

ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА

Под редакцией
проф. В. И. Лачина

ВЫСШЕЕ
ОБРАЗОВАНИЕ



ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА

*Дипломное проектирование
систем автоматизации и управления*

*Допущено Министерством образования и науки
Российской Федерации в качестве учебника для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по направлению
подготовки «Автоматизация и управление»*

Под редакцией доктора технических наук,
профессора В.И. Лачина

УДК [621.38+004.38](075.8)
ББК [32.85+32.97]я73
КТК 222
Э45

Рецензенты:

кафедра информационно-измерительной и медицинской техники Южно-Российского технического университета (Новочеркасского политехнического института) (зав. кафедрой д.т.н., проф. Н.И. Горбатенко); профессор кафедры автоматики и процессов управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» А.И. Солодовников.

Авторы:

С.Г. Григорьян, В.С. Елсуков, Е.В. Зинченко, В.Н. Козлов, Т.П. Кононенко, Н.Н. Кузьмин, В.И. Лачин, А.В. Павленко, О.Н. Пятина, Э.Я. Рапопорт, Н.С. Савелов, М.М. Савин, А.В. Седов, В.А. Терехов, А.В. Фролов

Э45 Электроника и микропроцессорная техника. Дипломное проектирование систем автоматизации и управления: учебник / Под ред. д.т.н., проф. В.И. Лачина. — Ростов н/Д: Феникс, 2007. — 576 с. — (Высшее образование).

ISBN 5-222-10078-2

В учебнике описываются цели, задачи и тематика дипломного проектирования, раскрывается содержание дипломного проектирования, приводятся требования к оформлению пояснительной записки и графической части дипломного проекта, основные обязанности руководителя проекта и дипломника, график работы над проектом, допуск к защите и описание публичной защиты дипломного проекта. Особое внимание уделяется содержанию специальной части дипломного проекта, а также технико-экономическому обоснованию проектируемых устройств и систем и основам безопасности жизнедеятельности при проектировании устройств и систем.

Может быть использован студентами специальностей, входящих в направления подготовки: «Автоматизация и управление», «Электроника и микроэлектроника», «Электротехника и электротехнология», «Приборостроение», «Информатика и вычислительная техника». Отдельные разделы учебника могут быть использованы студентами практически всех инженерных специальностей, в том числе и при изучении соответствующих курсов.

УДК [621.38+004.38](075.8)
ББК [32.85+32.97]я73

ISBN 5-222-10078-2

© Авторский коллектив, 2006
© Оформление, изд-во «Феникс», 2006

Предисловие

Данный учебник может быть полезным на завершающем этапе обучения студентов, поскольку в нем описываются цели, задачи и тематика дипломного проектирования, а также все этапы дипломного проектирования.

Учебник написан коллективом авторов, имеющих большой опыт руководства и консультирования дипломным проектированием студентов таких специальностей, как «Управление и информатика в технических системах», «Промышленная электроника», «Электрические и электронные аппараты», «Автоматизированные системы обработки информации и управления», «Электрический транспорт», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Прикладная информатика в экономике», «Информационно-измерительная техника и технология» и других, входящих в направления подготовки: «Автоматизация и управление», «Электроника и микроэлектроника», «Электротехника и электротехнология», «Приборостроение», «Информатика и вычислительная техника».

Он содержит все необходимые сведения, касающиеся различных этапов дипломного проектирования.

Учебник в целом или его отдельные разделы могут быть использованы студентами родственных специальностей и направлений.

Части 1 и 3 учебника могут быть использованы студентами практически всех инженерных специальностей.

Отдельные разделы учебника могут использоваться при изучении соответствующих курсов.

Дипломное проектирование можно условно разделить на следующие три этапа:

- организационный;
- содержательный;
- оформительный.

К первому этапу относятся преддипломная практика, работа над дипломным проектом, предварительная, а затем и публичная защита дипломного проекта. В учебнике обозначены цели преддипломной практики, место ее проведения и содержание, тематика дипломного проектирования, а также описывается, что нужно сделать во время преддипломной практики и какие ее результаты представить, описы-

вается работа над дипломным проектом с указанием основных обязанностей руководителя дипломного проекта и дипломника. Отмечается, что после завершения дипломного проекта проводится его предварительная защита и описывается процесс публичной защиты дипломного проекта.

Второму, содержательному, этапу дипломного проектирования посвящена основная часть учебника. Она состоит из специальной части дипломного проекта, технико-экономического обоснования проектируемых устройств и систем, их конструкторско-технологической реализации, а также основ безопасности жизнедеятельности при проектировании информационных, измерительных и управляющих устройств.

Каждый из этих разделов включает в себя типовое содержание соответствующей части дипломного проектирования, основные этапы их разработки, а в ряде разделов приводятся довольно подробный порядок разработки, ссылки на литературу, которой можно воспользоваться при дипломном проектировании.

Основное внимание в учебнике уделено содержанию специальной части дипломного проекта. Подробно рассматривается, что входит в содержание специальной части по:

- автоматическому управлению, включая системы автоматического управления с распределенными параметрами и нейросетевые системы управления, а также применение средств вычислительной техники при проектировании;
- построению устройств и систем на основе ЭВМ, микроконтроллеров и микропроцессоров;
- схемотехнической реализации проектируемых устройств и систем;
- программному и алгоритмическому обеспечению проектируемых устройств и систем;
- средствам автоматизированного анализа и проектирования устройств и систем;
- обработке результатов экспериментальных исследований;
- проектированию электромагнитных приводов для устройств и систем мехатроники;
- применению устройств силовой электроники.

К третьему этапу дипломного проектирования относится оформление пояснительной записки и графической части дипломного проекта. Эти вопросы рассмотрены довольно подробно с приведением примеров оформления и необходимыми ссылками на ГОСТы. Приводится большое число приложений.

В учебнике помещены ссылки на более чем 180 наименований литературы, которую рекомендуется использовать при дипломном проектировании. В ряде случаев приводятся адреса Web-страниц различных фирм, где можно найти нужную информацию.

В данном учебнике, являющемся трудом большого авторского коллектива четырех крупных вузов России (Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасского политехнического института), Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», Санкт-Петербургского государственного политехнического университета и Самарского государственного технического университета), объединены отдельные разработки и методические указания, использовавшиеся и ранее при дипломном проектировании, и, кроме того, расширены или написаны заново необходимые разделы.

Авторы надеются, что данный учебник поможет более продуктивной работе дипломников, позволит избежать ненужных трат времени во время дипломного проектирования и будет способствовать повышению качества дипломных проектов.

Часть 1

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Дипломное проектирование – завершающий этап учебы будущего инженера в вузе. Дипломный проект – это выпускная квалификационная работа, подводящая итоги обучения в вузе, характеризующая приобретенные знания и навыки, необходимые для самостоятельной профессионально ориентированной деятельности. При его выполнении основными целями являются систематизация, закрепление и расширение знаний, полученных в вузе, выявление практической и теоретической подготовленности студента и способности самостоятельно применять полученные знания к решению конкретных научно-технических, производственных и организационных задач, установленных Государственным образовательным стандартом.

Задачами дипломного проектирования являются:

- проявление творческой инициативности и изобретательности для получения результатов, имеющих практическую ценность, умение делать выводы и предложения;

- освоение методик анализа предметной области, конструирования функциональных структур разрабатываемых и исследуемых систем;
- освоение методов (методик) выбора и обоснования научно-технических решений с учетом экономических и технических требований при разработке реальных инженерных проектов и научно-исследовательских работ;
- освоение методов разработки (в случае необходимости) или применения соответствующих алгоритмического, программного, информационного, технического, математического, метрологического, лингвистического, эргономического, организационного и правового обеспечений системы;
- совершенствование методов разработки систем автоматизации и управления заданного качества;
- освоение методов тестирования и отладки аппаратно-программных комплексов;
- приобретение навыков разработки аппаратно-программных комплексов систем автоматизации и управления и их передачи на изготовление и сопровождение;
- приобретение навыков разработки программ и методик испытаний, проведения испытаний аппаратно-программных средств и систем автоматизации и управления;
- приобретение навыков сертификации аппаратных, программных средств и аппаратно-программных комплексов;
- приобретение навыков оценки экономической (экологической, правовой и др.) эффективности и целесообразности принимаемых решений;
- совершенствование навыков графического и текстового оформления результатов исследования в виде текста, чертежей, карт, схем, расчетов, проведенных экспериментов и других материалов, иллюстрирующих содержание работы;
- выявление степени подготовленности выпускника к самостоятельной работе в современных условиях.

После завершения дипломного проектирования в соответствии с фундаментальной и специальной подготовкой выпускник должен быть готов выполнять следующие виды профессиональной деятельности:

- научно-исследовательская;
- проектно-конструкторская;
- производственно-технологическая;
- организационно-управленческая;
- эксплуатационная;
- монтажно-наладческая;
- эксплуатационное и сервисное обслуживание.

Дипломный проект является важнейшим итогом обучения, в связи с этим содержание дипломного проекта и уровень его защиты должны учитываться как основной критерий при оценке уровня подготовки выпускника и оценке качества реализации образовательной программы в вузе.

Общими требованиями к дипломному проекту являются:

- целевая направленность;
- логическая последовательность изложения материала;
- глубина исследования и полнота освещения вопросов;
- убедительность аргументаций;
- краткость и четкость формулировок;
- конкретность изложения результатов работы;
- доказательность выводов и обоснованность рекомендаций;
- грамотное оформление.

В то же время работа студента над дипломным проектом является первым этапом инженерной деятельности и, как правило, первой его инженерной разработкой. В связи с этим представляется целесообразной организация дипломного проектирования непосредственно на рабочих местах будущей деятельности выпускников. Это поможет молодому специалисту быстрее пройти период адаптации и освоиться в новом коллективе.

В процессе дипломного проектирования студент должен уметь:

- осуществлять сбор, обработку, анализ и систематизацию научно-технической информации по теме исследований;
- составлять описания проводимых исследований, готовить данные для составления отчетов, обзоров и другой документации;
- проводить системный анализ решаемой задачи (системы, устройства или блока управления контроля, диагностики и т. п. для конкретного технологического процесса, объекта и т. п.) с использованием современной научно-технической литературы (отечественной и иностранной) и патентных источников;
- составлять математическое описание проектируемой системы (устройства, блока) и его общий алгоритм работы;
- выполнять математическое моделирование структур, приборов или технологических процессов с целью оптимизации их параметров;
- разрабатывать функциональные и принципиальные схемы отдельных блоков и узлов проектируемой системы (устройства);
- разрабатывать алгоритмическое и программное обеспечение;
- проводить конструкторско-техническую разработку проектируемой системы (устройств) с учетом новейших достижений технологии производства, в соответствии с назначением изделия, масштабностью его выпуска, используя достижения технической эстетики, технической психологии, а также государственных, отраслевых и ведомственных стандартов;

- оценивать экономическую эффективность принимаемых проектно-конструкторских решений, обеспечивать необходимый уровень унификации и стандартизации изделий;
- разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформлять законченные научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы;
- разрабатывать проектируемую систему (устройство) с учетом вопросов безопасности жизнедеятельности.

2

ПРЕДДИПЛОМНАЯ ПРАКТИКА И ТЕМАТИКА ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Преддипломная практика является частью основной образовательной программы и завершающим этапом обучения и проводится после освоения студентами теоретического и практического обучения. Она имеет целью закрепление теоретических и расширение профессиональных знаний, полученных ими в процессе обучения, приобретение опыта самостоятельного ведения экспериментальных и теоретических исследований при решении реальных инженерных задач или научных проблем в сфере будущей профессиональной деятельности, а также сбора, систематизации и обобщения материалов, необходимых для написания дипломного проекта.

Преддипломная практика проводится на договорных началах в сторонних организациях – НИИ, КБ, предприятиях и организациях, а также на выпускающей кафедре и в научных подразделениях вуза по профилю специальности. При наличии вакантных должностей студенты могут зачисляться на них, если работа соответствует требованиям программы практики.

Содержание практики определяется выпускающими кафедрами на основе Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования (ГОС ВПО) с учетом интересов и возможностей подразделений, в которых она проводится. Конкретное содержание работы студента планируется руководством подразделения, в котором она выполняется, и отражается в индивидуальном задании на преддипломную практику.

Руководство и контроль за прохождением практики возлагаются приказом ректора на руководителей практики от выпускающих кафедр. Непосредственное руководство работой студентов осуществляется руководителями на рабочих местах. При прохождении практики в сторонней организации с ее стороны выделяется представитель – соруководитель практики от организации, который направляет деятельность студентов совместно с руководителем от вуза. В период практики студенты подчиняются всем правилам внутреннего распорядка и техники безопасности, установленным в подразделении и на рабочих местах.

Перед отъездом студентов на преддипломную практику выпускающая кафедра проводит организационное собрание, на котором присутствуют заведующий выпускающей кафедры и консультанты по разделам экономико-организационной части и безопасности жизнедеятельности.

На организационном собрании студентов знакомят с целью и задачами преддипломной практики, порядком прохождения преддипломной практики, требованиями к дипломному проекту, а также закрепляют за руководителем практики от вуза, выдают направление на практику.

После организационного собрания студент встречается с руководителем практики, они обсуждают направление работы, и студент получает индивидуальное задание, которое является для студента основным руководящим документом. Индивидуальное задание содержит следующие вопросы, на которые студент должен обратить внимание:

- Обзор, изучение и анализ научно-технической литературы на предприятии по теме дипломного проекта.
- Патентный поиск по теме дипломного проекта.
- Изучение стандартов предприятия, в том числе стандартов по дипломному проектированию.
- Анализ структурных, функциональных, принципиальных и конструкторско-технологических разработок предприятия (организации) по теме проекта.
- Изучение и примерное использование методик технико-экономического обоснования объекта дипломного проектирования и его технических характеристик.
- Изучение основного производства с точки зрения требований охраны труда и защиты окружающей среды.
- Изучение функциональных обязанностей инженера, его роли на предприятии.

Для достижения основной цели преддипломной практики студент должен решить следующий комплекс задач исследовательского и инженерно-практического характера:

- осуществить поиск и изучение информации из всевозможных источников (техническая литература, патенты, периодические научно-технические журналы, проектно-технологическая документация, конференции, Интернет) о предметной области, о существующих методах и подходах, об аналогах и прототипах, как отечественных, так и зарубежных, для использования ее при выполнении выпускной квалификационной работы;
- выполнить всесторонний анализ собранной информации с целью дальнейшего выбора оптимальных и обоснованных проектных решений;

- изучить методы и средства компьютерного исследования и проектирования, необходимые при разработке приборов, материалов и устройств или их технологии в соответствии с заданием на выпускную работу;
- изучить методы исследования, проектирования и проведения экспериментальных работ;
- изучить назначение, состав, конструкцию, принцип работы, технологию изготовления, условие монтажа и технической эксплуатации проектируемых изделий, приборов или объектов;
- подобрать необходимый графический и расчетный материал по теме дипломного проекта.

Во время преддипломной практики студент обязан вести дневник установленного образца и по завершении преддипломной практики представить отчет, составленный в соответствии с заданием и программой практики, включающий следующие материалы:

- описание технологического процесса и определение требований к объекту, возникающих при решении задач автоматизации и управления;
- подробные технические данные, описание объекта, назначение системы;
- параметры и паспортные данные всех устройств, входящих в проектируемую систему;
- обоснование выбранного варианта с анализом возможных методов решения поставленной задачи на основе изучения литературных источников;
- принципиальные электрические схемы отдельных устройств и схем электрооборудования;
- необходимые данные для экономического обоснования технических решений, принимаемых при проектировании системы;
- сведения по возможным чрезвычайным ситуациям в критических условиях, последствий аварий и катастроф;
- конструктивные чертежи отдельных узлов системы;
- другие материалы по указанию руководителя практики.

По итогам преддипломной практики и представленному отчету руководитель преддипломной практики от предприятия выставляет оценку с учетом глубины проработки соответствующих вопросов и дает заключение о пригодности и достаточности материалов, собранных на практике для выполнения дипломного проекта.

Таким образом, во время прохождения преддипломной практики студент не только осуществляет сбор материала на дипломный проект, но и решает задачи теоретического и прикладного характера.

По завершении преддипломной практики проводится ее защита. К защите по преддипломной практике допускаются студенты, выполнившие ее программу и представившие кафедре отзыв руководителя практики от предприятия, отчет о проделанной работе и утвержден-

ное задание на дипломное проектирование. По итогам защиты выставляется оценка. После получения оценки студент обязан пройти в деканате или на кафедре регистрацию, имея при себе паспорт и зачетную книжку.

Студент, участвовавший за время обучения в проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, может представить к защите результаты этих работ, при условии, что его вклад в эти работы соответствует требованиям, предъявляемым к дипломным проектам.

Студент, не выполнивший программу практики по уважительной причине, направляется на практику вторично в свободное от учебы время.

Студент, не выполнивший программу практики без уважительной причины и получивший неудовлетворительную оценку, представляется к отчислению как имеющий академическую задолженность.

Темы дипломных проектов разрабатываются выпускающей кафедрой или с ее участием и утверждаются ректором вуза. Студент может предложить свою тему выпускной работы с необходимым обоснованием ее разработки. Тема проекта должна дать возможность дипломику показать уровень теоретической подготовки, умение решать практические инженерные задачи, использовать современные информационные технологии. Требуемый для разработки дипломного проекта объем работы должен позволить выполнить проект в установленный срок.

Темы дипломных проектов должны быть актуальны, четко сформулированы и полностью отражать содержание дипломного проекта. За актуальность, соответствие тематики выпускной работы профилю направления (специальности), руководство и организацию ее выполнения несет ответственность выпускающая кафедра и непосредственно руководитель работы. Желательно, чтобы в проектах решались конкретные задачи, выдвигаемые промышленными предприятиями, НИИ и различными организациями. В проекте должны разрабатываться новые системы и устройства или решаться вопросы модернизации существующих. Все эти вопросы должны быть обозначены во время преддипломной практики.

Рекомендуются следующие направления тематики дипломного проектирования для специальностей «Управление и информатика в технических системах», «Промышленная электроника», «Электрические и электронные аппараты», «Автоматизированные системы обработки информации и управления», «Электрический транспорт», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Прикладная информатика в экономике», «Информационно-измерительная техника и технология», «Биотехнические системы и медицинские приборы».

- I. Автоматические и автоматизированные системы и устройства сбора, обработки, отображения информации, управления, контроля и диагностики технических и биотехнических объектов.
- II. Разработка сложных электронных систем, узлов и блоков различного назначения.
- III. Системы управления, контроля, измерения и диагностики и их программно-алгоритмическое обеспечение.
- IV. Разработка информационно-измерительных, биотехнических систем для объектов широкого назначения.
- V. Разработка элементов и узлов электрических и электронных аппаратов широкого назначения.
- VI. Разработка электромагнитных и электромеханических приводов различного применения.
- VII. Разработка микропроцессорных устройств контроля, управления и защиты электроэнергетических объектов и систем.
- VIII. Разработка элементов и устройств мехатронных систем.
- IX. Разработка агрегатов и систем бесперебойного электроснабжения.
- X. Разработка специализированных стендов и систем для испытания электрических и электронных аппаратов.
- XI. Проектирование АСУ предприятием, технологическими процессами, гибкими производственными комплексами, технологической подготовки производства.
- XII. Проектирование распределенных систем обработки информации.

3

ТРЕБОВАНИЯ К СТРУКТУРЕ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА

3.1. Структура пояснительной записки и графической части дипломного проекта

Структура пояснительной записки:

- титульный лист (на стандартном бланке);
- задание (на стандартном бланке);
- аннотация;
- содержание;
- ведомость дипломного проекта;
- введение;
- перечень сокращений, условных обозначений символов, единиц и терминов;
- специальная часть (может содержать несколько разделов);
- конструкторско-технологическая часть;
- экономическая часть;
- безопасность жизнедеятельности;
- заключение;
- список использованной литературы;
- приложения.

Графическая часть дипломного проекта должна отражать принятые схемные и конструктивные решения и содержать 7–9 листов чертежей, схем, графиков и диаграмм. Графический материал должен обеспечить наглядное изложение сути дипломного проекта.

Примерный перечень материала графической части дипломного проекта:

- схема разрабатываемой системы или устройства и т. п. с указанием мест установки контроллеров, датчиков, регуляторов и т. д.;
- общий вид спроектированного устройства или системы;
- функциональные, структурные, принципиальные и технологические схемы;
- конструкции разработанных отдельных узлов или деталей;
- необходимые графики и диаграммы;
- схемы алгоритмов, программ и т. д.;
- результаты экспериментальных исследований и моделирования.

3.2. Рубрикация пояснительной записки

Титульный лист и задание

Форма титульного листа пояснительной записки дипломного проекта является общепринятой.

Задание на дипломный проект является вторым листом пояснительной записки и выполняется на специальном бланке.

Аннотация должна содержать краткое изложение цели и важнейших результатов работы, области практического применения и ожидаемых технико-экономических результатов.

Содержание должно включать введение, наименование всех разделов и подразделов с указанием номеров страниц, на которых размещается начало материала.

Ведомость дипломного проекта содержит перечень документов, изделий (макетов, моделей, опытных образцов и др.), вошедших в содержание проекта. Ведомость выполняется по ГОСТ 2.106-96 (форма 4) на бумаге формата А4 с рамкой и основной надписью.

Во введении рассматриваются актуальность темы, основные положения и документы, лежащие в основе разрабатываемого проекта, кратко характеризуется современное состояние технического вопроса или проблемы. Формулируются задача, ее новизна и возможные пути решения.

Специальная часть дипломного проекта может включать следующие разделы и (или) параграфы:

- постановка задачи, анализ вариантов реализации системы, патентные исследования, технические требования;
- математическое описание системы;
- разработка функциональных, структурных и принципиальных схем;
- анализ и синтез систем;
- моделирование систем;
- техническое, алгоритмическое и программное обеспечение;
- экспериментальные исследования;
- другие разделы.

Конструкторско-технологическая часть может включать следующие разделы и (или) параграфы:

- конструкция и технология изготовления устройств или системы;
- расчет тепловых режимов, блоков, узлов и элементов устройств;
- разработка конструкции и технология изготовления печатных узлов устройств;
- вопросы эксплуатации и наладки устройств;
- составление эксплуатационной документации;
- другие разделы.

Экономическая часть может включать:

- маркетинговые исследования;
- технико-экономическую оценку качества спроектированного устройства;
- вопросы менеджмента;
- расчет себестоимости и цены спроектированного устройства;
- планирование конструкторской подготовки изделия;
- иные экономические вопросы.

Безопасность жизнедеятельности включает следующие вопросы:

- анализ объекта автоматизации;
- выявление социально-экономического эффекта;
- безопасность жизнедеятельности в чрезвычайных ситуациях;
- разработка мероприятий по улучшению условий труда.

Подробные указания к содержанию и объему разделов по специальной, конструкторско-технологической, экономической частям и по безопасности жизнедеятельности даны ниже.

Заключение должно содержать окончательные выводы по работе, степень соответствия разработанной темы требованиям технического задания на основе сравнения технико-экономических показателей спроектированного и существующих объектов.

4

ОСНОВНЫЕ ОБЯЗАННОСТИ РУКОВОДИТЕЛЯ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА И ДИПЛОМНИКА

Руководство дипломным проектированием включает постановку задачи и выдачу технического задания, консультации, контроль за выполнением графика работы, написание отзыва.

4.1. Руководитель проекта и его обязанности

Руководитель проекта назначается заведующим кафедрой и утверждается приказом по университету одновременно с утверждением темы проекта. Основные обязанности руководителя дипломного проектирования состоят в следующем:

- составление задания на дипломное проектирование;
- проведение консультаций (*не реже одного раза в неделю*);
- оказание помощи в составлении списка основной и дополнительной литературы, справочных и архивных материалов;
- распределение объема работ по разделам и срокам их выполнения;
- контроль за выполнением календарного плана работы;
- проверка готовности дипломного проекта к защите;
- написание отзыва о работе студента над проектом.

Руководитель проекта готовит и подписывает задание, а также может рекомендовать студенту основные отечественные и зарубежные источники, по которым можно ознакомиться с состоянием интересующего вопроса.

Руководитель проекта устанавливает определенные часы для периодических консультаций, во время которых наблюдает за ходом проектирования и направляет работу дипломника.

О ходе дипломного проектирования и выполнения календарного плана руководитель регулярно (ежемесячно) докладывает на заседаниях кафедры. Руководитель знакомится с пояснительной запиской, чертежами и докладывает на заседании кафедры (комиссии) о возможности допуска проекта к защите, при этом он представляет отзыв о проекте.

Руководитель готовит дипломника к докладу Государственной аттестационной комиссии (ГАК).

Желательно присутствие руководителя на защите проекта, а при необходимости и на обсуждении результатов защиты, когда при воз-

никновении разногласий объяснения руководителя могут быть определяющими в оценке проекта.

Отзыв о работе дипломника должен содержать обоснованную оценку объема и качества выполненных работ и соображения о том, к какому роду деятельности лучше подготовлен молодой специалист. Обосновывая свое мнение, руководитель может отметить:

- правильно ли были поняты дипломником поставленные перед ним задачи;
- какие разделы имеют существенную новизну и вызывали наибольшие трудности при разработке;
- насколько самостоятельно и грамотно справился дипломник с работой над обзорной, расчетной, конструкторской, экономической, технологической частями проекта;
- решена ли поставленная задача;
- какова практическая ценность работы, можно ли направить ее для внедрения в промышленность или опубликовать;
- насколько трудолюбивым, организованным и целеустремленным проявил себя дипломник, достаточно ли его подготовки для самостоятельной деятельности.

В конце отзыва руководитель оценивает работу дипломника и его проект оценкой по четырехбалльной системе и дает заключение, достоин ли студент присуждения ему квалификации инженера.

Отзыв должен быть подписан руководителем, при этом необходимо указать место работы, должность и ученое звание руководителя, его фамилию, имя, отчество.

4.2. Обязанности дипломника

Дипломник обязан:

- после окончания преддипломной практики в недельный срок отчитаться по практике, сдать отчет, дневник и командировочное удостоверение. Отчет по преддипломной практике защищается в комиссии, включающей предполагаемого руководителя дипломного проекта;
- еженедельно являться на консультацию:
 - по специальной части;
 - по экономической части;
 - по безопасности жизнедеятельности;
 - по конструкторско-технологической части и нормоконтролю оформления дипломного проекта;
- по завершении выполнения дипломного проекта получить подписи всех консультантов и руководителя на титульном листе;
- подготовить доклад для предзащиты;



- вписать номер приказа на титульном листе;
- получить рецензию на дипломный проект;
- вовремя явиться на заседание ГАК в назначенное время.

За принятые в дипломном проекте (работе) решения и за правильность всех данных отвечает студент – автор дипломного проекта (работы). Руководитель и консультанты проекта не несут ответственности за ошибочное положение в проекте, если на это было указано студенту, но последний настаивает на своем решении. Различие мнений должно быть отражено в отзыве руководителя.

5

РАБОТА НАД ДИПЛОМНЫМ ПРОЕКТОМ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ЗАЩИТА И РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ

После получения задания студент совместно с руководителем составляет график работы над проектом и работает в строгом соответствии с ним.

В течение всего срока проектирования студент обязан являться к руководителю не реже одного раза в неделю. О случаях непосещения студентом очередных консультаций руководители должны сообщать заведующему кафедрой.

В конце каждого месяца руководитель проекта оценивает выполненную студентом работу и докладывает о ходе работы заведующему кафедрой или на заседании кафедры. Студент, не выполняющий требования руководителя и консультантов, может быть отстранен от выполнения дипломного проекта и не допущен к защите.

По окончании всей работы руководитель и консультанты проверяют записку и проект в целом с целью устранения возможных ошибок. Проект и записка в законченном виде и письменный отзыв руководителя представляются на предзащиту. Целью предварительной защиты являются отработка техники защиты проекта, уточнение содержания доклада и проработка наиболее характерных вопросов.

После успешной предзащиты перед комиссией, в которую входят 2–3 преподавателя (сотрудника) кафедры, в том числе и руководитель дипломного проекта, производится назначение рецензентов заведующим кафедрой.

Рецензентами по дипломным проектам должны назначаться, в соответствии с профилем проекта, квалифицированные инженеры и специалисты промышленных предприятий (НИИ, КБ и заводов) и различных исследовательских организаций.

Рецензент должен подробно ознакомиться с проектом и дать о нем развернутый отзыв с критической оценкой принятых дипломником решений.

В рецензии на дипломный проект должны быть освещены следующие вопросы:

- 1) актуальность темы дипломного проекта и значимость его для промышленности;

- 2) глубина теоретических обоснований проектируемого средства, оценка его конструкции, технологичности, качество и научно-технический уровень расчетов разработанной системы, устройства, технологической части, расчетов надежности, технико-экономических расчетов и др.;
- 3) степень сложности, правильности и актуальности поставленной исследовательской части и эксперимента;
- 4) соответствие выполненного проекта заданию с указанием пунктов, не выполненных полностью или частично;
- 5) достоинства и недостатки дипломного проекта: используемые при этом аргументы должны быть конкретными и краткими.

Рецензент должен дать оценку графической части проекта, стиля изложения расчетно-пояснительной записки и дипломного проекта в целом. Здесь целесообразно сформулировать несколько вопросов и замечаний студенту, на которые рецензент обратил внимание при просмотре работы и на которые студент должен ответить на публичной защите проекта. В заключение рецензии выставляется оценка работы по четырехбалльной системе.

Объем рецензии должен быть не менее полутора страниц машинописного текста.

Отзыв рецензента передается для ознакомления дипломнику и зачитывается при защите проекта.

Желательно, чтобы результаты, полученные при проектировании, были приняты к внедрению на предприятии или в организации, о чем дипломник должен представить справку при защите проекта.

Полностью оформленные документы дипломного проекта (пояснительная записка, чертежи, справка деканата о выполнении студентом учебного плана и об оценках, полученных за время обучения; отзыв руководителя дипломного проекта, рецензии на дипломный проект, справки о внедрении или предполагаемом использовании результатов работы) представляются заведующему кафедрой после предварительной защиты. Заведующий кафедрой принимает решение о допуске к защите, делает соответствующую запись в задании на проектирование и титульном листе пояснительной записки.

6

ПУБЛИЧНАЯ ЗАЩИТА ДИПЛОМНЫХ ПРОЕКТОВ

Защита дипломниками дипломных проектов производится на заседании Государственной аттестационной комиссии (ГАК), действующей согласно утвержденному положению.

В состав членов ГАК следует включать руководителей разделов дипломных проектов, а также представителей промышленности, организаций и учреждений, являющихся ведущими специалистами по соответствующей специальности.

Не позднее чем за две недели до защиты дипломник обязан сдать в деканат зачетную книжку, а также письменно засвидетельствовать свое согласие о правильности проставленных в справке деканата оценок.

Для обеспечения ритмичной работы ГАК кафедры составляет расписание защит дипломных проектов (согласованное с председателем ГАК) не позже чем за 2 недели до начала работы ГАК, причем руководители проектов с учетом пожеланий дипломников дают свои рекомендации о дате защиты соответствующих проектов. Объявление о времени и месте работы комиссии, а также список защищающихся вывешиваются на доске объявлений кафедры не позже чем за сутки до защиты.

Дипломный проект принимается к защите после представления дипломником следующих документов:

- дипломного проекта;
- справки деканата о выполнении студентом учебного плана и об оценках, полученных за время обучения;
- отзыва руководителя дипломного проекта;
- рецензии на дипломный проект;
- зачетной книжки;
- справки о внедрении или предполагаемом использовании результатов работы.

Все дипломники, защищающиеся на данном заседании ГАК, должны явиться за 15–20 минут до начала работы ГАК независимо от очередности защиты. Они должны сдать секретарю ГАК пояснительную записку, отзыв руководителя, рецензию на дипломный проект и, если это требуется, другие документы. Демонстрационные плакаты (кроме копий для членов ГАК) остаются у дипломника. Все демонстрируемые средства необходимо разместить в аудитории, где прово-

дится заседание ГАК, проверить их работоспособность и подготовить к демонстрации.

Очередной защищающийся дипломник готовит демонстрационные материалы. Демонстрационные плакаты желательно размещать в той последовательности, как они упоминались в докладе.

На заседании ГАК должны присутствовать члены комиссии и желательно руководитель рецензент проекта. Допускаются также все желающие присутствовать при защите (защита открытая).

Защита проекта (работы) осуществляется в следующем порядке:

- доклад автора дипломного проекта (работы);
- ответы на вопросы;
- выступление руководителя и других лиц, присутствующих на защите;
- заслушивание отзыва и рецензии;
- заключительное выступление автора дипломного проекта (работы).

При подготовке доклада нужно учитывать, что в течение 10–15 минут требуется рассказать основное содержание работы, ее актуальность, обосновать важность полученных результатов дипломником самостоятельно. Доклад существенно отличается от ответа на экзамене или доклада на конференции. Дипломник должен продемонстрировать не столько знание предмета и результаты работы, сколько свою инженерную подготовку.

Примерный план доклада:

- обоснование выбора темы, ее актуальность;
- место работы в ряду предшествующих исследований;
- постановка задачи с обязательным указанием всех допущений и отклонений;
- исходные данные (технические условия);
- общий подход к решению задачи и его обоснование;
- методы решения всех частных задач;
- основные результаты и технические характеристики разработки;
- состояние разработки в момент окончания проекта (работы);
- научные и экспериментальные результаты;
- новизна и достоверность полученных результатов и выводов;
- перспективы внедрения;
- экономические показатели разработки;
- содержание части, посвященной охране труда и экологии;
- перспективы дальнейших работ в данном направлении;
- выводы по работе.

Доклад необходимо уметь иллюстрировать формулами, графиками, схемами, вынесенными на плакаты или на другие демонстрационные материалы.

После этого члены ГАК и все желающие задают дипломнику вопросы. Содержание вопросов и ответов на них дипломника должны позволить членам ГАК оценить глубину проработки темы проекта и степень подготовленности дипломника к самостоятельной инженерной деятельности.

Оценка качества проекта, его защиты и присуждение квалификации производится на закрытом заседании ГАК после краткого заключения руководителя проекта и обмена мнениями между членами ГАК. Закрытое заседание ГАК проводится после окончания всех защит дипломных проектов в конце дня защиты. Результаты защиты дипломного проекта определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». При оценке работы учитываются качество выполнения и оформления проекта, уровень защиты проекта и ответов на вопросы, мнение руководителя и рецензента. ГАК может принять решение о выдаче диплома с отличием, а также рекомендовать защитившего диплом к поступлению в аспирантуру.

Студенту, сдавшему экзамены с оценкой «отлично» не менее чем по 75% всех дисциплин учебного плана, а по остальным дисциплинам с оценкой «хорошо», сдавшему государственный экзамен с оценкой «отлично» и защитившему дипломный проект с оценкой «отлично», выдается диплом с отличием.

В тех случаях, когда защита проекта признается неудовлетворительной, *студент отчисляется из вуза приказом ректора и ему вручается академическая справка*, а ГЭК устанавливает, может ли студент представить к повторной защите тот же дипломный проект с доработкой, определяемой комиссией, или же обязан разработать новую тему, которая устанавливается кафедрой. Студент, не защитивший проект, допускается к повторной защите дипломного проекта в течение трех лет после отчисления из университета при представлении положительной характеристики с места работы, отвечающей профилю подготовки.

Решение ГАК принимается простым большинством голосов, после защиты все дипломные проекты хранятся в кабинете дипломного проектирования в течение пяти лет.

Часть 2

СОДЕРЖАНИЕ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА

7

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, АНАЛИЗ И СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

7.1. Типовое содержание специальной части дипломного проекта

Тема дипломного проекта определяется по материалам преддипломной практики и может быть следующей:

- системы автоматического регулирования (САР) температуры тепловых процессов, технологических параметров теплоэнергетических объектов;
- системы автоматического управления (САУ) электроподвижным составом, электроприводами промышленных объектов;
- локальные системы управления производственными процессами, в том числе системы стабилизации, программного управления и следящие системы.

Типовое содержание специальной части дипломного проекта состоит из двух разделов:

Обзорно-постановочный раздел:

- *Составление и обоснование технического задания на разработку САУ (САР)*
 - описание автоматизируемого объекта и его технические характеристики;
 - технические требования к САУ (САР);
 - анализ известных вариантов САУ (САР) аналогичного назначения.

Расчетная часть:

- *Составление функциональной схемы САУ (САР) и выбор принципиальных схем элементов ее неизменяемой части*
 - описание функциональной схемы разрабатываемой системы;
 - выбор измерительно-преобразовательных элементов (первичных и вторичных преобразователей);
 - выбор исполнительных устройств (исполнительный двигатель, регулирующий орган, усилитель мощности и т. п.).
- *Математическое описание САУ (САР) и выбор автоматического управляющего устройства (АУУ)*
 - определение математической модели объекта;
 - определение передаточных функций измерительных преобразователей;
 - определение передаточной функции исполнительного устройства;
 - выбор закона автоматического управления в общем виде;
 - выбор автоматического управляющего устройства (стандартных промышленных регуляторов, управляющих вычислительных машин, микроконтроллеров и т. п.).
- *Структурно-параметрический синтез САУ (САР)*
 - выбор метода синтеза;
 - расчет параметров настройки, структуры АУУ и элементов его принципиальной схемы.
- *Моделирование САУ (САР) с помощью средств вычислительной техники.*

7.2. Составление и обоснование технического задания на разработку САУ

Описание объекта должно быть сделано с точки зрения технологического процесса его работы и конструктивных особенностей. В качестве технических характеристик объекта должны быть приведены только те, которые существенны для его автоматизации. Необходимо также указать регулируемые величины, управляющие и возмущающие воздействия и их характер изменения во времени.



В технических требованиях к САУ (САР) следует указать:

- допустимые ошибки в установившихся режимах при детерминированных воздействиях;
- то же при случайных воздействиях;
- прямые показатели качества переходных режимов, показатель колебательности, степень затухания и т. п.;
- технико-экономические и эксплуатационные требования.

Анализ известных вариантов САУ (САР) аналогичного назначения должен содержать обзор литературы и патентный поиск.

7.3. Составление функциональной схемы САУ и выбор элементов ее неизменяемой части

Функциональная схема системы должна быть выбрана исходя из технических требований структуры и параметров автоматизируемого объекта. Она должна опираться на прототипы и известные принципы построения САУ (САР).

Выбор измерительно-преобразовательных элементов должен учитывать необходимый диапазон измерения контролируемых величин, условия работы, инерционность и т. п., а также вопросы согласования с предшествующими и последующими устройствами (в частности, применение нормирующих преобразователей).

Выбор исполнительных устройств осуществляется исходя из заданных характеристик объектов регулирования, условий работы, динамических свойств регулятора и системы в целом. Следует иметь в виду, что по динамическим свойствам исполнительные устройства могут быть пропорциональными, интегрирующими (в том числе с постоянной скоростью) и позиционными.

7.4. Математическое описание САУ и выбор автоматического управляющего устройства

При составлении математической модели объекта (электродвигатель, генератор, резервуар с жидкостью, паровой котел, турбина и др.) можно пользоваться в простейших случаях аналитическими методами [1], а в более общих случаях – экспериментальными.

К экспериментальным методам следует отнести:

- снятие статических характеристик;
- снятие кривой разгона;
- снятие частотных характеристик.

Все указанные методы применимы при относительно малом уровне помех. При наличии помех статическая характеристика определяется методом планирования эксперимента, а динамическая характеристика в виде весовой функции определяется на ЭВМ по корреляционным функциям входа и выхода. Машинные методы могут быть применены для расчета передаточной функции по кривой разгона.

Определение передаточных функций измерительно-преобразовательных и исполнительных устройств можно выполнить по справочным или экспериментальным данным.

Определение закона управления в общем виде прежде всего предполагает выбор между САР с жесткой настройкой (при практически постоянных параметрах объекта) и адаптивными САУ.

Затем в классе систем с жесткой настройкой следует определить класс регулятора (непрерывный, релейный, импульсный), что можно, например, сделать, зная отношение запаздывания объекта к его постоянной времени.

Если ориентироваться на применение типовых законов регулирования (пропорционального (П), пропорционально-дифференциального (ПД), интегрального (И), пропорционально-интегрального (ПИ), пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД)), то прежде всего исходя из требуемого порядка астатизма и динамических свойств объекта (самовыравнивание, наличие одной или двух больших постоянных времени) следует сделать выбор между указанными выше регуляторами.

Если рассматриваемый нестационарный объект имеет экстремальную статическую характеристику и цель управления состоит в достижении экстремума, то следует применить поисковую самонастраивающуюся систему (СНС), если же нестационарность проявляется только в изменении параметров объекта, то следует применить беспоисковую СНС как более быстродействующую, чем поисковая.

Алгоритм функционирования поисковых адаптивных систем (систем экстремального регулирования) прежде всего определяется выбором способа поиска экстремума статической характеристики объекта, который может быть основан на запоминании экстремума, определении производных или приращений входной и выходной величин, использовании модулирующего поискового сигнала (синхронного детектирования).

Выбор алгоритма функционирования беспоисковых адаптивных (самонастраивающихся) систем определяется целью адаптации. При этом адаптация (самонастройка) может быть осуществлена по сигналам внешних воздействий, по минимуму квадратичного функционала, по динамическим характеристикам объекта.

Выбор автоматического управляющего устройства должен производиться на основании требуемого закона управления (алгоритма функционирования), как правило, из числа стандартных промышлен-

ленных регуляторов, управляющих вычислительных машин, микроконтроллеров и т. п.

На основе управляющих микроЭВМ могут быть построены цифровые многоуровневые децентрализованные автоматизированные системы, структуры которых выбираются исходя из особенностей объектов управления и включают в себя локальные САУ.

При проектировании цифровых систем следует иметь в виду следующие основные особенности, отличающие их от непрерывных систем (12):

- обрабатываются дискретные по времени сигналы (решетчатые функции), что характерно для импульсных САУ;
- законы управления реализуются программно с помощью алгоритмов, описываемых разностными уравнениями или дискретными передаточными функциями (в последнем случае – без учета квантования по уровню);
- сигналы могут принимать только определенные дискретные значения вследствие квантования по уровню в АЦП и преобразования величин в цифровой форме, что делает систему релейно-импульсной и усложняет расчет;
- для сопряжения цифрового регулятора с непрерывным исполнительным устройством применяется либо ЦАП, либо широтно-импульсный преобразователь (при исполнительных двигателях постоянной скорости);
- благодаря гибкости средств программного обеспечения при построении управляющих алгоритмов, возможности проектирования не ограничиваются только стандартными П-, И-, ПИ-, ПД-, ПИД-законами регулирования с жесткой настройкой, а позволяют реализовать оптимальное и адаптивное управление, нелинейные алгоритмы.

7.5. Структурно-параметрический синтез систем управления с сосредоточенными параметрами и запаздыванием

Выбор метода синтеза определяется прежде всего классом регулятора и техническими требованиями к САУ.

Структурно-параметрический синтез системы с жесткой настройкой производится различными методами в зависимости от класса применяемого регулятора (непрерывный, релейный, импульсный, цифровой). Для непрерывных регуляторов применяются методы определения оптимальных параметров настройки (ОПН) по временным, частотным характеристикам и стандартным передаточным функциям и уравнениям [1]. Системы общепромышленного назначения ком-

плектуются стандартными типовыми регуляторами. Синтез таких систем остается одной из важнейших базовых задач линейной ТАУ и поэтому рассмотрен более подробно.

Основное внимание уделено синтезу линейных непрерывных САР, так как к нему сводится большинство остальных видов синтеза.

При расчете одноконтурных систем автоматического регулирования применяют следующие методы синтеза:

1. Синтез по временным характеристикам (метод А. П. Копеловича).

В качестве временной характеристики используется переходная характеристика по возмущению и для нее принимаются три стандартных разновидности (рис. 7.1):

- апериодическая (характеристика 1);
- с 20% перерегулированием (характеристика 2);
- с минимальной квадратичной интегральной оценкой (45%-е перерегулирование)

$$I_{20} = \int_0^{\infty} y^2(t) dt.$$

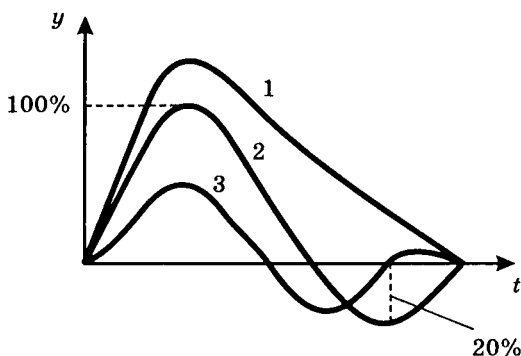


Рис. 7.1

В справочной литературе имеются номограммы, позволяющие определить параметры настройки регулятора для любой из трех указанных разновидностей переходной характеристики по параметрам объекта, имеющего стандартную математическую модель в виде последовательного соединения инерционного (интегрирующего) и запаздывающего звеньев.

Для пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора) при этом используются графики зависимостей:

$$(k_p \cdot k_{об}) = f_1 \left(\frac{T_{об}}{\tau_{об}} \right), \quad \frac{T_u}{\tau_{об}} = f_2 \left(\frac{T_{об}}{\tau_{об}} \right),$$

где $\tau_{об}$ и $T_{об}$ – запаздывание и постоянная времени объекта; k_p и T_u – параметры настройки регулятора.

2. Синтез по заданному затуханию (метод Е. П. Стефани).

Этот метод имеет экспериментально-итеративный характер. Эксперимент проводится либо в реальной системе, либо на модели. Применительно к ПИ-регулятору в плоскости параметров настройки, таких как k_p (коэффициент пропорциональной составляющей) и k_p/T_u (коэффициент интегральной составляющей), существует линия, затухание на которой равно заданному значению $\Psi = (85-90)\%$ (рис. 7.2).

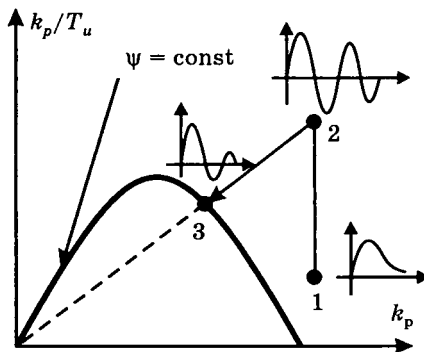


Рис. 7.2

Оптимальной считается точка за экстремумом, в которой квадратичная интегральная оценка имеет локальный минимум. Экспериментальный поиск настройки заключается в следующем:

- задают сравнительно большие значения k_p и T_u – точка 1. Получают апериодический процесс;
- начинают уменьшать значение T_u (увеличивать интегральную составляющую), колебательность увеличивается. Доходят до точки 2, где получают медленно затухающие колебания;

- уменьшая значение k_p , приходят в точку 3, которая и является точкой оптимума, судя по виду переходного процесса с заданным затуханием и $\min I_{20}$.

3. Синтез по заданным значениям корневых оценок (метод Е.П. Стефани).

В качестве корневой оценки берется степень колебательности $\mu = \omega/\alpha$ или $t = \mu^{-1}$. В характеристическом уравнении системы $1 + W_p W_{ос} = 0$ делается подстановка $s = -\alpha + j\omega = -\omega/\mu + j\omega$. Затем уравнение решается относительно параметров настройки, и частота ω варьируется от нуля до ∞ . В результате получается линия $\mu_3 = \text{const}$ в плоскости параметров ПИ-регулятора (рис. 7.3).

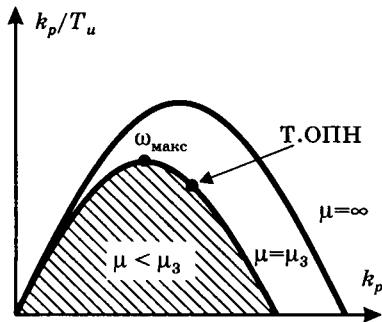


Рис. 7.3

Оптимальные параметры настройки (ОПН) регулятора соответствуют точке, для которой $\omega = 1,2\omega_{\text{макс}}$, где $\omega_{\text{макс}}$ — частота максимума кривой $k_p/T_u = f(k_p)$ при $\mu_3 = \text{const}$. В этой точке квадратичная интегральная оценка качества переходного процесса имеет минимум.

4. Синтез по заданному показателю колебательности (метод В.Я. Ротача).

Этот метод основан на том, что АФХ разомкнутой САР на комплексной плоскости должна касаться той окружности круговой диаграммы, для которой значение АЧХ замкнутой САР равно заданному значению показателя колебательности M_3 , т. е. $A(\omega) = M_3$.

При использовании ПИ-регулятора АФХ разомкнутой САР определяется формулой

$$W(j\omega) = W_p(j\omega) \cdot W_{ос}(j\omega) = k_p \cdot W_{ос}(j\omega) - j \frac{k_p}{T_i \omega} \cdot W_{ос}(j\omega),$$

из которой видно, что каждое ее значение можно представить как геометрическую сумму двух взаимно перпендикулярных векторов на плоскости.

Делая также построения при ряде значений $T_{и}$ можно в плоскости параметров настройки отобразить окружность $M = M_3 = \text{const}$ (рис. 7.4).

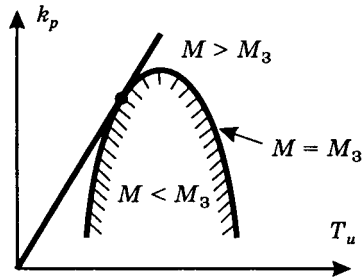


Рис. 7.4

Затем на этой линии находят точку оптимальной настройки параметров ПИ-регулятора как точку касания для касательной, проведенной из начала координат. Для этой точки $\frac{k_p}{T_{и}} = \text{max}$, что соответству-

ет максимально возможной интегральной составляющей закона регулирования, и, как следствие, минимуму линейной интегральной оценки переходного процесса.

Синтез многоконтурных систем автоматического регулирования включает следующие виды:

1. Система подчиненного регулирования.

Командный регулятор с передаточной функцией $W_{рк}(s)$ регулирует по принципу отклонения выходную величину y объекта регулирования путем изменения задания подчиненному регулятору $W_{рп}(s)$, который регулирует промежуточную величину y_1 объекта (рис. 7.5).

Созданный подчиненным регулятором внутренний контур синтезируется по методу оптимума модуля частотной передаточной функции последнего:

$$|\Phi_{вк}(j\omega)| = \left| \frac{W_{рп}(j\omega) \cdot W_{об1}(j\omega)}{1 + W_{рп}(j\omega) \cdot W_{об1}(j\omega)} \right| \approx 1.$$

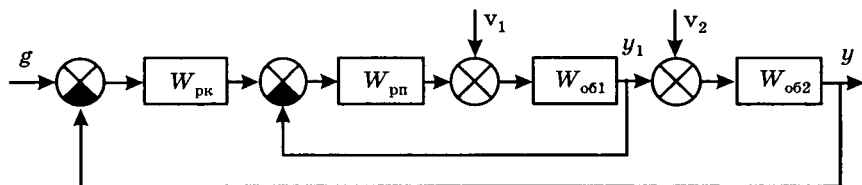


Рис. 7.5

Это условие выполняется при глубокой отрицательной ОС. При такой настройке обеспечивается наиболее быстрая компенсация влияния возмущения v_1 подчиненным регулятором, благодаря чему регулируемая величина y практически не меняется. Параметры $W_{рк}(s)$ находятся по одной из методик одноконтурных САР.

Примером может служить САР электропривода. При этом y – скорость, v_2 – момент сопротивления, y_1 – ток якоря двигателя, v_1 – напряжение питания.

2. Двухконтурная система с упредителем Смита.

В системах с объектом регулирования (ОР), имеющим большое запаздывание τ , используется упредитель Смита (УС) – специальная корректирующая ОС, охватывающая регулятор (рис. 7.6) и имеющая передаточную функцию $W_{ус} = W_0 - W_0 \cdot e^{-\tau s}$.

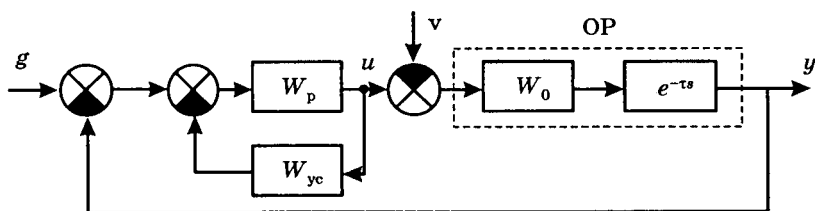


Рис. 7.6

Отсюда видно, что УС содержит две параллельные ветви:

- ветвь положительной ОС с передаточной функцией объекта $W_0 \cdot e^{-\tau s}$, которая компенсирует на входе регулятора реакцию объекта на регулирующее воздействие u ;
- ветвь отрицательной ОС с передаточной функцией объекта W_0 без запаздывания, которая обеспечивает упреждение.

Характеристическое уравнение САР имеет вид
 $1 + W(s) = 0,$

$$\text{где } W(s) = \frac{W_p \cdot W_0 \cdot e^{-ts}}{1 + W_p \cdot W_{yc}}.$$

После преобразований получим характеристическое уравнение
 $1 + W_p W_0 = 0,$
 которое показывает, что устойчивость САР не зависит от запаздывания.

Передаточные функции замкнутой САР по задающему и возмущающему воздействиям при условии, что $|W_p W_0| \gg 1$, приобретают вид:
 $\Phi_g = e^{-ts}; \Phi_v = -W_0(e^{-ts} - e^{-2ts}).$

Таким передаточным функциям соответствуют переходные функции $h_g(t)$ и $h_v(t)$, отличающиеся малой длительностью (рис. 7.7).

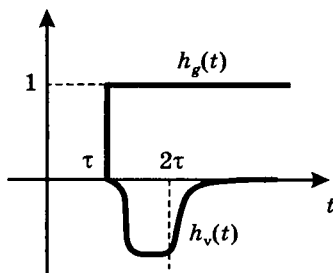


Рис. 7.7

3. Двухконтурная САР с глубокой гибкой местной отрицательной обратной связью.

Объект регулирования такой САР (рис. 7.8) состоит из малоинерционной части с передаточной функцией W_{01} и более инерционной части с передаточной функцией W_{02} , для которой передаточная функция эквивалентного регулятора равна

$$W_{ps} \approx W_{oc.m}^{-1}$$

при выполнении условия глубокой обратной связи в рабочем диапазоне частот

$$W_p(j\omega)W_{01}(j\omega)W_{oc.m}(j\omega) \gg 1.$$

Для реализации ПИ-закона регулирования величины y следует выбрать $W_{oc.m} = \frac{k_{oc}s}{T_{oc}s + 1}$ и рассчитать k_{oc} и T_{oc} по одной из методик

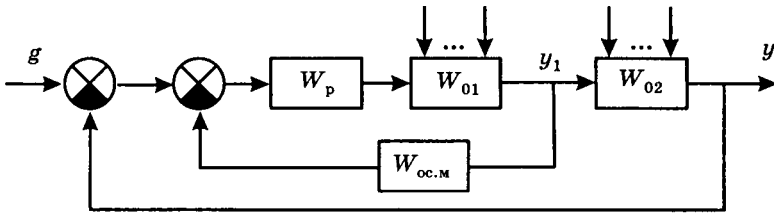


Рис. 7.8

синтеза одноконтурных САР. Точно так же можно определить оптимальные параметры передаточной функции W_p , выполнив условия устойчивости и высокой степени компенсации возмущений, примененных к внутреннему контуру.

Такая САР, в частности, применяется при регулировании температуры перегрева пара в котельных агрегатах тепловых электростанций. При этом y и y_1 – температура пара на выходе и в промежуточной точке паронагревателя соответственно.

4. Многосвязная система автоматического регулирования.

На структурной схеме многосвязной САР (рис. 7.9) обозначено:

W_0 и W_p – передаточные матрицы объекта регулирования (ОР) и автоматического регулятора (АР), g и v – векторы задающего и возмущающего воздействий соответственно.

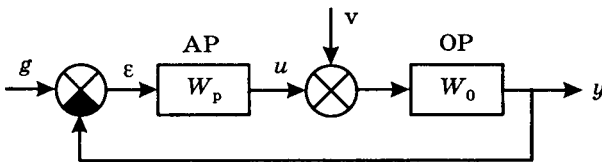


Рис. 7.9

В результате совместного решения уравнений

$$\begin{cases} y = W_0 W_p \varepsilon + W_0 v, \\ \varepsilon = g - y \end{cases}$$

находим векторно-матричное уравнение многосвязной САР

$$(I + W_0 W_p) y = W_0 W_p g + W_0 v,$$

где I – единичная матрица.

Условием автономности многосвязной САР по задающему воздействию, когда регулируемые величины всех сепаратных САР не зависят от «чужих» задающих воздействий, является диагональность соответствующей передаточной матрицы

$$\Phi^g = (I + W_0 W_p)^{-1} W_0 W_p.$$

Отсюда видно, что передаточная матрица Φ^g будет диагональной, если диагональна передаточная матрица $W_0 W_p$ САР, разомкнутой по основным обратным связям. Действительно, при этом диагональна передаточная матрица $I + W_0 W_p$ и все произведение.

Диагональность передаточной матрицы $I + W_0 W_p$ обеспечивает автономность свободных движений, т. е. при $g = v \equiv 0$. В этом случае характеристическое уравнение многосвязной САР имеет вид

$$\det[I + W_0 W_p] = 0$$

и содержит в левой части произведение характеристических полиномов всех сепаратных САР, что дает возможность осуществлять синтез каждой из них в отдельности по известным методикам одноконтурных САР.

Условием автономности многосвязной САР по возмущающему воздействию является диагональность соответствующей передаточной матрицы

$$\Phi^v = (I + W_0 W_p)^{-1} W_0.$$

Используя свойство произведения матриц

$$AB = (B^{-1}A^{-1})^{-1},$$

преобразуем к более простому для расчета виду:

$$\Phi^v = [W_0^{-1}(I + W_0 W_p)]^{-1} = (W_0^{-1} + W_p)^{-1}.$$

Сравнение показывает следующее:

- условия автономности по задающему и возмущающему воздействиям в общем случае не совпадают;
- для автономности по возмущающему и задающему воздействиям не обязательно, чтобы матрицы W_p и W_0 были диагональными каждая в отдельности. Если же это условие выполняется, то многосвязная САР автономна как по задающему воздействию, так и по возмущению (отсутствуют перекрестные связи в ОР и дополнительные связи в АР, т. е. многосвязная САР распадается на несколько сепаратных САР).

Пример. Синтез двусвязной САР.

Пусть $W_0 = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix}$, $W_p = \begin{bmatrix} W_{p11} & W_{p12} \\ W_{p21} & W_{p22} \end{bmatrix}$ – передаточные мат-

рицы объекта и регулятора соответственно. Передаточная матрица САР, разомкнутой по основным ОС (рис. 7.10), имеет вид

$$W_0 W_p = \begin{bmatrix} (W_{11} W_{p11} + W_{12} W_{p21}) & (W_{11} W_{p12} + W_{12} W_{p22}) \\ (W_{21} W_{p11} + W_{22} W_{p21}) & (W_{21} W_{p12} + W_{22} W_{p22}) \end{bmatrix}.$$

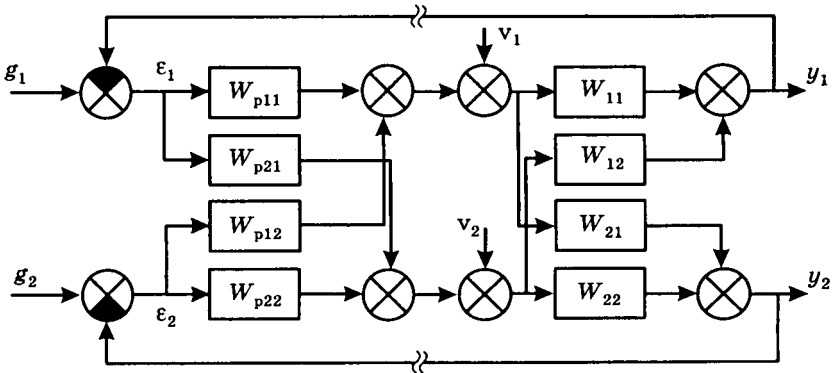


Рис. 7.10

Условия ее диагональности сводятся к следующим равенствам:

$$W_{p12} = -\frac{W_{12}}{W_{11}} W_{p22}, \quad W_{p21} = -\frac{W_{21}}{W_{22}} W_{p11}.$$

Передаточная функция автономной многосвязной САР по задающему воздействию имеет вид

$$\Phi_g = \begin{bmatrix} (1 + W_{11} W_{p11} + W_{12} W_{p21}) & 0 \\ 0 & (1 + W_{21} W_{p12} + W_{22} W_{p22}) \end{bmatrix}^{-1} \times \\ \times \begin{bmatrix} (W_{11} W_{p11} + W_{12} W_{p21}) & 0 \\ 0 & (W_{21} W_{p12} + W_{22} W_{p22}) \end{bmatrix} =$$

$$= \text{diag} \left[\frac{W_{11}W_{p11} + W_{12}W_{p21}}{1 + W_{11}W_{p11} + W_{12}W_{p21}}, \frac{W_{21}W_{p12} + W_{22}W_{p22}}{1 + W_{21}W_{p12} + W_{22}W_{p22}} \right],$$

так как матрица, обратная диагональной, равна диагональной матрице с обратными элементами.

После подстановки W_{p12} и W_{p21} в Φ^g передаточные функции отдельных САР будут зависеть только от передаточных функций «своих» регуляторов W_{p11} и W_{p22} , что позволяет произвести их синтез для одноконтурных САР.

Из релейных регуляторов простейшим является двухпозиционный, который следует выбирать, если допустимы автоколебания, ухудшающие качество регулирования. Расчет их параметров настройки приводится в работах А. С. Клюева. Трехпозиционные регуляторы (регуляторы постоянной скорости исполнительного механизма) входят в некоторые стандартные измерительные приборы и могут быть использованы при сравнительно невысоком качестве регулирования из-за наличия зоны нечувствительности. Для анализа и синтеза нелинейных САР могут быть применены следующие методы:

- расчет абсолютной устойчивости по частотному критерию В. М. Попова и прямому методу А. М. Ляпунова для непрерывных САР и методике Я. З. Цыпкина для цифровых САР;
- расчет периодических процессов при гармоническом и медленно меняющемся воздействиях по методу гармонической линеаризации (баланса) для непрерывных и релейно-импульсных систем (в том числе учет квантования по уровню);
- расчет процессов в автономных системах второго порядка по методам фазовой плоскости и точечного преобразования;
- расчет процессов в кусочно-линейных системах во временной области и на фазовой плоскости по методу припасовывания;
- расчет процессов в релейных системах во временной области методом наложения реакций линейной части;
- расчет стационарных случайных процессов по методу статистической линеаризации;
- машинное моделирование может применяться для анализа отдельных процессов, установления эмпирических закономерностей и оптимального синтеза САР методами перебора вариантов и нелинейного программирования. Оно не позволяет установить аналитические закономерности, но незаменимо для сложных систем.

Цифровые и импульсные регуляторы локальных САР, как правило, обычно обладают худшими показателями качества управления, чем непрерывные, что объясняется потерей информации при квантовании по времени. Однако импульсные регуляторы имеют преимущество при регулировании объектов с запаздыванием. Период (такт)

квантования нужно выбирать с учетом динамики объекта управления и спектра внешних воздействий, стремясь приблизить САУ к непрерывной.

Если требование теоремы В. А. Котельникова выполнено, то цифровая система эквивалентна непрерывной и синтез цифрового регулятора в квазинепрерывном режиме работы производится по методам, известным для непрерывных регуляторов. При этом приближенно цифровой регулятор математически описывается соответствующей передаточной функцией идеального непрерывного регулятора (П, ПИ, И, ПД, ПИД), а более точно – непрерывной передаточной функцией, найденной по формуле связи частотных спектров непрерывно- и дискретного сигналов.

Если принять период квантования, превышающий требуемый по теореме В. А. Котельникова, то происходит потеря информации и систему следует проектировать как импульсную. Расчет алгоритма цифрового управления выполняется исходя из требований устойчивости и заданного критерия качества управления. Для структурно-параметрического синтеза цифрового регулятора по желаемой дискретной передаточной функции применяется обычно критерий конечной длительности процесса в сочетании с требованием к установившейся ошибке (как правило, ставится условие астатизма первого порядка). Аналитическое решение задачи параметрического синтеза цифрового регулятора на минимум квадратичного критерия качества возможно лишь для САУ сравнительно низкого порядка, в остальных случаях следует применять численные методы оптимизации (Р. Изерман).

Для цифровых следящих систем распространенным методом структурно-параметрического синтеза является синтез дискретной коррекции методом логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) по заданному показателю колебательности, однако может быть рассчитана и эквивалентная непрерывная коррекция. Рассмотрим более подробно синтез цифровых автоматических регуляторов как наиболее перспективных для практического применения.

САУ с цифровым регулятором называется системой прямого цифрового регулирования и имеет следующую функциональную схему в координатах «вход-выход» (рис. 7.11).

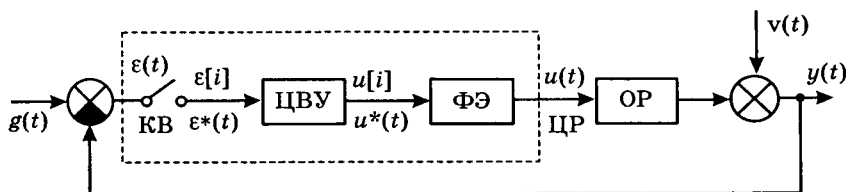


Рис. 7.11

Цифровой регулятор состоит из последовательно соединенных квантователя КВ по времени, цифрового вычислительного устройства ЦВУ и формирующего элемента ФЭ. Пренебрегаем квантованием по уровню, что допустимо при большом числе разрядов. Период квантования T по времени является важным дополнительным параметром настройки цифрового регулятора. Чем больше T , тем хуже качество регулирования из-за потери информации о процессе. Однако при малых значениях T возрастают вычислительные трудности и энергетические затраты на управление. Считается, что большие такты квантования находятся в пределах $(0,25 \div 0,66)t_p$, где t_p – время регулирования системы прямого цифрового регулирования.

При больших значениях T система прямого цифрового регулирования может быть рассчитана как линейная импульсная САР со структурной схемой, содержащей в замкнутом контуре два условных звена: цифровое вычислительное устройство и объект управления (рис. 7.12).

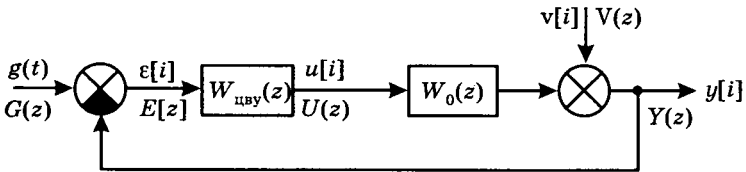


Рис. 7.12

Дискретная передаточная функция объекта управления

$$W_0(z) = Z\{W_\phi(s)W_{op}(s)\},$$

где $W_\phi(s) = [1 - e^{-Ts}]s^{-1}$ – передаточная функция формирующего элемента (экстраполятора нулевого порядка).

Дискретная передаточная функция $W_{цвy}(z)$ может быть найдена при структурно-параметрическом синтезе в координатах «вход-выход» так же, как и передаточная функция дискретного корректирующего устройства линейной импульсной системы.

При параметрическом синтезе структура цифрового вычислительного устройства выбирается. В частности, если желаемым непрерывным регулятором является идеализированный ПИД-регулятор с передаточной функцией

$$W_{pi}(s) = K_p[1 + (T_n s)^{-1} + T_d s],$$

то соответствующее разностное уравнение цифрового вычислительного устройства получим из уравнения этого ПИД-регулятора

$$u(t) = K_p \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_n} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right]$$

путем его дискретизации (интеграл заменяется конечной суммой, производная – первой разностью, $dt = T$):

$$u[i] = K_p \{ \varepsilon[i] + \frac{T}{T_u} \sum_{m=0}^{i-1} \varepsilon[m] + T_d (\varepsilon[i] - \varepsilon[i-1]) \}.$$

Если аналогично записать формулу для $u[i-1]$ и вычесть ее из предыдущей, то получим уравнение цифрового вычислительного устройства в рекуррентном виде:

$$u[i] - u[i-1] = q_0 \varepsilon[i] + q_1 \varepsilon[i-1] + q_2 \varepsilon[i-2],$$

где параметры цифрового регулятора

$$q_0 = K_p(1 + T_d T^{-1}), \quad q_1 = -K_p(1 + 2T_d T^{-1} - T T_u^{-1}), \quad q_2 = K_p T_d T^{-1}.$$

Этому уравнению соответствует дискретная передаточная функция цифрового вычислительного устройства

$$W_{\text{цву}}(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}},$$

являющаяся типовой для цифрового регулятора второго порядка.

Важно установить, при каких значениях q_i цифровой регулятор соответствует ПИД-регулятору. Для этого при нулевых начальных условиях и $\varepsilon[i] = 1[i]$ найдем решетчатую переходную функцию и построим переходную характеристику (рис. 7.13).

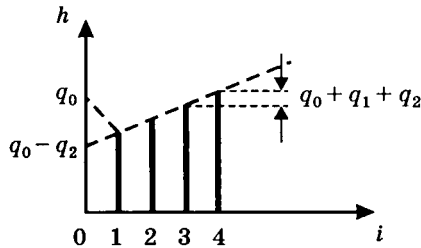


Рис. 7.13

$$h[i] = \begin{cases} q_0 & \text{при } i = 0, \\ 2q_0 + q_1 & \text{при } i = 1, \\ h[i-1] + q_0 + q_1 + q_2 & \text{при } i \geq 2. \end{cases}$$

Эта характеристика аналогична характеристике непрерывного ПИД-регулятора при положительности следующих коэффициентов цифрового регулятора: коэффициента передачи $K_p = q_0 - q_2$, коэффи-

циента опережения $c_d = q_2 K_p^{-1}$ и коэффициента интегрирования $c_u = (q_0 + q_1 + q_2) K_p^{-1}$.

Параметрический синтез системы прямого цифрового регулирования как линейной импульсной САР обычно производится по минимуму суммарной обобщенной квадратичной оценки

$$S_2 = \sum_{i=0}^{\infty} (\varepsilon^2[i] + r(\Delta u[i])^2),$$

где $\Delta u[i] = u[i] - u[\infty]$ – переходная составляющая управления; $r = (0,1 \div 0,25) k_0^2$ – весовой коэффициент энергозатрат.

В частности, для $W_{op}(s) = \frac{K_0}{(T_0 s + 1)^n}$, $n = \overline{1, 6}$, в литературе приводятся таблицы и номограммы для инженерного расчета q_i , причем эти настройки не обязательно соответствуют характеристике непрерывного ПИД-регулятора.

Если период T настолько мал, что выполняются известные условия эквивалентности импульсной и непрерывной САР, то, пренебрегая квантованием по времени синтез производят по следующей структурной схеме непрерывной САР (рис. 7.14).

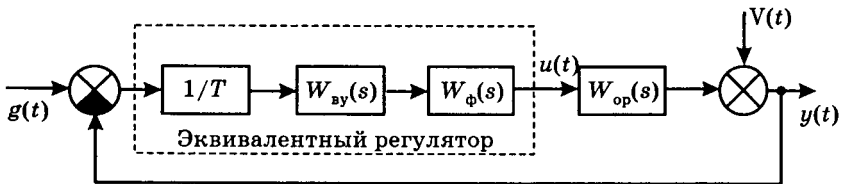


Рис. 7.14

В этой схеме квантователь заменен безынерционным звеном с коэффициентом передачи T^{-1} , а передаточная функция эквивалентного непрерывного регулятора

$$W_{пэ}(s) = \frac{1}{T} W_{ф}(s) W_{вы}(s).$$

Сюда входит передаточная функция непрерывной модели цифрового вычислительного устройства

$$W_{вы}(s) = W_{цвы}(z) \Big|_{z = e^{sT}}.$$

Эта модель состоит из запаздывающих и усилительных звеньев и поэтому называется НЗУ-моделью. Передаточная функция НЗУ модели определяет, как известно, связь изображений по Лапласу идеальных импульсных функций (последовательностей модулированных по площади δ -функций) на входе и выходе цифрового вычислительного устройства, но так как в данном случае дискретные сигналы эквивалентны непрерывным, то ее применение возможно. Однако только при $T \rightarrow 0$, когда $\text{EXP}(-Ts) \approx 1 - Ts$ получится равенство $W_{\text{рз}}(s) = W_{\text{ри}}(s)$. Поэтому расчеты системы прямого цифрового регулирования как непрерывной с передаточной функцией идеализированного регулятора являются наименее точными. Рассчитав параметры K_p , T_n и T_d непрерывного регулятора, следует затем по формулам найти параметры цифрового регулятора.

Когда объект регулирования является объектом первого порядка с запаздыванием, т. е.

$$W_{\text{оп}}(s) = \frac{K_0}{T_0 s + 1} \cdot e^{-\tau_0 s},$$

то даже при сравнительно больших значениях $T \approx (1/15 + 1/4)t_p$ можно вести расчет системы прямого цифрового регулирования как непрерывной с идеализированным непрерывным регулятором, если увеличить запаздывание на половину такта квантования, т. е. приняв

$$\tau_0 = \tau_0 + 0,5T.$$

Если в прямом цифровом регулировании применен исполнительный механизм постоянной скорости, то выходной аналоговый сигнал цифрового регулятора преобразуется в последовательность импульсов с широтно-импульсной модуляцией, управляющих этим исполнительным механизмом. Ввиду того, что исполнительный механизм является интегрирующим звеном, для построения ПИД-регулятора в этом случае непрерывная модель должна иметь ПДД² закон:

$$W_{\text{цвв}}(s) = K_{\text{п}} \frac{T_{\text{м}}}{T_{\text{и}}} \left(1 + T_{\text{и}} s + \frac{K_{\text{д}} T_{\text{и}}^2 s^2}{\alpha K_{\text{д}} T_{\text{и}} s + 1} \right),$$

где $T_{\text{м}}$ – время полного перемещения исполнительного механизма; $\alpha \ll 1$ – постоянный коэффициент (для цифрового регулятора типа Ремиконт $\alpha = 0,125$).

В результате общая передаточная функция идеализированной непрерывной модели цифрового регулятора при $W_{\text{им}}(s) = (T_{\text{м}} s)^{-1}$:

$$W_{\text{ри}}(s) = W_{\text{цвв}}(s) W_{\text{им}}(s) = K_{\text{п}} \left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}} s} + \frac{K_{\text{д}} T_{\text{и}} s}{(\alpha K_{\text{д}} T_{\text{и}} s + 1)^2} \right),$$

т. е. соответствует ПИД-регулятору с инерционным дифференцированием.

Синтез цифрового регулятора в пространстве состояний может выполняться для различных режимов работы системы:

- для свободного движения;
- для отработки задающего и (или) возмущающего воздействий.

Рассмотрим в общих чертах синтез для свободного движения. Пусть задано разностное векторно-матричное уравнение ОР:

$$\mathbf{x}[i] = \mathbf{A}\mathbf{x}[i - 1] + \mathbf{B}\mathbf{u}[i - 1].$$

В качестве критерия оптимальности выбран для минимизации обобщенный квадратичный критерий:

$$J = \mathbf{x}^T[N]\mathbf{Q}\mathbf{x}[N] + \sum_{i=0}^{N-1} \left\{ \mathbf{x}^T[i]\mathbf{Q}\mathbf{x}[i] + \mathbf{u}^T[i]\mathbf{R}\mathbf{u}[i] \right\}.$$

Первое слагаемое характеризует функцию от конечного состояния в момент $t_p = NT$, N – общее число тактов квантования T в переходном процессе. Остальная сумма характеризует ошибку регулирования и энергетические затраты. В ней \mathbf{Q} и \mathbf{R} – симметричные матрицы положительно-определенных квадратичных форм.

Требуется найти оптимальный алгоритм управления $\mathbf{u}^0[i]$.

Для синтеза используем метод динамического программирования для дискретно-непрерывной задачи. Рассматриваем постепенно увеличивающиеся по продолжительности конечные отрезки оптимального процесса и минимизируем на каждом из них свою часть критерия оптимальности.

На первом от конца отрезке $(N - 1)T \leq t \leq NT$ критерий оптимальности равен конечной сумме

$$J_{N-1} = \mathbf{x}^T[N] \cdot \mathbf{Q}\mathbf{x}[N] + \mathbf{x}^T[N - 1] \cdot \mathbf{Q}\mathbf{x}[N - 1] + \mathbf{u}^T[N - 1] \cdot \mathbf{R}\mathbf{u}[N - 1].$$

Для минимизации выразим конечное состояние ОР в соответствии с уравнением объекта:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}[N] &= \mathbf{A}\mathbf{x}[N - 1] + \mathbf{B}\mathbf{u}[N - 1], \\ \mathbf{x}^T[N] &= \mathbf{x}^T[N - 1] \mathbf{A}^T + \mathbf{u}^T[N - 1] \mathbf{B}^T. \end{aligned}$$

Подставив эти выражения, получим преобразованное выражение суммы, которое надо минимизировать по $\mathbf{u}[N - 1]$:

$$\begin{aligned} J_{N-1} &= \mathbf{x}^T[N - 1] \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{Q}\mathbf{x}[N - 1] + \mathbf{x}^T[N - 1] \mathbf{Q}\mathbf{x}[N - 1] + \\ &+ \mathbf{u}^T[N - 1] \mathbf{B}^T \mathbf{Q}\mathbf{A}\mathbf{x}[N - 1] + \mathbf{x}^T[N - 1] \mathbf{A}^T \mathbf{Q}\mathbf{B}\mathbf{u}[N - 1] + \\ &+ \mathbf{u}^T[N - 1] [\mathbf{B}^T \mathbf{Q}\mathbf{B} + \mathbf{R}]\mathbf{u}[N - 1]. \end{aligned}$$

Первые два слагаемых не зависят от $\mathbf{u}(N - 1)$, поэтому при минимизации их можно отбросить. Третье и четвертое слагаемые являются транспонированными скалярными величинами (т. е. равны между собой). Поэтому можно считать

$$J_{N-1} = 2\mathbf{x}^T[N - 1] \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{Q}\mathbf{B}\mathbf{u}[N - 1] + \mathbf{u}^T[N - 1](\mathbf{B}^T\mathbf{Q}\mathbf{B} + \mathbf{R})\mathbf{u}[N - 1].$$

Это выражение необходимо продифференцировать по $u[N-1]$ и производную приравнять нулю. Сложность в том, что надо дифференцировать по векторному аргументу. Для этого применяются формулы:

$$\frac{d(Vu)}{du} = V^T, \quad \frac{d(u^T Cu)}{du} = 2Cu,$$

где V и C – матрицы, u – вектор. В результате приходим к уравнению:

$$B^T Q A x[N-1] + [B^T Q B + R] u[N-1] = 0.$$

Отсюда оптимальное управление на данном конечном отрезке

$$u^0[N-1] = -K[N-1] x[N-1],$$

где $K[N-1] = (B^T Q B + R)^{-1} B^T Q A$ – матрица коэффициентов пропорциональности между векторами состояния и управления на последнем шаге.

Затем аналогичные расчеты повторяют для все более возрастающих конечных отрезков и получают нестационарный пропорциональный закон оптимального управления

$$u[i] = -K[i] x[i], \quad i = \overline{0, (N-1)}.$$

Такому результату соответствует следующая структурная схема оптимальной системы ПЦР (рис. 7.15). Зависимость $K[i]$ объясняется погрешностью дискретизации уравнений ОР.

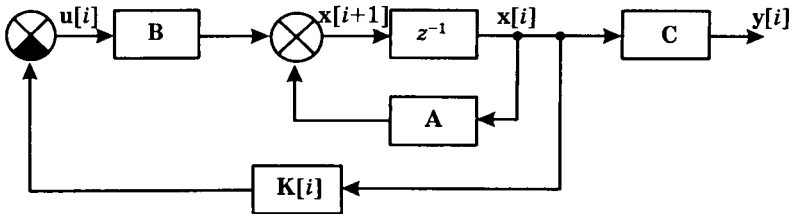


Рис. 7.15

Если частота квантования достаточно велика ($T \rightarrow 0, N \rightarrow \infty$), то матрица коэффициентов оптимального цифрового регулятора $K^0 = \lim_{N \rightarrow \infty} K[i], i = \overline{0, (N-1)}$ имеет постоянные элементы.

В этом случае данная система описывается уравнением

$$x[i+1] = Ax[i] - BK^0 x[i].$$

Такому разностному уравнению соответствует характеристическое, получаемое приравнением определителя к нулю:

$$\det[zI - A + BK^0] = 0,$$

где I – единичная матрица.

Оно удовлетворяет условиям устойчивости, если ОР полностью управляем.

Квантование по уровню делает цифровую систему нелинейной импульсной. В частности, если цифровой регулятор пропорциональный,

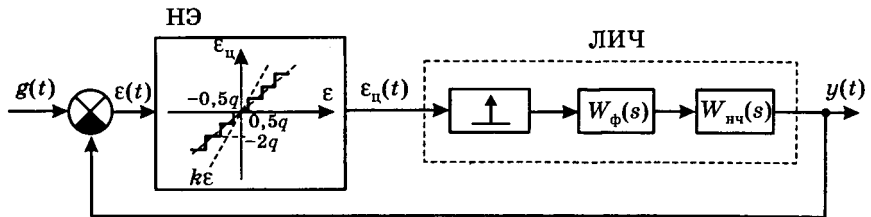


Рис. 7.16

то структурная схема цифровой одномерной САР будет такой, как на рис. 7.16.

Многопозиционный РЭ отражает процедуру квантования по уровню с использованием принципа «до ближайшего уровня». Эту операцию выполняет АЦП (q – шаг квантования). Линейная импульсная часть ЛИЧ включает в себя идеальный импульсный элемент, формирующий элемент и непрерывную часть. Для данной системы производят следующие расчеты:

- анализ устойчивости;
- анализ возможных периодических колебаний;
- оценка дополнительной погрешности при цифровом измерении рассогласования.

Анализ устойчивости выполняют по критерию Я. З. Цыпкина, который является аналогом критерия В. М. Попова для нелинейной импульсной САР и выражает следующее достаточное условие устойчивости состояния равновесия:

$$\operatorname{Re}\{W_{\text{лич}}(e^{j\nu})\} > -\frac{1}{k}, \quad 0 \leq \nu \leq \pi,$$

где $W_{\text{лич}}(e^{j\nu})$ – АФХ линейной импульсной части, которая получается из передаточной функции при частотной подстановке $z = e^{j\nu}$:

$$W_{\text{лич}}(z) = Z\{W_{\phi}(s) W_{\text{нч}}(s)\};$$

k – угловой коэффициент прямой, ограничивающей сектор расположения характеристики нелинейного элемента. Для данной характеристики $k = 2$ (см. рис. 7.16).

Графическая проверка этого условия требует построения АФХ и проведения вертикальной прямой через точку $-1/k$. Устойчивость имеет место, если АФХ целиком расположена правее вертикальной прямой (рис. 7.17).

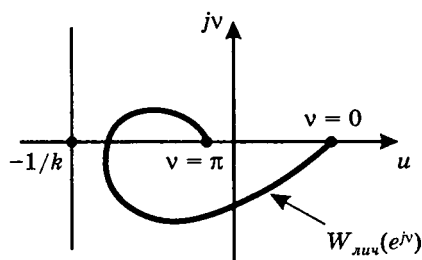


Рис. 7.17

Расчет периодических режимов проводится по методу гармонической линейзации и связан с решением уравнения:

$$1 + W_{\text{лич}}(e^{jv}) \cdot W_{\text{нз}}(A, \varphi, N) = 0.$$

Комплексный коэффициент линейзации $W_{\text{нз}}$ зависит от амплитуды A входных колебаний ϵ , их начальной фазы φ , а также числа N тактов квантования T в периоде колебаний. Соответствующие функции $W_{\text{нз}}$ приводятся в справочниках.

Данное уравнение решается графически следующим образом. На комплексной плоскости строится семейство характеристик НЭ для нескольких значений N . Каждому значению N соответствует несколько характеристик для разных значений φ в диапазоне от 0 до π , а каждая характеристика семейства имеет своим параметром A .

Затем в тех же координатах строим обратную АФХ линейной импульсной части – $W_{\text{лич}}^{-1}(e^{jv})$ в соответствии с преобразованным уравнением

$$W_{\text{нз}}(A, \varphi, N) = -\frac{1}{W_{\text{лич}}(e^{jv})}.$$

Для графического решения уравнения определяем только те точки пересечения характеристик, для которых значения частоты v соответствуют числу тактов N в периоде по формуле:

$$v = \omega T = \frac{2\pi}{NT} T = \frac{2\pi}{N}.$$

По этим точкам находим значения A и φ (возможны несколько решений или ни одного), которые определяют периодический режим, обусловленный квантованием как по времени, так и по уровню и не являющийся автоколебаниями. Эти колебания нежелательны, так как увеличивают ошибку регулирования.

Для оценки дополнительной погрешности от цифрового измерения сигнала рассогласования запишем выражение для него в цифровой форме

$$\varepsilon_d(t) = \varepsilon(t) + \Delta\varepsilon(t),$$

где $\varepsilon(t)$ – непрерывное (истинное) рассогласование.

Дополнительную погрешность $\Delta\varepsilon(t)$ (рис. 7.18) можно рассматривать как случайную величину с диапазоном изменения $\pm 0,5q$ и плотностью распределения вероятности $f = q^{-1} = \text{const}$ (рис. 7.19). Средний квадрат $\Delta\varepsilon(t)$ является искомой мерой дополнительной погрешности от цифрового измерения рассогласования

$$\overline{\Delta\varepsilon^2} = \int_{-0,5q}^{0,5q} (\Delta\varepsilon)^2 \cdot \frac{1}{q} d(\Delta\varepsilon) = \frac{q^2}{12}.$$

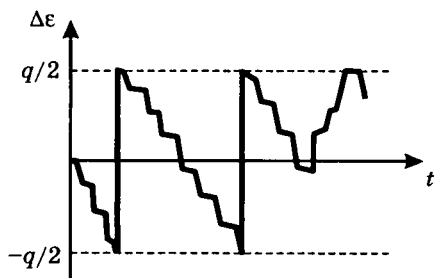


Рис. 7.18

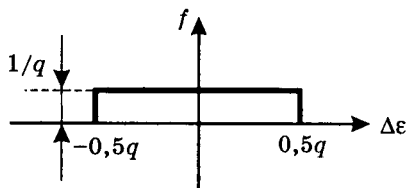


Рис. 7.19

Рассмотрим вкратце некоторые аспекты синтеза оптимальных и адаптивных САУ. Если технические требования соответствуют постановке задачи оптимального управления, то прежде всего следует принять ограничения и сформулировать критерий оптимальности, на-

пример, критерий максимального быстродействия или обобщенный квадратичный критерий. Затем следует учесть, что указанные критерии могут быть минимизированы релейным двухпозиционным и пропорциональным многомерным регулятором соответственно. Для расчета релейного регулятора применяется метод фазовой плоскости, а для пропорционального – методы вариационного исчисления с использованием стандартных пакетов прикладных программ, например, МАТЛАВ. Если оптимальное управление дискретно по времени, то для синтеза применяется метод динамического программирования. Оценки переменных состояния в оптимальных САУ и при модальном управлении определяются с помощью наблюдающих устройств.

Структурно-параметрический синтез беспоисковых адаптивных систем можно осуществлять с помощью прямого метода Ляпунова, метода функций чувствительности и др.

Для синтеза поисковых адаптивных систем можно применять метод приспособывания в фазовом пространстве и во временной области, метод аппроксимации решения уравнения динамики поисковой адаптивной системы в виде ряда Фурье (метод Галеркина) и др. Для синтеза шаговых поисковых систем используются методы расчета импульсных систем, а для расчета систем с синхронным детектированием в квазистационарном режиме – методы синтеза непрерывных систем с принципом управления по отклонению.

Список литературы

1. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник. В 3-х т. / Под ред. Н. Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ, 2000.
2. Теория управления: Учебник для вузов. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999. – 435 с.
3. Современная прикладная теория управления. В 3-х ч. Ч. 1. Оптимизационный подход в теории управления / Под ред. А. А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 400 с.
4. Андреев Ю. Н. Управление конечномерными объектами. – М.: Наука, 1976.
5. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления / Под ред. А. А. Воронова и И. А. Огурка. – М.: Наука, 1984.
6. Савин М. М., Елсуков В. С., Пятин О. Н. Теория автоматического управления: Учебное пособие для вузов / Под ред. д.т.н., проф. В. И. Лачина. – Новочеркасск: Высшее образование, 2005. – 352 с.

8

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Ввиду значительной специфики методов математического описания, построения и расчета систем автоматического управления объектами с распределенными параметрами (ОРП) и недостаточным их освещением в учебной литературе в настоящем разделе отдельно рассматриваются эти вопросы в конспективном изложении применительно к типовому содержанию расчетного раздела специальной части дипломного проекта.

8.1. Общая характеристика задач управления системами с распределенными параметрами [3, 6, 10, 18, 23]

Поскольку на практике любой технический объект управления имеет вполне определенные геометрические размеры, то функция, характеризующая его состояние, вообще говоря, изменяется в пределах пространственной области, занимаемой объектом, и, следовательно, зависит не только от времени t , но и от вектора x пространственных координат, являясь функцией $Q(x, t)$ по меньшей мере двух аргументов (если x – скалярная переменная).

Подобные системы, состояние которых описывается функциями нескольких аргументов, зависящими как от времени, так и от пространственных координат, получили название *систем с распределенными параметрами* (СРП), или, короче, *распределенных систем*.

Задачи управления СРП оказываются качественно более сложными по сравнению с системами с сосредоточенными параметрами (ССП) ввиду целого ряда принципиальных особенностей. Укажем некоторые из них:

1. Состояние СРП, определяемое функцией нескольких переменных, описывается соответственно дифференциальными уравнениями

не в обыкновенных, а в частных производных (содержащими производные функции состояния как во времени, так и по пространственным координатам), интегральными уравнениями, а также «гибридными» системами уравнений различной природы, включая в качестве дополнительных соотношений и обыкновенные дифференциальные уравнения. Это обстоятельство приводит к математическим моделям СРП, качественно отличающимся от типичных представлений, используемых в ССП.

2. По сравнению с ССП принципиально расширяется класс управляющих воздействий, прежде всего за счет возможности включения в их число пространственно-временных управлений, описываемых, подобно управляемому состоянию СРП, функциями нескольких аргументов – времени и пространственных координат.

3. Задача реализации систем управления объектами с распределенными параметрами резко усложняется по сравнению с ССП как за счет необходимости осуществления пространственно-распределенного контроля состояния объекта в целях наблюдения за результатами процесса управления и использования соответствующих сигналов обратных связей, так и за счет необходимости построения регуляторов с пространственно-распределенными управляющими воздействиями.

8.2. Базовые уравнения объектов с распределенными параметрами [3–6, 10, 13–15, 18, 19, 22, 23]

Типовое линейное дифференциальное уравнение второго порядка в частных производных, моделирующее поведение функции состояния $Q(x, t)$ пространственно одномерного объекта с распределенными параметрами, описывает в первом приближении широкий круг самых разнообразных физических явлений и может рассматриваться в качестве базовой модели ОРП достаточно общего вида.

После приведения к канонической форме записи, не содержащей смешанных производных, это уравнение может быть представлено в виде

$$A(x, t) \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + A_1(x, t) \frac{\partial Q}{\partial t} = C(x, t) \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + B_1(x, t) \frac{\partial Q}{\partial x} + C_1(x, t) Q + f(x, t, u(x, t)); \quad x_0 < x < x_1, \quad t > 0 \quad (8.1)$$

с заданными коэффициентами A, A_1, C, B_1, C_1 и функцией f .

Для получения единственного решения уравнение (8.1) необходимо дополнить начальными условиями, которые здесь, подобно случаю

описания ССП обыкновенными дифференциальными уравнениями, принимают вид

$$Q(x, 0) = Q_0^{(0)}(x); \quad \frac{\partial Q(x, 0)}{\partial t} = Q_0^{(1)}(x); \quad x_0 \leq x \leq x_1, \quad (8.2)$$

с заданными функциями $Q_0^{(0)}(x)$ и $Q_0^{(1)}(x)$.

Условие (8.2) необходимо, но не достаточно для выделения единственного решения уравнения (8.1), что является принципиальной особенностью СРП по сравнению с ССП.

Полная система дополнительных соотношений, как правило, должна содержать еще *граничные условия* для $Q(x, t)$, которые, характеризуя взаимодействие $Q(x, t)$ с внешней средой, должны выполняться для $t > 0$ в *граничных* точках $x = x_0$ и $x = x_1$ отрезка $[x_0, x_1]$ изменения пространственной переменной и задаются в типовой форме

$$\alpha(x_0, t) Q(x_0, t) + \beta(x_0, t) \frac{\partial Q(x_0, t)}{\partial x} = g_0(t, u_0(t)), \quad t > 0; \quad (8.3)$$

$$\alpha(x_1, t) Q(x_1, t) + \beta(x_1, t) \frac{\partial Q(x_1, t)}{\partial x} = g_1(t, u_1(t)), \quad t > 0. \quad (8.4)$$

Здесь α и β – заданные коэффициенты, а g_0 и g_1 – заданные функции своих аргументов.

Граничные условия (8.3), (8.4) называются *однородными* или *неоднородными*, если $g(t) = 0$ или $g(t) \neq 0$ соответственно.

Задача (8.1)–(8.4) при $\alpha > 0$, $\beta = 0$; $\alpha = 0$, $\beta > 0$ и $\alpha > 0$, $\beta > 0$ называется соответственно *первой*, *второй* и *третьей (смешанной) краевыми задачами*.

Как следует из (8.1)–(8.4), поведение *управляемого выхода* объекта, в качестве которого здесь рассматривается пространственно распределенная функция $Q(x, t)$, описывающая состояние ОРП, однозначно определяется при фиксированном начальном состоянии $Q_0(x) = (Q_0^{(0)}(x), Q_0^{(1)}(x))$ *входными воздействиями* f, g_0, g_1 . В свою очередь в роли этих входных воздействий могут фигурировать целиком или частично (например, в виде аддитивных слагаемых) соответствующие *управления* $u(x, t), u_0(t), u_1(t)$. Наряду с управляющими в роли входов объекта могут рассматриваться и *возмущающие воздействия*.

Управляющие воздействия $u(x, t)$, формально включаемые в уравнение объекта (8.1) в составе функции f (в частности, при $f(x, t, u(x, t)) = u(x, t)$) и реализуемые обычно за счет внутренних источников энергии или вещества, можно назвать *внутренними управлениями*, а управляющие воздействия $u_0(t), u_1(t)$ в составе функций g_0, g_1 , фигурирующие в граничных условиях (8.3), (8.4) и характеризующие целенаправленное влияние на $Q(x, t)$, организуемое со стороны окружа-

ющей среды на границе пространственной области, занимаемой объектом, – *граничными управлениями (управлениями по граничным условиям)*.

Граничные управления $u_0(t)$, $u_1(t)$ для одномерного объекта (8.1)–(8.4), сконцентрированные в точках x_0 и x_1 на границах отрезка $[x_0, x_1] \ni x$, представляют собой *сосредоточенные* воздействия, изменяющиеся только во времени t .

Внутренние управления $u(x, t)$ в любом случае могут представлять собой как независимые от пространственных координат управления, которые мы опять будем называть *сосредоточенными*, так и *пространственно-временные* воздействия, в зависимости от постановки конкретной задачи. С точки зрения физического содержания, инженерной интерпретации и практической реализации внутренние и граничные управления обычно существенно отличаются друг от друга.

Примеры [3, 13, 14, 18, 22, 23].

Рассмотрим некоторые характерные частные случаи. При $A = 1$; $C = v^2$; $A_1 = B_1 = C_1 = 0$; $f(x, t, u(x, t)) = 0$ получаемое из (8.1) уравнение

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}; \quad v^2 = \text{const} > 0, \quad x \in (x_0, x_1), \quad t > 0, \quad (8.5)$$

называемое *волновым уравнением*, моделирует процессы распространения свободных колебаний, например, процессы распространения со скоростью звука v пульсаций расхода газа в длинном трубопроводе.

Распределение напряжения и тока вдоль длинной электрической линии описывается *телеграфным уравнением*

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + b_1 \frac{\partial Q}{\partial t} + b_2 Q; \quad b_1, b_2 = \text{const} > 0, \quad x \in (x_0, x_1), \quad t > 0, \quad (8.6)$$

где в данном случае v является скоростью распространения электромагнитной волны вдоль линии.

В частном случае для длинных электрических линий без потерь при $b_1 = b_2 = 0$ уравнение (8.6) сводится к волновому уравнению (8.5). При $b_2 = 0$, $b_1 \neq 0$ уравнение (8.6) моделирует процессы механических колебаний в сопротивляющейся среде.

Уравнением теплопроводности математической физики

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = a \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + f(x, t, u(x, t)); \quad a = \text{const} > 0, \quad x \in (x_0, x_1), \quad t > 0, \quad (8.7)$$

описываются, например, в первом приближении температурные поля процессов нестационарной теплопроводности, нестационарные элек-

ромагнитные поля, поля концентраций в процессах нестационарной диффузии, тепломассопереноса и др.

В частном случае $A = C = 0$ в (8.1) мы получаем уравнение первого порядка, в первом приближении описывающее (одним или системой таких уравнений) поведение целого класса *подвижных* ОРП, к которым можно отнести процессы нагрева металла в агрегатах непрерывного действия, теплообменные процессы в движущихся средах, процессы передачи жидкостей и газа по длинным трубопроводам, теплообменные процессы в химических реакторах, распространение электромагнитных волн в длинных электрических линиях и т. п.

В простейшем случае это уравнение принимает вид

$$b \frac{\partial Q(x, t)}{\partial t} + bV \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} + Q(x, t) = Q_{\Pi}(x, t);$$

$$b = \text{const}, 0 < x < 1, t > 0, \quad (8.8)$$

где Q_{Π} – внешнее воздействие на объект; V – скорость перемещения объекта.

8.3. Стандартные формы, стандартизирующие функции, функции Грина и вход-выходные соотношения ОРП [4, 5, 10, 15, 18, 23]

Описание ОРП в общей форме краевой задачи (8.1)–(8.4) порождает множество различных возможных вариантов ее постановок для различных начальных состояний и воздействий $g(x, t)$ по граничным условиям в (8.3) и (8.4). Оказывается, что можно подобрать такую функцию $w(x, t)$ вместо $f(x, t)$ в (8.1), которая «компенсирует» эффект влияния на выходную величину ненулевых начальных и неоднородных граничных условий, обеспечивая равенство решений $Q(x, t)$ исходной системы (8.1)–(8.4) и задачи с нулевыми начальными и однородными граничными условиями. Такая задача называется при этом *стандартной формой* задачи (8.1)–(8.4), а функция $w(x, t)$ – *стандартизирующей функцией* этой задачи.

Ограничимся далее типовым случаем описания ОРП линейной одномерной моделью (8.1)–(8.4) с постоянными коэффициентами A , A_1 , $\alpha(x_0, t) = \alpha_0$; $\beta(x_0, t) = \beta_0$; $\alpha_1(x_1, t) = \alpha_1$; $\beta_1(x_1, t) = \beta_1$ и не зависящими от времени коэффициентами C , B_1 и C_1 (*стационарный* ОРП).

Соответствующая стандартная форма выглядит следующим образом:

$$A \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + A_1 \frac{\partial Q}{\partial t} = C(x) \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + B_1(x) \frac{\partial Q}{\partial x} + C_1(x)Q + w(x, t);$$

$$x_0 < x < x_1, t > 0,$$

$$Q(x, 0) = 0; \quad \frac{\partial Q(x, 0)}{\partial t} = 0; \quad x_0 \leq x \leq x_1; \quad (8.9)$$

$$\alpha_0 Q(x_0, t) + \beta_0 \frac{\partial Q(x_0, t)}{\partial x} = 0;$$

$$\alpha_1 Q(x_1, t) + \beta_1 \frac{\partial Q(x_1, t)}{\partial x} = 0.$$

Ее решение принимает предельно простой вид

$$Q(x, t) = \int_0^t \int_{x_0}^{x_1} G(x, \xi, t - \tau) w(\xi, \tau) d\xi d\tau. \quad (8.10)$$

Здесь $G(x, \xi, t - \tau)$ – функция Грина рассматриваемой системы с распределенными параметрами, которая в соответствии с выражением (8.10) с исчерпывающей полнотой описывает собственные свойства ОРП, не зависящие от характера входных воздействий, и является его основной фундаментальной характеристикой.

Функция Грина $G(x, \xi, t - \tau_0)$ описывает реакцию управляемой распределенной системы (8.9) с нулевыми начальными и однородными граничными условиями в любой точке $x \in [x_0, x_1]$ и любой момент времени $t \geq 0$ на точечное импульсное воздействие $w(x, t)$ вида дельта-функции, приложенное в произвольной, но фиксированной точке $\xi_0 \in [x_0, x_1]$ в момент времени $t = \tau_0 \geq 0$.

В общем вход-выходном соотношении (8.10) функция Грина $G(x, \xi, t - \tau)$ представляет собой реакцию объекта в точке x в момент времени t при нулевых начальных и однородных граничных условиях на импульсное воздействие, приложенное в каждой точке $\xi \in [x_0, x_1]$ в каждый момент времени $\tau \in [0, t]$, и может быть найдена известными методами [4, 5, 13, 15, 23].

Аргументы ξ и τ функции $G(x, \xi, t - \tau)$ естественно назвать *входными аргументами*, или *аргументами входа*, а аргументы x и t – соответственно *выходными аргументами*, или *аргументами выхода*.

В зависимости от заданных коэффициентов и функций f , $Q_0^{(0)}(x)$, $Q_0^{(1)}(x)$, g_0 , g_1 в (8.1)–(8.4) стандартизирующая функция в (8.10) определяется выражением

$$w(\xi, \tau) = (A_1 \delta(\tau) + A \delta'(\tau)) Q_0^{(0)}(\xi) + A \delta(\tau) Q_0^{(1)}(\xi) + (w_1(\xi, \tau) - w_0(\xi, \tau)) + f(\xi, \tau, u(\xi, \tau)), \quad (8.11)$$

где функции $w_0(\xi, \tau)$, $w_1(\xi, \tau)$ находятся по формулам

$$w_i(\xi, \tau) = \frac{C(\xi)}{\beta_i} \delta(\xi - x_i) g_i(\tau, u_i(\tau)), \quad i = 0, 1, \quad (8.12)$$

если $\beta_i > 0$, или

$$w_i(\xi, \tau) = \frac{1}{\alpha_i} [B_1(\xi)\delta(\xi - x_i) + C(\xi)\delta'(\xi - x_i)]g_i(\tau, u_i(\tau)), \quad i = 0, 1, \quad (8.13)$$

если $\beta_i = 0$.

В (8.11)–(8.13) $\delta(\tau)$, $\delta'(\tau)$ и $\delta(\xi - x_i)$, $\delta'(\xi - x_i)$ – соответственно временные и пространственные дельта-функции и их производные, сосредоточенные в точках $\tau = 0$ и $\xi = x_i$.

Пример [18].

Рассмотрим в качестве ОРП процесс нагрева неподвижного массивного тела, описываемый в первом приближении уравнением теплопроводности вида (8.7):

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} + \frac{1}{c\gamma} F(x, t); \quad 0 < x < R, \quad t > 0 \quad (8.14)$$

с начальными и граничными условиями

$$\theta(x, 0) = \theta_0(x); \quad 0 \leq x \leq R; \quad (8.15)$$

$$\lambda \frac{\partial \theta(R, t)}{\partial x} = q(t); \quad t > 0; \quad (8.16)$$

$$\frac{\partial \theta(0, t)}{\partial x} = 0; \quad t > 0. \quad (8.17)$$

Здесь $a = \frac{\lambda}{c\gamma} = \text{const}$ – коэффициент температуропроводности; c ,

γ , λ – теплофизические параметры нагреваемого материала, соответственно удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности.

В качестве выхода объекта фигурирует нестационарное температурное поле $\theta(x, t)$, а в роли внешних входных воздействий выступают удельная мощность внутреннего тепловыделения $F(x, t)$, плотность теплового потока $q(t)$ на поверхности $x = R$ нагреваемого тела и начальное распределение температур $\theta_0(x)$. Каждое из этих воздействий может рассматриваться в качестве управления (соответственно внутреннего или граничного) или неуправляемого внешнего фактора (возмущения).

Функция Грина задачи (8.14)–(8.17) может быть получена в характерной форме разложения в бесконечный ряд [4, 5, 10, 18]:

$$G(x, \xi, t - \tau) = \frac{1}{R} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{\pi n x}{R}\right) \cos\left(\frac{\pi n \xi}{R}\right) \cdot \exp\left[-\frac{a \pi^2 n^2}{R^2} (t - \tau)\right] \right\}. \quad (8.18)$$

В условиях

$$A = B_1 = C_1 = 0; \quad \alpha_0 = \alpha_1 = 0; \quad A_1 = 1; \quad C = a; \quad \beta_0 = \beta_1 = \lambda;$$

$$x_0 = 0; x_1 = R; g_0(\tau, u_0(\tau)) = 0; g_1(\tau, u_1(\tau)) = q(\tau);$$

$$f(\xi, \tau, u(\xi, \tau)) = \frac{1}{c\gamma} F(\xi, \tau)$$

в (8.1), (8.9) стандартизирующая функция (8.11) принимает следующий вид:

$$w(\xi, \tau) = \theta_0(\xi)\delta(\tau) + \frac{1}{c\gamma} q(\tau)\delta(\xi - R) + \frac{1}{c\gamma} F(\xi, \tau). \quad (8.19)$$

8.4. Типовые распределенные блоки [4, 5, 10, 18]

Типовой объект управления с распределенными параметрами, описываемый линейными уравнениями (8.9), с входным воздействием $w(x, t)$ и выходом $Q(x, t)$ можно рассматривать в качестве частного варианта *скалярного распределенного блока*, под которым понимается устройство любой природы с выделенными в его структуре входным и выходным скалярными распределенными сигналами.

В практических задачах чаще всего приходится иметь дело с различными характерными частными случаями представления стандартизирующих функций (8.11)–(8.13) при изучении свойств распределенных блоков относительно каждого в отдельности из типичных реализуемых внешних воздействий на объект.

Один из наиболее распространенных на практике вариантов такого представления в (8.9), (8.10) сводится к виду

$$w(\xi, \tau) = \varphi(\xi)v(\tau) \quad (8.20)$$

с сосредоточенными внешними воздействиями $v(\tau)$ и фиксированными законами $\varphi(\xi)$ пространственного распределения входного сигнала.

Подстановка равенства (8.20) в (8.10) приводит к следующему соотношению, связывающему выход объекта с управлением $v(\tau)$:

$$Q(x, t) = \int_0^t S(x, t - \tau) v(\tau) d\tau = S(x, t) * v(t), \quad (8.21)$$

где

$$S(x, t - \tau) = \int_{x_0}^{x_1} G(x, \xi, t - \tau) \varphi(\xi) d\xi = G(x, \xi, t - \tau) \otimes \varphi(\xi), \quad (8.22)$$

и символами $*$ и \otimes обозначены, соответственно, операция *свертки* по временной переменной (интегрирования по времени произведения $S(x, t - \tau)v(\tau)$) и операция (8.22) пространственного интегрирования

произведения $G(x, \xi, t - \tau)\varphi(\xi)$, называемая *пространственной композицией*.

Выражение (8.21) для оценки реакции объекта в каждой фиксированной точке x отрезка $[x_0, x_1]$ по существу ничем не отличается от соотношения между входом $w(t)$ и выходом $Q(t)$ линейной сосредоточенной системы с соответствующей импульсной переходной функцией (функцией Грина) $G(t)$.

Вся специфика пространственной распределенности сказывается здесь только в выражениях для функций Грина $S(x, t - \tau)$ в (8.22), зависящих от пространственной координаты как от параметра. Распределенные блоки вида (8.21) с сосредоточенным входом и распределенным выходом называются *переходными x -блоками*.

К типовым распределенным блокам можно отнести также «обратный» вариант с распределенным входным воздействием $w(\xi, \tau)$ и сосредоточенным скалярным или векторным выходом, в качестве которого часто рассматриваются значения функции состояния $Q(x_k^{**}, t)$ в одной x_1^{**} или в нескольких фиксированных точках $x_k^{**} \in [x_0, x_1]$, $k = \overline{1, m}$.

Подобный блок, описываемый в рассматриваемом случае по-прежнему для задачи (8.9) основным соотношением (8.10), но для фиксированных значений $x = x_k^{**}$, называется *переходным ξ -блоком*.

На практике очень часто встречаются распределенные блоки с сосредоточенными входами и выходами, моделирующие поведение функции состояния объекта $Q(x_k^{**}, t)$ в фиксированных точках $x_k^{**} \in [x_0, x_1]$, $k = \overline{1, m}$, при сосредоточенном управлении $v(\tau)$ в (8.20).

Будем называть такие блоки *$x\xi$ -блоками*, поскольку они обладают свойствами как x -, так и ξ -блоков по сосредоточенному характеру сигналов соответственно на входе и на выходе блока. Указанные свойства, как известно, характеризуют объекты с сосредоточенными параметрами, однако $x\xi$ -блок принципиально отличается от них видом своей функции Грина.

Пример [18].

Объект (8.14)–(8.17) с функцией Грина (8.18) при сосредоточенном граничном управлении $q(t)$ в условиях $\theta_0(x) = 0$, $F(x, t) = 0$, когда стандартизирующая функция (8.19) принимает вид (8.20):

$$w(\xi, \tau) = \frac{1}{c\gamma} \delta(\xi - R)\varphi(\tau), \quad (8.23)$$

представляет собой согласно (8.21)–(8.23) x -блок:

$$\theta(x, t) = \frac{1}{c\gamma} \int_0^t G(x, R, t - \tau) q(\tau) d\tau. \quad (8.24)$$

Другие примеры и анализ свойств типовых x -блоков приведены в [18].

8.5. Передаточные функции ОРП [4, 5, 10, 18]

Обычные правила применения преобразования Лапласа для функций состояния $Q(t)$ сосредоточенных систем полностью переносятся на распределенные функции состояния $Q(x, t)$, где в этом случае пространственная переменная x просто выступает в роли «постороннего» параметра.

Известное правило операционного исчисления, согласно которому изображение L , по переменной t свертки функций равно произведению изображений этих функций, приводит основное вход-выходное соотношение (8.10) к виду следующей пространственной композиции:

$$\tilde{Q}(x, p) = \int_{x_0}^{x_1} \tilde{G}(x, \xi, p) \tilde{w}(\xi, p) d\xi = \tilde{G}(x, \xi, p) \otimes \tilde{w}(\xi, p), \quad (8.25)$$

где $\tilde{Q}(x, p)$, $\tilde{G}(x, \xi, p)$ и $\tilde{w}(\xi, p)$ – соответственно изображения выхода объекта $Q(x, t)$, функции Грина $G(x, \xi, t)$ и стандартизирующей функции $w(\xi, \tau)$, а p – комплексная переменная преобразования Лапласа.

По аналогии с сосредоточенной системой изображение функции Грина называется *передаточной функцией* $W(x, \xi, p)$ *объекта с распределенными параметрами* (распределенного блока) (8.9):

$$W(x, \xi, p) = \tilde{G}(x, \xi, p). \quad (8.26)$$

Указанная аналогия по существу заключается здесь лишь в том, что передаточная функция как для сосредоточенной, так и для распределенной системы является изображением ее импульсной переходной функции.

В то же время принципиальная специфика распределенной системы заключается в том, что вместо обычного произведения передаточной функции и изображения входа здесь *используется операция пространственной композиции* (8.25) для получения изображения функции состояния объекта.

Лишь изображение выходной величины $\tilde{Q}(x, p)$ x -блока представляется согласно соотношениям (8.21), (8.22) для каждого фиксиро-



ванного значения пространственной координаты x обычным производением

$$\tilde{Q}(x, p) = W_x(x, p) \tilde{v}(p) \quad (8.27)$$

передаточной функции и изображения входного воздействия, подобно сосредоточенным системам, если ввести здесь определение $W_x(x, p)$ передаточной функции x -блока согласно соотношению

$$W_x(x, p) = \tilde{S}(x, p) = \int_{x_0}^{x_1} \tilde{G}(x, \xi, p) \varphi(\xi) d\xi = \int_{x_0}^{x_1} W(x, \xi, p) \varphi(\xi) d\xi. \quad (8.28)$$

Следовательно, вся специфика по сравнению с сосредоточенными системами в данном частном случае сводится лишь к самим выражениям для $W_x(x, p)$, которые не зависят от пространственной переменной входа и должны учитывать параметрическую зависимость от выходного пространственного аргумента.

Выражения для передаточных функций большого числа типовых распределенных блоков приведены в [4, 5, 15].

8.6. Соединения распределенных блоков [4, 5, 10, 18]

Способы получения передаточных функций различных соединений распределенных блоков отличаются значительной спецификой по сравнению с сосредоточенными системами. Лишь на $x\xi$ -блоки полностью распространяются все соответствующие правила, установленные для ССП.

Параллельное и последовательное соединение распределенных блоков

Передаточная функция $W(x, \xi, p)$ параллельно соединенных распределенных блоков по аналогии с подобной операцией в стационарных системах с сосредоточенными параметрами определяется в виде суммы их передаточных функций.

Передаточная функция $W(x, \xi, p)$ последовательного соединения двух распределенных блоков определяется в форме пространственной композиции передаточных функций $W_1(x, \xi, p)$ и $W_2(x, \xi, p)$ составляющих блоков, взятых в порядке, обратном по отношению к порядку их следования в схеме данного соединения:

$$W(x, \xi, p) = \int_{x_0}^{x_1} W_2(x, \eta, p) W_1(\eta, \xi, p) d\eta = W_2(x, \eta, p) \otimes W_1(\eta, \xi, p). \quad (8.29)$$

Это означает адекватную *некоммутативность последовательного соединения, в котором нельзя менять местами соединяемые блоки.*

Данные выводы легко распространяются на любое число последовательно соединяемых блоков.

Переходные блоки для последовательного соединения распределенных и сосредоточенных звеньев

При описании взаимодействия ОРП с сосредоточенным регулятором должны быть использованы специальные переходные блоки, согласующие входные и выходные сигналы объекта и регулятора различной пространственной размерности.

Такие блоки, во-первых, моделируют на своем выходе сигнал с датчика обратной связи, помещенного в точке $x = a^* \in [x_0, x_1]$, при подаче на их вход распределенной функции состояния объекта $Q(x, t)$ (ξ -блок) и, во-вторых, описывают управляющее воздействие на ОРП в фиксированной точке $x = b^* \in [x_0, x_1]$, формируемое по выходному сигналу сосредоточенного регулятора (x -блок) (рис. 8.1).

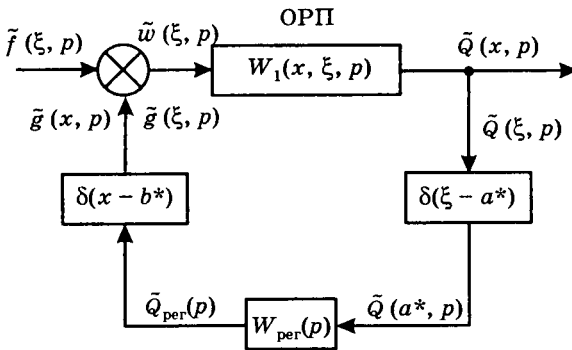


Рис. 8.1. Структурная схема замкнутой системы управления ОРП с сосредоточенным регулятором

В первом случае входной распределенный сигнал $\tilde{Q}(x, p)$ ξ -блока преобразуется в сосредоточенный $\tilde{Q}(a^*, p)$ на его выходе, и тогда его передаточная функция $W_{\xi}(\xi, p)$ описывается с помощью пространственной δ -функции, сосредоточенной в точке $\xi = a^*$ [4, 10, 18]:

$$W_{\xi}(\xi, p) = \delta(\xi - a^*). \quad (8.30)$$

Во втором случае входной сигнал $\tilde{Q}_{\text{пер}}(p)$ с выхода сосредоточенного регулятора преобразуется в выходной сигнал $\tilde{g}(x, p)$, формируемый в заданной точке $x = b^*$ в некотором x -блоке с передаточной функцией $W_x(x, p)$, которая может быть представлена в виде

$$W_x(x, p) = \psi_1(x)\delta(x - b^*) + \psi_2(x)\delta'(x - b^*) \quad (8.31)$$

с известными коэффициентами ψ_1 и ψ_2 , определяемыми выражениями (8.11)–(8.13) для стандартизирующей функции. Распространенный вариант $\psi_1 = 1, \psi_2 = 0$ показан на рис. 8.1.

Переходные ξ - и x -блоки вида (8.30), (8.31) по определению являются статическими, так как их передаточные функции не зависят от переменной p .

Распределенные блоки, охваченные обратной связью

Задача определения передаточной функции $W(x, \xi, p)$ распределенного блока $W_1(x, \xi, p)$, охваченного обратной связью $W_2(x, \xi, p)$, оказывается в общем случае очень сложной и сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма второго рода, которое, вообще говоря, не может быть получено в явном виде [4, 10, 15, 18].

Однако в целом ряде частных, но практически важных случаев данное интегральное уравнение сводится к алгебраическому. Это относится прежде всего к распространенной на практике ситуации, при которой блок обратной связи является *вырожденным*, т. е. его передаточная функция представляется в виде произведения функций, каждая из которых зависит только от одного из пространственных аргументов входа или выхода.

Пусть, в частности, этот блок состоит из последовательно соединенных сосредоточенного регулирующего устройства с передаточной функцией $W_{\text{пер}}(p)$ и переходных ξ - и x -блоков (8.30), (8.31), моделирующих измерение функции состояния в точке $x = a^*$ и подачу управляющего воздействия в точке $x = b^*$ в частном случае $\psi_1 = 1, \psi_2 = 0$ в (8.31) (см. рис. 8.1). В таком случае будем иметь вырожденный блок обратной связи:

$$W_2(x, \xi, p) = \delta(x - b^*)W_{\text{пер}}(p) \delta(\xi - a^*), \quad (8.32)$$

что позволяет получить формулу для вычисления $W(x, \xi, p)$ [4, 10, 18]:

$$W(x, \xi, p) = W_1(x, \xi, p) + \frac{W_{\text{пер}}(p)W_1(x, b^*, p)W_1(a^*, \xi, p)}{1 - W_{\text{пер}}(p)W_1(a^*, b^*, p)}, \quad (8.33)$$

полностью совпадающую с соответствующим результатом для сосредоточенной системы при $x = a^*, \xi = b^*$, т. е. для $x\xi$ -блока $W_1(a^*, b^*, p)$.

8.7. Точные методы фактического определения основных характеристик ОРП [3, 4, 10, 13–15, 18, 19]

В этих целях на практике широко используются различные виды интегральных преобразований функции состояния ОРП, главный смысл применения которых заключается в замене операций дифференцирования в исходных уравнениях объекта на соответствующие алгебраические операции.

Если при этом для исключения производных по времени используется, как и для ССП, преобразование Лапласа

$$\bar{Q}(x, p) = \int_0^{\infty} Q(x, t) e^{-pt} dt, \quad (8.34)$$

то в целях осуществления подобной операции с пространственными производными применяются *конечные интегральные преобразования* на ограниченном отрезке $[x_0, x_1]$ вида [3, 10, 13, 15, 18]:

$$\bar{Q}(\mu, t) = \int_{x_0}^{x_1} Q(x, t) \varphi(\mu, x) r(x) dx. \quad (8.35)$$

Здесь x – *переменная преобразования* (подобно t в (8.34)); $\varphi(\mu, x)$ – *ядро преобразования* (подобно e^{-pt} в (8.34)), $r(x)$ – *весовая функция*, отрезок $[x_0, x_1]$ – *промежуток преобразования* и μ – *параметр преобразования* (подобно комплексной переменной p в (8.34)), которые должны быть выбраны из основного условия исключения операций дифференцирования по x в исходных уравнениях объекта при переходе к изображениям.

Если в (8.34) x играет роль «постороннего» параметра, то в (8.35), наоборот, в таком качестве выступает время t .

В результате становится возможным, в зависимости от конкретного характера задачи и целей исследования, последовательно применять такого рода преобразования функции состояния объекта $Q(x, t)$ по времени и пространственным аргументам или любое одно из них, и таким образом трансформировать исходную модель к виду алгебраических или дифференциальных уравнений относительно соответствующих изображений по какой-либо одной или части переменных в пространственно-временной области определения $Q(x, t)$.

Применение операционного исчисления для построения моделей объектов с распределенными параметрами [14, 15, 18, 19]

Применение преобразования Лапласа вида (8.34) к функциям состояния $Q(x, t)$ распределенной системы, где пространственная переменная формально выступает лишь в роли некоторого дополнительного параметра, производится по обычным правилам операционного исчисления.

Поскольку выход ОРП совпадает с его функцией Грина при импульсном пространственно-временном воздействии $w(x, t)$ на его входе, то в соответствии с выражением (8.26), применение преобразования Лапласа к стандартной форме (8.9) при таком виде стандартизирующей функции $w(x, t)$ приводит к следующей краевой задаче для отыскания передаточной функции ОРП [15, 18]:

$$(Ap^2 + A_1p)W(x, \xi, p) = C(x) \frac{d^2W(x, \xi, p)}{dx^2} + B_1(x) \frac{dW(x, \xi, p)}{dx} + C_1(x)W(x, \xi, p) + \delta(x - \xi); \quad (8.36)$$

$$\Gamma_0 W = \alpha_0 W(x_0, \xi, p) + \beta_0 \frac{dW(x_0, \xi, p)}{dx} = 0; \quad (8.37)$$

$$\Gamma_1 W = \alpha_1 W(x_1, \xi, p) + \beta_1 \frac{dW(x_1, \xi, p)}{dx} = 0. \quad (8.38)$$

Ее решение (получаемое, например, классическим методом вариации произвольных постоянных) имеет следующий вид:

$$W(x, \xi, p) = \begin{cases} -\frac{1}{\sigma\Delta(p)} \varphi_1(p, \xi)\varphi_2(p, x)r(\xi), & x_0 \leq \xi \leq x, \\ -\frac{1}{\sigma\Delta(p)} \varphi_1(p, x)\varphi_2(p, \xi)r(\xi), & x \leq \xi \leq x_1. \end{cases} \quad (8.39)$$

$$\text{Здесь } r(x) = \frac{1}{C(x)} \exp\left\{\int \frac{B_1(x)}{C(x)} dx\right\},$$

$$\sigma = C(x)r(x)[MM'_1 - M'M_1];$$

$$\varphi_1(p, x) = (\Gamma_0 M_1)M - (\Gamma_0 M)M_1;$$

$$\varphi_2(p, x) = (\Gamma_1 M_1)M - (\Gamma_1 M)M_1; \quad (8.40)$$

$$\Delta(p) = \begin{vmatrix} (\Gamma_0 M) & (\Gamma_0 M_1) \\ (\Gamma_1 M) & (\Gamma_1 M_1) \end{vmatrix};$$

$M(p, x)$ и $M_1(p, x)$ – любые два линейно независимых решения однородного уравнения второго порядка, образуемого при отсутствии в правой части (8.36) дельта-функции $\delta(x - \xi)$ (штрихом в (8.40) обозначены производные от M и M_1 по x); Γ_0 и Γ_1 – линейные операторы вида (8.37), (8.38).

На практике вычисления значительно облегчаются наличием обширных справочных данных с заранее найденными функциями $\varphi_1(p, x)$, $\varphi_2(p, x)$, $r(x)$, $\Delta(p)$ и числами σ для широкого класса типовых моделей ОРП вида (8.36)–(8.38) [4, 5, 15].

Для объектов, описываемых уравнениями (8.36) первого порядка при $C(x) = 0$ с единственным нулевым граничным условием $W(x_0, \xi, p) = 0$, задача значительно упрощается и при произвольных кусочно-непрерывных зависимостях $B_1(x) \neq 0$ и $C_1(x)$ в соответствии с известной формой представления общего решения уравнения первого порядка, будем иметь [18]

$$W(x, \xi, p) = -\frac{1(x - \xi)}{B_1(\xi)} \exp \left[-\int_{x_0}^{\xi} \frac{C_1(\eta) - Ap^2 - A_1 p}{B_1(\eta)} d\eta + \int_{x_0}^x \frac{C_1(\eta) - Ap^2 - A_1 p}{B_1(\eta)} d\eta \right], \quad (8.41)$$

где $1(x - \xi) = 1$ для всех $x > \xi$ и $1(x - \xi) = 0$, если $x < \xi$.

Для случая сосредоточенного граничного управления $u_1(\tau)$ в составе стандартизирующей функции вида (8.20) при $v(\tau) = u_1(\tau)$ передаточная функция соответствующего x -блока определяется на основании (8.28) и (8.39) следующими выражениями [18]:

$$W_x(x, p) = \frac{\tilde{Q}(x, p)}{\tilde{u}_1(p)} = -\frac{C(x_1)}{\beta_1 \sigma \Delta(p)} \varphi_1(p, x) \varphi_2(p, x_1) r(x_1), \quad (8.42)$$

если $\beta_1 > 0$, и

$$\begin{aligned} W_x(x, p) &= \frac{\tilde{Q}(x, p)}{\tilde{u}_1(p)} = -\frac{1}{\alpha_1 \sigma \Delta(p)} \varphi_1(p, x) \times \\ &\times [B_1(x_1) \varphi_2(p, x_1) r(x_1) - \varphi_2'(p, x_1) C(x_1) r(x_1) - \\ &- \varphi_2(p, x_1) (C(x_1) r'(x_1) + C'(x_1) r(x_1))], \end{aligned} \quad (8.43)$$

если $\beta_1 = 0$.

Аналогичный вид имеют передаточные функции по граничному управлению $u_0(\tau)$ [18].

При сосредоточенном внутреннем управлении $\tilde{v}(p) = \tilde{u}(p)$ с фиксированным характером $\varphi(\xi) = f_1(\xi)$ его пространственного распределения выражение для $W_x(x, p)$ приобретает вид [18]

$$W_x(x, p) = -\frac{1}{\sigma\Delta(p)} \left[\varphi_2(p, x) \int_{x_0}^x \varphi_1(p, \xi) r(\xi) f_1(\xi) d\xi + \varphi_1(p, x) \int_x^{x_1} \varphi_3(p, \xi) r(\xi) f_1(\xi) d\xi \right]. \quad (8.44)$$

Как следует из (8.39)–(8.44), вид искоемых передаточных функций ОРП определяется в первую очередь решениями *дифференциального* уравнения (8.36) с краевыми условиями (8.37), (8.38), вследствие чего характер зависимости этих передаточных функций от комплексной переменной p резко усложняется по сравнению с сосредоточенными системами, для которых они представляются решениями простейших *алгебраических* уравнений и имеют поэтому элементарную дробно-рациональную структуру.

Тем не менее возможность определения точных выражений для передаточных функций в замкнутой форме является несомненным преимуществом метода преобразования Лапласа применительно к рассматриваемым объектам. Даже если эти выражения оказываются слишком сложными и «трудноанализируемыми» для непосредственного применения в целях моделирования систем управления с распределенными параметрами, они, в частности, могут быть использованы в качестве эталонов для оценки точности приближения в частотной области с помощью более простых и удобных аппроксимаций.

Примеры [4, 14, 18].

1. Для объекта (8.14)–(8.17), описываемого уравнением теплопроводности, передаточная функция (8.39) может быть получена в следующем виде:

$$W(x, \xi, p) = \begin{cases} \frac{1}{h_0(p)} h_1(p, \xi) h_2(p, x), & 0 \leq \xi \leq x, \\ \frac{1}{h_0(p)} h_1(p, x) h_2(p, \xi), & x \leq \xi \leq R; \end{cases} \quad (8.45)$$

$$\text{где } h_0(p) = a \sqrt{\frac{p}{a}} \operatorname{sh} \sqrt{\frac{p}{a}} R; \quad h_1(p, x) = ch \sqrt{\frac{p}{a}} x;$$

$$h_2(p, x) = ch \sqrt{\frac{p}{a}} (R - x); \quad (8.46)$$

При сосредоточенном управлении $\tilde{u}_1(p) = \tilde{q}(p)$ по величине теплового потока на границе $x = R$ передаточная функция $W_x(x, p)$ соответствующего распределенного x -блока от этого входа к температурному распределению $\tilde{\theta}(x, p)$ на его выходе находится согласно (8.42) по значительно более простой формуле:

$$W_x(x, p) = \frac{\tilde{\theta}(x, p)}{\tilde{q}(p)} = \frac{ch\sqrt{\frac{p}{a}}x}{\lambda\sqrt{\frac{p}{a}}sh\sqrt{\frac{p}{a}}R} = \frac{ch\sqrt{T_x p}}{\sqrt{T_0 p} sh\sqrt{T_R p}}, \quad (8.47)$$

$$T_0 = \frac{\lambda^2}{a}; \quad T_x = \frac{x^2}{a}; \quad T_R = \frac{R^2}{a}.$$

Если в условиях третьей краевой задачи на границе $x = R$

$$\lambda \frac{\partial \theta(R, t)}{\partial x} + \alpha \theta(R, t) = \alpha \theta_{\Pi}(t) \quad (8.48)$$

в роли сосредоточенного управления $\tilde{u}_1(p) = \tilde{\theta}_{\Pi}(p)$ выступает температура печи $\tilde{\theta}_{\Pi}(p)$, в которой нагревается изделие, то передаточная функция (8.47) видоизменяется следующим образом:

$$W_x(x, p) = \frac{\tilde{\theta}(x, p)}{\tilde{\theta}_{\Pi}(p)} = \frac{ch\sqrt{T_x p}}{ch\sqrt{T_R p} + \frac{\lambda}{\alpha R} \sqrt{T_R p} \cdot sh\sqrt{T_R p}}. \quad (8.49)$$

Выражения для передаточных функций ОРП часто существенно упрощаются в случаях, когда область изменения пространственной переменной можно считать полуограниченной, полагая, например, что $x_0 \leq x < x_1$, где $x_1 \rightarrow \infty$.

Если, в частности, в таких условиях для рассматриваемого ОРП в качестве сосредоточенных управлений на границе $x_0 = 0$ рассматриваются тепловой поток $\tilde{q}(p)$, температура печи $\tilde{\theta}_{\Pi}(p)$ или температура на самой границе $\tilde{\theta}(0, p)$ соответственно в условиях второй, третьей или первой краевой задачи, то передаточные функции объекта по указанным воздействиям имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} W_x(x, p) &= \frac{\tilde{\theta}(x, p)}{\tilde{q}(p)} = \frac{\exp(-\sqrt{T_x p})}{\sqrt{T_0 p}}, \\ W_x(x, p) &= \frac{\tilde{\theta}(x, p)}{\tilde{\theta}_{\Pi}(p)} = \frac{\exp(-\sqrt{T_x p})}{\sqrt{\frac{T_0}{\alpha^2} p + 1}}, \\ W_x(x, p) &= \frac{\tilde{\theta}(x, p)}{\tilde{\theta}(0, p)} = \exp(-\sqrt{T_x p}). \end{aligned} \quad (8.50)$$

В структуре этих x -блоков можно выделить в качестве «элементарных» *полуинтегрирующее звено, полупериодическое звено и звено запаздывания (затухания)* с передаточными функциями соответственно

$$W_{\text{ПИ}}(p) = \frac{1}{\sqrt{T_0 p}} ;$$

$$W_{\text{ПА}}(p) = \frac{1}{\sqrt{\frac{T_0}{\alpha^2} p + 1}} ; \quad (8.51)$$

$$W_{\text{ПЗ}}(x, p) = \exp(-\sqrt{T_x p}),$$

отличающимися от типовых (интегрирующего $W_{\text{И}}(p) = \frac{1}{T_0 p}$, аperiodического $W_{\text{А}}(p) = \frac{1}{T_{01} p + 1}$ и запаздывающего $W_{\text{З}}(p) = \exp(-\tau p)$) звеньев только тем, что в роли аргумента их передаточных функций фигурирует \sqrt{p} вместо p .

Анализ характеристик звеньев (8.50) приведен в [14].

2. Волновое уравнение

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 Q(x, t)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 Q(x, t)}{\partial x^2} + u(t) \delta'(x - x^*), \quad 0 < x < l, \quad x^* \in [0, l], \quad t > 0 \quad (8.52)$$

с начальными и граничными условиями

$$Q(x, 0) = Q_0^{(0)}(x); \quad \frac{\partial Q(x, 0)}{\partial t} = Q_0^{(1)}(x); \quad 0 \leq x \leq l; \quad (8.53)$$

$$Q(0, t) = g_0(t); \quad Q(l, t) = 0; \quad t > 0, \quad (8.54)$$

моделирует процесс гашения пульсаций расхода газа $Q(x, t)$ в газопроводе с управляемым гасителем колебаний, создающим в точке x^* его подключения к газопроводу дополнительный объемный расход газа $u(t)$ [3, 4]. Передаточная функция ОРП по этому каналу воздействия на основании (8.44) приводится к следующему виду [4]:

$$W_x(x, p) = \frac{\tilde{Q}(x, p)}{\tilde{u}(p)} = \begin{cases} \frac{\operatorname{ch} \frac{p}{c_0} x^*}{\operatorname{sh} \frac{p}{c_0} l} \operatorname{sh} \frac{p}{c_0} (l - x), & 0 \leq x^* < x, \\ \frac{\operatorname{sh} \frac{p}{c_0} x}{\operatorname{sh} \frac{p}{c_0} l} \operatorname{ch} \frac{p}{c_0} (l - x^*), & x < x^* \leq l. \end{cases} \quad (8.55)$$

При сосредоточенном воздействии по расходу газа на входе в газопровод, включаемом в граничное условие (8.54) при $x = 0$, получим, подобно (8.43), для передаточной функции x -блока от входа $\tilde{g}_0(p)$ к выходу $\tilde{Q}(x, p)$ [18]:

$$W_x(x, p) = \frac{\tilde{Q}(x, p)}{\tilde{g}_0(p)} = \frac{1}{\operatorname{sh} \frac{p}{c_0} l} \operatorname{sh} \frac{p}{c_0} (l - x). \quad (8.56)$$

Существенной особенностью передаточных функций рассматриваемого объекта по сравнению с предыдущим примером является их представление в форме трансцендентных функций, аргументом которых является сама комплексная переменная p , вместо \sqrt{p} в выражениях для передаточных функций (8.45)–(8.47), (8.49)–(8.51).

3. Рассмотрим ОРП первого порядка вида (8.8):

$$b \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} + bV \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} + \theta(x, t) = \theta_{\Pi}(x, t); \quad 0 < x < l, \quad t > 0, \quad (8.57)$$

$$\theta(x, 0) = \theta_0(x), \quad 0 \leq x \leq l; \quad \theta(0, t) = \theta^0(t), \quad t > 0, \quad (8.58)$$

моделирующий процесс нагрева партии заготовок, перемещающихся с постоянной скоростью V в печи непрерывного действия.

Передаточная функция такого объекта от стандартизирующего входа к распределению температуры $\tilde{Q}(x, p)$ на выходе непосредственно определяется выражением (8.41) при $A = 0$; $A_1 = b$; $B_1 = -bV$; $C_1 = -1$; $x_0 = 0$:

$$W(x, \xi, p) = \frac{1}{bV} \cdot 1(x - \xi) \exp\left(-\frac{bp + 1}{bV}(x - \xi)\right). \quad (8.59)$$

При сосредоточенном управлении по температуре $\tilde{Q}_{\Pi}(p)$ печного пространства, равномерно распределенной по длине печи, передаточ-

ная функция x -блока, моделирующего свойства объекта по такому входу, представляет собой пространственную композицию (8.28) при $\varphi(\xi) = 1$ и, следовательно, здесь с учетом (8.59)

$$W_x(x, p) = \frac{\tilde{\theta}(x, p)}{\tilde{\theta}_\Pi(p)} = \int_0^l W(x, \xi, p) d\xi = \\ = \frac{1}{bV} \int_0^x \exp\left[-\frac{bp+1}{bV}(x-\xi)\right] d\xi = \frac{1}{bp+1} \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{bV}\right) \exp\left(-\frac{x}{V}p\right)\right].$$

Метод конечных интегральных преобразований [3, 10, 13, 15, 18, 19]

Метод конечных интегральных преобразований может быть распространен на широкий класс типовых линейных объектов с распределенными параметрами, описываемых краевыми задачами вида (8.1)–(8.4) с постоянными, подобно (8.9), коэффициентами $A, A_1, \alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1$ и не зависящими от t коэффициентами C, B_1 и C_1 .

Основные теоретические положения

Для того чтобы после применения конечного интегрального преобразования вида (8.35) уравнение объекта не содержало в пространстве изображений операций дифференцирования по пространственной переменной x , необходимо, чтобы ядро преобразования $\varphi(\mu, x)$ являлось решением уравнения

$$C(x) \frac{d^2 \varphi(\mu, x)}{dx^2} + B_1(x) \frac{d\varphi(\mu, x)}{dx} + C_1(x) \varphi(\mu, x) = -\mu^2 \varphi(\mu, x) \quad (8.60)$$

с однородными граничными условиями:

$$\alpha_0 \varphi(\mu, x_0) + \beta_0 \frac{d\varphi(\mu, x_0)}{dx} = 0; \quad (8.61) \\ \alpha_1 \varphi(\mu, x_1) + \beta_1 \frac{d\varphi(\mu, x_1)}{dx} = 0,$$

а весовая функция определялась выражением

$$r(x) = \frac{1}{C(x)} \exp\left[\int \frac{B_1(x)}{C(x)} dx\right]. \quad (8.62)$$

Краевая задача (8.60), (8.61) (*задача Штурма–Лиувилля, спектральная задача*) имеет, как известно из общей теории таких задач, отличные от тождественного нуля решения только при определенных вещественных значениях параметра μ^2 , которые называются *соб-*

ственными значениями, или собственными числами, а сами соответствующие таким числам решения – собственными функциями этой задачи Штурма–Лиувилля.

Собственные числа μ_n^2 , $n = 1, 2, \dots$ образуют бесконечную возрастающую последовательность – спектр собственных чисел $\mu_1^2 < \mu_2^2 < \mu_3^2 < \dots$

Каждому собственному числу соответствует одна собственная функция $\varphi_n(\mu_n, x)$, $n = 1, 2, \dots$, определяемая решением задачи (8.60), (8.61) с точностью до постоянного множителя, который можно выбирать из соображений удобства нормирования $\varphi_n(\mu_n, x)$.

Система собственных функций образует такую полную, ортогональную, а при соответствующем выборе постоянного множителя и ортонормированную систему функций, что всякая функция состояния $Q(x, t)$ рассматриваемого объекта при некоторых (практически малостеснительных) допущениях может быть представлена ее разложением в сходящийся (в среднем) бесконечный ряд (ряд Фурье):

$$Q(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{Q}_n(\mu_n, t) \varphi_n(\mu_n, x), \quad (8.63)$$

где $\bar{Q}_n(\mu_n, t)$ – изображение $Q(x, t)$ согласно (8.35) для $\mu = \mu_n$ и, следовательно, $\bar{Q}_n(\mu_n, t)$ можно рассматривать как коэффициенты разложения $Q(x, t)$ в бесконечный ряд по системе $\{\varphi_n(\mu_n, x)\}$, а формулу (8.63) как правило перехода к оригиналу (правило обратного преобразования).

Решение краевой задачи (8.60), (8.61) может быть найдено (с точностью до постоянного множителя) в виде

$$\begin{aligned} \varphi(\mu, x) = & \left\{ \beta_0 \frac{dM_1(\mu, x_0)}{dx} + \alpha_0 M_1(\mu, x_0) \right\} M(\mu, x) - \\ & - \left\{ \beta_0 \frac{dM(\mu, x_0)}{dx} + \alpha_0 M(\mu, x_0) \right\} M_1(\mu, x), \end{aligned} \quad (8.64)$$

а собственные значения в соответствии с граничным условием (8.61) для $x = x_1$ – из характеристического уравнения

$$\beta_1 \frac{d\varphi(\mu, x_1)}{dx} + \alpha_1 \varphi(\mu, x_1) = 0, \quad (8.65)$$

где $M(\mu, x)$ и $M_1(\mu, x)$ – какие-либо линейно-независимые частные решения уравнения (8.60).

Применение интегрального преобразования (8.35) к уравнению ОРП в (8.9) приводит к обыкновенному дифференциальному уравнению второго порядка по переменной t в пространстве изображений

$$A \frac{d^2 \bar{Q}_n(\mu_n, t)}{dt^2} + A_1 \frac{d \bar{Q}_n(\mu_n, t)}{dt} = -\mu_n^2 \bar{Q}_n(\mu_n, t) + \bar{f}_n(\mu_n, t) + R(\mu_n, t) \quad n = 1, 2, \dots \quad (8.66)$$

с преобразованными согласно (8.35) начальными условиями

$$\bar{Q}_n(\mu_n, 0) = \bar{Q}_0^{(0)}(\mu_n); \quad \frac{d \bar{Q}_n(\mu_n, 0)}{dt} = \bar{Q}_0^{(1)}(\mu_n), \quad n = 1, 2, \dots \quad (8.67)$$

Здесь $\bar{f}_n(\mu_n, t)$ – изображение функции f в (8.1);

$$R(\mu_n, t) = R_1(\mu_n, t) - R_0(\mu_n, t), \quad (8.68)$$

где $R_i(\mu_n, t) = \frac{g_i(t)}{\beta_i} h(x_i) \varphi_n(\mu_n, x_i)$, $i = 0, 1$; если $\beta_i \neq 0$; (8.69)

$$R_i(\mu_n, t) = -\frac{g_i(t)}{\alpha_i} h(x_i) \frac{d\varphi_n(\mu_n, x_i)}{dx}, \quad i = 0, 1; \text{ если } \beta_i = 0, \alpha_i \neq 0;$$

$g_i(t)$ – заданные функции в краевых условиях (8.3), (8.4); $h(x) = C(x)r(x)$ и $\bar{Q}_0^{(0)}(\mu_n)$; $\bar{Q}_0^{(1)}(\mu_n)$ – коэффициенты разложения в ряд вида (8.63) функций $Q_0^{(0)}(x)$ и $Q_0^{(1)}(x)$ в (8.2).

Соответствующая задача Коши (8.66), (8.67) с постоянными коэффициентами A и A_1 имеет известное решение следующего вида:

$$\begin{aligned} \bar{Q}_n(\mu_n, t) = & \int_0^t [\bar{f}_n(\mu_n, \tau) + R(\mu_n, \tau)] G_n^*(\mu_n, t - \tau) d\tau + \\ & + \bar{Q}_0^{(0)}(\mu_n) \left[A \frac{dG_n^*(\mu_n, t)}{dt} + A_1 G_n^*(\mu_n, t) \right] + \\ & + \bar{Q}_0^{(1)}(\mu_n) A G_n^*(\mu_n, t), \end{aligned} \quad (8.70)$$

где изображение по Лапласу функции $G_n^*(\mu_n, t)$ определяется выражением

$$\tilde{G}_n^*(\mu_n, p) = \frac{1}{Ap^2 + A_1p + \mu_n^2}.$$

Определение базовых характеристик ОРП

С помощью выражений (8.63), (8.70), описывающих функцию состояния ОРП, легко определяются все базовые характеристики объекта. В частности, при нулевых начальных, однородных граничных условиях и импульсном воздействии f эти выражения определяют функцию Грина ОРП в форме сходящегося бесконечного ряда

$$G(x, \xi, t - \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} G_n^*(\mu_n, t - \tau) \varphi_n(\mu_n, x) \varphi_n(\mu_n, \xi) r(\xi), \quad (8.71)$$

а ее изображение по Лапласу согласно (8.26), (8.71) приводит к передаточной функции объекта в виде, отличном от конечных соотношений (8.39):

$$W(x, \xi, p) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{Ap^2 + A_1p + \mu_n^2} \varphi_n(\mu_n, x) \varphi_n(\mu_n, \xi) r(\xi). \quad (8.72)$$

В отличие от сложных трансцендентных зависимостей передаточных функций ОРП типа (8.39) от комплексной переменной p выражение (8.72) означает, что рассматриваемый ОРП в структурном отношении представляется параллельным соединением бесконечного числа стандартных динамических звеньев второго порядка:

$$W_n(x, \xi, p) = \frac{k_n(x, \xi)}{Ap^2 + A_1p + \mu_n^2}, \quad (8.73)$$

$$k_n(x, \xi) = \varphi_n(\mu_n, x) \varphi_n(\mu_n, \xi) r(\xi)$$

с коэффициентами передачи $k_n(x, \xi)$, зависящими от пространственных аргументов как от параметра.

Тем самым устанавливаются наглядные аналогии с линейными сосредоточенными системами, принципиальное отличие от которых заключается в структурном моделировании объектов с распределенными параметрами с помощью именно *бесконечного* числа таких звеньев.

Примеры [4, 5, 10, 14, 15, 18].

1. Применение метода конечных интегральных преобразований приводит к формуле (8.18) для функции Грина и к следующему выражению для передаточной функции объекта (8.14)–(8.17):

$$W(x, \xi, p) = \frac{1}{R} \left[\frac{1}{p} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{\pi n x}{R}\right) \cos\left(\frac{\pi n \xi}{R}\right) \frac{T_n}{T_n p + 1} \right],$$

$$T_n = \frac{1}{\mu_n^2} = \frac{R^2}{a\pi^2 n^2}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (8.74)$$

свидетельствующему о его структурном представлении параллельным соединением одного интегрирующего и бесконечного числа апериодических звеньев с постоянными времени, убывающими обратно пропорционально квадратам натурального ряда чисел.

При сосредоточенном граничном управлении $\tilde{q}(p)$ в соответствии с общим выражением (8.28) и формулой для составляющей вида (8.20) стандартизирующей функции (8.19), содержащей $q(\tau)$, получим передаточную функцию (8.47) согласно (8.74) в виде

$$W_x(x, p) = \frac{a}{\lambda} W(x, R, p) = \frac{1}{c\gamma R} \left[\frac{1}{p} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos\left(\frac{\pi n x}{R}\right) \frac{\frac{R^2}{a\pi^2 n^2}}{\frac{R^2}{a\pi^2 n^2} p + 1} \right]. \quad (8.75)$$

Если на границе $x = R$ выполняется условие (8.48), то вместо (8.74) будем иметь

$$W(x, \xi, p) = \frac{1}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\eta_n}{\eta_n + \sin \eta_n \cdot \cos \eta_n} \cos\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) \cos\left(\eta_n \frac{\xi}{R}\right) \frac{T_n^*}{T_n^* p + 1},$$

$$T_n^* = \frac{R^2}{a\eta_n^2}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (8.76)$$

где $\eta_n, n = 1, 2, \dots$ – бесконечная возрастающая последовательность корней трансцендентного уравнения

$$\eta \operatorname{tg} \eta - \frac{\alpha R}{\lambda} = 0.$$

В данном случае структура объекта согласно (8.76) представляется, в отличие от (8.74), только апериодическими звеньями с постоянными времени T_n^* .

2. Для объекта (8.52)–(8.54) передаточная функция находится методом конечных интегральных преобразований в форме ряда

$$W(x, \xi, p) = \frac{2c_0^2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\pi n \frac{x}{l}\right) \sin\left(\pi n \frac{\xi}{l}\right) \frac{1}{p^2 + c_0^2 \mu_n^2}, \quad (8.77)$$

согласно которой объект представляется в структурном отношении параллельным соединением бесконечного числа колебательных (консервативных) звеньев.

Стандартные выражения для почленно вычисляемых оригиналов изображений (8.74)–(8.77) приводят к формулам для функций Грина соответствующих ОРП. Выражения для передаточных функций в форме разложения в ряды по собственным функциям для большого числа типовых ОРП приведены в [4, 5, 14].

8.8. Приближенное моделирование ОРП [1, 3, 6, 7, 11, 14, 18, 19, 22, 24]

Здесь рассматриваются только *аналитические* методы получения приближенных моделей ОРП по известным точным описаниям распределенных блоков.

В настоящее время разработан целый ряд аналитических способов построения приближенных моделей объектов с распределенными параметрами. Все они могут быть условно подразделены на две основные группы по «предмету аппроксимации».

Первая группа образуется различными способами упрощенного представления самих исходных дифференциальных уравнений объекта, последующее решение которых известными методами позволяет получить в определенных конкретных условиях удовлетворительные по точности описания свойств ОРП в сравнительно простом виде.

Методы *второй группы* базируются на приближенном представлении (как правило, в типовой для ССП форме соответствующих передаточных функций (ПФ)) точных решений уравнений в частных производных, моделирующих поведение ОРП.

Методы аппроксимации исходных уравнений объекта

Способы приближенного описания ОРП, связанные с упрощением самих уравнений объекта, в свою очередь могут быть реализованы либо путем перехода к более простым уравнениям в производных, сохраняющим пространственно-временной характер функции состояния объекта и допускающим по возможности точное аналитическое решение, либо непосредственным преобразованием к конечномерной системе в рамках моделей ССП путем использования подходящей процедуры дискретизации.

Необходимо иметь в виду, что применение широко распространенных на практике конечномерных приближений может привести к потере существенных свойств, определяемых пространственной распределенностью управляемых процессов [4, 10, 18].

1. Методы перехода к распределенным блокам упрощенной структуры

Методы малого параметра [7, 18]

Во многих конкретных ситуациях знание базовых закономерностей предметной области позволяет значительно упростить уравнения моделей ОРП без существенной потери в точности описания объекта за счет обоснованного пренебрежения отдельными составляющими дифференциальных операторов или их представления в упрощенной форме.

По существу такого рода упрощения обосновываются малостью сокращаемых членов в уравнениях (а также в граничных и начальных условиях), которая формально, как правило, может быть учтена вводом в структуру математических моделей соответствующих малых множителей (*малых параметров*), моделирующих физически обоснованную степень влияния рассматриваемых факторов на поведение функции состояния объекта.

После представления краевой задачи, моделирующей ОРП в форме, содержащей малый параметр ϵ , вся дальнейшая проблема сводится к исследованию зависимости ее решений от величины ϵ .

Имея в распоряжении эту зависимость в достаточно простой форме, можно построить строгую алгоритмическую процедуру поиска приближенного решения для нулевого значения малого параметра, оценить погрешности, связанные с его конечной величиной, и перейти, если потребуются, к соответствующим уточнениям.

Методы, реализующие подобную формальную схему поиска приближенных моделей, получили название *методов малого параметра*.

Обоснование и описание техники их применения для построения приближенных моделей объектов, описываемых уравнениями в частных производных, приводится в специальной литературе [7].

Методы линеаризации [3, 6, 18]

В случаях, когда дифференциальные уравнения ОРП и (или) граничные условия оказываются существенно нелинейными, приходится учитывать соответствующие нелинейности для получения описания моделей объекта с приемлемой точностью.

Если в качестве выхода ОРП рассматриваются достаточно малые отклонения функции состояния объекта и ее производных от некоторого стационарного режима, вызванные соответственно малыми вариациями внешних воздействий, то при гладких функциональных зависимостях, описывающих нелинейные эффекты, можно при моделировании объекта применить широко используемый в теории управления прием *линеаризации*. Этот прием сводится, как известно, к разложению нелинейных зависимостей в ряд Тейлора около ста-

ционарного режима с последующим учетом только его линейных членов в силу высшего порядка малости отбрасываемого остатка ряда. В результате получаем линейное уравнение, в первом приближении с удовлетворительной точностью моделирующее поведение нелинейного объекта управления в указанных условиях, и далее можно использовать все описанные выше способы описания линейных ОРП применительно к линеаризованной модели.

Соответствующие примеры приведены в [3, 6, 18].

2. Методы конечномерных приближений

Методы модального описания объекта [1, 3–6, 10, 12, 15, 18, 19]

Ввиду сходимости ряда (8.63) при найденной системе собственных функций и собственных чисел объекта достаточно большое, но конечное число N уравнений (8.66), (8.67) во многих случаях обеспечивает удовлетворительное по точности *модальное* описание ОРП в типичной для систем с сосредоточенными параметрами форме.

Здесь в роли переменных состояния фигурируют *временные моды* – коэффициенты $\bar{Q}_n(\mu_n, t)$ разложения функции состояния объекта $Q(x, t)$ в ряд (8.63).

При этом граничные входные воздействия $g_0(t, u_0(t))$ и $g_1(t, u_1(t))$ (в том числе действующие на границах $x = x_0$ и $x = x_1$ сосредоточенные управления $u_0(t)$ и $u_1(t)$) непосредственно фигурируют в составе функций $R(\mu_n, t)$ (согласно (8.68), (8.69)), включаемых в качестве аддитивной составляющей в правые части уравнений (8.66). Внутренние воздействия $f(x, t, u(x, t))$ (в том числе распределенные управления $u(x, t)$) аналогичным образом входят в эти уравнения в форме коэффициентов $\bar{f}_n(\mu_n, t)$ разложения $f(x, t, u(x, t))$ в ряд по собственным функциям.

Подобное представление объектов с распределенными параметрами возможно и для более широкого круга моделей ОРП [12, 19].

Существует целый ряд различных методов (иногда называемых *псевдомодальными*), обобщающих этот способ аппроксимации путем подобного (8.63) представления функции состояния для объектов различного уровня сложности в виде *квазимодального* разложения по некоторой заранее выбираемой системе *базисных* функций $\phi_n(x)$ (*базис разложения*), вообще говоря, отличных от $\phi_n(\mu_n, x)$ [12, 19].

Примеры [18]. Модальное описание объекта (8.14)–(8.17) принимает на основании (8.66), (8.67) вид следующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений *первого* порядка:

$$\frac{d\bar{\theta}_n}{dt} = -\mu_n^2 \bar{\theta}_n + \frac{1}{c\gamma} \bar{F}_n + \frac{(-1)^n}{E_n} \frac{q(t)}{\lambda}; \quad \bar{\theta}_n(0) = \bar{\theta}_0(\mu_n),$$

$$E_n = \begin{cases} \sqrt{\frac{R}{a}}, & n = 0, \\ \sqrt{\frac{R}{2a}}, & n = 1, 2, \dots, N; \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N, \quad (8.78)$$

где $\bar{\theta}_n = \bar{\theta}(\mu_n, t)$; $\bar{F}_n = \bar{F}(\mu_n, t)$; $\bar{\theta}_n(0) = \bar{\theta}(\mu_n, 0)$ и $\bar{\theta}(\mu_n, t)$, $\bar{F}(\mu_n, t)$, $\bar{\theta}_0(\mu_n)$ – изображения вида (8.35) температурного поля $\theta(x, t)$, функции внутреннего тепловыделения $F(x, t)$ и начального температурного распределения $\theta_0(x)$.

Для ОРП (8.52)–(8.54) получаем уже систему (8.66)–(8.67) второго порядка:

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{d^2 \bar{Q}_n}{dt^2} = -\mu_n^2 \bar{Q}_n - \frac{\mu_n}{E_n} \cos\left(\frac{\pi n x^*}{l}\right) u(t) + \frac{\mu_n}{E_n} g_0(t);$$

$$E_n = \sqrt{\frac{l}{2}}; \quad \bar{Q}_n(0) = \bar{Q}_0^0(\mu_n);$$

$$\frac{d\bar{Q}_n(0)}{dt} = \bar{Q}_0^{(1)}(\mu_n), \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (8.79)$$

где $\bar{Q}_0^{(0)}(\mu_n)$ и $\bar{Q}_0^{(1)}(\mu_n)$ – изображения вида (8.35) функций $Q_0^{(0)}(x)$ и $Q_0^{(1)}(x)$ в (8.53).

Примеры применения методов псевдомодального представления нелинейных ОРП приведены в [18, 19].

Дифференциально-разностные модели ОРП [3, 11, 18, 22]

Все известные разностные методы приближенного описания ОРП используют различные способы *пространственного, временного или пространственно-временного квантования* области изменения аргументов входа и выхода рассматриваемого распределенного блока.

Выполняя дискретизацию по пространственной переменной x , разобьем отрезок ее изменения $[x_0, x_1]$ на N равных интервалов при

$$s = \frac{x_1 - x_0}{N} \quad \text{точками } x^{(0)} = x_0, x^{(1)} = s + x_0, x^{(2)} = 2s + x_0, \dots, x^{(N)} = x_1,$$

образующими равномерную пространственную сетку с шагом s :

$$x^{(n)} = ns + x_0, \quad n = \overline{0, N}.$$

Приближенные выражения для первой и второй производных от функции состояния ОРП $Q(x, t)$ по пространственной координате в точке $x = x^{(n)}$ могут быть теперь получены с погрешностью порядка s и s^2 соответственно в следующем виде:

$$\frac{\partial Q(x^{(n)}, t)}{\partial x} \cong \frac{Q(x^{(n+1)}, t) - Q(x^{(n)}, t)}{s};$$

$$\frac{\partial Q(x^{(n)}, t)}{\partial x} \cong \frac{Q(x^{(n)}, t) - Q(x^{(n-1)}, t)}{s}; \quad (8.80)$$

$$\frac{\partial^2 Q(x^{(n)}, t)}{\partial x^2} \cong \frac{Q(x^{(n+1)}, t) - 2Q(x^{(n)}, t) + Q(x^{(n-1)}, t)}{s^2}. \quad (8.81)$$

Используя приближенное представление пространственных производных их разностными аналогами в уравнениях объекта и сохраняя там производные по времени в дифференциальной форме, можно получить различные варианты аппроксимации исходной модели ОРП соответствующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений относительно $Q(x^{(n)}, t)$.

Введем далее для краткости обозначения:

$$Q(x^{(n)}, t) = Q_n(t), \quad n = \overline{0, N}$$

и ограничимся для простоты двумя типичными частными случаями модели ОРП.

Рассмотрим сначала линейное одномерное уравнение теплопроводности с постоянными коэффициентами, получаемое из (8.1) при $A = 0$; $A_1 = 1$; $C \equiv a$; $B_1 \equiv C_1 \equiv 0$.

Заменяя в этом уравнении для всех точек $x^{(n)}$, $n = \overline{1, N-1}$ вторые производные $\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}$ приближенным выражением (8.81) и полагая в его правой части $f(x^{(n)}, t, u(x^{(n)}, t)) = f_n(t)$, получим следующую дифференциально-разностную аппроксимацию модели данного объекта:

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{a}{s^2} (Q_{n+1} - 2Q_n + Q_{n-1}) + f_n(t); \quad n = \overline{1, N-1} \quad (8.82)$$

в виде типичной для ССП системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, разрешенных относительно первой производной (*нормальная форма* записи уравнений объекта; описание в *пространстве состояний*). Характерной особенностью этой системы является *трехдиагональная* матрица ее коэффициентов, содержащая в каждой строке только три отличных от нуля элемента при любом значении N . Заметим, что в систему (8.82) не входят уравнения для Q_0 и Q_N , поскольку для них не определены значения второй

производной согласно (8.81). Эти величины должны быть найдены с помощью граничных условий (8.3), (8.4), которые с использованием выражений (8.80) при постоянных коэффициентах (подобно (8.9)) приводятся к виду

$$Q_0(t) = \frac{1}{\alpha_0 - \frac{\beta_0}{s}} \left[g_0(t, u_0(t)) - \frac{\beta_0}{s} Q_1(t) \right]; \quad (8.83)$$

$$Q_N(t) = \frac{1}{\alpha_1 + \frac{\beta_1}{s}} \left[g_1(t, u_1(t)) - \frac{\beta_1}{s} Q_{N-1}(t) \right].$$

Подстановка выражений (8.83) с заданными внешними воздействиями g_0 и g_1 на границах области изменения пространственной переменной в первое и последнее уравнения системы (8.82) приводит к ее замыканию относительно $N - 1$ значений сеточной функции $Q_n(t)$, $n = \overline{1, N - 1}$.

Дополняя полученное описание объекта в соответствии с (8.2) начальными условиями

$$Q_n(0) = Q_0^{(0)}(x^{(n)}), \quad n = \overline{1, N - 1}, \quad (8.84)$$

окончательно получим приближенную модель объекта в форме соответствующей задачи Коши.

Сосредоточенные управляющие воздействия $u_0(t)$ и $u_1(t)$ на границах $x = x_0$ и $x = x_1$ включаются в уравнения объекта через граничные условия согласно (8.83), а управление $u(x, t)$ в правой части $f(x, t, u(x, t))$ уравнения (8.1) входит в состав $f_n(t)$ в (8.82) и заменяется здесь сеточной функцией $u^{(n)}(t) = u(x^{(n)}, t)$, $n = \overline{1, N - 1}$, т. е. совокупностью сосредоточенных управлений $u^{(n)}(t)$ на рассматриваемой пространственной сетке.

Совершенно аналогично для волнового уравнения вида (8.1) (при $A = 1$; $A_1 = 0$; $C \equiv v^2$; $B_1 \equiv C_1 \equiv 0$) получим дифференциально-разностную модель объекта, описываемую системой обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\frac{d^2 Q_n}{dt^2} = \frac{v^2}{s^2} (Q_{n+1} - 2Q_n + Q_{n-1}) + f_n(t), \quad n = \overline{1, N - 1}, \quad (8.85)$$

замыкаемой граничными соотношениями (8.83) и дополняемой в соответствии с (8.2) начальными условиями:

$$Q_n(0) = Q_0^{(0)}(x^{(n)}); \quad \frac{dQ_n(0)}{dt} = Q_0^{(1)}(x^{(n)}), \quad n = \overline{1, N - 1}. \quad (8.86)$$

Несомненным преимуществом описанного метода моделирования ОРП, свидетельствующим о высокой степени его универсальности, является возможность получения подобным образом приближенного описания объекта не только для общего случая краевой задачи (8.1)–(8.4), но и для более широкого класса ОРП, в том числе описываемых пространственно-многомерными, нелинейными и нестационарными уравнениями в частных производных [22].

Применение псевдомодального представления функции состояния ОРП с предварительным разбиением области изменения пространственных переменных по методу конечных элементов [11, 18] и соответствующим выбором совокупности базисных функций, каждая из которых отлична от нуля только в пределах своего элемента, приводит в итоге к конечно-элементной форме дифференциально-разностной аппроксимации уравнений ОРП [11, 18].

Если дискретизация производится не только по пространственной, но и по временной переменной с последующим использованием разностных аналогов, подобных (8.80), (8.81) для всех частных производных функции состояния объекта, то в итоге получают *конечно-разностные* аппроксимации исходной модели уже в форме системы алгебраических уравнений относительно значений этой функции на пространственно-временной сетке.

Методы решения этих систем уравнений, полученных с помощью разных сеточных шаблонов, признаки сходимости и устойчивости различных разностных схем по входным данным широко освещены в литературе [18, 22].

Методы аппроксимации точных решений уравнений ОРП [14, 18]

Методы разложения передаточных функций в бесконечные ряды

Учет конечного числа N членов в точных выражениях (8.72) для ПФ ОРП по стандартизирующему входу сразу приводит к искомому дробно-рациональному приближению ПФ.

Для x -блоков с граничным управлением, например $\bar{u}_1(p)$, сосредоточенным в точке $x = x_1$, ПФ по этому входу находится, подобно (8.75), при $\beta_1 \neq 0$ в форме

$$W_x(x, p) = \frac{C}{\beta_1} W(x, x_1, p), \quad (8.87)$$

и, следовательно, с учетом (8.72) получим приближенное представление объекта в форме параллельного соединения типовых динамических звеньев не выше второго порядка с коэффициентами передачи, зависящими от x :

$$W_x(x, p) = \sum_{n=1}^N \frac{k_n(x, x_1)}{Ap^2 + A_1p + \mu_n^2};$$

$$k_n(x, x_1) = \frac{C}{\beta_1} r(x_1) \varphi_n(\mu_n, x_1) \varphi_n(\mu_n, x). \quad (8.88)$$

Разложения трансцендентных выражений вида (8.42), (8.43) для передаточных функций распределенных x -блоков (или их различных составляющих по отдельности) в сходящиеся ряды Тейлора позволяют получить дробно-рациональные приближения этих ПФ, учитывая лишь первые N членов данного ряда (как правило, не более трех) [14, 18, 24].

Во многих случаях удовлетворительная точность приближений достигается при $N = 1$ (см. примеры в [14, 18, 24]).

Методы определения параметров дробно-рациональных приближений передаточных функций заданной структуры

В инженерной практике значительное распространение получил способ моделирования линейных x -блоков ОРП путем поиска их ПФ в априори заданном классе типовых дробно-рациональных приближений фиксированной структуры, отвечающей заведомо известным основным физическим закономерностям исследуемых процессов. В такой ситуации искомые приближения заранее определены с точностью до коэффициентов аппроксимирующих выражений, и проблема сводится к их выбору из условий минимизации неизбежно возникающих ошибок такого представления объекта.

В частности, для x -блоков с ограниченными переходными функциями в целом ряде случаев с удовлетворительной для инженерных целей точностью применяется описание $W_x(x, p)$ в одной из следующих типовых форм [14, 18]:

$$\frac{W_x(x, p)}{W_x(x, 0)} \approx \frac{e^{-p\tau_3(x)}}{T_1(x)p + 1}; \quad (8.89)$$

$$\frac{W_x(x, p)}{W_x(x, 0)} \approx \frac{T(x)p + 1}{T_1(x)p + 1} \quad (8.90)$$

со значениями времени запаздывания τ_3 и постоянных времени T, T_1 , подлежащими определению в каждом конкретном случае.

Передаточная функция чаще выбирается в виде (8.90) или (8.89) при $\tau_3 \geq 0$, если объект соответственно обладает или не обладает «формирующими» свойствами.

Для определения $\tau_3(x), T(x), T_1(x)$ могут быть использованы различные способы. Один из распространенных приемов заключается в

решении относительно искомым параметров систем уравнений, образуемых приравниванием коэффициентов разложения в ряд Тейлора по степеням комплексной переменной точного и аппроксимирующего выражений для ПФ объекта (см. примеры [14, 18]).

Параметры $\Delta = (\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N)$ аппроксимирующих передаточных функций $W_x^A(x, p, \Delta)$ дробно-рационального вида могут быть найдены и другими способами.

Достаточно эффективным может оказаться способ, заключающийся в переходе от передаточных функций $W_x(x, p)$ к *вещественным изображениям* $W_x(x, \delta)$ (*характеристикам мнимых частот (ХМЧ)* [2, 18]) путем простой формальной замены комплексной переменной p на действительную переменную δ в выражениях для точной и аппроксимирующей ПФ с последующим решением относительно искомым параметров Δ задачи минимизации абсолютной ошибки приближения $W_x^A(x, \delta, \Delta)$ к $W_x(x, \delta)$ (*задачи равномерного приближения*) в области существенных значений $\delta \in [0, \delta^*]$ для каждого фиксированного значения координаты $x \in [x_0, x_1]$ [17, 18].

8.9. Анализ и синтез систем автоматического управления ОРП

Синтез САУ ОРП так же, как и для ССП, производится по заданной математической модели объекта управления на основании предъявляемых к САУ требований.

Управляемость ОРП [3, 4, 10, 16, 19, 25]

Постановка задачи управления имеет смысл лишь для управляемых объектов. ОРП называется *управляемым*, если найдется реализуемое управляющее воздействие, переводящее объект из заданного начального состояния $Q(x, 0)$ в некоторое *допустимое* конечное состояние $Q^*(x) = Q(x, T)$ за конечное время $t = T$.

В общем случае проблема управляемости для точных моделей ОРП оказывается очень сложной [3, 4, 25]. Иногда проще установить условия *неуправляемости* объекта, которые реализуются применительно к ОРП гораздо чаще, чем в ССП [16, 25]. При приближенном модальном описании ОРП могут быть использованы известные матричные критерии полной управляемости ССП [1, 19, 25].

Практически всегда встречающиеся ограничения на управляющие воздействия приводят здесь к дополнительным требованиям. В частности, в целях обеспечения управляемости следует избегать совпа-

дения точек приложения пространственно локализованных управлений с нулями собственных функций объекта [19, 25].

Наблюдаемость распределенных систем [4, 9, 19, 25]

Построение САУ ОРП возможно только при *неполном* измерении пространственно распределенной функции состояния объекта с помощью конечного числа датчиков обратной связи. В результате возникает *проблема наблюдаемости*, заключающаяся, во-первых, в установлении возможности восстановления управляемого выхода $Q(x, t)$ по результату его неполного измерения и, во-вторых, в разработке способов построения устройств (*наблюдателей*), реализующих такую возможность, если она существует. При приближенном модальном описании ОРП могут быть использованы известные матричные критерии наблюдаемости в ССП [1, 19, 25]. Можно показать, что для обеспечения условий наблюдаемости ОРП точки измерения его состояния не должны являться нулями собственных функций объекта [19, 25]. Удовлетворительные оценки состояния ОРП можно получить с помощью асимптотических наблюдателей Луенбергера [1, 9, 25].

Анализ и синтез САР ОРП с сосредоточенными входными воздействиями и управляемыми величинами [8, 14, 19, 21, 25]

Если объект управления представляет собой распределенный $x\xi$ -блок, то он отличается в структурном отношении от подобных объектов с сосредоточенными параметрами (ОСП) лишь характером вход-выходных соотношений, в частности трансцендентными выражениями для передаточных функций. Использование обычных сосредоточенных регуляторов приводит к таким же структурам САР, как и для ОСП, на которые распространяются известные алгебраические правила определения операторов связи между входами и выходами различных соединений динамических звеньев в форме передаточных функций, а также известные закономерности структурных преобразований.

На системы с $x\xi$ -блоками, имеющими мероморфные передаточные функции разомкнутого контура и ограниченную полосу пропускания частот, распространяется частотный критерий устойчивости Найквиста для линейных ССП [8, 21, 25]. На этом основании на САР ОРП с сосредоточенными управлениями и регулируемыми величинами распространяются без существенных усложнений классические частотные методы анализа и синтеза замкнутых САР ОСП [8, 14, 21, 25].

Существенное повышение качественных показателей САР ОРП часто достигается на практике путем построения систем *комбинированного регулирования*, а также *многоконтурных* систем с использованием дополнительных обратных связей по выходу объекта в неко-

торых «промежуточных» точках пространственной области [14, 25]. При использовании приближенных моделей ОРП в форме некоторого ОСП для построения САР без каких-либо изменений применяются методы синтеза САР ОСП.

Примеры анализа и синтеза САР распределенных $x\xi$ -блоков приведены в [8, 14, 21, 25].

Анализ и синтез САР ОРП с распределенными управляемыми величинами [12, 15, 19, 25]

При необходимости управления распределенным выходом ОРП $Q(x, t)$ во всей пространственной области его определения приходится строить САР с использованием сигналов обратных связей непосредственно по текущему состоянию $Q(x, t)$ объекта, которые могут быть реализованы только с помощью соответствующих наблюдателей. При этом на основании известной *теоремы разделения* задачу построения САР можно разделить на независимые задачи синтеза регулятора с обратными связями непосредственно по переменным состояния объекта и проектирования асимптотического наблюдателя с требуемыми динамическими свойствами [1, 25].

Можно показать [12, 15, 19, 25], что задача синтеза САР распределенного выхода ОРП сводится к построению независимых друг от друга контуров регулирования учитываемых временных мод объекта

$$\bar{Q}_n(\mu_n, t), n = \overline{1, N}.$$

«Элементарный» объект управления каждого из таких контуров имеет простейшую передаточную функцию (8.73) с единичным коэффициентом передачи применительно к типовым ОРП, и соответствующая индивидуальная система управления n -й модой строится методами теории ССП по стандартной схеме «объект – регулятор» с обратной связью по $\bar{Q}_n(\mu_n, t)$ и задающим воздействием $\bar{Q}_n^*(\mu_n, t)$ для желаемого поведения $\bar{Q}_n(\mu_n, t)$. Как правило, здесь удается использовать стандартные II- или III-регуляторы.

Для более сложных ОРП, представляющих собой, например, некоторое соединение типовых блоков вида (8.9), аналогичный подход приводит к более сложным трансцендентным передаточным функциям «элементарных» объектов типа $x\xi$ -распределенных блоков в независимых контурах регулирования [12, 25].

В таких случаях синтез индивидуальных регуляторов сводится к задаче, рассмотренной в разделе «Анализ и синтез САР ОРП с сосредоточенными входными воздействиями и управляемыми величинами». Количество регулируемых мод должно определяться из условий обеспечения требуемой точности обработки САР задающего воздей-

ствия $Q^*(x, t)$ на входе системы. Реализуемые распределенные управления на входе ОРП синтезируются по выходам регуляторов $\bar{w}_n(\mu_n, t)$, $n = 1, N$ путем их взвешенного суммирования с собственными функциями по типу выражения (8.63). Здесь $\bar{w}_n(\mu_n, t)$ – временные моды стандартизирующей функции. Сигналы обратной связи по $\bar{Q}_n(\mu_n, t)$ могут быть получены с помощью специального *анализатора*, представляющего собой совокупность интеграторов (8.35) сигнала $Q(x, t)$ на выходе наблюдателя состояния объекта [12, 19, 25]. Примеры синтеза САР ОРП с распределенным выходом приведены в [12, 19, 25].

Оптимальное управление ОРП [3, 6, 9, 10, 14–17, 19, 20, 23]

Для решения задач отыскания оптимальных по выбранным критериям оптимизации пространственно-временных управляющих воздействий для ОРП (задачи программного оптимального управления) может быть использован аппарат принципа максимума Понтрягина [6, 16] (применительно к модальному описанию ОРП (8.66)–(8.67) либо специальные его модификации [6, 20, 23] применительно к описанию ОРП интегральными соотношениями типа (8.10) или уравнениями в частных производных вида (8.1)–(8.4).

Применение указанных необходимых условий экстремума позволяет, как правило, найти искомые управления лишь с точностью до ряда параметров, которые должны быть определены на последующем этапе путем решения краевой задачи по достижению допустимых конечных состояний объекта. Здесь могут быть использованы различные приближенные [3, 6, 10, 14] или алгоритмически точные [17] методы. В целях синтеза замкнутых систем оптимального управления ОРП может быть использован метод динамического программирования [9, 20]. Примеры решения задач оптимального управления ОРП приведены в [3, 6, 9, 16, 17, 19, 20, 23]. При приближенном представлении ОРП в форме некоторой модели ОСП на задачи оптимального управления распределенными объектами полностью распространяются методы теории оптимизации систем с сосредоточенными параметрами.

Список литературы

1. *Андреев Ю.Н.* Управление конечномерными объектами. – М.: Наука, 1976. – 424 с.
2. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления / Под ред. А.А. Воронова и И.А. Огурка. – М.: Наука, 1984. – 344 с.
3. *Бутковский А.Г.* Методы управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1975. – 568 с.
4. *Бутковский А.Г.* Структурная теория распределенных систем. – М.: Наука, 1977. – 320 с.
5. *Бутковский А.Г.* Характеристики систем с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1979. – 224 с.
6. *Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н.* Оптимальное управление нагревом металла. – М.: Metallургия, 1972. – 439 с.
7. *Васильева А.Б., Бутузов В.Ф.* Асимптотические методы в теории сингулярных возмущений. – М.: Высшая школа, 1990. – 208 с.
8. *Воронов А.А.* Основы теории автоматического управления: Особые линейные и нелинейные системы. – М.: Энергоиздат, 1981. – 303 с.
9. *Дегтярев Г.Л., Сиразетдинов Т.К.* Теоретические основы оптимального управления упругими космическими аппаратами. – М.: Машиностроение, 1986. – 214 с.
10. *Дидук Г.А., Золотов О.И., Пустыльников Л.М.* Специальные разделы теории автоматического регулирования и управления (теория СРП): Учебное пособие/ Предисловие А.Г. Бутковского. – СПб.: СЗТУ, 2000. – 172 с.
11. *Зенкевич О., Морган К.* Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
12. *Коваль В.А.* Спектральный метод анализа и синтеза распределенных управляемых систем. – Саратов: СГТУ, 1997. – 192 с.
13. *Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М.* Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Наука, 1970. – 710 с.
14. *Маковский В.А.* Динамика металлургических объектов с распределенными параметрами. – М.: Metallургия, 1971. – 384 с.
15. *Мартыненко Н.А., Пустыльников Л.М.* Конечные интегральные преобразования и их применение к исследованию систем с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1986. – 303 с.
16. *Рапопорт Э.Я.* Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Metallургия, 1993. – 277 с.
17. *Рапопорт Э.Я.* Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 336 с.
18. *Рапопорт Э.Я.* Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами/ Предисловие А.Г. Бутковского. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.

19. *Рей У.* Методы управления технологическими процессами. – М.: Мир, 1983. – 368 с.
20. *Сиразетдинов Т.К.* Оптимизация систем с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1977. – 463 с.
21. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Кн. 2. Анализ и синтез линейных непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования / Под ред. В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1967. – 679 с.
22. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736 с.
23. *Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г.* Методы теории автоматического управления. – М.: Наука, 1971. – 744 с.
24. *Чермак И., Петерка В., Заворка И.* Динамика регулируемых систем в теплоэнергетике и химии. – М.: Мир, 1972. – 623 с.
25. *Рапопорт Э.Я.* Анализ и синтез автоматического управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2005. – 292 с.

9

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Проектирование систем автоматизации и управления производственными процессами и техническими устройствами на основе типовых решений получило широкое, если не сказать преобладающее, распространение. При этом предполагается возможность адекватного описания регулируемых объектов классом линейных динамических моделей. Для простейших типовых моделей, ограниченных 2-м порядком дифференциальных уравнений с последовательно включенным звеном временного запаздывания, выполнение функций регулирования и управления возлагается на типовые промышленные ПИД-регуляторы и их модификации, вплоть до так называемых «нечетких» ПИД-регуляторов и ПИД-регуляторов, настраиваемых с помощью многослойных нейросетей¹, хотя применение ИНС *в качестве механизма оптимизации* для настройки параметров типовых законов регулирования может быть оправдано лишь тем, что это не противоречит исключительным возможностям обучаемых нейросетей. На использовании типовых решений, в том числе и типовых линейных законов регулирования, построена целая индустрия серийно выпускаемых типовых промышленных регуляторов или контроллеров. В сущности, типовые регуляторы являются одним из основных «прикладных продуктов» классической теории автоматического регулирования, в то время как ее более «продвинутые» разделы иллюстрируют *лишь возможности* построения подобных систем с их реализацией в частных случаях. Содержательный смысл понятия «типовой регулятор» определим обязательным наличием следующих компонент:

- *типовой функциональный состав* регулятора для класса типовых в каком-либо смысле объектов, в том числе функциональная структура, связи, алгоритмы, сервисные функции и т. п.;

¹ *Sigeru Omatu, Marzuki Khalid, Rubiyah Yusof. Neuro-Control and its Applications. Springer./ Омату С., Халид М., Юсоф Р. Нейроуправление и его приложения / Пер. с англ.; Под общ. ред. А.И. Галушкина и В.А. Птичкина (Сер. «Нейрокомпьютеры и их применение». Кн. 2.). – М.: ИПРЖР, 2000. 272 с. См. также: Абиев Р.Г., Алиев Р.А., Алиев Р.Р. Синтез систем автоматического управления с обучаемым на нейронной сети нечетким контроллером // Изв. РАН. Техническая кибернетика. 1994. № 2. С. 192–197.*

- типовые *информационные функции*, в том числе число и состав сигналов вход/выход, преобразователей, устройств памяти, интерфейс и т. п.;
- типовое *техническое исполнение* – элементная база, конструкция, автономность, тиражируемость;

Однако следует обратить внимание на то, что требование быть типовым, т. е. универсальным для возможно более широкого класса объектов, означает работоспособность и выполнение заданных технологических показателей качества систем управления независимо от индивидуальных особенностей динамики управляемых процессов. Другими словами, типовые регуляторы *функционально* должны быть и адаптивными, и робастными. Требование типизации ставит на повестку дня необходимость в такой научной теории систем регулирования, которая бы изначально опиралась на *исходно нелинейную динамику* управления и адекватные средства достижения. С этой точки зрения, например, адаптивные системы являются специальным *классом* существенно *нелинейных систем управления*, а для реализации адаптивного регулятора требуются *обучающиеся нелинейные структуры*.

Таковыми типовыми нелинейными и настраиваемыми структурами являются искусственные нейронные сети (ИНС). Основным типом ИНС в последующем изложении служит многослойная обучаемая нейронная сеть (МНС) с искусственными нейронами (ИН) или еще, базовыми процессорными элементами (БПЭ). Обоснованием для их применения в автоматических системах служат хорошо изученные их фундаментальные свойства.

Во-первых, сигналы в таких нейросетях, как и в системах автоматического управления, распространяются в прямом направлении.

Во-вторых, ключевую роль в формировании необходимых нелинейных алгоритмов управления играют *универсальные аппроксимационные* свойства многослойных сетей. На основе обобщенной аппроксимационной теоремы Стоуна–Вейерштрасса сделан вывод о том, что с помощью нелинейных нейронных сетей можно *сколь угодно точно* равномерно приблизить любую непрерывную функцию многих переменных на любом замкнутом ограниченном множестве. Дополнительным стимулирующим фактором является высокая скорость аппроксимации в зависимости от n – числа нейронов сети. Погрешность аппроксимации составляет порядок $O(1/n^2)$.

В-третьих, обучение МНС придает адаптивные свойства нейросетевым системам управления. Эти свойства вызывают неизменный интерес, так как порождают способность сети выполнять функции робастного адаптивного регулятора при фиксированных коэффициентах синаптических связей, т. е. уже после обучения на реальной конечной выборке экспериментальных данных нейронная сеть спо-

собна подстраиваться в реальных условиях по данным, несколько отличающихся от эталонных.

В-четвертых, способность нейронных сетей к *параллельной* обработке сигналов делает естественным их использование для управления многомерными объектами. Многослойная нейронная сеть представляет собой однородную вычислительную среду и как универсальный нелинейный аппроксиматор в контурах управления динамическим процессом выполняет функцию адаптивного регулятора состояния фазового пространства системы «объект + нейросеть + внешняя среда».

Искусственная нейронная сеть и, в частности, обучаемая многослойная нейронная сеть с нелинейными функциями активации осуществляет настраиваемое нелинейное преобразование многомерной информации. Динамика такого преобразования описывается векторными нелинейными дифференциальными уравнениями, общая размерность которых определяется произведением числа настраиваемых весовых коэффициентов синаптических связей и числа нейронов сети. Даже для малоразмерных (по числу нейронов в скрытых слоях) нейросетей, например, порядка 3–5 с числом настраиваемых коэффициентов 3, эквивалентная размерность динамической модели сети составляет значение 9–15. Очевидно, что нелинейной динамической структуре обучаемой нейросети соответствуют виртуальные пространства состояний высокой размерности. Вместе с нелинейным объектом настраиваемая многослойная нейронная сеть создает сложную и изменяемую в процессе обучения топологию нелинейного фазового пространства высокой размерности, что и является предпосылкой к организации открытых систем управления со сложным динамическим поведением многомерных нелинейных объектов.

Таким образом, МНС с обучением в реальном времени служит адекватным средством для формирования нелинейных изменяющихся во времени законов управления динамическими объектами, описываемыми исходно нелинейными дифференциальными уравнениями.

9.1. Классы искусственных нейронных сетей

Искусственные нейронные сети (ИНС), образуемые ассоциацией искусственных нейронов, являются весьма упрощенной аналогией биологических нервных сетей. При этом степень упрощения обусловлена несравнимыми уровнями связности нейронов и их числом. Нервная система человека имеет порядка 10^{11} нейронов, объединенных в сеть с примерно 10^{15} (!) передающими связями. В биологических нервных системах каждый нейрон обладает множеством качеств и функций, среди которых уникальной функцией являются *прием*,

обработка и передача электрохимических сигналов по нервным волокнам, образующим коммуникационную систему мозга.

Искусственные нейросети отличаются своей архитектурой: структурой связей между нейронами (рис. 9.1), числом слоев, функцией активации нейронов, алгоритмом обучения. С этой точки зрения среди известных ИНС можно выделить статические, динамические сети

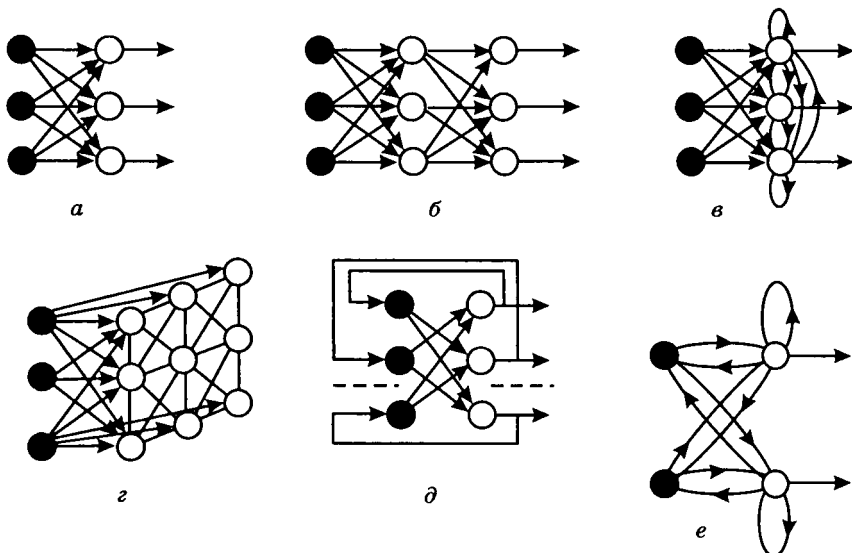


Рис. 9.1. Структуры наиболее распространенных ИНС:

a – однослойная сеть; *б* – многослойная сеть (перцептрон);
в – сети с «боковыми соединениями»; *г* – сети Кохонена;
д – сети Хопфилда; *е* – АРТ-сети

и *fuzzy*-структуры¹; однослойные или многослойные сети. Различия вычислительных процессов в сетях частично обусловлены способом взаимосвязи нейронов, поэтому выделяют следующие виды сетей:

- сети прямого распространения (*feedforward*) – сигнал по сети проходит только в одном направлении: от входа к выходу;
- сети с обратными связями (*feedforward/feedback*);
- сети с боковыми обратными связями (*laterally connected*);
- гибридные сети.

В целом по структуре связей ИНС могут быть сгруппированы в два класса: сети *прямого распространения* – без обратных связей в струк-

¹ Fuzzy (англ.) – термин теории нечетких множеств (Л. Заде, 1965), эквивалентный понятию «нечеткий(ая)». См. стандарт МЭК (1997) IEC 1131-7.

туре и *рекуррентные сети* – с обратными связями. В первом классе сетей наиболее известными и чаще используемыми являются многослойные нейронные сети (многослойные перцептроны по Ф. Розенблатту), где искусственные нейроны расположены слоями.

Связь между слоями – однонаправленная и в общем случае выход каждого нейрона связан со всеми входами нейронов последующего слоя. Такие сети являются *статическими*, так как не имеют в своей структуре ни обратных связей, ни динамических элементов, а выход зависит от заданного множества на входе, начальных значений весовых коэффициентов и не зависит от предыдущих состояний сети. В отличие от статических сетей прямого распространения сети второго класса (рекуррентные) являются *динамическими*, так как из-за обратных связей состояние сети в каждый момент времени зависит от предшествующего состояния. Задачи, для решения которых используются искусственные нейронные сети, можно разделить на четыре категории:

A – распознавание и классификация/кластеризация, например распознавание символьной информации и речи, классификация электрокардиограмм, клеток крови и других видов информации; в задачах кластеризации осуществляются классификация образов и объединение близких образов в один кластер;

B – обработка изображений: текстовых, видео-, аэрофотосъемки;

C – системы идентификации и управления;

D – обработка сигналов, в частности, такая широко распространенная задача, как аппроксимация функций при решении инженерных и научных задач моделирования.

9.2. Базовый процессорный элемент (искусственный нейрон)

Базовый процессорный элемент (БПЭ) осуществляет отображение $R^n \rightarrow R^1$ в соответствии с соотношением для выхода q (рис. 9.2):

$$q = f \left(\sum_{j=1}^n w_j r_j + w_0 r_0 \right) = f \left(\sum_{j=0}^n w_j r_j \right), \quad (9.1)$$

где r_0, r_1, \dots, r_n – входы БПЭ; w_0, w_1, \dots, w_n – весовые коэффициенты синаптических связей БПЭ.

Вход r_0 и коэффициент связи w_0 вводят специально для *инициализации* сети; обычно $r_0 = +1$; коэффициенты w_0 , как и остальные w_j , $j \in \overline{1, n}$, – настраиваемые в процессе обучения; $f(\cdot)$ – «функция активации» – монотонная, непрерывно дифференцируемая на интервале

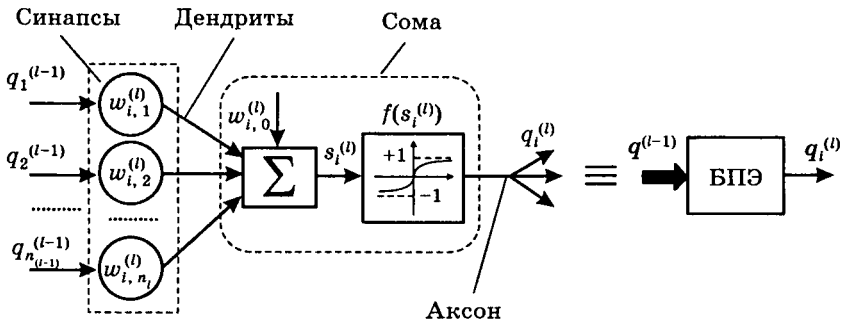


Рис. 9.2. Схема искусственного нейрона (базового процессорного элемента)

либо $(-1, +1)$, либо $(0, +1)$. В искусственных нейронах наибольшее распространение (и по аналогии с биологическими нейронами) получили:

1) экспоненциальные или радиально-базисные функции (функции Гаусса):

$$f(x) = \exp(-x^2/2\sigma^2), \sigma - \text{const};$$

2) функция гиперболического тангенса:

$$f(x) = \text{th}(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x}); f'(x) = (1 - f(x))^2;$$

3) сигмоидные функции:

$$f(x) = 1 / (1 + e^{-x}); f'(x) = f(x)(1 - f(x));$$

4) бинарные функции различного определения.

Среди простейших типов искусственных нейронов наиболее известна *адалина* Б. Уидроу, для которой функция $f(x)$ – линейная, а выход определяется соотношением

$$q = \sum_{j=1}^n w_j r_j + w_0 \cdot 1; w_j = \text{var}; j = \overline{0, n}.$$

9.3. Статические линейные однослойные сети

Простейшая однослойная линейная ИНС состоит из K адалин (рис. 9.3), называется *мадалина* и имеет K выходов $q_1, \dots, q_i, \dots, q_K$ и $n + 1$ входов $r_0, r_1, \dots, r_j, \dots, r_n$ и может быть описана векторно-матричным соотношением:

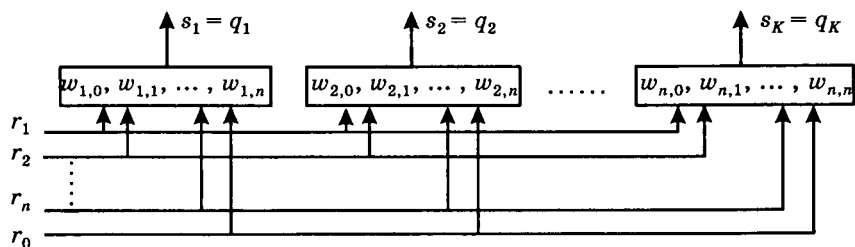


Рис. 9.3. Схематическое представление однослойной линейной искусственной нейронной сети

$$\mathbf{q} = \mathbf{W}_1^{(K)} \mathbf{r}_1 + \mathbf{w}_0 r_0 = \mathbf{W}^{(K)} \mathbf{r}. \quad (9.2)$$

В (9.2) обозначены: вектор выхода $\mathbf{q} = \text{col}(q_1, \dots, q_l, \dots, q_K)$; вектор входа $\mathbf{r}_1 = \text{col}(r_1, \dots, r_j, \dots, r_n)$, а с учетом входа инициализации r_0 , одинакового для всех адалин, вектор входа $\mathbf{r}^T = (r_1^T : r_0)$. Матрица весовых коэффициентов $\mathbf{W}^{(K)} = \|w_{i,j}\|$, $i = \overline{1, K}$, $j = \overline{0, n}$; матрица $\mathbf{W}_1^{(K)} = \|w_{i,j}\|$, $i = \overline{1, K}$, $j = \overline{1, n}$.

Таким образом, в матрице $\mathbf{W}^{(K)}$ последний столбец есть вектор коэффициентов инициализирующих связей $\mathbf{w}_0 = \text{col}(w_{1,0}, \dots, w_{K,0})$. В соответствии с (9.2) линейная *многослойная* сеть типа мадалины осуществляет отображение $\mathbf{r}_1 \in R_n$ в $\mathbf{q} \in R$.

9.4. Статические многослойные нейронные сети

Структура статических многослойных нейронных сетей (МНС) изображена на рис. 9.4. В так называемых *полносвязных гомогенных* многослойных нейросетях выходы базовых элементов каждого слоя

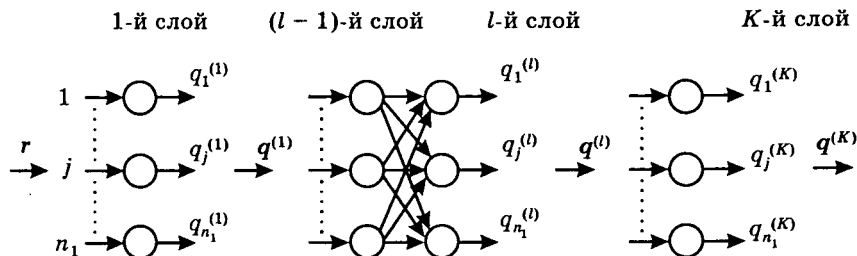


Рис. 9.4. Структурная схема статических МНС

поступают на входы всех базовых элементов следующего слоя, а функция активации $f(s)$ принимается одинаковой для всех БПЭ. Выходной слой многослойной сети выполняется в виде мадалины.

Входной слой является буферным для сигнала g . Многослойная нейросеть может быть определена в символьной форме как $N_{n_0, n_1, \dots, n_K}^K$, где

K – число слоев в сети; n_0 – число входов сети; n_i ($i = \overline{1, K-1}$) – число базовых элементов в i -х «скрытых» или промежуточных слоях; n_K – число базовых элементов в выходном K -м слое и одновременно число выходов q_1, \dots, q_{n_K} многослойной нейросети. Промежуточный l -слой имеет n_l базовых процессорных элементов. Связи между базовыми элементами в слое отсутствуют. Выходы базовых элементов l -го слоя поступают на входы базовых элементов только следующего $(l+1)$ -го слоя. Выход i -го элемента в l -м слое многослойной нейросети может быть определен так же, как и для любого базового элемента, в виде

$$q_i^{(l)} = f \left(\sum_{j=1}^{n_{l-1}} w_{i,j}^{(l)} q_j^{(l-1)} + w_{i,0}^{(l)} q_0^{(l-1)} \right) = f(s_i^{(l)}). \quad (9.3)$$

В векторной форме выход l -го слоя сети есть

$$\mathbf{q}_1^{(l)} = \mathbf{f}(\mathbf{W}_1^{(l)} \mathbf{q}_1^{(l-1)} + \mathbf{w}_0^{(l)} q_0^{(l-1)}), \quad (9.4)$$

где $\mathbf{w}_0^{(l)} = \text{col}(w_{1,0}^{(l)}, \dots, w_{n_l,0}^{(l)})$ – вектор весовых коэффициентов сигнала инициализации $q_0^{(l-1)}$ в слое l , который для всех $l = \overline{1, K}$ принимается равным $+1$; $\mathbf{q}_1^{(l)} = \text{col}(q_1^{(l)}, \dots, q_{n_{l-1}}^{(l)})$, $\mathbf{q}_1^{(l-1)} = \text{col}(q_1^{(l-1)}, \dots, q_{n_{l-1}}^{(l-1)})$ – векторы выходов базовых процессорных элементов слоя l и выходов предыдущего $(l-1)$ -го слоя, поступающих на входы базовых элементов слоя l . Для выходного K -го слоя имеем:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_1^{(K)} &= \mathbf{W}_1^{(K)} \mathbf{q}_1^{(K-1)} + \mathbf{w}_0^{(K)}; \\ \mathbf{q}_1^{(K-1)} &= \mathbf{f}(\mathbf{W}_1^{(K-1)} \mathbf{q}_2^{(K-1)} + \mathbf{w}_0^{(K-1)}). \end{aligned} \quad (9.5)$$

Соотношения (9.3)–(9.5) описывают статические многослойные нейросети с нелинейными функциями активации $\mathbf{f}(s)$ *послойно*. Функции $s_i^{(l)}$ на i -х выходах сумматоров базовых элементов слоя l называются *дискриминантной функцией*. В общем случае – это отрезок многомерного ряда Тейлора, и его наибольшая степень определяет порядок базовых элементов. Так, соотношение (9.3) соответствует выходу элемента первого порядка, а вектор весовых коэффициентов

соответствующего ряда Тейлора $w_i^{(l)} = \text{col}(w_{i,0}^{(l)}, \dots, w_{i,n_{l-1}}^{(l)})$ есть «память» базового процессорного элемента. Дискриминантная функция есть взвешенная сумма входов БПЭ с коэффициентами, равными значениям настраиваемых «весов» $w_{i,j}^{(l)}$. Дискриминантная функция разделяет входной вектор (паттерн входной активности) на классы – минимум на два класса в случае линейной сети с дискриминантной функцией первого порядка. В этом случае дискриминантная функция $s_j = 0$ – дискриминантная линия, которая разделяет входное множество $q_1^{(l-1)}, q_2^{(l-1)}, \dots, q_{n_{l-1}}^{(l-1)}$ на два подмножества:

$$q_j^{(l)} = \begin{cases} 1, & \text{если } s_j > 0, \\ 0, & \text{если } s_j < 0. \end{cases}$$

Для элементов второго порядка дискриминантная функция определяется как

$$s_i^{(l)} = w_{i,0}^{(l)} + \sum_{j=1}^{n_{l-1}} w_{i,j}^{(l)} q_j^{(l-1)} + \sum_{j=1}^{n_{l-1}} \sum_{k=1}^j w_{j,k}^{(l)} q_j^{(l-1)} q_k^{(l-1)} = (w_i^{(l)})^T q_1^{(l-1)}, \quad (9.6)$$

где $w_{i,0}^{(l)}, w_{i,j}^{(l)}, w_{j,k}^{(l)}$ ($j = 1, n_{l-1}, k \leq j$) – компоненты вектора весовых коэффициентов i -го базового элемента в l -м слое сети, а вектор входа $q_1^{(l-1)}$ имеет вид

$$q_1^{(l-1)} = \text{col}(1, q_1^{(l-1)}, q_2^{(l-1)}, \dots, q_{n_{l-1}}^{(l-1)}, (q_1^{(l-1)})^2, (q_2^{(l-1)})^2, \dots, (q_{n_{l-1}}^{(l-1)})^2). \quad (9.7)$$

Из (9.6) и (9.7) следует, что в каждом l -м слое нейросети с элементами второго порядка наряду с линейным преобразованием выходов предшествующего слоя $q_1^{(l-1)}$ осуществляется *билинейное* преобразование этих же сигналов.

Нейронные сети с дискриминантными функциями высокого порядка позволяют разделять (классифицировать) входное множество на классы при помощи нелинейных разделяющих поверхностей. В частности, разделяющая поверхность $s_i^{(l)} = 0$, где $s_i^{(l)}$ определяется соотношением (9.6), является разделяющей поверхностью второго порядка и получила название *гиперквадрика*.

БПЭ с дискриминантной функцией высокого порядка имеет существенно большее число «синаптических» связей и настраиваемых коэффициентов в составе вектора $w_i^{(l)}$ при одинаковом числе слоев и элементов в структурах многослойных нейросетей с базовыми элементами как первого, так и второго порядков. В последующем огра-

начимся обсуждением многослойных нейронных сетей с базовыми процессорными элементами первого порядка.

Определим связь между входом \mathbf{r} и выходом $\mathbf{u} = \mathbf{q}^{(K)}$ нейросети с элементами первого порядка. Используя (9.4) и $(n_l \times (n_{l-1} + 1))$ – матрицу весовых коэффициентов базовых элементов l -го слоя:

$$\mathbf{W}^{(l)} = [\mathbf{w}_0^{(l)} : \mathbf{w}_1^{(l)} : \mathbf{w}_2^{(l)} : \dots : \mathbf{w}_{n_l}^{(l)}]^T = \left[\left(\mathbf{w}_0^{(l)} \right)^T : \left(\mathbf{W}_1^{(l)} \right)^T \right], \quad (9.8)$$

запишем в векторно-матричной форме выход l -го слоя:

$$\mathbf{q}_1^{(l)} = \mathbf{f}^{(l)}(\mathbf{w}_0^{(l)} q_0^{(l-1)} + \mathbf{W}_1^{(l)} \mathbf{q}_1^{(l-1)}) = \mathbf{f}^{(l)}(\mathbf{q}^{(l-1)}), \quad q_0^{(l)} = +1; \quad l = \overline{1, K}. \quad (9.9)$$

В (9.9) $\mathbf{f}^{(l)}$ определяет нелинейное преобразование каждой компоненты вектора $\mathbf{q}^{(l-1)}$ так, как это определено соотношением (9.3).

Нелинейное рекуррентное уравнение, примененное последовательно для всех $l = K, K-1, \dots, 2, 1$, позволяет установить связь между входом \mathbf{r} и выходом $\mathbf{u} = \mathbf{q}^{(K)}$ сети в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{u} = \mathbf{q}^{(K)} = & \mathbf{f}^{(K)}(\mathbf{w}_0^{(K)} + \mathbf{W}_1^{(K)} \mathbf{f}^{(K-1)}(\mathbf{w}_0^{(K-1)} \mathbf{W}_1^{(K-1)} \mathbf{f}^{(K-2)} \times \\ & \times (\dots \mathbf{w}_0^{(l)} + \mathbf{W}_1^{(l)} \mathbf{f}^{(l-1)}(\mathbf{w}_0^{(l-1)} \mathbf{W}_1^{(l-1)} \mathbf{f}^{(l-2)} \times \\ & \times (\dots \mathbf{w}_0^{(2)} + \mathbf{W}_1^{(2)} \mathbf{f}^{(1)}(\mathbf{w}_0^{(1)} + \mathbf{W}_1^{(1)} \mathbf{q}^{(0)} \dots) \dots)) = \mathbf{F}(\mathbf{r}). \end{aligned} \quad (9.10)$$

Из (9.10) следует, что многослойная нейросеть выполняет в силу своей структуры сложное нелинейное преобразование $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ входного вектора \mathbf{r} в зависимости от векторов весовых коэффициентов $\mathbf{w}^{(l)}$ и нелинейных функций активации $\mathbf{f}^{(l)}$.

9.5. Общая характеристика алгоритмов обучения искусственных нейросетей

Под *обучением* искусственной нейронной сети понимается процесс настройки весовых коэффициентов $w_{i,j}$ ее базовых процессорных элементов, результатом чего является выполнение сетью конкретной задачи – распознавания, оптимизации, аппроксимации, управления. Достижение подобных целей формализуется критерием качества Q , минимальное значение $\min_w Q = Q^*$ которого соответствует наилучшему решению поставленной задачи.

Многообразие алгоритмов обучения определяется функциональным назначением сети, ее архитектурой и избранной стратегией обучения. Различают три основные стратегии обучения: «с учителем», «без учителя» (т. е. с самообучением) и смешанную. В первом случае нейросеть настраивается по заданной обучающей выборке в соответствии с принятым правилом или алгоритмом. Во втором случае заранее не требуется знать правильный результат обучения и в процессе

настройки весовых коэффициентов образуется внутренняя структура активированных базовых элементов, соответствующая предъявленному вектору входа сети. При смешанной стратегии обучения часть весовых коэффициентов $w_{i,j}$ настраивается по заданной обучающей выборке, а другая – в соответствии с правилами обучения «без учителя».

Перечисленным стратегиям соответствуют конкретные алгоритмы обучения искусственных нейросетей. Каждый алгоритм ориентирован на конкретную архитектуру сети и применим для решения определенного типа задач. Так, одно- и многослойные сети обучаются по первой стратегии, и это применимо для решения задач классификации, аппроксимации и управления. Самообучение используется в сетях Хопфилда, самоорганизующихся картах (сетях) Кохонена, сетях ART (adaptive resonance theory); смешанная стратегия обучения применяется в так называемых RBF-сетях с радиально-базисными функциями активации.

Общим для всех модификаций алгоритмов является их *рекуррентный* характер, а сами алгоритмы обучения представляют собой линейные или чаще нелинейные дифференциальные (или разностные) уравнения первого порядка, составленные по определенному правилу. Эти правила имеют эвристический характер, не всегда вытекающий из принципов функционирования бионейронов и нервной сети живого организма.

Наибольшее распространение получили следующие правила обучения искусственных нейросетей: правило Хебба; δ -правило; обучение с «конкуренцией» или методом соревнования; ART-правило (обучение «без учителя»); «больцманово» обучение; генетические алгоритмы.

Правило Хебба – исторически первая предложенная концепция обучения нейросети «без учителя». В соответствии с ней весовые коэффициенты $w_{i,j}$ синаптических связей увеличиваются, если активированы (возбуждены) оба базовых элемента – источник возбуждения и приемник сигнала возбуждения. Тем самым регулярно используемые входы и синаптические связи активируются за счет увеличения «своих» весовых коэффициентов в большей степени, чем остальные нейроны сети. Модель обучения Хебба дает объяснение способности нейросети к привыканию и обучению этой способности через *повторение*. Правило или алгоритм Хебба выражается как

$$w_{i,j}(k+1) = w_{i,j}(k) + \gamma q_j q_i,$$

где $w_{i,j}(k)$ – значение весового коэффициента, изменяющегося от нейрона i к нейрону j до настройки; $w_{i,j}(k+1)$ – то же, но после настройки; q_i, q_j – выходы нейронов i, j соответственно; $\gamma > 0$ – коэффициент «усиления» алгоритма; $k = 0, 1, 2, \dots$.

Правило Хебба может быть применено для обучения простых сетей типа мадалины, рекуррентных сетей Хопфилда, оно положило начало процессу «конструирования» множества подобных правил обучения нейросетей «без учителя» и, в частности, на этом пути был получен удачный алгоритм обучения «с конкуренцией» для сети Кохонена (правило Кохонена). Важной особенностью правила Хебба является то, что изменения синаптических весов $w_{i,j}(k)$ зависят *только* от активности базовых элементов, связанных между собой данным синапсом.

δ -правило реализует стратегию обучения «с учителем», или супервизорного обучения. «Учитель» – это целевой, желаемый выход базового элемента типа перцептрона u^* , а q – реальный выход. Для настройки весовых коэффициентов базовых элементов используется ошибка обучения $\delta = u^* - q$ в алгоритме градиентного спуска:

$$w_i(k+1) = w_i(k) - \gamma \delta r_i, \gamma > 0,$$

где r_i – вход i -й синаптической связи базового элемента (см. рис. 9.2).

Обобщение δ -правила на многослойные нейросети приводит к методу обратного распространения ошибки – методу ВР.

Обучение «конкуренцией» в отличие от правила Хебба, по которому могут возбуждаться одновременно множество базовых элементов выходного слоя, предусматривает «соревнование» этих элементов за право активации. Такая стратегия получила название «победитель берет все». После активации в процессе настройки изменяются лишь «победившие» элементы. Известно, что такая же стратегия обучения присуща биологическим нейронным сетям в отличие от обучения по δ -правилу. Обучение «с конкуренцией» используется в ART-сетях, сетях Кохонена для решения задач классификации зрительных, звуковых образов, сжатия данных, кластеризации и категоризации внутри класса.

Рассмотрим базовый алгоритм обучения многослойных нейронных сетей, получивший преимущественное распространение при использовании искусственных нейросетей в задачах управления.

9.6. Метод и алгоритм обратного распространения ошибки

Метод обратного распространения ошибки – метод ВР разработан для обучения статических нелинейных многослойных нейросетей и использует технологию последовательной и послойной настройки базовых процессорных элементов, начиная с последнего, выходного слоя и заканчивая настройкой элементов первого слоя. «Урок» обучения искусственной нейросети может быть повторен необходимое

число раз. Для настройки весовых коэффициентов базовых элементов применяется δ -правило в его общей форме: в виде алгоритма градиентного спуска для минимизации критерия обучения $Q(e_u)$. Здесь $e_u = u^* - u = u^* - q^{(K)}$ – вектор ошибки обучения сети относительно желаемого (эталонного) выхода u^* при нелинейном согласно (1.10) преобразовании входного вектора r в выходной вектор $u = q^{(K)}$ последнего слоя K . Ошибка e_u явным образом зависит от коэффициентов $w_{i,j}^{(K)}$ и может быть использована как аргумент функционала Q для настройки базовых элементов K -го слоя. Явной зависимости вектора e_u и функции $Q(e_u)$ от весовых коэффициентов $w_{i,j}^{(l)}$ ($l = \overline{1, K-1}$) нет. Поэтому в случае использования критерия обучения $Q(e_u)$ для настройки коэффициентов $w_{i,j}^{(l)}$, ошибка e_u в процедуре обучения многослойной нейросети пересчитывается последовательно в обобщенные ошибки $\sigma^{(l)}$, явно зависящие от значений $w_{i,j}^{(l)}$. Настройка коэффициентов $w_{i,j}^{(l)}$ осуществляется по δ -правилу, где используются обобщенные ошибки $\sigma^{(l)}$. Очевидно, что для слоя K ошибка $\sigma^{(K)} = e_u(w^{(K)})$. В методе ВР далее используется локальный квадратичный функционал $Q(\sigma) = 0,5\sigma^T\sigma$. Минимизация $Q(\sigma)$ по настраиваемым весовым коэффициентам $w_{i,j}^{(l)}$ ($l = \overline{1, K-1}$) методом градиентного спуска с пересчетом ошибки $\sigma^{(K)} = e_u(w^{(K)})$ для слоя K в ошибку $\sigma^{(l)} = e(w^{(l)})$ для слоев $l = K-1, K-2, \dots, 1$ определяет суть ВР-технологии обучения многослойных нейросетей.

9.6.1. Алгоритм обучения многослойной нейросети по методу ВР

Приведем алгоритм обучения K -слойной нейросети методом обратного распространения ошибки в одной из возможных форм, вытекающей из принятой методики вывода алгоритма:

$$\begin{aligned} a) \quad w_i^{(K)}(k+1) &= w_i^{(K)}(k) + \gamma f'_s(s_i^{(K)}(k+1)) e_{ui}(k+1) q^{(K-1)}(k+1) = \\ &= w_i^{(K)}(k) + \gamma \sigma_i^{(K)}(k+1) q^{(K-1)}(k+1); \end{aligned} \quad (9.11)$$

$$\gamma > 0; k = 0, 1, 2, \dots; e_{ui} = u_i^* - u_i; i \in \overline{1, n_K};$$

$$q^{(K-l)} = \text{col} \left(q_0^{(K-l)}, q_1^{(K-l)}, \dots, q_j^{(K-l)}, \dots, q_{n_{K-1}}^{(K-l)} \right);$$

$$\text{б) } \mathbf{w}_i^{(l)}(k+1) = \mathbf{w}_i^{(l)}(k) + \gamma \mathbf{q}^{(l-1)}(k+1) (\mathbf{f}'_s(s_i^{(l)}(k+1)))^T \Lambda^{(l)}(k); \quad (9.12)$$

$$\Lambda^{(l)}(k) = \mathbf{D}^{(l+1)} \Lambda^{(l+1)}(k);$$

$$\mathbf{D}^{(l+1)}(k) = (\mathbf{W}^{(l+1)}(k))^T \text{diag}(f'_s(s^{(l)}(k)));$$

$$\gamma > 0; l = \overline{K-1, 1}; \mathbf{q}^{(l-1)} = \text{col}(q_0^{(l-1)}, q_1^{(l-1)}, \dots, q_{l_{k-1}}^{(l-1)}); i = \overline{0, n_l}.$$

В частности, алгоритм настройки i -го БПЭ слоя $K-1$ в соответствии с пунктом б) имеет вид

$$\mathbf{w}_i^{(K-1)}(k+1) = \mathbf{w}_i^{(K-1)}(k) - \gamma \mathbf{q}^{(K-2)}(k+1) (\mathbf{f}'_s(s_i^{(K-1)}(k+1)))^T \Lambda^{(K-1)}(k);$$

$$\Lambda^{(K-1)}(k) = \mathbf{D}^{(K)}(k) \Lambda^{(K)}(k);$$

$$\mathbf{D}^{(K)}(k) = \mathbf{W}^{(K)}(k) \text{diag}(f'_s(s^{(K)}(k))) = \mathbf{W}^{(K)}(k);$$

$$\Lambda^{(K)}(k) = \text{col} \left(\frac{\partial Q}{\partial q_1^{(K)}}, \dots, \frac{\partial Q}{\partial q_{n_k}^{(K)}} \right) = -\mathbf{e}_u(k).$$

$$\text{Тогда } \Lambda^{(K-1)}(k) = -\mathbf{W}^{(K)}(k) \mathbf{e}_u(k),$$

$$(\mathbf{f}'_s(s_i^{(K-1)}(k+1)))^T \Lambda^{(K-1)}(k) = -(\mathbf{f}'_s(s_i^{(K-1)}(k+1)))^T \mathbf{W}^{(K)}(k) \mathbf{e}_u^T(k) =$$

$$= \sigma_i^{(K-1)}(k+1)$$

– скалярная обобщенная ошибка обучения нейросети для i -го базового элемента в слое $K-1$. С ее использованием получаем алгоритм настройки, по форме в точности соответствующей δ -правилу:

$$\mathbf{w}_i^{(K-1)}(k+1) = \mathbf{w}_i^{(K-1)}(k) - \gamma \sigma_i^{(K-1)}(k) \mathbf{q}^{(K-2)}(k+1);$$

$$\sigma_i^{(K-1)}(k+1) = -(\mathbf{f}'_s(s_i^{(K-1)}(k)))^T \mathbf{W}^{(K)}(k) \mathbf{e}^{(K)}(k+1); \quad (9.13)$$

$$\mathbf{e}_u^{(K)}(k) = \mathbf{u}^*(k) - \mathbf{q}^{(K)}(k).$$

В формулах (9.12), (9.13) используются матрицы весовых коэффициентов в слоях нейросети $\mathbf{W}^{(l+1)} = [\mathbf{w}_0^{(l+1)}; \mathbf{w}_1^{(l+1)}; \dots; \mathbf{w}_{n_{l+1}}^{(l+1)}]^T = \|\|w_{i,j}^{(l)}\|\|$,

$$i = \overline{0, n_{l+1}}; j = \overline{0, n_l}; l = \overline{K-1, 1}.$$

Аргумент k обозначает момент использования соответствующих значений заданных множеств \mathbf{u}^* и $\mathbf{r} = \mathbf{q}^{(0)}$ на k -й итерации вычисления весовых коэффициентов $\mathbf{w}_i^{(l)}$ на «уроках» обучения, число которых зависит от числа слоев и количества нейронов в слоях.

Фаза обучения завершена, когда достигнут $\min Q(\mathbf{e}_u)$ для заданных в своем классе множеств \mathbf{u}^* и $\mathbf{r} = \mathbf{q}^{(0)} = \mathbf{r}$. Сеть фиксирует это состоя-

ние в значениях своих весовых коэффициентов и соответствующих «виртуальных» смещениях центров симметрии функций активации и их производных активированных базовых элементов и хранит это состояние после снятия сигнала $q^{(0)} = r$ на входах сети в виде виртуальной статической нелинейной характеристики, собранной из фрагментов сигмоидных функций. Если теперь на входах предъявить то же множество или близкое к нему из того же класса, то нейросеть практически мгновенно восстановит на выходе то же множество $u = q^{(K)}$, что и после фазы обучения. Этот этап функционирования сети называют *фазой воспоминания*. Сеть, таким образом, выполняет функцию *ассоциативной памяти*. Если же множества u^* , $q^{(0)} = r$ являются функциями времени: $q^{(0)} = r(t)$, $u^* = u^*(t)$, то стандартный алгоритм ВР становится неавтономным и требует задания *всего* множества значений переменных $r(t)$ и $u^*(t)$.

В задачах управления $u^*(t)$ – функция оптимального управления динамическим объектом. Управление с помощью многослойной нейросети в двухэтапном режиме возможно, если только заранее функция оптимального управления рассчитана и может быть определено *все* множество значений ошибки обучения сети $e_u(t)$ на интервале ее определения. Использование другой измерительной информации, например ошибки воспроизведения заданной функции $r(t)$ на выходе динамического объекта, вносит запаздывание в алгоритм настройки и приводит к неустойчивому процессу. Возникает проблема синтеза *динамических* алгоритмов обучения многослойной нейросети, учитывающих влияние инерционности, вносимой в процесс настройки по алгоритму ВР.

Пример. Составить алгоритм обучения двухслойной сети $N_{1,3,1}^2$ с одним входом $r(k)$ ($k = 1, 2, \dots, N$); одним выходом $u(k) = q_1^{(2)}(k)$ во втором слое ($n_2 = 1$) и одним скрытым слоем с числом базовых элементов $n_1 = 3$ (рис. 9.5).

Функции активации базовых элементов в первом слое соответствуют функция гиперболического тангенса, т. е. $f(s_i^{(1)}) = \text{th } s_i^{(1)} = q_i^{(1)}$ и $f'(s_i^{(1)}) = (1 + f(s_i^{(1)}))/(1 - f(s_i^{(1)}))$. Выходной слой – адалина и $q_1^{(2)} = s_1^{(2)}$, поэтому $f(s_1^{(2)}) = s_1^{(2)}$ и $f'(s_1^{(2)}) = 1$.

Алгоритм настройки БПЭ в слое 2 следует из (9.11):

$$\begin{aligned} w^{(2)}(k) &= w^{(2)}(k-1) - \gamma_1 \sigma^{(2)}(k) q^{(1)}(k); \quad \gamma_1 > 0; \\ \sigma^{(2)}(k) &= \lambda^{(2)}(k) = e_u(k) = u^*(k) - q_1^{(2)}. \end{aligned} \quad (9.14)$$

В (9.14) в соответствии со схемой на рис. 9.5 $q^{(1)} = \text{col}(+1, q_1^{(1)}, q_2^{(1)}, q_3^{(1)})$ – вектор входа базового элемента выходного слоя; $w^{(2)} = \text{col}(w_{1,0}^{(2)}, w_{1,1}^{(2)}, w_{1,2}^{(2)}, w_{1,3}^{(2)})$; $w^{(2)}(0)$ – начальное значение вектора весовых коэффициентов базовых элементов выходного слоя $w^{(2)}(k)$.

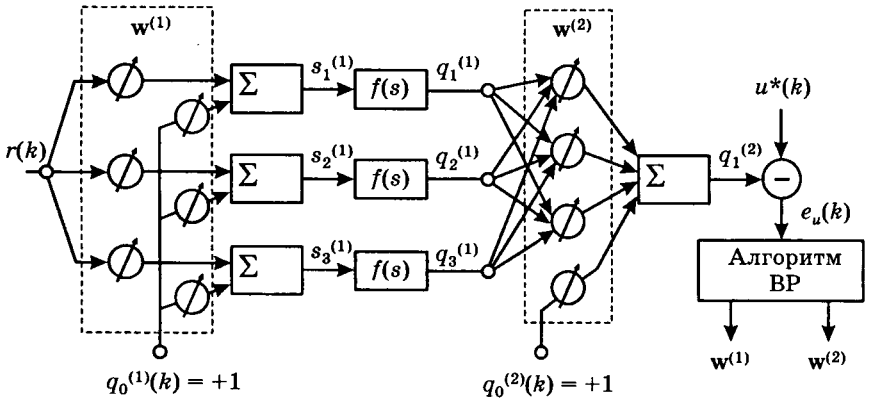


Рис. 9.5. Пример обучаемой двухслойной нейронной сети

Алгоритм настройки весовых коэффициентов $w_i^{(1)}(k) = \text{col}(w_{i,0}^{(1)}(k), w_{i,1}^{(1)}(k))$, $i = 1, 2, 3$, базовых элементов первого слоя составляется согласно (9.13):

$$\begin{aligned}
 w_i^{(1)}(k) &= w_i^{(1)}(k-1) - \gamma_2 \sigma_i^{(1)}(k) q^{(0)}(k), \quad i = 1, 2, 3, \quad \gamma_2 > 0; \\
 q^{(0)}(k) &= \text{col}(+1, r(k)); \\
 \sigma_i^{(1)}(k) &= f'(s_i^{(1)}(k)) \lambda_i^{(1)}(k); \\
 \lambda_i^{(1)}(k) &= w_{1,i}^{(2)}(k) e_u(k).
 \end{aligned}$$

Здесь $w_{1,i}^{(2)}(k)$ – компоненты ($i = 1, 2, 3$) вектора $w^{(2)}(k)$, из которого удалена компонента $w_{1,0}^{(2)}(k)$.

9.7. Алгоритмы обучения нейронной сети в реальном времени

9.7.1. Возможные подходы к синтезу алгоритма обучения

Функционирование обучаемых статических многослойных нейронных сетей происходит в два этапа. На этапе обучения в процессе настройки весовых коэффициентов базовых элементов на минимум критерия обучения $Q(e(w, k))$ сеть для заданного входа $r(k)$ ($k = \overline{1, N}$) формирует аппроксимацию $u(k)$ обучающей функции $u^*(k)$ для тех же значений $k = \overline{1, N}$. На этапе фиксированного рабочего режима обученная сеть с постоянными весовыми коэффициентами при поступлении на ее входы функции $\tilde{r}(k)$, близкой к $r(k)$ на этапе обучения, практически без ошибок восстанавливает функцию $u(k)$ на выходах базовых элементов выходного слоя.

Для реализации этого свойства в нейросетях необходимо задание *всей* обучающей функции (множества) объемом N . В случае управления – это задание оптимального в каком-либо смысле управления $u^*(k)$ на интервале времени управления $k = \overline{1, N}$ для формирования ошибки обучения $e_u(k) = u^*(k) - u(k)$. Такой режим работы сети называют *автономным* (режим *off-line*).

Если же статическая нейронная сеть включается в систему управления динамическим объектом с заранее не известной оптимальной траекторией управления $u^*(k)$ и $k \rightarrow \infty$ и если в качестве ошибки обучения принимается ошибка управления, то необходимое условие обучения такой сети по методу ВР нарушается. Это объясняется тем, что ошибка обучения сети и она же ошибка управления (например, ошибка воспроизведения заданной функции $r(k)$ на выходе инерционного объекта) является функцией, развертывающейся на интервале времени $k = 0, 1, 2, \dots$. Использование в алгоритме ВР вместо ошибки

$e_u(k)$ ($k = \overline{1, N}$) ошибки $e_y(k) = f(r(k), y(k - v))$ ($k \rightarrow \infty$ и $y(k)$ – выход объекта управления, $v = 1, 2, \dots, k-1$) приводит к неудовлетворительному качеству обучения. Для использования многослойной нейросети в *реальном* масштабе времени необходимо ввести в нее динамику, учитывающую текущие значения измерительной информации.

В принципиальном плане можно выделить три подхода к обработке временной последовательности статическими многослойными нейросетями. Во-первых, об использовании для этой цели *рекуррентных* сетей, в частности сетей Хопфилда. Стандартная архитектура этой

однослойной динамической по своей природе сети обладает аппроксимирующими свойствами, необходимыми для воспроизведения желаемых функций времени. Такая сеть может быть интерпретирована как распределенная система БПЭ, настройкой весовых коэффициентов которых формируется устойчивая совокупность активированных состояний – аттракторов. Тем самым формируется память нейросети при предъявлении на ее входы исходного множества сигналов.

Во-вторых, в структуру базовых процессорных элементов или нейронной сети можно ввести линейные динамические звенья $W(p)$ или $W(z^{-1})$. Например, можно включить динамическое звено между выходом сумматора базовых элементов и входом нелинейного элемента, реализующего функцию активации $f(s)$. В схеме стандартного базового элемента, изображенного на рис. 9.4, $W(p) = 1$. В качестве непрерывных динамических звеньев $W(p)$ можно использовать типовые звенья p^{-1} , $(p + a)^{-1}$, e^{-ap} и их соединения. Сеть, образованная из таких динамических элементов, также является динамической.

Другой способ состоит в применении однотипных элементов задержки в структуре статической нейросети. Пример структуры такой динамической многослойной нейросети дан на рис. 9.6. Здесь статическая нейросеть выполняет нелинейное преобразование $F(\mathbf{R}_N, \mathbf{U}_N, \mathbf{w}_i^{(l)})$ векторов:

$$\mathbf{R}_N(k - n + 1) \text{ col}[\mathbf{r}(k); \mathbf{r}(k - 1); \dots; \mathbf{r}(k - n + 1)],$$

$$\mathbf{U}_N(k - n + 1) \text{ col}[\mathbf{u}(k); \mathbf{u}(k - 1); \dots; \mathbf{u}(k - n + 1)],$$

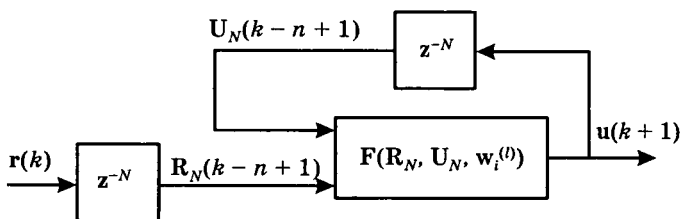


Рис. 9.6. Структура рекуррентной многослойной нейросети с элементами задержки

где символом N обозначен сдвиг во времени векторов $\mathbf{r}(k)$ и $\mathbf{u}(k)$ на $0, 1, \dots, N-1$ периодов дискретизации Δt в блоках элементов задержки z^{-N} . Такая рекуррентная нейросеть реализует динамическую нелинейную модель многомерного объекта управления, описываемую нелинейным разностным уравнением n -го порядка:

$$\mathbf{u}(k + 1) = \mathbf{f}[\mathbf{u}(k), \mathbf{u}(k - 1), \dots, \mathbf{u}(k - n + 1); \mathbf{r}(k), \mathbf{r}(k - 1), \mathbf{r}(k - n + 1)],$$

где векторная нелинейная функция $\mathbf{f}(\cdot) \in F(\cdot)$ формируется сетью в процессе обучения путем настройки весовых коэффициентов $\mathbf{w}_i^{(l)}$.

В-третьих, динамика может быть введена в алгоритм обучения статической нейросети [1]. В этом случае аргумент функции обучения $Q(e(t))$ изменяется в силу уравнений объекта или его желаемой модели. Алгоритм обучения в некотором смысле играет роль «модулирующей» функции нелинейного статического преобразования входной функции $g(t)$, выполняемого сетью.

Две особенности следует отметить у последнего подхода. Введение динамики в алгоритм обучения статической нейросети придает ей свойства динамической сети, но без использования обратных связей, как в сети Хопфилда или как в сетях с динамическими базовыми элементами. Процесс обучения по динамическому алгоритму позволяет объединить в один оба отмеченных ранее этапа функционирования статической нейросети, что существенно при использовании ее в качестве регулятора в системах управления. По этим причинам для решения практических задач управления предпочтителен третий подход, позволяющий обучать статические многослойные нейросети в режиме реального времени в трех модификациях: 1) с использованием уравнений состояния динамического объекта управления (или его явной модели); 2) с использованием в стандартном алгоритме ВР прогноза ошибки $\hat{e}(t)$; 3) с использованием для обучения нейронной сети агрегированных макропеременных, отображающих желаемые режимы работы системы управления. Так как нейронная сеть осуществляет настраиваемое нелинейное преобразование входных переменных в процессе обучения, то применение обучаемых МНС наиболее оправданно в задачах управления многомерных нелинейных объектов с изменяющейся во времени динамикой.

В последующем рассматривается последовательное соединение обучаемой многослойной нейронной сети и объекта управления (рис. 9.7).

Схему, приведенную на рис. 9.7, можно воспринимать как систему воспроизведения входной функции $g(t)$ на выходе динамического объекта управления. В этом случае $g(t)$ может быть эталонной траекторией для разомкнутой относительно ее входа системы управления. Одновременно $g(t)$ будет и обучающей траекторией для нейросети. Обучение сети осуществляется путем настройки векторов весовых

коэффициентов $w_i^{(l)}$ нейронов в l -х слоях сети ($l = \overline{1, K}$) с учетом условия минимума критерия обучения $Q = (e(w_i^{(l)}, t))$. В результате с момента t_0 формируется управляющий сигнал $u(t)$, при котором

$y(t) \xrightarrow{t_0 \rightarrow t_1} g(t)$. Интервал (t_0, t_1) составляет цикл обучения сети и одновременно это интервал времени, за которое завершается переходный процесс в системе из обучаемой нейросети и динамического объекта.

Структура на рис. 9.7 известна как схема «инверсного обучения», или «инверсного адаптивного управления без введения жесткой об-

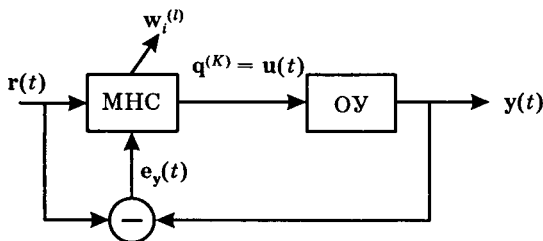


Рис. 9.7. Схема обобщенного настраиваемого объекта с МНС: $r(t)$ – вектор входа обучаемой МНС; $y(t)$ – вектор выхода ОУ; $e_y(t) = r(t) - y(t)$ – ошибка обучения нейронной сети

ратной связи¹». При $e_y(t) \equiv 0$, т. е. когда $y(t) \equiv r(t)$, «идеальное» управляющее воздействие $u^*(t) = A^{-1}r(t)$ (A – оператор ОУ). Нейросеть, обученная на достижение нулевой ошибки $e_y(t)$, ведет себя как инверсная модель объекта управления. Будем рассматривать это наиболее простое соединение сети с динамическим объектом как *обобщенный настраиваемый объект* (ОНО) в составе систем управления. Простейшей из них будет сам ОНО, воспроизводящий входной сигнал $r(t)$ на выходе объекта управления и обладающий, в силу свойств нейросети, адаптивными свойствами.

9.7.2. Динамический алгоритм обратного распространения прогноза ошибки обучения

Сохраняя идею базового алгоритма обратного распространения ошибки обучения многослойной нейронной сети, обратимся к стандартной схеме обучения нейросети по методу ВР (рис. 9.8). Ошибка обучения $e_u(t) = u^*(t) - u(t)$ здесь – ошибка аппроксимации заданной функции $u^*(t)$ («учителя сети») функцией выхода сети $u(t) = F(r(t))$ ($F(r(t))$ – функция нелинейного преобразования (9.10)). В схеме обобщенного настраиваемого объекта на рис. 9.8 функцией $u^*(t)$ является функция оптимального управления в принятом. Аналитическое определение $u^*(t)$ представляет не всегда разрешимую задачу, и, как следствие, становится невозможным вычисление ошибки $e_u(t)$. Если $u^*(t)$ не известна, то можно исходить из следующих соображений, если вместо ошибки $e_u(t)$ применять ошибку воспроизведения $e_y(t) = \text{col}(e_{y_1}(t), \dots, e_{y_l}(t), \dots, e_{y_n}(t)) = r(t) - y(t)$ входной функции $r(t)$ в

¹ Widrow B., Walach E. Adaptive signal processing for adaptive control // Proc. IFAC Adaptive Systems in Control and Signal Process. 1984. P. 7–12.

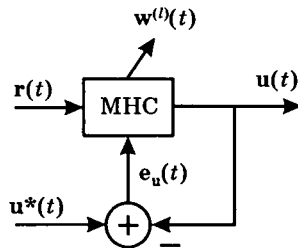


Рис. 9.8. Стандартная схема обучения МНС по методу ВР

структуре обобщенного объекта на рис. 9.7. В качестве математической модели объекта управления примем разностные уравнения «вход-выход». Практически приемлемым будет описание многосвязного объекта с n входными и n выходными координатами системой разностных уравнений порядка ν :

$$\sum_{j=1}^n (a_{i,j}^0 z^\nu + a_{i,j}^1 z^{\nu-1} + \dots + a_{i,j}^\nu) y_j(k) = \sum_{j=1}^n (b_{i,j}^1 z^{\nu-1} + \dots + b_{i,j}^\nu) u_j(k), \quad (9.15)$$

где $i = \overline{1, n}$; z – оператор сдвига (опережения) на время Δt . Обучение нейросети при использовании дискретных сигналов $y_j(k \cdot \Delta t)$, $r_f(k \cdot \Delta t)$, $u_j(k \cdot \Delta t)$, ($k = 0, 1, 2, \dots$; $\Delta t = \text{const}$ – период дискретности) осуществляется за время $k \cdot \Delta t < t \leq (k + 1) \cdot \Delta t$.

При значениях Δt с запасом удовлетворяющих условию импульсной теоремы Котельникова–Шеннона и одновременно больших, чем длительность хотя бы одного цикла обучения, примем допущение о том, что на интервалах времени обучения сети гладкие измеряемые функции $e_u(t)$, $u(t)$, $r(t)$ имеют значимые и конечные величины производных не выше второй. Это допущение позволяет ограничить порядки ν полиномов $a_{i,j}(z)$ при координатах $y_j(k)$ ($i, j = \overline{1, n}$) в системе (9.15) значением $\nu \leq 2$ и, следовательно, ограничить класс используемых математических моделей объекта управления системой n -связных разностных уравнений второго порядка:

$$\mathbf{A}(z)\mathbf{y}(k) = \mathbf{B}(z)\mathbf{u}(k), \quad (9.16)$$

где $\mathbf{u}(k) = \text{col}(u_1(k \cdot \Delta t), \dots, u_n(k \cdot \Delta t))$ и $\mathbf{y}(k) = \text{col}(y_1(k \cdot \Delta t), \dots, y_n(k \cdot \Delta t))$ – векторы входных и выходных сигналов объекта управления;

$$\mathbf{A}(z) = \left\| a_{i,j}^0 z^2 + a_{i,j}^1 z + a_{i,j}^2 \right\|_1^n = \left\| a_{i,j}(z) \right\|_1^n \quad \text{и}$$

$$\mathbf{B}(z) = \left(b_{i,j}^1 z + b_{i,j}^2 \right)_1^n = \left(b_{i,j}(z) \right)_1^n \quad \text{– матрицы полиномов } a_{i,j}(z), b_{i,j}(z).$$

Принятое допущение не носит принципиального характера и имеет лишь практическое значение в тех случаях, когда математическая модель многосвязного объекта управления априорно недоопределена, но измеряются выходные координаты $y_j(k)$ или ошибки управления в обобщенном объекте $e_{yj}(k) = r_j(k) - y_j(k)$.

Используя понятие дискретной передаточной матрицы (ДПМ) и z -преобразования решетчатых функций $y(k)$ и $u(k)$ при нулевых начальных значениях для времени $k < 0$, перепишем (9.16) в следующем виде:

$$y(z) = W(z)u(z) = A^{-1}(z)B(z)u(z). \quad (9.17)$$

В (9.17) аргумент $z = e^{-j\omega \Delta t}$ – комплексная переменная взамен прежнего аргумента z -оператора сдвига на время Δt ; $W(z) = A^{-1}(z)B(z)$ – дискретная передаточная матрица линейного многосвязного объекта управления, удовлетворяющая условию физической реализуемости. Когда $u(z) = u^*(z)$ (в структуре обобщенного объекта нейросеть отображает в этом случае инверсную модель объекта управления с оператором $W^{-1}(z) = (A^{-1}(z)B(z))^{-1} = B^{-1}(z)A(z)$), тогда

$$y^*(z) = r(z) = W(z)u^*(z). \quad (9.18)$$

Из (9.17) и (9.18) следует, что ошибка управления $e_y(z)$ в схеме обобщенного объекта и ошибка обучения в стандартном алгоритме ВР (9.11), (9.12) связаны соотношением

$$e_y(z) = r(z) - y(z) = W(z)[u^*(z) - u(z)] = W(z)e_u(z), \quad (9.19)$$

откуда ошибка обучения сети $e_u(z)$ вычисляется с использованием измеряемой ошибки $e_y(z)$:

$$e_u(z) = W^{-1}(z)e_y(z) = B^{-1}(z)A(z)e_y(z). \quad (9.20)$$

Так как матрица $W(z)$ удовлетворяет условиям физической реализуемости, то согласно (9.20) для вычисления компонент ошибки обучения $e_u(z)$ потребуются упреждающие значения измеряемой ошибки $e_y[(k+l) \cdot \Delta t]$, где в данном случае $l = 1, 2$; в общем случае $l > 2$.

Упреждающие значения $e_y(k+l)$, $e_y(k+2)$, ..., не могут быть точно вычислены, но возможно получение их оценок: $\hat{e}_y(k+l)$, $\hat{e}_y(k+2)$, ..., или прогноза. Для этого необходимо допустить, что функции $e_{yi}(t)$ на интервале времени $t = [0, \infty]$ дифференцируемы не менее v раз (напомним, что v – порядок полиномов в (9.19)). Тогда для аппроксимации s - x производных функций $e_{yi}(t)$ для аргументов $t = k \cdot \Delta t$ ($i = \overline{1, n}$; $\Delta t = \text{const}$) можно использовать формулу

$$e_i^{(s)}(t) = \frac{1}{(\Delta t)^s} \nabla^s \left[e_i(k) + \frac{1}{2!} \nabla e_i(k) + \frac{1}{3!} \nabla^2 e_i(k) + \dots + \frac{1}{(m+1)!} \nabla^m e_i(k) \right],$$

$$s = 1, 2, \dots, v; k = 0, 1, 2, \dots, \quad (9.21)$$

В (9.21) ∇^s – символ *восходящей* конечной разности, который может рассматриваться как аналог производной порядка s и определяется как $\nabla^s e_i(k) = \nabla(\nabla^{s-1} e_i(k)) = \nabla^{s-1} e_i(k) - \nabla^{s-1} e_i(k-1)$. В частности, восходящая конечная разность 1-го порядка определяется в виде $\nabla^1 e_i(k) = \nabla e_i(k) - e_i(k-1)$.

Формула (9.21) точно так же записывается и для аппроксимации s -х производных $e_i(t)$ для $t = k \cdot \Delta t$ с помощью так называемых *нисходящих* конечных разностей. Например, нисходящая конечная разность 1-го порядка определяется как $\Delta^1 e_i(k) = \Delta e_i(k) = e_i(k+1) - e_i(k)$, а конечная разность порядка s – $\Delta^s e_i(k) = \Delta(\Delta^{s-1} e_i(k)) = \Delta^{s-1} e_i(k+1) - \Delta^{s-1} e_i(k)$. Понятия восходящей и нисходящей конечной разности связаны с определением левой и правой производных функции $e_i(t)$:

$$\left(\frac{de_i(t)}{dt} \right)_L = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\nabla e_i(k \cdot \Delta t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{e_i(k \cdot \Delta t) - e_i((k-1) \cdot \Delta t)}{\Delta t};$$

$$\left(\frac{de_i(t)}{dt} \right)_R = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta e_i(k \cdot \Delta t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{e_i((k+1) \Delta t) - e_i(k \cdot \Delta t)}{\Delta t}.$$

Аналогично могут быть записаны формулы, связывающие производные и конечные разности высших порядков.

Если ограничиться одним членом ряда в квадратных скобках формулы (9.17), то можно записать приближенные значения левых и правых производных первого и второго порядков для функций $e_i(t)$: $(e'_i(t))_L$ и $(e'_i(t))_R$; $(e''_i(t))_L$ и $(e''_i(t))_R$. Так как ранее было сделано допущение о существовании производных функций $e_i(t)$ ($i = \overline{1, n}$) в моменты времени $t = k \cdot \Delta t$, то $(e'_i(t))_L = (e'_i(t))_R$ и $(e''_i(t))_L = (e''_i(t))_R$. Из равенства соответствующих конечных разностей первого и второго порядков следуют формулы вычисления прогноза упреждающих значений $\hat{e}_i((k+1) \cdot \Delta t) = \hat{e}_i(k+1)$ и $\hat{e}_i((k+2) \cdot \Delta t) = \hat{e}_i(k+2)$;

$$\hat{e}_i(k+1) = 2e_i(k) - e_i(k-1);$$

$$\hat{e}_i(k+2) = 4e_i(k) - 4e_i(k-1) + e_i(k-2), \quad i = \overline{1, n}. \quad (9.22)$$

Пример. Пусть двумерный объект управления описывается системой разностных уравнений «вход-выход»:

$$\begin{aligned} (z+1)y_1(k) + 0,5y_2(k) &= u_1(k); \\ -7,5z y_1(k) + (z^2 - 3z) y_2(k) &= u_2(k). \end{aligned} \quad (9.23)$$

Характеристический определитель системы (9.23) имеет вид: $\Delta(z) = z(z^2 - 2z + 0,75)$, а его нули из $\Delta(z) = 0$ равны: $z_1 = 0$; $z_2 = 0,5$; $z_3 = 1,5$; т. е. объект управления неустойчив. Матрицы $A = \|a_{i,j}\|_1^2$ и $B = \|b_{i,j}\|_1^2$ в данном случае записываются

$$A(z) = \begin{pmatrix} z+1 & 0,5 \\ -7,5z & z^2 - 3z \end{pmatrix}; \quad B(z) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (9.24)$$

Дискретная передаточная матрица

$$W(z) = A^{-1}(z)B(z) = A^{-1}(z) = \frac{1}{\Delta(z)} \tilde{A}(z) \quad (\tilde{A}(z) - \text{присоединенная матрица})$$

имеет вид

$$W(z) = \begin{pmatrix} \frac{z-3}{(z-0,5)(z-1,5)} & \frac{-0,5}{(z-0,5)(z-1,5)z} \\ \frac{7,5}{(z-0,5)(z-1,5)} & \frac{z+1}{(z-0,5)(z-1,5)z} \end{pmatrix}.$$

Обратная матрица $W^{-1}(z) = B^{-1}A(z) = A(z)$. Ошибку обучения $e_u = \text{col}(e_{1u}, e_{2u})$ согласно (9.20) и (9.24) запишем, заменив $z = e^{j\omega \cdot \Delta t}$ оператором опережения z , принятым в системе (9.15):

$$\begin{aligned} e_{1u}(k) &= e_{y1}(k+1) + e_{y1}(k) + 0,5e_{y2}(k); \\ e_{2u}(k) &= -7,5e_{y1}(k+1) + e_{y2}(k+2) - 3e_{y2}(k+1). \end{aligned} \quad (9.25)$$

Упреждающие значения $e_{y1}(k+1)$, $e_{y2}(k+1)$ и $e_{y2}(k+2)$ заменяем на оценки (прогноз), следуя формулам (9.22):

$$\begin{aligned} e_{1u}(k) &= 3e_{y1}(k) - e_{y1}(k-1) + 0,5e_{y2}(k); \\ e_{2u}(k) &= -15e_{y1}(k) + 7,5e_{y1}(k-1) - 2e_{y2}(k) - e_{y2}(k-1) + e_{y2}(k-2). \end{aligned} \quad (9.26)$$

Алгоритм (9.26) вычисления компонент вектора ошибок обучения $e_u(k)$ дополняет стандартные алгоритмы ВР (9.11)–(9.12) и вместе с ними реализует пример динамического алгоритма ВР с использованием оценок прогноза ошибки обучения нейросети в структуре обобщенного настраиваемого объекта (далее алгоритм ВРР – back propagation with prediction). Динамический алгоритм ВР с прогнозом в вычислительном аспекте более прост, чем динамический алгоритм SBP, приведенный в [1,2]. Для его применения не требуется восстанавливать вектор состояния объекта управления; достаточно лишь измерять выходные координаты обобщенного объекта, поскольку в алгоритме ВРР используется дискретная динамическая модель «вход-выход» многосвязного объекта управления, а не уравнения состояния, как в алгоритме обучения SBP. Замена чистых производных конечными разностями при выполнении необременительных условий на аналитические свойства измеряемых функций ошибок $e(t)$ позволяет вычислить оценки упреждающих значений ошибок обучения, необходимые в алгоритме ВРР.

9.7.3. Обучение многослойных нейронных сетей с использованием макропеременных состояния

Обучаемая многослойная нейронная сеть с нелинейными функциями активации осуществляет настраиваемое нелинейное преобразование многомерной информации. Динамика такого преобразования описывается векторными нелинейными дифференциальными уравнениями, общая размерность которых определяется произведением числа настраиваемых весовых коэффициентов синаптических связей и числа нейронов сети. Даже для малоразмерных (по числу нейронов в скрытых слоях) нейросетей, например, порядка 3–5 с числом настраиваемых коэффициентов 3, эквивалентная размерность динамической модели сети составляет значение 9–15. Нелинейной динамической структуре обучаемой нейросети соответствуют виртуальные пространства состояний высокой размерности. Вместе с нелинейным объектом настраиваемая многослойная нейронная сеть создает сложную и изменяемую в процессе обучения топологию нелинейного фазового пространства высокой размерности, что и является предпосылкой к организации открытых систем управления со сложным динамическим поведением.

В соответствии с концепцией синергетического управления в таких системах существуют аттракторы и репеллеры, находящиеся в сложной нелинейной зависимости друг с другом [3]. Тогда цель адаптивного управления может быть поставлена, как такое обучение МНС, когда изображающая точка фазового пространства системы асимптотически переходит от начального аттрактора к следующему аттрактору более низкой размерности, вплоть до заданного целевого аттрактора, которому соответствует *желаемое* техническое состояние объекта. Настраиваемая многослойная нейросеть выполняет функцию адаптивного регулятора состояния, реализуя процесс генерации обратной связи на многообразиях. Принципиальным является тот факт, что для настройки нейросети не обязательно задание параметризованной нелинейной модели. Для обучения сети используется макроинформация в виде агрегированных макропеременных или технологических инвариантов для данного класса объектов. Для формирования макропеременных (это одна из проблемных задач нейроуправления) используются измерения выходов объекта или векторов состояния – в более общем случае.

Аналитический синтез оптимального закона управления как прототип нейросетевой реализации целесообразно выполнять в соответствии с синергетической теорией управления – на основе *метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов*

(АКАР). Концепция подхода к синтезу нейросетевых систем адаптивного управления включает следующие положения:

1. Адаптивный закон управления формируется в классе *изменяемых во времени нелинейных функций* не только для классов нелинейных, но и для класса линейных объектов с изменяющимися во времени динамическими свойствами.

2. Размерность фазового пространства нелинейного адаптивного регулятора должна быть *не меньше, а больше* размерности расширенного фазового пространства нелинейного объекта и учитываемой динамики внешней среды его функционирования.

3. Формирование нелинейных адаптивных законов должно основываться, главным образом, на использовании *текущей сигнальной информации*, получаемой с датчиков на выходах объекта.

4. В качестве адаптивного регулятора следует выбирать структуру, потенциально способную производить *полную реконструкцию достоверной модели* динамической системы, либо *изначально содержать в себе возможные решения для максимально широкого класса задач*, либо сочетать решение обеих задач.

5. Техническая база для реализации адаптивных регуляторов – *искусственные нейронные сети*, в частности – нелинейные многослойные нейронные сети.

Базовые функциональные схемы адаптивных систем (рис. 9.9) не выходят за рамки двухуровневых структур адаптивных систем прямого действия. Но существенно различаются функции блоков такой системы. Блок, обозначенный как «Алгоритм ...», строится на основе информации о классе математических моделей реального нелинейного объекта управления и это – *перестраиваемая* часть адаптивного нейрорегулятора. Блок «Регулятор» должен обладать способностью

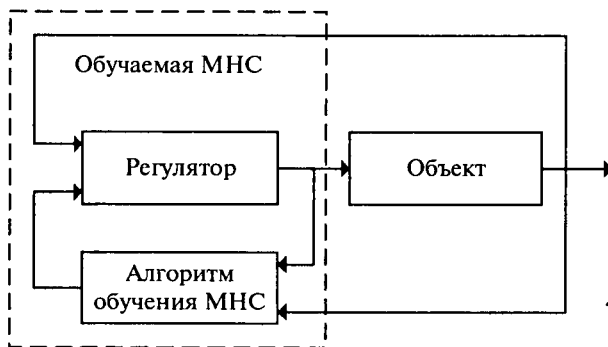


Рис. 9.9. Типовая функциональная схема нейросетевой системы управления

реализовать функцию из класса и это – *неизменяемая* часть нейрорегулятора для того класса нелинейных моделей объекта, для которых предназначен типовой адаптивный регулятор. Полезно провести параллель между типовыми ПИД-регуляторами и рассматриваемой структурой. В ПИД-регуляторе неизменяемая часть – это аналоговая или цифровая схема с нормированными сигналами вход/выход, формирующая компоненты ПИД-закона, а настраиваемая часть – параметры ПИД-закона под конкретный объект в классе типовых линейных моделей. В адаптивном нейрорегуляторе неизменяемая часть выполняется в виде настраиваемой МНС, потенциально «содержащей» множество нелинейных функций управления, а перестраиваемая часть формируется на основе *типовой макроинформации* о состоянии конкретного объекта в классе и *типового алгоритма* настройки весовых коэффициентов синаптических связей искусственных нейронов (или библиотеки типовых алгоритмов). Из предложенного подхода к построению типового адаптивного нейроконтроллера следует, что принципиальная возможность такого построения базируется на использовании трех *типовых* решений:

- *типовой однородной вычислительной структуры* регулятора Р на базе обучаемой многослойной нейронной сети;
- *типовой информации о состоянии* объекта в виде макропеременных – инвариантов фазового пространства объекта управления или системы в целом;
- *типовых алгоритмов* обучения нейросети.

Естественно, что другие типовые решения, о которых речь шла в начале раздела, также необходимо использовать в реализации нейрорегулятора.

9.8. Синтез нейрорегуляторов с использованием макропеременных

В основе синтеза используются положения синергетической концепции управления многомерными нелинейными объектами в динамических системах. С другой стороны, многослойные нейронные сети служат универсальным или почти универсальным средством формирования управляющих воздействий, что достаточно подробно обсуждалось в предшествующих главах книги. С целью выявления преимуществ такого объединения дадим сначала краткое введение в теорию синергетического управления, в его основные положения и используемый математический аппарат.

9.8.1. Краткое введение в теорию синергетического управления

Конструктивное содержание теории синергетического управления составляет метод аналитического конструирования агрегированных нелинейных регуляторов (метод АКАР). Основные положения этого метода рассмотрим на примере решения задачи стабилизации динамической системы, модель которой задана системой дифференциальных уравнений (9.27):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + G_1(x_1)x_2, \\ \dot{x}_2 = f_2(x) + G_2(x)u; \end{cases} \quad (9.27)$$

где $x = (x_1 : x_2)$ – вектор состояния, $x_1 \in R^k$, $x_2 \in R^m$, $x \in R^n$, $n = k + m$, $n > m$; $u \in R^m$ – вектор управлений;

$$G_1(x_1) = [g_{11}(x_1), \dots, g_{1m}(x_1)], \quad (9.27, a)$$

$$G_2(x) = [g_{21}(x), \dots, g_{2m}(x)], \quad (9.27, б)$$

и векторные функции f_1 , f_2 , g_{11} , ..., g_{1m} , g_{21} , ..., g_{2m} являются дифференцируемыми. Требуется определить закон управления $u = u(x)$ такой, чтобы в замкнутой этим управлением системе достигалась, например, стабилизируемость положения равновесия системы, т. е. цель управления:

$$x(t) \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow +\infty. \quad (9.28)$$

Особенностью метода АКАР является *переход от управления в пространстве состояний к управлению в пространстве агрегированных макрпеременных, отражающих желаемое состояние управляемого объекта*. Для реализации поставленной цели на первом этапе в методе АКАР предлагается выбрать *функцию выхода* для системы (9.27)

$$y = \Psi(x), \quad y \in R^m, \quad \Psi \in C^1, \quad (9.29)$$

такую, что из равенства

$$\Psi(x(t)) \equiv 0 \text{ для всех } t \geq 0 \quad (9.30)$$

следует предельный переход (9.28). Функция выхода полностью отражает макросостояние системы: чем ближе значение выхода к нулю, тем ближе система к реализации цели управления (9.28). По этой причине наиболее целесообразно обеспечивать возможность измерения именно этого сигнала выхода при конструировании системы управления сложным динамическим процессом. В последующем оба термина: «функция выхода» и «агрегированная переменная» будут использоваться как равносильные. Уравнение $\Psi(x) = 0$ задает в пространстве состояний системы (9.27) *желаемое многообразие*, т. е. та-

кое множество точек пространства состояний, достижение которых гарантирует выполнение (9.28). Подобный выбор функции выхода позволяет перейти от цели управления, заданной в виде предельного перехода (9.28), к «промежуточной» цели управления, выраженной уравнением (9.30). По условию размерность выхода m меньше размерности вектора состояния n , отсюда формализация цели управления в виде (9.30) позволяет упростить процесс решения задачи.

При этом возникает вопрос: как выбрать для системы (9.27) функцию выхода вида (9.29)? В методе АКАР предполагается, что разработчику известна функция закона управления для «внутренней» подсистемы (9.27, а), при этом в качестве «внутреннего» сигнала управления рассматривается координата x_2 вектора состояния. Термин «внутренний» в методе АКАР вводится для обозначения факта того, что непосредственно внешнее управление u не влияет на динамику подсистемы (9.27, а). В качестве основной связи этой подсистемы с внешней средой выступает переменная x_2 . Так как цель управления (9.28) предполагает стремление к нулю всего вектора состояния (векторов x_1 и x_2 одновременно), логично возложить на векторную переменную x_2 задачу управления «внутренней» подсистемой (9.27, а):

$$x_2 = \alpha(x_1),$$

где функция α – дифференцируема, $\alpha(0) = 0$ и подстановка этого управления во внутреннюю подсистему

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1) + G_1(x_1) \alpha(x_1)$$

означает выполнение цели управления (9.28) по векторной в общем случае переменной x_1 :

$$x_1(t) \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow +\infty. \quad (9.31)$$

В этом случае в качестве функции выхода системы целесообразно выбрать разность

$$\Psi(x) = x_2 - \alpha(x_1). \quad (9.32)$$

Предположим, что для функции выхода (9.32) выполнено равенство (9.30) для всех $t \geq 0$. Это означает, что $\Psi \equiv 0$ для всех моментов времени $t \geq 0$ и $x_2(t) = \alpha(x_1(t))$. Тогда в силу условий, предъявленных к функции α , будет выполнен предельный переход (9.29), но $\alpha(0) = 0$ и функция α – дифференцируема, следовательно:

$$x_2(t) \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow +\infty$$

и цель управления (9.28) достигается. Проиллюстрируем рассмотренную процедуру выбора функции выхода $y = \Psi(x)$ в виде (9.32).

Пример 9.8.1. Рассмотрим для простоты линейную динамическую систему, объект в которой есть последовательное соединение двух интеграторов:

$$\dot{x}_1 = x_2;$$

$$\dot{x}_2 = u.$$

Напомним, что целью управления является стабилизация системы. Выберем «внутренний» закон управления для этой системы следующим образом:

$$x_2 = \alpha(x_1) = -ax_1, \quad a > 0,$$

в этом случае функция выхода (9.32) примет вид:

$$y = \Psi(x_1, x_2) = x_2 + ax_1.$$

Подставляя выбранное управление во «внутреннюю» подсистему $\dot{x}_1 = x_2$, получим асимптотически устойчивую линейную систему

$$\dot{x}_1 = -ax_1,$$

в которой, очевидно, выполняется цель управления (9.29) по переменной x_1 .

Пример 9.8.2. Решим ту же задачу для нелинейной динамической системы:

$$\dot{x}_1 = -x_1 + (1 + x_1^2)x_2;$$

$$\dot{x}_2 = u.$$

Выбирая здесь «внутреннее» управление

$$x_2 = 0,$$

получим, что с таким управлением «внутренняя» подсистема становится асимптотически устойчивой линейной системой (как и в предыдущем примере). В этом случае функция выхода (9.32) совпадает с переменной состояния x_2 :

$$y = x_2.$$

Пример 9.8.3. Рассмотрим систему уравнений, описывающую поведение математического маятника в верхнем неустойчивом положении равновесия:

$$\dot{x}_1 = x_2;$$

$$\dot{x}_2 = \sin x_1 + x_3;$$

$$\dot{x}_3 = u.$$

В этом примере динамика «внутренней» подсистемы характеризуется системой из двух дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \sin x_1 + x_2; \end{cases}$$

а переменная x_3 используется в качестве управления. Выберем закон «внутреннего» управления следующим образом:

$$x_3 = \alpha(x_1, x_2) = -a_1x_1 - a_2x_2 - \sin x_1, \quad a_1, a_2 > 0.$$

Подставляя x_3 в систему уравнений «внутренней» подсистемы, получим *линейную* редуцированную (т. е. пониженного порядка) систему уравнений движения математического маятника:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -a_1 x_1 - a_2 x_2. \end{cases}$$

При выбранных ограничениях на значения коэффициентов a_1, a_2 ($a_1, a_2 > 0$) эта система будет асимптотически стабилизируемой.

Функция выхода (9.32) в рассматриваемом примере имеет вид:

$$y = x_3 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \sin x_1.$$

Итак, необходимый ограничением на значения коэффициентов (в общем виде в соответствии с (9.30); в частном случае, например, в виде функции выхода (9.32) означает решение поставленной задачи и окончание первого этапа синтеза оптимального закона управления по методу АКАР.

Обычно начальные условия в системе таковы, что равенство (9.30) нарушено в начальные моменты времени. В этом случае на внешнее управление и возлагается задача перевода изображающей точки траектории системы на желаемое многообразие $\Psi(x) = 0$ с последующим удержанием системы на нем. При этом равенство (9.30) уже оказывается выполненным не для всех $t \geq 0$, а только для некоторых достаточно больших моментов времени $t \geq t^*$ или даже при $t \rightarrow +\infty$. В последнем случае необходимо дополнительно анализировать свойства синтезированной системы.

На *втором* этапе в методе АКАР для выбора соответствующего закона управления и вводится так называемый сопровождающий функционал:

$$J = \int_0^{\infty} \Psi^T(t) \Psi(t) + \varphi(\Psi(t))^T \varphi(\Psi(t)) dt, \quad (9.33)$$

минимуму которого должны соответствовать переходные процессы по выходу (9.32). Физическое обоснование свойств этого вида функционалов содержится в работе [3]. Согласно вариационным методам оптимизации экстремаль функционала (9.33) примет вид:

$$T\dot{\Psi}(t) + \varphi(\Psi(t)) = 0 \text{ для } \forall t \geq 0, \quad T^T = T > 0. \quad (9.34)$$

В зависимости от свойств функции φ можно обеспечить необходимое качество переходных процессов по выходу. В числе основных требований, предъявляемых к функции φ , укажем следующие:

$$\varphi(0) = 0 \text{ и } \Psi^T \varphi(\Psi) > 0, \text{ если } \Psi \neq 0. \quad (9.35)$$

Решение дифференциального уравнения (9.34) с функцией φ , удовлетворяющей условиям (9.35), наделено свойством:

$$\Psi(t) \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow \infty. \quad (9.36)$$

Найдем закон управления u , используя уравнение (9.34). Для этого перепишем его через переменные вектора состояния x :

$$\dot{\Psi} + T^{-1}\varphi(x_2 - \alpha(x_1)) = 0.$$

Вычислим $\dot{\Psi}$ с учетом (9.32):

$$\begin{aligned} \dot{\Psi} &= \frac{\partial \Psi}{\partial x_2} \dot{x}_2 + \frac{\partial \Psi}{\partial x_1} \dot{x}_1 = \dot{x}_2 - \frac{\partial \alpha}{\partial x_1} \dot{x}_1 = \\ &= f_2(x) + G_2(x)u - \frac{\partial \alpha}{\partial x_1} [f_1(x_1) + G_1(x_1)x_2], \end{aligned}$$

откуда экстремаль (9.34) можно выразить следующим образом:

$$f_2(x) + G_2(x)u - \frac{\partial \alpha}{\partial x_1} [f_1(x_1) + G_1(x_1)x_2] + T^{-1}\varphi(x_2 - \alpha(x_1)) = 0. \quad (9.37)$$

Пусть $\text{rank}[G_2(x)] = m$ для всех $x \in R^n$. Это означает, что во всех точках пространства состояний матричная функция $G_2(x)$ имеет обратную. Тогда уравнение (9.37) имеет решение относительно векторной функции управления:

$$u = -G_2^{-1}(x) \left(T^{-1}\varphi(x_2 - \alpha(x_1)) + f_2(x) - \frac{\partial \alpha}{\partial x_1} [f_1(x_1) + G_1(x_1)x_2] \right). \quad (9.38)$$

Для системы (9.27) с законом управления (9.38) выполнено равенство (9.34) и, следовательно, такая система наделена свойством (9.36).

На *третьем* этапе осуществляется анализ полученного решения. Условия применимости метода АКАР, устойчивости, диссипативности и условия сохранения желаемых свойств системой при внешних возмущениях излагаются в [11, 24]. Здесь анализ этих нетривиальных условий опущен. В общем случае будем считать, что *всегда* будет существовать некоторая окрестность начала координат пространства состояний, «стартуя» из которой, изображающая точка траекторий системы (9.27) с учетом (9.38) достигнет начала координат пространства состояний и тем самым будет выполнена цель управления (9.28).

Пример 9.8.1 (продолжение). В последующем для всех рассмотренных примеров 9.8.1–9.8.3 выберем функцию φ в классе линейных:

$$\varphi(\Psi) = \Psi.$$

Для этой функции выполнено условие (9.35), так как $\varphi(0) = 0$ и $\Psi\varphi(\Psi) = \Psi^2 > 0$ для $\Psi \neq 0$. Запишем уравнение (9.34):

$\dot{\Psi} + T^{-1}\Psi = (\dot{x}_1 + ax_2) + T^{-1}(x_1 + ax_2) = (x_2 + au) + T^{-1}(x_1 + ax_2) = 0$, которое в данном случае имеет следующее решение относительно управления (9.38):

$$u = -aT^{-1} - (a - T^{-1})x_2.$$

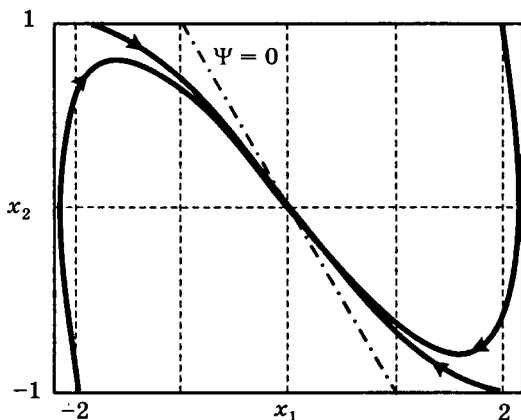


Рис. 9.10. Графики интегральных кривых к примеру 8.1

Исходная система относится к классу линейных, где закон управления формируется в соответствии с приведенным соотношением в канале отрицательной обратной связи по вектору состояния.

Динамика системы при $a = T = 1$ с иллюстрируется графиками на рис. 9.10. В этом примере желаемое многообразие (напомним: множество точек пространства состояний, для которых выполнено $\Psi(x) = 0$) представляет собой прямую линию.

Пример 9.8.2 (продолжение). Запишем для этого примера уравнение (9.34):

$$\dot{\Psi} + T^{-1}\Psi = \dot{x}_2 + T^{-1}x_2 = u + T^{-1}x_2 = 0,$$

откуда закон управления (9.38) примет вид:

$$u = -T^{-1}x_2.$$

Отметим, что и в этом примере полученный закон управления – линейный, а желаемое многообразие представляет собой прямую в пространстве состояний.

Графики, иллюстрирующие динамику замкнутой системы, представлены на рис. 9.11. Из анализа этих кривых видно, что не для всех начальных условий достигается цель управления (9.28). Например, для кривой, отмеченной цифрой 1, выполнен предельный переход (9.36). Видно, что с течением времени координата x_1 (функция выхода) стремится к нулю, при этом координата $x_1 \rightarrow +\infty$ при $t \rightarrow +\infty$.

Для стабилизации «внутренней» подсистемы можно предложить не единственный закон управления $x_2 = \alpha(x_1)$, при этом все они будут обеспечивать свойство (9.29) для этой подсистемы. Отличие этих законов будет состоять в дополнительных свойствах, привносимых

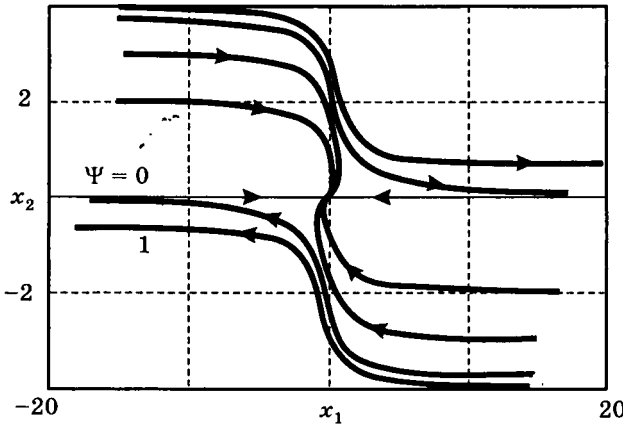


Рис. 9.11. Графики интегральных кривых к примеру 9.8.2

во «внутреннюю» подсистему. В частности, выбор «внутреннего» управления в виде $x_2 = -x_1$ снимает проблему.

Пример 9.8.3 (продолжение). Запишем для этого примера уравнение (9.34):

$$\begin{aligned} \dot{\Psi} + T^{-1}\Psi &= (\dot{x}_3 + (a_1 + \cos x_1)\dot{x}_1 + a_2\dot{x}_2) + \\ &+ T^{-1}(x_3 + a_1x_1 + a_2x_2 + \sin x_1) = \\ &= u + (a_1 + \cos x_1)x_2 + a_2(\sin x_1 + x_3) + \\ &+ T^{-1}(x_3 + a_1x_1 + a_2x_2 + \sin x_1) = -0. \end{aligned}$$

Закон управления (9.38) в этом случае примет вид:

$$u = -(a_1 + T^{-1}a_2 + \cos x_1)x_2 - (a_2 + T^{-1})(\sin x_1 + x_3) - T^{-1}a_1x_1$$

и относится к классу нелинейных функций. Уравнение желаемого многообразия $\Psi = 0$ здесь задает более сложную поверхность в пространстве состояний математического маятника, представленную на рис. 9.12. Там же представлены графики интегральных кривых этой системы. Из рис. 9.12 видно, что изображающая точка стремится к поверхности $\Psi = 0$ с последующим ее движением к началу координат. Интегральные кривые на рис. 9.12 соответствуют различным начальным условиям, при которых изображающие точки «располагаются» в данном примере над поверхностью $\Psi = 0$.

Полученные на базе метода АКАР законы управления вида (9.38) представляют собой различные виды линейных и нелинейных функций, реализуемых в обратной связи системы (9.27) компьютерной программой индивидуально для каждого объекта. Универсальной реализацией «синергетических» законов управления служит обуча-

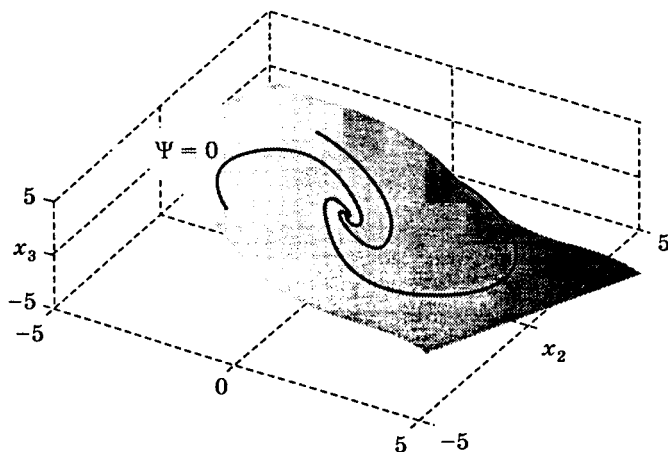


Рис. 9.12. Графики интегральных кривых и поверхность желаемого многообразия к примеру 9.8.3

емая многослойная нейронная сеть. Термин «реализация» в нашем случае будет означать воспроизведение на выходе обучаемой в реальном времени нейросети управления (9.38). Доказано, что с помощью двухслойной нейросети с сигмоидными функциями активации можно аппроксимировать почти любую нелинейную непрерывную функцию, в том числе вида (9.38).

Но вопрос состоит в том, как этого добиться, т. е. как сконструировать алгоритм обучения нейросети, обеспечивающий требуемое качество процессов на выходе нейросети? Как совместить динамические процессы управления нелинейным объектом и настройки многослойной нейросети? Для этой цели можно использовать стандартный алгоритм обратного распространения прогноза ошибки обучения/управления. Однако при этом не гарантируется требуемое качество процессов в нейросистеме. Применение макропеременных, в том числе целевых макропеременных, открывает такую возможность, как это следует из приведенных выше примеров. Еще более тонкий механизм обучения нейросети и достижение гарантированного качества возможен, если использовать функцию обобщенной ошибки обучения $\sigma(\Psi)$, в которой аргументом служит целевая макропеременная.

В общем случае синтез структуры и алгоритмов управления в нейросетевой системе включает выбор архитектуры сети, функционала обучения и цели управления, составление расширенной системы дифференциальных уравнений, выбор обобщенной ошибки обучения σ и синтез алгоритма обучения/управления. Подробно об этом можно прочитать в [2].

9.8.2. Синтез функций обобщенной ошибки обучения МНС

Процедуру выбора обобщенной ошибки σ можно разделить на *два* этапа: на *первом этапе* происходит выбор аргументов функции обобщенной ошибки, в качестве которых может быть использована любая измерительная информация; на *втором этапе* задается оператор преобразования выбранных аргументов функции σ .

Аргументы функции обобщенной ошибки следует выбирать максимально информативными в смысле цели управления и описания движений в системе (9.42). Задание оператора преобразования для функции σ определяет характер переходных процессов и влияет на вычислительную сложность алгоритма обучения нейросети, устойчивость и качество процесса обучения/управления. Рассмотрим возможный подход к обоснованному выбору обобщенной ошибки – в зависимости от используемых данных измерения.

1. Аргументом функции обобщенной ошибки служит вектор ошибки обучения сети $e_u = u^* - u$. Этот аргумент не отражает текущее состояние объекта управления. Функция желаемого управления u^* должна быть задана в явном виде. В простейшем случае $\sigma = e_u$ и в таком виде обобщенная ошибка используется в стандартном алгоритме ВР, а режим работы нейросетевой системы называется *супервизорным*.

2. Аргументом ошибки σ принимается сигнал рассогласования $e_x = r - x$ – ошибка управления. Вектор ошибки содержит информацию о текущем состоянии объекта управления. Применение класса *динамических операторов* L определяет класс функций обобщенных ошибок:

$$\sigma = L\{e_x\}.$$

Обобщенные ошибки с динамическим оператором $L\{e_x\}$ открывают возможность обучения сети в темпе процессов управления и совмещения этих процессов. Такие обобщенные ошибки содержат информацию не только о текущем состоянии объекта управления, но и о динамике переходных процессов в нейросетевой системе. Примером простейшего динамического оператора $L\{e_x\}$ может служить линей-

ный дифференциальный полином $L(p) = p^v + \sum_{j=0}^{v-1} \lambda_j p^j$, где $p = \frac{d}{dt}$,

λ_j – коэффициенты, выбираемые из требований к качеству процесса обучения и его устойчивости (полином L -гурвицев).

Если оператор L единичный, то функция обобщенной ошибки σ содержит информацию только о текущем состоянии объекта управления. Для учета динамики объекта в алгоритм обучения вводят дина-

мическую модель состояния системы. Примером такого подхода может служить упоминавшийся выше алгоритм SBP, введенный в [1, 2].

3. Применение обучаемых МНС в нелинейных многосвязных системах на основе теории синергетического управления приводит к управлению на основе *агрегированных макропеременных* Ψ .

Функция обобщенной ошибки $\sigma = \sigma(\Psi)$ характеризует состояние объекта на желаемом многообразии $\Psi = 0$ и согласует процесс обучения сети и достижения поставленной цели управления.

Выбирая динамический оператор L соответствующим цели управления, заданной функционалом (9.33), и уравнениям экстремали (9.34), можно найти управляющие воздействия, отвечающие решению функциональных уравнений (9.34). Функция обобщенной ошибки записывается в виде:

$$\sigma = L\{\Psi\} = \dot{\Psi} + T^{-1}\varphi\{\Psi\}. \quad (9.39)$$

Выбор оператора L и макропеременной Ψ подчинен функциональному назначению нейросетевой системы управления и предопределяет структуру системы: каналы измерения переменных системы для получения необходимой информации, блоки вычислительных алгоритмов, исполнительные устройства.

9.8.3. Обобщенная функциональная структура нейросетевых систем управления

В общем виде уравнения состояния, описывающие функционирование системы управления с нейросетью соответствуют системе уравнений (9.42). Примем в качестве обобщенной ошибки σ левую часть функциональных уравнений семейства экстремалей (9.34) для сопровождающего функционала (9.33), минимизация которого приводит к *совмещению в единый динамический процесс* обучение МНС и формирование алгоритма управления объектом (9.27).

Обобщенная структурная схема НСУ изображена на рис. 9.13. Система обладает следующими свойствами:

- обеспечивает предельный переход (9.36) для объекта (9.27);
- гарантирует оптимальное в смысле выбранного критерия (9.33) движение изображающей точки к многообразию $\Psi = 0$;
- параметрическое управление системой (задание параметров T и вида функций φ) дает возможность определять качество и форму переходных процессов;
- задание функциональных уравнений (9.34) в общем виде как устойчивого подсемейства экстремалей критерия (9.33) и использование в уравнениях (9.34) только измерительной информации обеспечивает независимость решения от конкретных параметров объекта и изменения его структуры, при условии,

что данные изменения не противоречат физической реализуемости необходимого решения.

Пример 9.8.3 (продолжение). Проиллюстрируем решение задачи синтеза нейросетевой системы управления математическим маятником в системе со структурной схемой, приведенной на рис. 9.13.

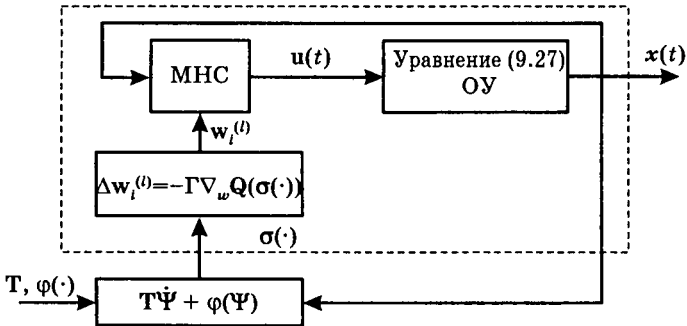


Рис. 9.13. Обобщенная функциональная схема нейросетевой системы управления

Для осуществления *первого* этапа синтеза необходимо определить основные параметры архитектуры нейросетевого регулятора, к которым можно отнести: число слоев нейросети, число нейронов в скрытом слое, тип функций активации, начальные значения весовых коэффициентов синаптических связей и значение коэффициента настройки нейросети γ . Как уже отмечалось, регулярных правил выбора архитектуры многослойных нейросетей в конкретных задачах пока не существует и приходится опираться на опыт разработчика системы и компьютерный эксперимент.

Обычно для задачи управления достаточно использовать двухслойную сеть с линейными функциями активации выходного слоя и гиперболическим тангенсом в скрытом слое. Выберем число нейронов в скрытом слое равным трем. Начальные значения для коэффициентов w выберем случайным образом из отрезка $[-0,5; 0,5]$. Коэффициент настройки сети полагаем $\gamma = 1$.

Второй этап – выбор целевой макропеременной или функции выхода – можно считать выполненным, так как функция выхода для этой модели уже была предложена ранее, при аналитическом синтезе этого примера с использованием метода АКАР.

На *третьем* этапе выберем функцию обобщенной ошибки согласно (9.39):

$$\sigma = \dot{\Psi} + T^{-1}\varphi\Psi = u + (a_1 + \cos x_1)x_2 + a_2 (\sin x_1 + x_3) + T^{-1} (x_3 + a_1x_1 + a_2x_2 + \sin x_1). \quad (9.40)$$

Запишем для выбранной архитектуры нейросети, функции ошибки σ и квадратичного критерия обучения $Q(\sigma) = 0,5\sigma^2$ алгоритм настройки весовых коэффициентов:

$$\dot{\mathbf{w}} = -\gamma \nabla_{\mathbf{w}} Q(\sigma) = -\gamma \sigma \nabla_{\mathbf{w}} \sigma.$$

Вектор весовых коэффициентов синаптических связей может быть составлен следующим образом:

$$\mathbf{w} = \text{col}[\mathbf{w}_1^{(2)}, \mathbf{w}_1^{(1)}, \mathbf{w}_2^{(1)}, \mathbf{w}_3^{(1)}, \mathbf{w}_0^{(1)T}, \mathbf{w}_0^{(2)}],$$

где $\mathbf{w}_1^{(2)} = [w_{1,1}^{(2)}, w_{1,2}^{(2)}, w_{1,3}^{(2)}]$ – вектор-строка весовых коэффициентов выходного слоя; $\mathbf{w}_i^{(1)} = [w_{i,1}^{(1)}, w_{i,2}^{(1)}, w_{i,3}^{(1)}]$ – вектор-строки весовых коэффициентов трех искусственных нейронов в скрытом слое, $i = \overline{1, 3}$; $\mathbf{w}_0^{(1)} = \text{col}[w_{0,1}^{(1)}, w_{0,2}^{(1)}, w_{0,3}^{(1)}]$ – вектор-столбец «смещений» искусственных нейронов в скрытом слое; $w_0^{(2)}$ – коэффициент «смещения» в выходном слое.

Для выбранной нейросети вход-выходное преобразование (9.10) примет вид:

$$\mathbf{u} = \mathbf{q}^{(k)} = \sum_{i=1}^3 w_{1,i}^{(2)} f(\mathbf{w}_i^{(1)} \mathbf{x} + w_{0,i}^{(1)}) + w_0^{(2)}. \quad (9.41)$$

Подставляя (9.41) в (9.40), получим выражение для ошибки σ с явно зависящей от настраиваемых параметров правой частью:

$$\sigma = \sum_{i=1}^3 w_{1,i}^{(2)} f(\mathbf{w}_i^{(1)} \mathbf{x} + w_{0,i}^{(1)}) + w_0^{(2)} + (a_1 + \cos x_1)x_2 + a_2 (\sin x_1 + x_3) + T^{-1} (x_3 + a_1x_1 + a_2x_2 + \sin x_1).$$

Полученная формула поможет нам вычислить частную производную функции σ по вектору \mathbf{w} и записать алгоритм обучения сети для этого примера:

$$\begin{cases} \dot{w}_{1,i}^{(2)} = -\gamma \sigma f(\mathbf{w}_i^{(1)} \mathbf{x} + w_{0,i}^{(1)}), \\ \dot{w}_i^{(1)} = -\gamma \sigma f'(\mathbf{w}_i^{(1)} \mathbf{x} + w_{0,i}^{(1)}) \mathbf{x}, \\ \dot{w}_{0,i}^{(1)} = -\gamma \sigma f'(\mathbf{w}_i^{(1)} \mathbf{x} + w_{0,i}^{(1)}), \\ \dot{w}_0^{(2)} = -\gamma \sigma, \quad i = \overline{1, 3}. \end{cases}$$

Эти уравнения совместно с уравнениями модели математического маятника образуют расширенную модель нейросетевой системы управления.

Подчеркнем, что при вычислении функции обобщенной ошибки в составе функционирующей нейросетевой системы, величина $\dot{\Psi}$ восстанавливается по значениям измеряемого сигнала Ψ . Вычислим

частную производную $\frac{\partial \sigma}{\partial u} = 1$. В [2] в этом случае показано, что обеспечить необходимое качество переходных процессов в системе можно настройкой коэффициента γ .

Результаты численного моделирования с применением программы моделирования обучаемой МНС в формате S-функций пакета MATLAB®, приведенной в приложении 3 [1], представлены на рис. 9.14. Из сравнения графиков видно, что при $t > 0,5$ аналитический закон управления практически точно воспроизводится нейросетью в процессе настройки ее весовых коэффициентов.

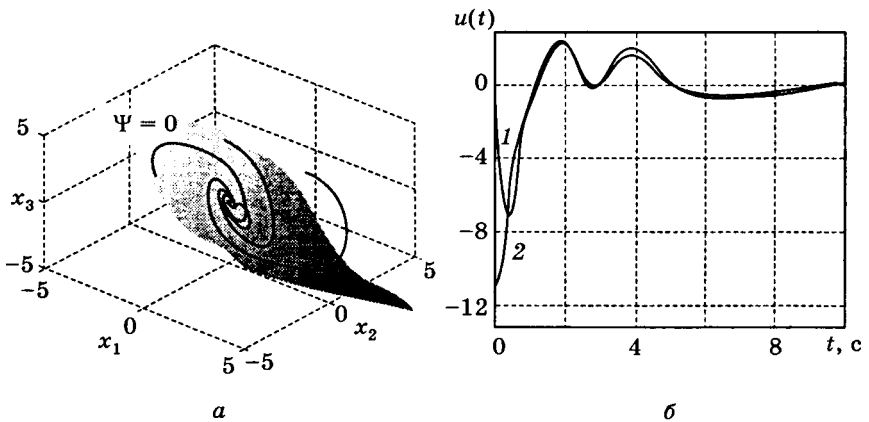


Рис. 9.14. Графики процессов в нейросетевой системе управления:

a – интегральные кривые; b – законы управления:
 1 – нейросетевой, 2 – аналитический

9.9. Заключение

Заклячая раздел по применению искусственных нейронных сетей для проектирования систем управления, следует отметить, что обучаемые многослойные нейросети могут выполнять функции любых регулирующих контроллеров, например, функции типовых промышленных регуляторов. Однако вследствие рассмотренных в книге свойств применение нейросетевого управления наиболее эффективно и, возможно, для настоящего времени безальтернативно в тех случаях, когда применение известных методов аналитического синтеза и анализа систем управления ограничено нарушением условий их применимости в реальных задачах. Использование многослойных нейросетей предпочтительнее в задачах управления *состоянием* в условиях неполноты математической модели объекта, по крайней мере, *текущей* неполноты на уровне параметров и функционально-параметрической неопределенности используемой модели управляемого объекта. Именно такая позиция лежит в основе изложенного в разделе подхода к синтезу нейросетевых систем управления.

Список литературы

1. Терехов В. А., Ефимов Д. В., Тюкин И. Ю. Нейросетевые системы управления: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 2002. – 183 с.
2. Терехов В. А., Ефимов Д. В., Тюкин И. Ю. Нейросетевые системы управления // Сер. «Нейрокомпьютеры и их применение». Кн. 8. Общ. ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2002. – 480 с.
3. Современная прикладная теория управления: «Оптимизационный подход к теории управления». Ч. I. – 400 с.; «Синергетический подход в теории управления». Ч. II. – 559 с.; «Новые классы регуляторов технических систем». Ч. III. – 703 с. / Под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999/2000.

10

МЕТОДЫ СИНТЕЗА РОБАСТНЫХ И АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ¹

Методы анализа и синтеза систем управления, рассмотренные выше, предполагали полную определенность параметров системы. Однако реальные физические объекты и условия, в которых они функционируют, не могут быть учтены абсолютно точно. Очень часто они подвергаются различным возмущениям и изменяются непредвиденным образом. Неопределенность характеристик объекта не позволяет обеспечить оптимальные свойства системы управления и может привести к потере устойчивости. Системы автоматического управления, обеспечивающие требуемое качество функционирования, несмотря на существенную неопределенность характеристик объекта управления, называются робастными.

10.1. Синтез робастных систем во временной и частотной областях

Проектирование систем с робастными свойствами – одна из наиболее важных проблем теории управления. Решению задач оптимизации в условиях наличия внешних и внутренних неопределенностей уделяют большое внимание отечественные и зарубежные исследователи. Методы для решения задач робастного управления в частотной области основаны на *оптимизации в пространствах Харди* [1] – пространстве функционалов типа нормы H_2 и H_∞ .

Ключевым моментом *синтеза робастных регуляторов* во временной области *методами интервального анализа* является решение матричных уравнений типа Лурье–Риккати, полученных на основе условий устойчивости неопределенных систем с различного рода функциями Ляпунова.

10.1.1. Робастная линейно-квадратичная оптимизация

Исследуем чувствительность квадратичного функционала в системах с ограниченной неопределенностью параметров. Задача синтеза

¹ Написано совместно с В. Н. Шашихиным.

управлений, гарантирующих двухсторонние оценки функционала качества, решается на основе достаточных условий оптимальности непрерывных процессов, которые с использованием интервальных функций Ляпунова обобщены для систем с параметрическими возмущениями.

Методика синтеза робастного управления может быть основана на решении функционального уравнения Гамильтона–Якоби–Беллмана с интервальной функцией Ляпунова. Задача определения параметров регулятора с заданными свойствами в конечном итоге сводится к решению двух алгебраических уравнений Риккати с коэффициентами, которые соответствуют граничным значениям параметров исследуемой системы автоматического управления.

10.1.2. Постановка задачи робастной линейно-квадратичной оптимизации

Рассматривается параметрически возмущенная система, модель которой представляется дифференциальным уравнением с вещественными интервальными коэффициентами

$$\dot{x} = \tilde{A}x + \tilde{B}u, \quad x(0) = x_0, \quad (10.1)$$

где $\tilde{A} = (\tilde{a}_{i,j})_1^n = [\underline{A}; \bar{A}] \in IR^{n \times n}$, $\tilde{B} = (\tilde{b}_{i,j})_1^{n,m} = [\underline{B}; \bar{B}] \in IR^{n \times m}$, – интервальные матрицы; $\underline{A} = (\underline{a}_{i,j})_1^n$, $\underline{B} = (\underline{b}_{i,j})_1^{n,m}$, – их нижние границы; $\bar{A} = (\bar{a}_{i,j})_1^n$, $\bar{B} = (\bar{b}_{i,j})_1^{n,m}$ – верхние границы; $x \in R^n$, $u \in R^m$ – векторы состояния и управления соответственно.

Под интервальной системой (10.1) понимается множество линейных систем с вещественными матричными коэффициентами A и B , принимающими произвольные значения из диапазонов $[\underline{A}; \bar{A}]$ и $[\underline{B}; \bar{B}]$.

Цель управления состоит в минимизации функционала

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt, \quad Q = Q^T \geq 0, \quad R = R^T > 0, \quad (10.2)$$

при динамических ограничениях (10.1). Значения функционала (10.2), найденные вдоль траекторий замкнутой системы, при всех $A \in \tilde{A}$ и $B \in \tilde{B}$ должны удовлетворять двухстороннему неравенству $\underline{J} \leq J \leq \bar{J}$ или принадлежать заданному интервалу $J \in [\underline{J}; \bar{J}]$.

10.1.3. Синтез робастного управления

Для решения задачи динамической оптимизации (10.1), (10.2) воспользуемся достаточным условием оптимальности непрерывных процессов. В соответствии с этим условием для оптимальности допустимого процесса $\{x^*(t), u^*(t)\}$ достаточно существование функции $v(t, x)$, обладающей следующими свойствами:

- 1) функция $v(t, x)$ – допускает бесконечно малый высший предел;
- 2) функция $v(t, x)$ – удовлетворяет уравнению Гамильтона–Якоби–Беллмана $\partial v / \partial t = \Psi(t, \partial v / \partial x, x)$.

При синтезе управлений, обеспечивающих устойчивость и заданный уровень качества систем с ограниченной неопределенностью параметров, могут использоваться два подхода, широко распространенные в интервальном анализе. Первый подход связан с рассмотрением интервальных математических объектов (матриц, функций, уравнений и т. д.) как множеств, состоящих из соответствующих «точечных» объектов (объектов с вещественными коэффициентами). При этом необходимые действия выполняются над точечными объектами с последующим объединением результатов.

Данный подход используется на первой стадии синтеза – этапе *выделения множества стабилизирующих регуляторов*. Вторая стадия синтеза – *определение параметров робастного регулятора* – связана с решением интервального матричного уравнения. На этой стадии подход, связанный с рассмотрением интервального объекта как множества точечных объектов, требует решения континуума алгебраических уравнений Риккати с вещественными коэффициентами. Для преодоления возникающих на этом пути трудностей задача нахождения поточечного или объединенного множества решений интервального уравнения трансформируется в задачу определения аппроксимирующего множества решений, которая в традиционных рамках интервального исчисления решается с помощью построения двухсторонних неравенств.

Обобщение достаточных условий оптимальности для систем с ограниченной неопределенностью параметров основано на замене функции Ляпунова $v(x)$ ее естественным интервальным расширением $\tilde{v}(x) = [\underline{v}(x); \bar{v}(x)]$; – интервальной функцией Ляпунова. Обозначим $\mu(x, t)$ воронку интегральных линий с вершиной в точке (x, t) , определяемую множеством отрезков $x_{t,A}$ решений $x(t, x_0, A, u(x))$ системы (10.1), которые соответствуют различным значениям параметров и удовлетворяют условию

$$\mu(x, t) = \{x_{t,A} | \tilde{v}(x_{t,A}) \leq \tilde{v}(x_{0,A}), t_0 < t < T\}.$$

Введем скалярно-оптимизационную функцию $R(x)$ множества $\mu(x, t)$, устанавливающую соответствие между множеством $\mu(x, t)$ и точками числовой оси R_+^1 :

$$R(x) = \sup\{\tilde{v}(x) | x_{t,A} \in \mu(x, t)\}.$$

Скалярно-оптимизационная функция $R(x)$ определяет наибольшее значение производной $\dot{\tilde{v}}(x)$ на ограниченном множестве интегральных воронок, вдоль которых интервальная функция Ляпунова $\tilde{v}(x)$ убывает. Функция $R(x)$ может рассматриваться как обобщение понятия производной положительно определенной функции для систем с интервальными коэффициентами.

Введем вспомогательную функцию

$$\Psi(t, x, u) = R(x) + x^T Q x + u^T R u \quad (10.3)$$

и в качестве функции Ляпунова возьмем интервальную квадратичную форму

$$\tilde{v}(x) = [\underline{v}(x); \bar{v}(x)] = x^T \tilde{P} x = [x^T \underline{P} x; x^T \bar{P} x]. \quad (10.4)$$

Здесь $\tilde{v}(x)$ – естественное интервальное расширение вещественной квадратичной формы. Тогда функциональное уравнение Беллмана примет вид:

$$\min_u \{R(x) + x^T Q x + u^T R u\} \stackrel{def}{=} \min_u \{\Psi(t, x, u)\} \equiv 0.$$

С учетом вида интервальной функции Ляпунова $\tilde{v}(x)$ (10.4) и скалярно-оптимизационной функции $R(x)$ функция (10.3) равна

$$\begin{aligned} \Psi(t, x, u) &= \sup\{\langle \partial \tilde{v}(x) / \partial x, (\tilde{A} x + \tilde{B} u) \rangle | x \in \mu(x, t)\} + \\ &+ x^T Q x + u^T R u = \sup\{2(\tilde{P} x)^T (\tilde{A} x + \tilde{B} u) | x \in \mu(x, t)\} + x^T Q x + \\ &+ u^T R u. \end{aligned}$$

Используя условие стационарности функции $\Psi(t, x, u)$ по u $\partial \Psi(t, x, u) / \partial u \equiv 0$, находим искомое управление:

$$\tilde{u} = -R^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P} x \stackrel{def}{\Leftrightarrow} \{u \in R^m | u = -R^{-1} B^T P x, B \in \tilde{B}, P \in \tilde{P}\}. \quad (10.5)$$

Соотношение (10.5) выделяет множество регуляторов, обеспечивающих устойчивость интервальной системы (10.1).

Чтобы управление (10.5) было оптимальным по отношению к функционалу (10.2), матрицу \tilde{P} необходимо определить из условия тождественного равенства нулю функции $\Psi(t, x, u)$, которая при выбранной квадратичной форме $\tilde{v}(x)$ и синтезированном управлении определяется соотношением

$$\Psi(t, x, u) = \sup\{2(\tilde{P} x)^T (\tilde{A} x - \tilde{B} R^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P} x) | x \in \mu(x, t)\} +$$

$$\begin{aligned}
 &+ x^T Q x + x^T \tilde{P} \tilde{B} R^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P} x = \\
 &= \sup \{ x^T (\tilde{A}^T \tilde{P} + \tilde{P} \tilde{A} - \tilde{P} \tilde{B} R^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P} + Q) x \mid x \in \mu(x, t) \}.
 \end{aligned}$$

Чтобы функция $\Psi(t, x, u)$ была тождественно равна нулю, матрица \tilde{P} должна являться решением интервального матричного уравнения

$$\tilde{P} \tilde{A} + \tilde{A}^T \tilde{P} - \tilde{P} \tilde{D} \tilde{P} + Q = 0, \quad \tilde{D} = \tilde{B} R^{-1} \tilde{B}^T, \quad (10.6)$$

которое эквивалентно множеству матричных уравнений с вещественными коэффициентами

$$\{ PA + A^T P - PDP + Q = 0, A \in \tilde{A}, B \in \tilde{B} \},$$

а под решением \tilde{P} интервального матричного уравнения (10.6) понимается следующее.

Определение 10.1.1. Объединенным множеством решений интервального матричного уравнения (10.6) называется множество

$$\tilde{P} = \{ P \in R^{n \times n} \mid PA + A^T P - PDP + Q = 0, A \in \tilde{A}, B \in \tilde{B} \}, \quad (10.7)$$

включающее решения «точечных» матричных уравнений Риккати

$$PA + A^T P - PDP + Q = 0, \forall A \in \tilde{A}, \forall B \in \tilde{B}.$$

Из множества стабилизирующих регуляторов (10.5) целесообразно выбрать регулятор вида

$$u = -(K_0 \pm \delta K)x,$$

где $K_0 = \text{med } \tilde{K} = (\underline{K} + \overline{K})/2$ – медиана интервального матричного коэффициента обратной связи $\tilde{K} = R^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P}$; $\delta K \in \delta \tilde{K}$ – вариации параметров регулятора ($\delta \tilde{K} = [-0,5; +0,5]$ *wid* \tilde{K} – вариации матричного коэффициента обратной связи; *wid* $\tilde{K} = \overline{K} - \underline{K}$ – ширина интервальной матрицы \tilde{K}).

Данный регулятор следует трактовать как номинальный регулятор с допуском, при этом $\delta \tilde{K}$ – максимально допустимый разброс параметров номинального регулятора, при котором гарантируются устойчивость и качество замкнутой системы, а δK – технически реализуемый допуск на параметры регулятора.

10.1.4. Свойства замкнутой системы

Свойства параметрически возмущенной системы (10.1) с робастным регулятором (10.5)

$$\dot{x} = (\tilde{A} - \tilde{B} R^{-1} \tilde{B}^T \tilde{P}) x \quad (10.8)$$

определяются следующей теоремой.

Теорема 10.1.1. Пусть выполнены следующие условия:

1) Пары матриц (A, B) управляемы, а пары матриц $(Q^{1/2}, A)$ наблюдаемы для всех $A \in \bar{A}, B \in \bar{B}, Q^{1/2}$ – квадратный корень матрицы Q .

2) Множества $\underline{dA}, \overline{dA}$ и $\underline{dB}, \overline{dB}$ параметрических возмущений $\delta A = A - \underline{A}, \overline{\delta A} = \overline{A} - A$ и $\delta B = B - \underline{B}, \overline{\delta B} = \overline{B} - B$ удовлетворяют соотношениям:

$$\underline{dA} = \{ \delta A \in R^{n \times n} \mid 0 \leq \delta A^T P + P \delta A \leq \underline{\Omega}(P), \\ \underline{\Omega}(P) = (P \underline{D} P + Q) \}, \quad (10.9)$$

$$\overline{dA} = \{ \overline{\delta A} \in R^{n \times n} \mid 0 \leq \overline{\delta A}^T \bar{P} + \bar{P} \overline{\delta A} \leq \overline{\Omega}(\bar{P}), \\ \overline{\Omega}(\bar{P}) = (\bar{P} \underline{D} \bar{P} + Q) \} \quad (10.10)$$

$$\underline{dB} = \{ \delta B \in R^{n \times m} \mid 0 \leq \delta D = D - \underline{D} = \\ = \delta B \underline{B}^T + \underline{B} \delta B^T + \delta B \delta B^T \}, \quad (10.11)$$

$$\overline{dB} = \{ \overline{\delta B} \in R^{n \times m} \mid 0 \leq \overline{\delta D} = \overline{D} - D = \overline{\delta B} \bar{B}^T + \bar{B} \overline{\delta B}^T - \overline{\delta B} \overline{\delta B}^T \}, \quad (10.12)$$

где матрицы $P, \bar{P} \in R^{n \times n}$ – симметричные положительно определенные решения «граничных» уравнений Риккати:

$$P A + A^T P - P \underline{D} P + Q = 0, \quad (10.13)$$

$$\bar{P} \overline{A} + \overline{A}^T \bar{P} - \bar{P} \underline{D} \bar{P} + Q = 0. \quad (10.14)$$

Тогда робастный регулятор (10.5) обеспечивает устойчивость системы (10.1) и гарантирует двухсторонние оценки функционала качества (10.2)

$$\underline{J} = x_0^T P x_0 \leq \tilde{J} \leq x_0^T \bar{P} x_0 = \bar{J},$$

или $\lambda_{\min}(\tilde{P}) \|x_0\|^2 \leq \tilde{J} \leq \lambda_{\max}(\tilde{P}) \|x_0\|^2$ (10.15) при вариациях параметров, удовлетворяющих (10.9)–(10.12).

Доказательство. При выполнении условий теоремы 10.1.1 существуют симметричные положительно определенные решения \underline{P} и \bar{P} «граничных» уравнений Риккати (10.13), (10.14) и для всех P , образующих объединенное множество решений (10.7) интервального уравнения (10.6), справедливо $\underline{P} \leq P \leq \bar{P}$ и $P = P^T > 0$. Следовательно, интервальная матрица \tilde{P} – симметричная положительно определенная матрица.

Функция $\tilde{v}(x)$ – положительно определенная функция, допускающая бесконечно малый высший предел. Функция $\tilde{v}(x)$ тождественно равна нулю при невозмущенном движении системы (8). Положительная определенность функции $\tilde{v}(x)$ следует из положительной

определенности интервальной матрицы \tilde{P} ($\forall P \in \tilde{P}$ выполнено $P > 0$). Наличие бесконечно малого высшего предела у функции $\tilde{v}(x)$ эквивалентно выполнению неравенств

$$w_1(x) \leq \tilde{v}(x) \leq w_2(x), \quad (10.16)$$

которые следуют из решения спектральной задачи для интервальных симметричных матриц. В качестве функций $w_1(x)$ и $w_2(x)$ могут быть использованы функции, заданные через оценки собственных чисел интервальной матрицы \tilde{P} :

$$w_1(x) = \underline{\lambda}_{\min}(\tilde{P}) \|x\|^2 = \lambda_{\min}[\text{med } \tilde{P}] - \varepsilon_{\min} \|x\|^2, \quad (10.17, a)$$

$$w_2(x) = \bar{\lambda}_{\max}(\tilde{P}) \|x\|^2 = \lambda_{\max}[\text{med } \tilde{P}] + \varepsilon_{\max} \|x\|^2. \quad (10.17, б)$$

Здесь $\underline{\lambda}_{\min}(\tilde{P})$ – нижняя граница минимального собственного числа; $\bar{\lambda}_{\max}(\tilde{P})$ – верхняя граница максимального собственного числа интервальной матрицы \tilde{P} ; величины ε_{\min} , ε_{\max} определяются соотношениями

$$\varepsilon_{\min} = \| |\tilde{P} v_{\min} - \lambda_{\min}[\text{med } \tilde{P}] v_{\min} | \|_2,$$

$$\varepsilon_{\max} = \| |\tilde{P} v_{\max} - \lambda_{\max}[\text{med } \tilde{P}] v_{\max} | \|_2,$$

где v_{\min} , v_{\max} – собственные векторы матрицы $\text{med } \tilde{P}$, соответствующие собственным числам $\lambda_{\min}[\text{med } \tilde{P}]$ и $\lambda_{\max}[\text{med } \tilde{P}]$; $\| \cdot \|_2$ – евклидова норма вектора; $| \cdot |$ – модуль интервального вектора, $\text{med } \tilde{P} = (\underline{P} + \bar{P})/2$ – медиана интервальной матрицы \tilde{P} .

Отсюда следует, что у параметрически возмущенной системы (10.1) существует интервальная функция, которая удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к функциям Ляпунова. Вычислим полную производную интервальной функции Ляпунова $\tilde{v}(x)$ в силу системы (10.8), замкнутой синтезированным управлением:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{v}}(x) &= 2x^T \tilde{P} (\tilde{A} - \tilde{B}R^{-1}\tilde{B}^T \tilde{P})x \subseteq x^T (\tilde{P}\tilde{A} + \tilde{A}^T \tilde{P} - 2\tilde{P}\tilde{B}R^{-1}\tilde{B}^T \tilde{P})x = \\ &= x^T (\tilde{P}\tilde{A} + \tilde{A}^T \tilde{P} - \tilde{P}\tilde{B}R^{-1}\tilde{B}^T \tilde{P} + Q - \tilde{P}\tilde{B}R^{-1}\tilde{B}^T \tilde{P} - Q)x. \end{aligned}$$

Матрица \tilde{P} – решение интервального уравнения (10.6), поэтому для производной функции Ляпунова справедливо следующее соотношение:

$$\dot{\tilde{v}}(x) \subseteq -x^T (\tilde{P}\tilde{B}R^{-1}\tilde{B}^T \tilde{P} + Q)x = -x^T \tilde{M}x.$$

Интервальная квадратичная форма в правой части данного включения отрицательно полуопределена при положительной полуопределенности матрицы \tilde{M}

$$(\forall M \in \tilde{M} = (\tilde{P}\tilde{B}R^{-1}\tilde{B}^T\tilde{P} + Q), M = M^T \geq 0).$$

Из существования интервальной функции Ляпунова и отрицательной определенности ее производной в силу уравнений возмущенного движения следует устойчивость системы (10.8) при всех вариациях параметров объекта управления, ограниченных неравенствами (10.9) – (10.12).

Если интервальная функция Ляпунова задается квадратичной формой типа (10.4), а регулятор определяется соотношением (10.5), то вспомогательная функция (10.3) в рассматриваемом случае принимает вид:

$$\begin{aligned} \Psi(t, x, u) &= \sup\{2x^T \tilde{P} (\tilde{A} - \tilde{B}R^{-1}\tilde{B}^T\tilde{P})x + \\ &+ x (\tilde{P}\tilde{B}R^{-1}\tilde{B}^T\tilde{P} + Q)x \mid x \in \mu(x, t)\} = \\ &= \sup\{x^T \tilde{P}\tilde{A} + A^T \tilde{p} - \tilde{P}\tilde{B}R^{-1}\tilde{B}^T\tilde{P} + Q)x \mid x \in \mu(x, t)\}. \end{aligned}$$

Функция $\Psi(t, x, u)$ тождественно равна нулю, так как матрица \tilde{P} – решение уравнения (10.6). Таким образом, у системы (10.8), замкнутой синтезированным управлением, существует функция $\tilde{v}(x)$, которая допускает бесконечно малый высший предел и удовлетворяет функциональному уравнению Беллмана. Из достаточного условия оптимальности непрерывных процессов следует оптимальность управления (10.5) по отношению к функционалу качества (10.2).

Значение функционала качества, вычисленное вдоль траекторий параметрически возмущенной системы (10.8)

$$J = \int_0^{\infty} x^T (Q + \tilde{P}\tilde{B}R^{-1}\tilde{B}^T\tilde{P}) x dt.$$

С точностью до знака подынтегральная функция совпадает с производной функции $\tilde{v}(x)$, поэтому справедливо соотношение

$$J = - \int_0^{\infty} (d\tilde{v}(x) / dt) dt = -\{\tilde{v}(\infty) - \tilde{v}(0)\},$$

а из устойчивости параметрически возмущенной системы (10.8)

$J = x_0^T \tilde{P} x_0$. Последнее интервальное равенство эквивалентно двухстороннему неравенству

$$\underline{J} \leq J \leq \bar{J}$$

(или $x_0^T \underline{P} x_0 \leq J \leq x_0^T \bar{P} x_0$), которое с учетом соотношений (10.16) и (10.17) преобразуется к оценкам вида (10.15):

$$\underline{\lambda}_{\min}(\tilde{P}) \|x_0\|^2 \leq J \leq \bar{\lambda}_{\max}(\tilde{P}) \|x_0\|^2.$$

Данные неравенства выполняются при всех допустимых вариациях параметров, ограниченных условиями (10.9)–(10.12). Следовательно, синтезированное управление (10.5) обеспечивает робастную устойчивость и робастное качество интервальной системы (10.1), т. е. является решением задачи робастной линейно-квадратичной оптимизации.

В соответствии с рассмотренной методикой параметры робастного регулятора определяются при решении интервального матричного уравнения Риккати. Процедура решения интервального матричного уравнения сводится к решению двух «граничных» уравнений Риккати с вещественными коэффициентами, которые соответствуют предельным значениям параметров управляемого объекта.

10.1.5. Методы робастного управления в частотной области

При конструировании робастных регуляторов в частотной области исходная задача сводится к решению проблемы *H-оптимизации* [2]: минимизации $H_2(\infty)$ -нормы передаточной функции от внешнего входа к выходу путем выбора регулятора из множества допустимых (стабилизирующих) регуляторов. Методы *H*-теории управления существенно разработаны как в теоретическом, так и практическом плане. Полученные фундаментальные результаты позволили разработать теорию, близкую линейно-квадратичной гауссовой теории.

Робастная стабилизация. Пусть объект управления задан в операторном виде

$$y(s) = \tilde{G}(s) u(s) + w(s), \quad (10.18)$$

где $w(s)$ – вектор неконтролируемых возмущений, или динамическая неопределенность, причем $\|w(s)\|_\infty \leq C_w < \infty$; $y(s)$ – вектор состояний; $u(s)$ – вектор управления; s – переменная преобразования Лапласа; $\tilde{G}(s)$ – $n \times n$ -матрица передаточных функций $\tilde{g}_{i,j}(s)$, $i, j = \overline{1, n}$; $w(s)$, $u(s)$, $y(s) \in R^n$; $\|w(s)\|_\infty = \max_{\omega} |w(j\omega)|$ – норма функции $w(s)$ в пространстве Харди H_∞ .

Пусть передаточная матрица системы известна неточно и представляется в виде

$$\tilde{G}(s) = G_0(s) + \Delta(s), \quad (10.19)$$

где $G_0(s)$ – передаточная функция некоторой «опорной» системы, известная точно, а $\Delta(s)$ характеризует внутреннюю неопределенность модели системы.

Решение задачи робастной стабилизации в системе (10.18) с неструктурированными неопределенностями формулируется в следующем утверждении.

Утверждение 10.1.1. Регулятор $K = K(s) \in RL^\infty$ стабилизирует любой объект с матричной передаточной функцией $\tilde{G}(s)$ (10.19) с неопределенностью, характеризуемой множеством D_ε :

$\Delta(s) \in D_\varepsilon = \{\Delta: \|\Delta(s)\|_\infty \leq \varepsilon, \varepsilon > 0\}$, $\eta(\tilde{G}(s)) = \eta(\Delta(s))$, (10.20)
и является D_ε -робастным стабилизатором, если и только если:

1) $K(s)$ стабилизирует опорный объект $G_0(s)$.

2) Величина $\|\tilde{G}(s)\|_\infty < \varepsilon^{-1}$,

где ε – заданный уровень неопределенности; $\eta(G)$ – количество неустойчивых полюсов матрицы $G \in RL^\infty$, RL^∞ – пространство Лебега правых функций, не имеющих полюсов на мнимой оси.

D_ε – робастный стабилизатор задается соотношениями:

$$K(s) = (Y_{22} - M_{22}Q)(X_{22} - N_{22}Q)^{-1} = (\tilde{X}_{22} - Q\tilde{N}_{22})(\tilde{Y}_{22} - Q\tilde{M}_{22}), \quad (10.21)$$

где $M_{22}, N_{22}, \tilde{M}_{22}, \tilde{N}_{22}, X_{22}, \tilde{X}_{22}, Y_{22}, \tilde{Y}_{22}$ – результат взаимно-простой факторизации матрицы опорного объекта; $Q \in RL^\infty$ – произвольная матричная функция.

Вопрос о существовании непустого множества робастных стабилизаторов (10.21) (как должны соотноситься номинальный объект и s -возмущения, чтобы существовали робастные регуляторы) решается следующим образом.

Утверждение 10.1.2. Множество робастных на классе D_ε стабилизаторов не пусто, если и только если:

$$\inf_{Q \in RL^\infty} \|T_1 - T_2QT_3\| < \varepsilon^{-1},$$

где $T_1 = P_{11} + P_{12}Y_{22}M_{22}P_{21}$, $T_2 = P_{12}M_{22}$, $T_3 = \tilde{M}_{22}P_{21}$.

Робастная оптимизация. Пусть описание системы задано моделью пространства состояния

$$\dot{x} = Ax + B_1w + B_2u, \quad (10.22, a)$$

$$z = Cx + Du, \quad (10.22, б)$$

где x – вектор состояния, w – вектор возмущений, u – вектор управлений, z – вектор полного выхода, A, B_1, B_2, C, D – постоянные матрицы соответствующих размерностей.

Будем считать, что в (10.22, б) матрицы C и D имеют вид:

$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $D = \begin{bmatrix} 0 \\ D_1 \end{bmatrix}$. Тогда выходной вектор $z = \begin{bmatrix} C_1 x \\ D_1 u \end{bmatrix}$ формиру-

ется из двух компонент: $z_x = C_1 x$ – интерпретируемой как характеристика точности и $z_u = D_1 u$ – как характеристика затрат на управление, так что $|z|^2 = |z_x|^2 + |D_1 u|^2$. Полагая $D_1 = \varepsilon E$ (E – единичная матрица), получим $|z|^2 = x^T C_1^T C_1 x + \varepsilon^2 |u|^2$, где ε – именуется штрафом за управление.

При полных наблюдениях (все компоненты вектора x доступны для измерения) оптимальная обратная связь становится статической, т. е. оператор $K(s) = K$:

$$U(s) = -K(s)X(s). \quad (10.23)$$

Передаточная функция «возмущение-выход» $P_{wz}(s)$ в зависимости от передаточной функции обратной связи $K(s)$ имеет вид

$$P_{wz}(s) = [E + (sE - A)^{-1} B_2 K(s)]^{-1} (sE - A)^{-1} B_1.$$

Синтез H_2 – оптимальной обратной связи, обеспечивающей наименьшее значение H_2 -нормы передаточной функции $P_{wz}(s)$:

$$\|P_{wz}(s)\|_2 = \left[\frac{1}{2} \int_0^\infty \text{tr} \{ P_{wz}^T(-i\omega) P_{wz}(i\omega) \} d\omega \right]^{1/2}.$$

H_2 -норма характеризует подавление импульсных или белешумных возмущений.

Оптимальная обратная связь (10.23), найденная из условия минимизации функционала качества

$$J_2(\varepsilon) = \inf_{K(s)} \|P_{wz}(s)\|_2,$$

имеет вид:

$$K = \frac{1}{\varepsilon} B_2^T X_2(\varepsilon). \quad (10.24)$$

где $X_2(\varepsilon)$ – неотрицательное определенное решение матричного квадратичного уравнения

$$XA + A^T X - \frac{1}{\varepsilon^2} X B_2 B_2^T X + C_1^T C_1 = 0,$$

а значение функционала качества

$$J_2(\varepsilon) = \left[\text{tr} \{ B_1^T X_2(\varepsilon) B_1 \} \right]^{1/2}.$$

Синтез H_∞ – оптимальной обратной связи, обеспечивающей наименьшее значение H_∞ -нормы передаточной функции $P_{wz}(s)$, определенной равенством

$$\|P_{wz}(s)\|_{\infty} = \sup_{\omega} \sigma_{\max}\{P_{wz}(i\omega)\},$$

где $\sigma_{\max}\{P_{wz}(i\omega)\}$ – наибольшее сингулярное число матрицы.

$P_{wz}(i\omega)$ – H_{∞} -норма определяет подавление гармонических возмущений с произвольной частотой.

Оптимальную обратную связь (10.23) в этом случае находят из условия минимизации функционала качества

$$J_{\infty}(\varepsilon) = \inf_{K(s)} \|P_{wz}(s)\|_{\infty},$$

и она определяется выражением

$$K = \frac{1}{\varepsilon} B_2^T X_{\infty}(\varepsilon), \quad (10.25)$$

где $X_{\infty}(\varepsilon)$ – неотрицательно определенное решение матричного квадратичного уравнения

$$XA + A^T X + X \left[\frac{1}{\gamma^2} B_1 B_1^T - \frac{1}{\varepsilon^2} B_2 B_2^T \right] X + C_1^T C_1 = 0$$

с наименьшим возможным значением $\gamma_{\infty}(\varepsilon)$, для которого существует

это решение, а матрица $A = \frac{1}{\varepsilon} B_2 B_2^T X_{\infty}(\varepsilon)$ устойчива. Значение минимизируемого функционала равно найденному значению $\gamma_{\infty}(\varepsilon)$.

Условием существования оптимальных робастных регуляторов (10.24), (10.25) является стабилизируемость пары (A, B_2) и детектируемость пары (C_1^T, A) системы (10.22).

Для системы

$$\dot{X} = AX + B_1 \omega + B_2 u, \quad z = C_1 X + D_{12} u, \quad y = C_2 X + D_{21} u, \quad (10.26)$$

где z – выход системы, y – измеряемые координаты выхода ($\dim y < \dim z$), оптимальный регулятор основного контура вида

$$u = -K_{\infty} \hat{X} \quad (10.27)$$

должен быть дополнен наблюдателем для получения оценок \hat{x} вектора x по измеряемым выходам y . Наблюдатель задается дифференциальным уравнением

$$\dot{\hat{X}} = A_{\infty} \hat{X} + z_{\infty} L_{\infty} y. \quad (10.28)$$

Коэффициент K_{∞} основного контура и матрицы A_{∞} , L_{∞} , z_{∞} наблюдателя находят по следующему алгоритму.

1. Вычисление матриц:

$$R_1 = B_1 B_1^T, \quad R_2 = B_2 B_2^T, \quad Q = C_1^T C_1.$$

2. Вычисление решения $\bar{P} > 0$ уравнения

$$A^T \bar{P} + \bar{P}A - \bar{P}R_2 \bar{P} + Q = 0.$$

3. Вычисление матрицы:

$$\bar{A} = A - R_2 \bar{P}.$$

4. Определение решения \bar{Y}_1 уравнения

$$\bar{A} \bar{Y} + \bar{Y} \bar{A} + E = 0.$$

5. Вычисление величины ε_1 по соотношению

$$\bar{\varepsilon}_1^{-1} = 4 \|R_1\| \| \bar{X} \| \| \bar{y} \| (1 + \|R_2\| \| \bar{X} \| \| \bar{y} \|),$$

где $\bar{X} = \bar{P}$, $\bar{y} = \bar{Y}_1$, $\| \cdot \|$ – спектральная норма матрицы.

6. Определение решения $X_1 > 0$ уравнения

$$A^T X + XA + X[\varepsilon_1^* R_1 - R_2]X + Q = 0, \quad \varepsilon_1^* < \varepsilon_1.$$

7. Задание равенств $A = A^T$, $R_1 = C_1^T C_1$, $R_2 = C_2^T C_2$, $Q = B_1 B_1^T$ и переход к п. 2–6 вычислений, обозначив результат п. 5 переменной $\bar{\varepsilon}$, а п. 6 – переменной X_2 .

8. Вычисление наибольшего собственного числа матрицы $X_1 X_2$, обозначение его $\bar{\gamma}^2$.

9. Вычисление $\gamma = \max \{ (\varepsilon_1^*)^{-1/2}, (\varepsilon_2^*)^{-1/2}, \bar{\gamma} \}$.

10. Вычисление $K_\infty = B_2^T X_1$ – параметров регулятора основного контура, $L_\infty = X_2 C_2^T$ – регулятора наблюдателя,

$$A_\infty = A + \gamma^2 B_1 B_1^T X_1 - B_2 K_\infty - Z_\infty L_\infty C_2, \quad Z_\infty = (I - \gamma^2 X_2 X_1^{-1})^{-1}.$$

Условиями существования робастного оптимального регулятора является стабилизируемость пар матриц (A, B_1) , (A, B_2) , (A^T, C_1^T) , (A^T, C_2^T) и вид матриц $D_{12}^T \{C_1 D_{12}\} = \{0E\}$, $D_{21} \{B_1^T D_{21}^T\} = \{0E\}$. В замкнутой системе гарантируется качество процесса управления не хуже, чем $J_\infty < \gamma$.

Методы H_2 и H_∞ – оптимального управления обеспечивают робастную устойчивость по отношению к внешним возмущениям, параметрическим возмущениям объекта управления, неструктурированным шумам измерений, неконтролируемой динамике при раздельном действии каждого из перечисленных возмущений.

10.2. Идентификация линейных по параметрам статических и динамических объектов и систем

Оценка параметров моделей объектов управления по наблюдениям за их функционированием называется *параметрической идентификацией*. Идентификация выполняется для классов математических моделей объектов, критериев адекватности моделей объектов и алгоритмов вычисления оценок параметров [3].

10.2.1. Основные классы моделей идентифицируемых объектов управления

Рассмотрим следующие классы моделей:

1) *Статические модели* в виде алгебраических соотношений

$$y_t = a^T x_t + \xi_t, \quad (10.29)$$

где $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T \in R^n$; $x_t = (x_{t1}, x_{t2}, \dots, x_{tn})^T \in R^n$ – векторы параметров входа и выхода объекта.

2) Динамические *непрерывные модели «вход-выход»*

$$a_n(p)y(t) = b_m(p)u(t) + \xi(t), \quad (10.30)$$

где $a_n(p)$ и $b_m(p)$ – полиномы n -го и m -го порядков от оператора дифференцирования $p \triangleq d/dt$; $u(t) \in R^1$ и $y(t) \in R^1$ – входной и выходной сигналы объекта.

3) Динамические *непрерывные модели, представленные интегралом свертки*:

$$y(t) = \int_0^{\infty} w(\tau)u(t - \tau)d\tau + \xi(t), \quad (10.31)$$

где $w(t)$ – импульсная переходная функция объекта; $u(t), y(t) \in R^1$ – входной и выходной сигналы объекта.

4) Динамические *дискретные модели в форме «вход-выход»*

$$a_n(\nabla)y_t = b_m(\nabla)u_t + \xi_t, \quad (10.32)$$

где $a_n(\nabla)$ и $b_m(\nabla)$ – полиномы n -го и m -го порядков от оператора сдвига по времени назад ∇ ; $u_t \in R^1, y_t \in R^1$ – входной и выходной сигналы объекта.

Случайные помехи в моделях (10.29)–(10.32) имеют следующие статистические свойства: $M[\xi_t] = 0, D[\xi_t] = M[\xi_t^2] = \sigma_\xi^2$.

10.2.2. Идентификация статических и дискретных динамических моделей

Для оценивания параметров (10.29) рассмотрим N измерений входных и выходных сигналов. В результате можно записать

$$Y = Xa + \xi,$$

где $Y = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$ – вектор N измерений выходного сигнала; $X \in R^{N \times n}$ – матрица входных воздействий; $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)^T$ – вектор шумов.

Оценки параметров \hat{a} минимизируют функционал невязок: $J = (Y - Xa)^T (Y - Xa)/2$.

Из необходимого условия: $\partial J / \partial a = X^T (Y - X\hat{a}) = 0$ следует

$$\hat{a} = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (10.33, a)$$

где \hat{a} – оценка метода наименьших квадратов (МНК) в форме

$$\hat{a} = \hat{a}_N = \left(\sum_{l=1}^N x_l x_l^T \right)^{-1} \sum_{l=1}^N x_l y_l. \quad (10.33, б)$$

Здесь x_t – вектор измерения выходных сигналов объекта в t -й момент времени. Алгоритму МНК (10.33, б) можно придать рекуррентный вид:

$$a_{t+1} = a_t + \Delta a_{t+1}.$$

Введем следующие обозначения для квадратной ($n \times n$) матриц:

$$\Gamma_{t+1} = \left[\sum_{l=1}^{t+1} x_l x_l^T \right]^{-1}, \quad \Gamma_t = \left[\sum_{l=1}^t x_l x_l^T \right]^{-1}.$$

Принимая во внимание (10.33, б), можно записать два равенства:

$$\Gamma_{t+1}^{-1} a_{t+1} = \sum_{l=1}^{t+1} x_l y_l, \quad \Gamma_t^{-1} a_t = \sum_{l=1}^t x_l y_l,$$

из которых следует $\Gamma_{t+1}^{-1} a_{t+1} = \Gamma_t^{-1} a_t + x_{t+1} y_{t+1}$, но так как

$$\Gamma_t^{-1} = \Gamma_{t+1}^{-1} - x_{t+1} x_{t+1}^T, \text{ то } \Gamma_{t+1}^{-1} a_{t+1} = (\Gamma_{t+1}^{-1} - x_{t+1} x_{t+1}^T) a_t + x_{t+1} y_{t+1}.$$

В результате процедура (10.33, б) примет вид:

$$a_{t+1} = a_t + \Gamma_{t+1} x_{t+1} (y_{t+1} - x_{t+1}^T a_t), \quad (10.34)$$

где матрица Γ_{t+1} вычисляется с помощью *леммы об обращении матриц*:

$$\Gamma_{t+1} = \Gamma_t - (\Gamma_t x_{t+1} x_{t+1}^T \Gamma_t x_{t+1}) (1 + x_{t+1}^T \Gamma_t x_{t+1})^{-1}.$$

Рассмотрим алгоритм идентификации параметров (10.32) для нескольких вариантов задания полиномов $a_n(\nabla)$ и $b_m(\nabla)$. Пусть $a_n(\nabla) =$

$$= 1 - \sum_{l=1}^n a_l \nabla^l \text{ и } b_m(\nabla) = 0, \text{ причем корни полинома } a_n(\nabla) \text{ лежат в единичном круге. В этом случае модель (10.32) имеет вид:}$$

$$y_t = a_1 y_{t-1} + a_2 y_{t-2} + \dots + a_n y_{t-n} + \xi_t \quad (10.35)$$

и называется моделью авторегрессии. Запишем ее в векторной форме:

$$y_t = a^T x_t + \xi_t,$$

где $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$, $x_t = (y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-n})^T$, которая совпадает с моделью (10.29).

Оценку вектора параметров a на основе N измерений получим путем минимизации функционала $J = (Y - Xa)^T (Y - Xa)/2$, где $Y = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$ – вектор выходных сигналов объекта; $X \in R^{N \times n}$ – матрица со строками x_i , $i = \overline{1, N}$. Используя обозначения, введенные в (10.34), алгоритм оценивания параметров модели (10.35) запишем в виде

$$a_{t+1} = a_t + K_{t+1} (y_{t+1} - x_{t+1}^T a_t), \quad a_0 = 0;$$

$$K_{t+1} = \Gamma_t x_{t+1} / (1 + x_{t+1}^T \Gamma_t x_{t+1});$$

$$\Gamma_{t+1} = \Gamma_t - K_{t+1} x_{t+1}^T \Gamma_t, \quad \Gamma_0 = \alpha E, \quad \alpha \gg 1.$$

Если $a_n(\nabla) = 1$, $b_m(\nabla) = \sum_{l=0}^m b_l \nabla^l$, то модель (10.31) имеет вид:

$$y_t = b_0 u_t + b_1 u_{t-1} + \dots + b_m u_{t-m} + \xi_t \quad (10.36)$$

и называется моделью авторегрессии со скользящим средним

$$y_t = a^T z_t + \xi_t, \quad (10.37)$$

$a = (a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, \dots, b_m)^T$, $z_t = (y_{t-1}, \dots, y_{t-n}, y_{t-1}, u_t, \dots, u_{t-m})^T$, причем последние векторы – вектор параметров и вектор последовательных измерений выходных и входных сигналов. Оценки МНК для (10.37) имеют вид

$$a_{t+1} = a_t + K_{t+1} (y_{t+1} - z_{t+1}^T a_t), \quad (10.38)$$

$$K_{t+1} = \Gamma_t z_{t+1} / (1 + z_{t+1}^T \Gamma_t z_{t+1}), \quad (10.39)$$

$$\Gamma_{t+1} = \Gamma_t - K_{t+1} z_{t+1}^T \Gamma_t.$$

Если в (10.37) шум ξ_t не белый, то оценки не являются несмещенными. Для устранения смещения шум ξ_t можно представить как процесс авторегрессии $\xi_t = \sum_{l=1}^s c_l \xi_{t-l} + et$, где et – белый шум с нулевым

средним и дисперсией σ_e^2 , $c_s(\nabla)$ – полином s -го порядка от оператора сдвига ∇ . В результате модель (10.37) можно записать в виде

$$y_t = b_m(\nabla)u_t + \xi_t, \quad (10.40)$$

$$\xi_t = c_s(\nabla)\xi_t + e_t. \quad (10.41)$$

Из (10.41) следует, что $e_t = [1 - c_s(\nabla)]\xi_t$, где $[1 - c_s(\nabla)]$ – передаточная функция отбеливающего фильтра для ξ_t . Действуя оператором $[1 - c_s(\nabla)]$ на (10.40), получим модель авторегрессии со скользящим средним

$$y_t = c_s(\nabla)y_t + [1 - c_s(\nabla)]b_m(\nabla)u_t + e_t. \quad (10.42)$$

Обозначив $[1 - c_s(\nabla)]b_m(\nabla) \triangleq \sum_{l=1}^{s+m+1} \alpha_l \nabla^l$, преобразуем модель (10.42)

к следующему виду:

$$y_t = \sum_{l=1}^s c_l y_{t-l} + \sum_{l=1}^{s+m+1} \alpha_l u_{t-l} + e^t.$$

Последнее равенство можно переписать в эквивалентной векторной форме:

$$y_t = a^T z_t + e_t. \quad (10.43)$$

Так как шум e_t в модели (10.43) белый, то для получения несмещенных оценок параметра \hat{a} можно использовать соотношения (10.38), (10.39).

10.2.3. Идентификация непрерывных моделей

Рассмотрим алгоритм идентификации параметров линейной модели объекта управления. Перейдем от операторной формы записи модели объекта к эквивалентной дифференциальной форме типа «вход-выход»:

$$y^{(n)} + a_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + a_0y - b_{n-1}u^{(n-1)} - \dots - b_0u = 0.$$

Выберем настраиваемую в процессе идентификации модель объекта в виде:

$$\varepsilon(t) = y^{(n)} + \alpha_{n-1}y^{(n-1)} + \dots + \alpha_0y - \beta_{n-1}u^{(n-1)} - \dots - \beta_0u,$$

где $\alpha_i, \beta_i, i = \overline{1, n}; j = \overline{0, n-1}$ – параметры, минимизирующие критерий $J = J(\alpha, \beta) = \varepsilon^2(t)/2$ изменением α_i, β_j , согласно градиентным законам настройки

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = -k \frac{\partial J(\alpha, \beta)}{\partial \alpha_i} = -k\varepsilon(t)y^{(i)}, \quad \frac{d\beta_i}{dt} = -k \frac{\partial J(\alpha, \beta)}{\partial \beta_i} = -k\varepsilon(t)u^{(i)}. \quad (10.44)$$

Такие градиентные законы настройки параметров обеспечивают сходимость по параметрам: α_i к α_i^* и β_j к β_j^* .

Если выбрать квадратичную по параметрам функцию Ляпунова в виде

$$V = V(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} [(\alpha_i - a_i)^2 + (\beta_i - b_i)^2]$$

и вычислить ее полную производную по t в силу уравнений (10.44), то можно получить

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{i=0}^{n-1} \left[(\alpha_i - a_i) \frac{d\alpha_i}{dt} - (\beta_i - b_i) \frac{d\beta_i}{dt} \right] = \\ &= k\varepsilon \sum_{i=0}^{n-1} [(\alpha_i - a_i)y^{(i)} - (\beta_i - b_i)u^{(i)}] = -k\varepsilon^2. \end{aligned}$$

Знакоотрицательность $\dot{V}(\alpha, \beta)$ обеспечивает сходимость по параметрам.

10.2.4. Алгоритм идентификации импульсной переходной функции

В силу уравнения (10.33) взаимная корреляционная функция «вход-выход» имеет вид:

$$\begin{aligned} r_{uy}(\tau) &= M[u(t - \tau)y(t)] = \\ &= \int_0^{\infty} M[u(t - \tau)u(t - \theta)]W(\theta)d\theta + M[\xi(t)u(t - \theta)], \end{aligned} \quad (10.45)$$

где $\xi(t)$ и $u(t)$ удовлетворяют следующему соотношению для математических ожиданий:

$$M[\xi(t)u(t - \theta)] = M[u(t - \theta)]M[\xi_t] = 0.$$

Обозначив автокорреляционную функцию входного сигнала $r_{uu}(\tau) = M[u(t-\tau)u(t-\theta)]$, запишем (10.45) в форме уравнения Винера-Хопфа:

$$r_{uy}(\tau) = \int_0^{\infty} r_{uu}(\tau - \theta) W(\theta) d\theta. \quad (10.46)$$

Если входной сигнал объекта – белый шум $r_{uu}(t - \tau) = \sigma_u^2 \delta(t - \tau)$, где $\sigma_u^2 = M[u^2(t)]$, $\delta(t - \tau)$ – δ -функция Дирака, то $r_{uy}(\tau) = \sigma_u^2 W(\tau)$. Для устойчивого объекта $W(\tau) \rightarrow 0$ при $\tau \rightarrow \infty$, поэтому без внесения значительных погрешностей бесконечный верхний предел в (10.31) можно заменить конечным T . Производя измерения выходного и входного сигналов объекта с интервалом Δ , запишем следующие оценки корреляционных функций:

$$r_{uu}(k\Delta) = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} u(l\Delta) u((l+k)\Delta),$$

$$r_{uy}(k\Delta) = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} u(l\Delta) y((l+k)\Delta),$$

где $N = T/\Delta$ – число интервалов измерений.

Значения $W(\tau)$ определим в моменты $\tau = k\Delta$. Вычислив интеграл в (10.43) по методу левых прямоугольников, получим

$$r_{uy}(k\Delta) = \Delta \sum_{l=1}^N W(l\Delta) r_{uu}((k-l)\Delta).$$

Введя обозначения векторов

$$r = (r_{uy}(0), r_{uy}(\Delta), \dots, r_{uy}(N\Delta))^T,$$

$$W = (W(0), W(\Delta), \dots, W(N\Delta))^T$$

и матрицы

$$R = \begin{bmatrix} r_{uu}(0) & r_{uu}(-\Delta) & \dots & r_{uu}(-N\Delta) \\ r_{uu}(\Delta) & r_{uu}(0) & \dots & r_{uu}(-(N-1)\Delta) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{uu}(N\Delta) & r_{uu}((N-1)\Delta) & \dots & r_{uu}(0) \end{bmatrix},$$

запишем уравнение (10.43) в виде

$$r = \Delta R W. \quad (10.47)$$

Вектор оценок $\hat{W} = \Delta^{-1}R^{-1}r$, и в силу симметричности R для решения (10.47) можно использовать факторизацию (*алгоритм Холецкого*).

10.3. Синтез адаптивных систем методом рекуррентных целевых неравенств

Рассмотрим скалярный динамический дискретный объект управления, описываемый уравнениями «вход-выход»

$$y_t + a_1 y_{t-1} + \dots + a_r y_{t-r} = b_1 u_{t-1} + \dots + b_r u_{t-r} + v_t, \quad y_t, u_t \in R^1, \quad (10.48)$$

где $b_1 \neq 0$, т. е. запаздывание в управлении минимально: $s = 1$.

Возмущение v_t в (10.48) – ограничено по модулю: $|v_t| \leq 1$, а в остальном возмущение является произвольным. Управления u_t допустимые, т. е. представлены вектором: $u_{t-1}, \dots, u_0, y_{t-1}, \dots, y_0$ и t . Цель управления состоит в минимизации функционала:

$$J(u_0^\infty) = \limsup_{t \rightarrow \infty} \sup_{v_0^\infty \in V} |y_t|.$$

На первом этапе решения задачи рассмотрим синтез регулятора основного контура при условии, что коэффициенты a_j, b_j уравнения объекта известны. Тогда решение задачи синтеза регулятора основного контура очевидно: *целевое условие регулятора основного контура (РОК)* состоит в том, чтобы оптимальное управление следовало из требования, при котором уравнение (10.48) приняло вид $y_t = v_t$, т. е. оптимальным является регулятор:

$$u_t = b_1^{-1} [-b_2 u_{t-2} - \dots - b_r u_{t-r} + a_1 y_{t-1} + \dots + a_r y_{t-r}]. \quad (10.49)$$

Таким образом, при полной информации регулятор определен, и можно перейти к задаче адаптивного управления.

10.3.1. Постановка задачи

Определим понятие варианта для данной задачи. Поскольку регулятор основного контура определен с точностью до неизвестных параметров, то множество $\{\xi\} = \{\xi^a, \xi^b\}$, т. е. вариант определен множеством неизвестных параметров $\{\xi^a\} = [a_j, b_j]$ и возмущением $v_t = v_t(\xi^b)$. Пусть $\{\xi\}$ – множество всех ξ , таких, что ξ^n принимает любые значения, а $v_t = v_t(\xi^b)$: $|v_t| \leq c$. *Целевое условие регулятора контура адаптации (РКА)*:

$$|y_{t+1}| \leq c_y, \quad (10.50)$$

которое обеспечивается подстройкой параметров, причем будем считать, что $c_y > c$. В противном случае не существует адаптивного управления и вообще никакого управления, обеспечивающего целевое условие.

Вид оптимального управления (10.49) подсказывает выбор следующего сенсора σ_t , определяющего структуру управления так, что

$$\begin{aligned} u_t &= (\sigma_t, \tau^0), \quad \sigma_t = \text{col}(u_{t-1}, \dots, u_{t-r-1}, y_t, \dots, y_{t-r-1}), \\ \tau^0 &= \text{col}(-b_2, \dots, -b_r, a_1, \dots, a_r). \end{aligned} \quad (10.51)$$

Далее можно перейти к рассмотрению синтеза регулятора контура адаптации [4].

10.3.2. Синтез адаптивного регулятора

Адаптивное управление будем искать в виде (10.51), заменяя неизвестный вектор τ^0 вектором подстраиваемых параметров τ_t , изменяемых с целью выполнения на каждом шаге управления целевого условия (10.50).

Перейдем к построению регулятора целевого назначения. Рассмотрим прогнозируемое значение

$$y_{t+1} = b_1[u_t - (\sigma_t, \tau^0)] + v_{t+1}, \quad (10.52)$$

представляющее собой уравнение (10.47), записанное в новых обозначениях. Подставим (10.52) в целевое условие типа неравенств (10.50):

$$|b_1[(\sigma_t, \tau) - (\sigma_t, \tau^0)] + v_{t+1}| \leq c_y. \quad (10.53)$$

Соотношение (10.53) представляет собой линейное алгебраическое неравенство *относительно подстраиваемых параметров* τ . Алгоритм его решения должен быть построен так, чтобы существовал такой момент $t_* = t(\xi)$, при котором для всех $t > t_*$ все неравенства (10.53) были выполнены. Это означает адаптивность системы в некотором классе. Искомый алгоритм имеет вид ($|b_1| < c_b$):

$$\tau_{t+1} = \begin{cases} \tau_t, & |y_{t+1}| \leq c_y, \\ \tau_t - (1 - \rho)c_b^{-1} \text{sign } b_1 \sigma_t \|\sigma_t\|^{-2}, & |y_{t+1}| > c_y \end{cases} \quad (10.54)$$

и совпадает с известным алгоритмом «Полоска». Число ошибок алгоритма (т. е. число моментов нарушения целевого условия) можно оценить соотношением

$$r^0 \leq \{|\tau_0 - \tau^0| c_b (c_y c)^{-1} c_\sigma\}^2, \quad \rho = c c_y^{-1}. \quad (10.55)$$

где τ_0 и τ^0 – начальное и оптимальное значения параметров.

Регуляторы данного класса обеспечивают решение задачи *функциональной идентификации*, при которой целевые условия выпол-

нены, а оценки параметров могут существенно отличаться от их реальных значений.

10.4. Анализ грубости методами функционального анализа¹

Исследование грубости объектов или систем управления является одной из задач адаптивного управления. Исследование грубости актуально в связи с неадекватностью математических моделей, используемых при синтезе.

Проблема грубости исторически восходит к А. А. Андронову. Определенное распространение анализ грубости методами функционального анализа получили наряду с методами исследования интервальной устойчивости полиномов по Л. В. Харитонову, некорректности решений, интервальной устойчивости оптимальных систем, с проблемой синтеза регуляторов в пространстве Харди. Методы функционального анализа позволяют оценить допустимые изменения параметров объектов и систем управления в пространстве с нормой

$$\|X_i\| = \max_{i=1, \dots, n} |X_i^i| \text{ в } R^n, \text{ где нормы векторов и нормы операторов согласованы.}$$

Задача 1. Пусть объект управления описывается параметрическими возмущенными уравнениями:

$$X_{t+1} = HX_t + \Delta H X_t,$$

где ΔH – матрица возмущений параметров.

Требуется получить оценки норма для матрицы возмущений параметров в нормированном пространстве состояний.

Оценка нормы вектора правой части строится на основе следующих соотношений:

$$\|X_{t+1}\| = \|HX_t + \Delta H X_t\| \leq \|H + \Delta H\| \|X_t\|,$$

связывающих нормы образов и прообразов линейных операторов, достаточных условий сходимости: $\|H + \Delta H\| < 1$, которые определяют ограничение на величину параметрического матричного возмущения так, что $\|H + \Delta H\| < 1$. Тогда ограничения на величину нормы параметрического возмущения матрицы объекта или системы примут следующий вид:

$$\|\Delta H\| < 1 - \|H\|, \|H\| < 1.$$

¹ Написано Ю.В. Козловым и И.П. Симаковым.

Задача 2. Пусть система управления описывается разностными уравнениями

$$X_{t+1} = HX_t + FCX_t.$$

Требуется получить оценку на величину нормы вектора параметров обратной связи, при которой выполнены достаточные условия устойчивости в нормированном пространстве состояний.

Оценка нормы правой части имеет вид

$$\|X_{t+1}\| = \|HX_t + FCX_t\| \leq \|H + FC\| \|X_t\| \leq (\|H\| + \|F\| \|C\|) \|X_t\|,$$

а достаточное условие сходимости (сжатия): $\|H\| + \|F\| \|C\| < 1$ определяют ограничение на параметры обратной связи в виде следующего неравенства:

$$\|C\| < (1 - \|H\|) / \|F\|, \quad \|H\| < 1.$$

Задача 3. Пусть система описывается уравнениями

$$X_{t+1} = (H + \Delta H)X_t + FCX_t.$$

Требуется сформулировать ограничение на допустимое возмущение по параметрам объекта управления в виде ограничений на норму матрицы возмущений.

Ограничение на норму матричного параметрического возмущения имеет вид

$$\|\Delta H\| < (1 - \|H\|) \|F\| \|C\|.$$

Последнее соотношение следует из оценки нормы возмущенного оператора замкнутой системы и достаточного условия устойчивости.

Задача 4 (об оценках-ограничениях на собственные числа). Пусть система управления описывается уравнениями

$$X_{t+1} = (H + \Delta H)X_t + FCX_t.$$

Требуется сформулировать оценки на собственные числа матрицы объекта управления, исходя из достаточных условий устойчивости замкнутой системы управления.

Для получения необходимой оценки требуется рассмотреть достаточные условия рассматриваемой системы при условии приведения матрицы системы к форме Жордана. В результате можно установить следующее неравенство:

$$\|\Delta J\| < 1 - \|J\| - \|F\| \|C\| \|S\|,$$

ограничивающее норму приращения матрицы Жордана, где J и ΔJ – жорданова форма и ее приращение такие, что имеет место равенство $H = SJS^{-1}$, причем собственные числа матрицы объекта вещественные, т. е. принадлежат R^{-1} .

10.5. Анализ развития методов синтеза адаптивных систем

Развитие и применение теории адаптивного управления происходит эволюционным путем на основе совершенствования существующих систем, которые образуют основной контур управления. В связи с этим адаптивное управление строится на основе регуляторов основного контура (РОК) и регуляторов контура адаптации (РКА) [5].

В настоящее время существует достаточно широкий арсенал методов синтеза основного контура управления, которые в сочетании с рассмотренными методами синтеза контура адаптации определяют *системные варианты* подходов к синтезу адаптивных систем. Для синтеза РОК можно использовать широко известные методы модального управления, локально оптимального управления, оптимального управления, которые являются преимущественно линейными. При этом задачей контура адаптации является идентификация параметров объекта управления в реальном времени. Для подстройки параметров – для синтеза РКА – могут использоваться различные методы, к числу которых относятся метод рекуррентных целевых неравенств, метод стохастической аппроксимации, метод скоростного градиента и др. На основе этого можно дать системную характеристику возможных типов адаптивных систем управления (табл. 10.1), характеризующую возможные варианты построения адаптивных систем. В табл. 10.1 отмечены типы адаптивных систем, которые к настоящему времени разработаны на достаточно фундаментальной основе, поскольку для ряда вариантов алгоритмов адаптации получены условия функциональной или параметрической «идентифицируемости» объектов управления. Для разработки методов синтеза адаптивных регуляторов других типов необходимо использование оригинальных подходов к решению проблемы синтеза, которые анализируются далее.

Необходимо остановиться на системной технологии доказательства сходимости итерационных процессов адаптации. Рассматривается алгоритмический аспект доказательства сходимости с акцентом на системное подходе к построению доказательства в следующей постановке. Пусть имеется совокупность итерационных (рекуррентных) процессов, соответствующих:

1) Процедурам численного решения детерминированных разностных уравнений или эволюционным уравнениям в дискретном времени.

2) Детерминированным процедурам численной оптимизации.

3) Стохастическим процедурам оптимизации (метод стохастической аппроксимации).

Таблица 10.1

Контур адаптации	Основной контур			
	Модальные регуляторы	Локально-оптимальные регуляторы	Оптимальные регуляторы	Регуляторы, синтезируемые методами математического программирования
Метод рекуррентных целевых неравенств		РОК и РКА, функциональная идентификация		
Метод стохастической аппроксимации	РОК и РКА, сходимость по параметрам			
Метод скоростного градиента		РОК и РКА, устойчивость замкнутых систем		

4) Стохастическим процедурам адаптивного управления.

Требуется сформулировать системную технологию доказательства сходимости перечисленных выше итерационных процессов, выделив варианты исследования сходимости и общие характерные черты, позволяющие расширить классы подходов к анализу сходимости. Другими словами, необходимо осуществить системный синтез возможных подходов к исследованию сходимости, дополняющих известные процедуры. Для решения задачи можно построить системную матрицу возможных вариантов исследования сходимости в пространстве задачи – методы анализа сходимости, которая имеет вид, приведенный в табл. 10.2, в которой указаны тип устойчивости или характер результата.

Для задачи 1 формулируются основные этапы получения результата: формирование уравнения стационарных состояний, введение функции Ляпунова типа нормы или квадратичной формы, вычисление первой разности функции Ляпунова, преобразование, приводящее к результату.

Для задачи 2, решаемой на основе «квазистационарности первой разности», требует введения первой разности, ее преобразования представлением оценки первой разности через производные, приме-

Таблица 10.2

Метод Задача	Функций Ляпунова	Стационарности производной	Рядов	Скалярных рекуррентных неравенств
Устойчивость разностных схем и эволюционных уравнений	Достаточные условия			
Устойчивость детерминирован- ных процедур оптимизации	Достаточные условия	Ограничения на параметры		
Устойчивость стохастических процедур оптимизации			Ограничения на параметры	
Устойчивость стохастических процедур адаптации				Ограничения на параметры

нения условия Липшица, для вывода условий существования минимизирующей последовательности функционалов.

Для задачи 3, состоящей в формулировке условий сходимости случайных величин в среднеквадратичном смысле и по вероятности, решение включает следующие этапы доказательства: формирование уравнения отклонения текущей переменной от истинного значения, вычисление второго момента, суммирование семейства разностей последующих и предыдущих значений случайных вспомогательных величин, применение условий сходимости полученного ряда, из которых следуют ограничения на параметры рекуррентной процедуры уточнения оценок.

Для задачи 4 (задачи синтеза процедуры оценки параметров адаптивной системы методом стохастической аппроксимации) решение находится из уравнений отклонений параметров от истинных значений, формируется стохастическая функция Ляпунова, которая имеет смысл второго центрального момента параметров. Преобразование функции Ляпунова выполняется «в силу» уравнений подстройки параметров и динамики уравнений объекта. Использование условного математического ожидания ошибки по параметрам (стохастической функции Ляпунова) позволяет определить условия сходимости, которые формулируются на основе специальных условий (условий для мартигалов, условий типа Чжуна, Буркхольдера, Дермана, Сакса и др.).

Перечисленные подходы составляют базу системной технологии доказательства сходимости широкого класса итерационных процессов, позволяющей получать новые результаты в области теории сходимости на основе применения ранее не использованных подходов, которые определены системной матрицей. Используя рассмотренный набор вариантов построения адаптивных систем, можно синтезировать широкий класс регуляторов для достижения целей адаптивного управления.

Список литературы

1. Позняк А. С. Основы робастного управления (H_∞ -теория): Учебн. пособие. – М.: 1991. – 126 с.
2. Барabanов А. Е., Первозванский А. А. Оптимизация по равномерно-частотным показателям (H_∞ -теория). А и Т. № 9. 1992. – С. 3–32.
3. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления / Пер. с англ. Под ред. Н. С. Райбмана – М.: Мир, 1975. – 685 с.
4. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами // Анализ и синтез нелинейных систем/ Под общ. ред. Г. А. Леонова и А. Л. Фрадкова. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
5. Фрадков А. Л. Адаптивное управление в сложных системах. – М.: Наука, 1990. – 286 с.

11

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ САУ

Практически любому инженеру требуется знание основ и умение работать со средствами автоматизации проектирования, в том числе со средствами вычислительной техники. Это вызвано, в частности, появлением мощных персональных компьютеров (ПК) и оснащением ими практически всех проектно-конструкторских предприятий. В этой связи возникла необходимость перехода от аппаратного обеспечения процесса проектирования к алгоритмическому и программному обеспечению, а также возможность внедрения нового методологического обеспечения процесса проектирования САУ на базе методов современной теории автоматического управления. Автоматизация проектирования САУ с помощью средств вычислительной техники позволяет значительно сократить временные затраты на проектирование и повысить качество проекта.

В дипломном проектировании применение средств вычислительной техники целесообразно при выполнении следующих проектных процедур.

1. Идентификация, т. е. нахождение математической модели объекта управления (ОУ), например, по полученным эмпирически его динамическим характеристикам.
2. Исследование свойств и/или упрощение исходной математической модели ОУ.
3. Синтез управляющего устройства (регуляторов) автоматической системы.
4. Исследование качества переходных процессов полной математической модели САУ, т. е. такой, которая содержит исходную математическую модель ОУ.

Для выполнения всех перечисленных процедур можно применить одну из самых мощных и эффективных интегрированных программных систем: матричную лабораторию MATLAB (MATrix LABoratory) с ее множеством пакетов расширения [1, 2]. Рассмотрим выполнение указанных процедур на примерах решения частных конкретных задач, но которые достаточно часто встречаются в дипломном проектировании. Для решения других или аналогичных задач иными методами необходимо более подробное изучение прикладных программ

расчета характеристик и моделирования САУ. Их описание можно найти в источниках, указанных в списке литературы.

11.1. Нахождение математической модели ОУ по его эмпирически полученной кривой разгона

Для решения такой задачи удобно применить графический интерфейс пакета расширения System Identification Toolbox [3, 4]. При этом идентифицируемый объект управления принято представлять в виде схемы, показанной на рис.11.1.

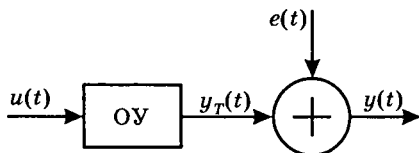


Рис. 11.1

На рис. 11.1 обозначено: $u(t)$ – контролируемый входной сигнал ОУ; $y_T(t)$, $y(t)$ – теоретический и наблюдаемый выходные сигналы; $e(t)$ – аддитивная случайная помеха, отражающая действие неучитываемых факторов (шум наблюдения).

Обычно предполагается, что связь между входным и теоретическим выходным сигналами задается в виде некоторого оператора:

$$y_T(t) = Hu(t).$$

Тогда наблюдаемый выход может быть описан соотношением

$$y(t) = Hu(t) + e(t).$$

При этом графический интерфейс рассматриваемого пакета позволяет представить оператор H в тета-форме (для временных характеристик), в формате нулей и полюсов передаточной функции и в частотной форме (для частотных характеристик). Пусть нас интересует тета-форма. И мы будем искать дискретную ARX- (ARMAX-) модель в виде:

$$A(z)y[i] = B(z)u[i - nk] + e[i] - \text{ARX-модель} \quad (11.1)$$

($A(z)y[i] = B(z)u[i - nk] + C(z)e[i]$ – ARMAX-модель),
 где $A(z) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_naz^{-na}$; $B(z) = b_1 + b_2z^{-1} + \dots + b_nbz^{-nb+1}$;

$C(z) = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_{nc} z^{-nc}$; nk – чистое запаздывание сигнала, равное числу периодов его дискретизации. Заметим попутно, что в пакете System Identification Toolbox вместо относительного времени i используется обозначение $t = iT$, где T – период дискретизации.

Пусть кривая разгона ОУ задана в табличном виде (табл. 11.1).

Таблица 11.1

t	0	.1	.2	.3	.4	.5	.6
$y(t)$	0	0	6.3	8.65	9.5	9.82	9.93
$u(t)$	4						

Загрузка данных о кривой разгона и вызов графического интерфейса осуществляется в командном окне MATLAB следующим образом:

► $y = [0; 0; 6.3; 8.65; 9.5; 9.82; 9.93];$

► $u = [4; 4; 4; 4; 4; 4; 4];$

► ident

Enter

В верхнем левом углу раскрывшегося окна «ident: Untitled» в раскрываемом списке Data (данные) выбираем вариант Import. Это приводит к открытию диалогового окна «Import Data». Введем в нем имя u в поле Input (вход), y – в поле Output (выход), в поле Samp.inter (интервал дискретизации) – 0.1, в поле Data name (имя данных) укажем произвольное название, например, ММ, а в поле Starting time (начало отсчета времени) – 0. Затем нажимаем последовательно кнопки Import и Close (закрыть).

Указанные действия приведут к появлению в верхнем левом углу табло Data Views значка с цветной линией и надписью ММ. Это означает, что импортируемые данные введены в среду интерфейса. Сообщения об этих данных появляются также на табло Working Data (рабочие данные) и Validation Data (данные для проверки модели).

Для контроля введенных данных можно установить флажок Time plot в левой нижней части интерфейса. Почти сразу же появляется одноименное окно с графиками сигналов $y_1(t)$ и $u_1(t)$, т. е. выходного и входного сигналов ОУ.

Для построения математической модели ОУ в раскрываемом списке интерфейса Estimate выбираем вариант Parametric models. Сразу же появляется одноименное окно выбора параметров ARX-модели. В раскрываемом списке Order editor можно выбрать любой порядок полиномов na , nb и значение nk дискретной модели (11.1).

Для рассматриваемого примера выбираем $na = 2$, $nb = 1$ / $nk = 1$ и нажимаем кнопки Estimate и Close. В верхней правой части интерфейса появляется значок с цветной линией и именем модели $arx211$,

означающий, что выбранная модель построена. Чтобы увидеть результат, достаточно установить флажок *Transient resp* (переходная функция) в правой нижней части интерфейса. Сразу же появляется окно *Transient response: $u_1 > y_1$* с переходной функцией построенной модели исследуемого ОУ.

Заметим, что если в раскрывающемся списке *Order editor* указать не конкретные значения порядков полиномов ARX-модели, а указать диапазон их выбора, то после нажатия кнопки *Estimate* появляется окно выбора порядка модели *ARX Model Structure Selection*. По горизонтальной оси графика этого окна порядок модели n выбирается таким, чтобы столбцы графика, расположенные справа, имели бы намного меньшую высоту, чем столбцы, расположенные слева.

Сохранение построенной модели производится в два этапа.

1. Модель вводится в рабочее окружение системы MATLAB (перетаскиванием значка модели *arx211* в область *To Workspace* в центре рабочего окна интерфейса с помощью левой клавиши мыши (ЛКМ)). При этом модель будет фигурировать в рабочем пространстве MATLAB под тем же именем, что и в среде интерфейса.

2. Модель сохраняется в режиме командной строки (как любая переменная MATLAB).

Для вывода информации о коэффициентах полиномов модели достаточно в окне интерфейса дважды щелкнуть ЛКМ на значке модели *arx211*. И в появившемся окне *Data/model Info: arx211* нажать кнопки: *Present* и *Close*.

В результате этого в рабочем окне MATLAB появляется следующая информация о дискретной модели:

Discrete-time IDPOLY model: $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$
 $A(q) = 1 - 0.3728 (+0.001186) q^{-1} + 0.003119 (+0.001046) q^{-2}$
 $B(q) = 1.575 (+0.001347) q^{-1}$
Estimated using ARX from data set Объект
Loss function $8.29401e-006$ and FPE $2.0735e-005$
Sampling interval: 0.1
Created: 04-Sep-2005 11:37:28
Last modified: 04-Sep-2005 12:42:44

В этой записи под аргументом q следует понимать z , под аргументом t функций $y(t)$ и $e(t)$: $0,1i$, а под аргументом t функции $u(t)$: $0.1(i-1)$, так как чистое запаздывание ОУ было выбрано равным одному периоду дискретизации его входного и выходного сигналов: $T = 0,1$ с.

Для преобразования найденной дискретной модели в непрерывную Mn достаточно в командной строке окна MATLAB ввести команду:

» $Mn = thd2thc(arx211)$

В результате выполнения этой команды появляется следующая информация о непрерывной модели:

Continuous-time IDPOLY model: $A(s)y(t) = B(s)u(t) + C(s)e(t)$

$A(s) = s^2 + 57.7 s + 480.8$

$B(s) = 23.8 s + 1201$

$C(s) = s^2 + 63.62 s + 762.7$

Estimated using ARX from data set Объект

Loss function 8.29401e - 006 and FPE 2.0735e-005

В этой записи под аргументом s следует понимать $p = d/dt$, под аргументом t функций $y(t)$ и $e(t)$: t , а под аргументом t функции $u(t)$: $t - 0.1$.

11.2. Построение амплитудно-частотной характеристики математической модели объекта управления

Построение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ОУ бывает необходимо для оценки ширины полосы частот пропускания ОУ. Например, при выборе периода квантования сигналов в микропроцессорной САУ, работающей в квазинепрерывном режиме. Приблизительно ширину полосы частот пропускания ОУ можно оценить по логарифмической АЧХ. Ее можно увидеть в окне *Frequency Function: u1>y1*, если поставить флажок *Frequency resp* в правой нижней части окна графического интерфейса «*ident: Untitled*». Более точную оценку ширины полосы частот пропускания ОУ можно произвести по графику АЧХ в натуральных единицах. Для его построения можно использовать, например, следующую программу, которая вводится в командном окне *MATLAB*:

```

* for i = 1:8 j (i) = 2^i/2; end; w = j;
* H (w) = freqresp (Mn,w); A = abs (H (w)); plot (w,A)
Enter,

```

где Mn – непрерывная ММ ОУ, найденная ранее в рассмотренном выше примере, а через w обозначена частота.

В результате выполнения этой программы раскрывается графическое окно с АЧХ ОУ в натуральных единицах.

11.3. Синтез регулятора автоматической системы стабилизации

Осуществим указанный синтез для ОУ, ММ которого построена в рассмотренном выше примере двумя разными методами с помощью пакета расширения *Control System Toolbox* [5].

1. Синтез регулятора выхода методом корневого годографа

Для применения этого метода можно использовать модель Mn ОУ. Тогда в командном окне *MATLAB* достаточно ввести следующую программу:

- ✦ $w=tf([23.8\ 1201],[1\ 57.7\ 480.8]); rlocus(w);$
- ✦ $[k, poles]=rlocfind(w)$

Заметим, что в первой строке этой программы построенная ранее непрерывная модель объекта Mn задается в форме tf , т. е. в виде матриц-строк коэффициентов полиномов передаточной функции ОУ. Функция $rlocus$ необходима для построения корневого годографа ОУ. А через k обозначен искомый коэффициент усиления обратной связи системы регулирования.

В ходе выполнения команды $rlocfind$ появляется окно с построенным корневым годографом и курсором, с помощью которого необходимо указать желаемый полюс системы путем нажатия левой клавиши мыши (ЛКМ). Укажем значение этого полюса, приблизительно равное -30 . В результате выполнения всей программы появляется информация о коэффициенте усиления (матрице-строке при многомерном ОУ) k обратной связи САР и ее полюсах $poles$:

Select a point in the graphics window

selected_point =
 $-30.0474 - 0.0466i$

k =
 0.7205

poles =
 -44.8014
 -30.0475

2. Синтез регулятора состояния методом модального управления

Для того чтобы применить этот метод, необходимо сначала преобразовать модель Mn ОУ к форме ss -модели. Это преобразование можно выполнить с помощью следующей программы:

- >> $w = tf([23.8\ 1201],[1\ 57.7\ 480.8]);$
- >> $sys = ss(w)$

$$a = \begin{array}{cc} & x1 & x2 \\ x1 & -57.7 & -7.513 \\ x2 & 64 & 0 \end{array}$$

$$b = \begin{array}{cc} & u1 \\ x1 & 8 \\ x2 & 0 \end{array}$$

$$c = \begin{array}{cc} & x1 & x2 \\ y1 & 2.975 & 2.346 \end{array}$$

$$d = \begin{array}{cc} & u1 \\ y1 & 0 \end{array}$$

Тогда матрицу-строку коэффициентов обратных связей САУ можно найти с помощью директивы: $k = acker(A, B, P)$, если задаться вектором желаемых полюсов ее передаточной функции. Зададим следующие значения компонентам вектора P : $[-44; -30]$. После введения и выполнения указанной выше директивы получим:

Continuous-time model.

`>> k = acker([-57.7 -7.513; 64 0], [8; 0], [-44; -30])`

$k = \begin{array}{cc} 2.0375 & 1.6390 \end{array}$

11.4. Исследование качества переходных процессов математической модели САУ

Исследование качества переходных процессов модели САУ можно осуществлять разными методами:

- операторным или классическим методом, например, с помощью пакета символьных расчетов *Symbolic Math Toolbox* [2, 6];
- одним из методов численного решения дифференциальных уравнений ММ САУ [29, 33];
- методом аналогового моделирования на аналоговой вычислительной машине АВМ [34];
- методом аналитического или имитационного моделирования на ПК, например, с помощью специального прикладного пакета программ визуального моделирования *Simulink* [4, 8].

Заметим, что каждый из перечисленных методов имеет свою область наиболее эффективного применения.

При исследовании процессов САУ операторным или классическим методами необходимо преобразование ее исходной ММ в систему уравнений относительно искомым величин. Однако это возможно лишь для достаточно простых линейных систем.

В случае использования численных методов также требуется преобразование ММ в систему уравнений, допускающую ее эффективное решение. Причем класс уравнений, которые могут быть решены численными методами, значительно шире. Но решение задачи при использовании численных методов является частным, а не общим.

При моделировании САУ на АВМ структурная схема ее электронной математической модели (ЭММ) составляется, как правило, по уравнениям отдельных звеньев системы. Поэтому между структурными схемами САУ и ее модели существует определенное топологическое сходство, при котором все входные и выходные переменные звеньев САУ имеют аналоги среди машинных переменных ее электронной модели. Но АВМ пригодна для исследования только таких САУ, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями с небольшим количеством нелинейностей.

При моделировании на ПК с помощью специального прикладного пакета ММ САУ преобразуется поэлементно в соответствующий стандартный элемент этого пакета или специальный моделирующий алгоритм, структура которого аналогична структуре исходной ММ. Этим исключается необходимость преобразования исходной ММ САУ к системе уравнений, допускающей ее эффективное решение. Более того, имитационное моделирование, в частности, оказывается весьма удобным для исследования процессов в системах со случайными внешними и параметрическими возмущениями.

В дипломном проектировании исследование качества переходных процессов спроектированной САУ осуществляется, как правило, методом ее моделирования на АВМ или ПК с помощью того или иного прикладного пакета программ моделирования. Рассмотрим далее применение именно этого метода на примерах моделирования конкретных САУ.

11.5. Моделирование САУ на АВМ

Моделирование САУ на АВМ состоит из двух этапов.

1. Подготовка ММ САУ к исследованию на АВМ, которая включает в себя две процедуры:

- программирование ММ, т. е. составление структурной схемы электронной ММ на основе приведения исходного математического описания САУ к виду, удобному для моделирования;

- проведение масштабирования переменных и расчет параметров коммутационной схемы электронной ММ САУ: масштабных коэффициентов передачи операционных блоков модели, карт настройки нелинейных блоков (если модель нелинейная), а также значений машинных начальных условий и внешних воздействий.

2. Исследование динамических характеристик ММ САУ.

Рассмотрим перечисленные этапы на примере моделирования САР ЭДС генератора постоянного тока, уравнения звеньев которой записаны в стандартной форме:

$$\left. \begin{aligned} pu &= (1/T_{И})(T_{ИЗ}p + 1)(u_{ЕЗ} - k_{ДЕ}E), \\ (T_{П}p + 1)u_{П} &= k_{П}u, \\ (T_{Г}p + 1)E &= k_{Г}u_{П}; \end{aligned} \right\} \quad (11.2)$$

где $k_{П}$, $T_{П}$, $u_{П}$ – коэффициент усиления, постоянная времени и выходное напряжение преобразователя, от которого питается обмотка возбуждения генератора; $k_{Г}$, $T_{Г}$ – коэффициент усиления и постоянная времени генератора; $k_{ДЕ}$ – коэффициент передачи датчика ЭДС; u – выходной сигнал ПИ-регулятора ЭДС; $T_{И}$, $T_{ИЗ}$ – постоянные времени интегрирования и изодрома регулятора, значения которых соответствуют настройке контура регулирования ЭДС на оптимум по модулю его частотной передаточной функции [9], $T_{И} = 2k_{П}k_{Г}k_{ДЕ}T_{П}$; $T_{ИЗ} = T_{Г}$; $u_{ЕЗ}$ – сигнал задания ЭДС.

Числовые значения параметров САР и максимально возможные значения ее переменных приведены в табл. 11.2.

Таблица 11.2

$k_{П}$	$T_{П}, с$	$k_{Г}$	$T_{Г}, с$	$k_{ДЕ}$	$T_{И}, с$	$E_{\max}, В$	$u_{ЕЗ}, В$
10	0,01	10	0,1	0,01	0,02	800	4

Наиболее простой способ составления структурной схемы электронной модели САР заключается в следующем.

Сначала дифференциальные уравнения исходной ММ САР (11.2) разрешаются относительно старшей производной выходной величины соответствующего звена и каждое из них интегрируется столько раз, каков его порядок, т. е.

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{T_{ИЗ}}{T_{И}} (u_{ЕЗ} - k_{ДЕ} E) + \frac{1}{T_{И}} \int_0^t (u_{ЕЗ} - k_{ДЕ} E) dt; \\ u_{П} &= \frac{1}{T_{П}} \int_0^t (k_{П} u - u_{П}) dt; \\ E &= \frac{1}{T_{Г}} \int_0^t (k_{Г} u_{П} - E) dt. \end{aligned} \right\} (11.3)$$

Затем по уравнениям (11.3) составляется структурная схема электронной модели САР с помощью условных изображений отдельных операционных блоков путем подсоединения входов каждого из них к выходам соответствующих операционных блоков (рис. 11.2). Рас-

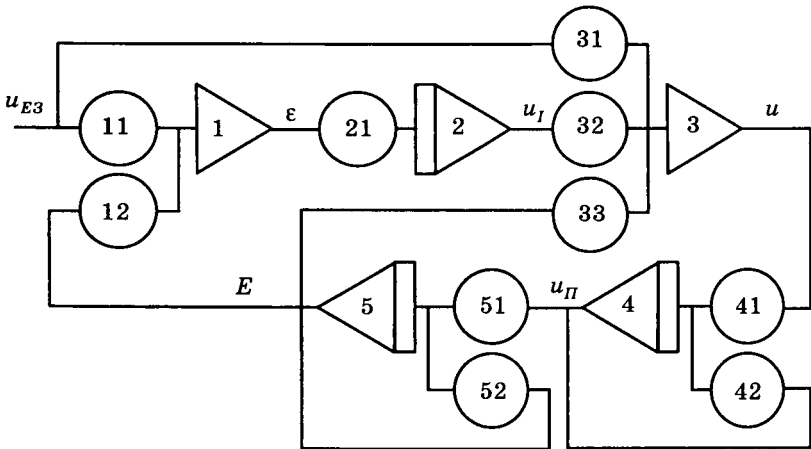


Рис. 11.2

четные формулы и числовые значения структурных коэффициентов передачи операционных блоков, изображенных на рис. 11.2, представлены в табл. 11.3.

Таблица 11.3

β_{11}	β_{12}	β_{21}	β_{31}	β_{32}	β_{33}	β_{41}	β_{42}	β_{51}	β_{52}
-	$k_{ДЕ}$	$1/T_{И}$	$T_{ИЗ}/T_{И}$	-	$k_{ДЕ} T_{ИЗ}/T_{И}$	$K_{П}/T_{П}$	$1/T_{П}$	$K_{Г}/T_{Г}$	$1/T_{Г}$
1	0,01	50	5	1	0,05	1000	100	100	10

При моделировании САР на АВМ их исходные переменные заменяются с помощью масштабов машинными переменными. Причем независимой переменной в АВМ служит машинное время, а все зависимые машинные переменные являются электрическими напряжениями. Масштабы машинных переменных выбираются исходя из допустимого диапазона изменения амплитуды и частоты последних. В частности, для каждого типа АВМ задаются максимально допустимое значение напряжения, например, для АВК-6 [10] $u_{\max} = \pm 10 \text{ В}$. А также указывается рекомендуемый диапазон времени наблюдения исследуемых процессов: $\tau_{\min} + \tau_{\max}$ (для АВК-6 $\tau = 0,1-1 \text{ с}$).

Рассчитываются масштабы машинных переменных по формулам:

$$\left. \begin{aligned} m_i &= u_{\max} / y_{i \max}, \\ m_t &= \tau / t_{\Pi}; \end{aligned} \right\}$$

где t_{Π} – длительность протекания исследуемого процесса в САР; $y_{i \max}$ – максимально возможное значение i -й исходной переменной САУ.

Масштабирование начального значения i -й переменной $y_i(0)$, j -го внешнего воздействия f_j и времени запаздывания τ_3 соответствующего звена (если оно есть) выполняется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} u_i(0) &= m_i y_i(0), \\ u_{fj} &= m_{fj} f_j, \\ \tau_M &= m_t \tau_3, \end{aligned} \right\}$$

где $u_i(0)$, u_{fj} , τ_M – соответственно начальное условие, внешнее воздействие и время запаздывания в машинных переменных.

Рассчитанные значения масштабов машинных переменных для моделируемой на АВК-6 САР представлены в табл. 11.4.

Таблица 11.4

Обозначение	m_E	$m_{u_{\text{ин}}}$	m_u	m_ϵ	m_{x_3}	m_{E_3}	m_t
Расчетная формула	$\frac{10}{E_{\max}}$	$\frac{10T_{\Pi}}{k_{\Pi}T_{\text{ИЗ}}\mu_{E_3}}$	$\frac{10T_{\Pi}}{T_{\text{ИЗ}}\mu_{E_3}}$	$\frac{10}{u_{E_3}}$	$\frac{10k_{\Pi}k_{\Gamma}}{E_{\max}}$	$\frac{10}{u_{E_3}}$	$\frac{1}{0,1}$
Значение	0,0125	0,05	0,5	2,5	1,25	2,5	10

После масштабирования переменных электронной модели САР производится расчет масштабных коэффициентов передачи каждого ее i -го операционного блока по формуле:

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \beta_{ij} m_i / m_j & \text{для усилителя;} \\ \beta_{ij} m_i / m_j / m_t & \text{для интегратора,} \end{cases} \quad (11.4)$$

где β_{ij} – структурный коэффициент передачи i -го операционного блока (см. рис. 11.2); m_i, m_j – масштабы соответственно выходной и j -й входной переменной.

Расчитанные по формуле (11.4) значения масштабных коэффициентов передачи операционных блоков электронной модели САР представлены в табл. 11.5.

Таблица 11.5

α_{11}	α_{12}	α_{21}	α_{31}	α_{32}	α_{33}	α_{41}	α_{42}	α_{51}	α_{52}
1	2	2,5	1	0,4	2	10	10	2,5	10

Далее по структурной схеме электронной модели САР (см. рис. 11.2) составляется коммутационная схема набора модели для конкретного типа АВМ и уточняются, в случае необходимости, значения масштабных коэффициентов передачи ее операционных блоков. Например, на АВК-6 операционные блоки являются двухкаскадными. Поэтому требуется перераспределение представленных в табл. 11.5 значений масштабных коэффициентов между двумя каскадами.

Коммутационная схема набора модели исследуемой САР на АВК-6 приведена на рис. 11.3, а значения масштабных коэффициентов передачи ее операционных блоков – в табл. 11.6.

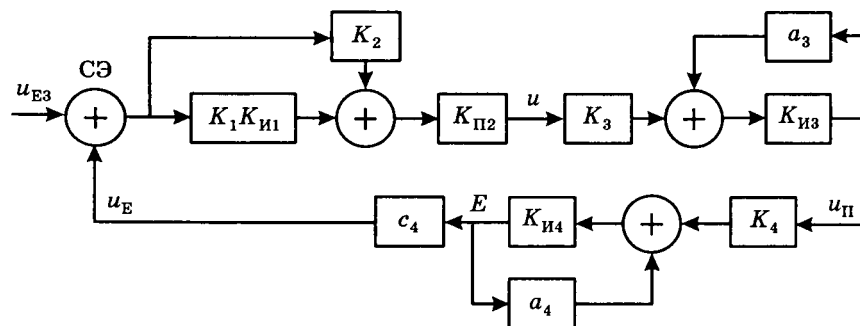


Рис. 11.3

Таблица 11.6

K_1	$K_{И1}$	K_2	$K_{П2}$	K_3	$K_{И3}$	a_3	K_4	$K_{И4}$	a_4	c_4
1	1	2	1	1	10	-1	0,25	10	-1	-2

После составления коммутационной схемы набора модели САР и уточнения значений масштабных коэффициентов передачи ее операционных блоков осуществляется установка последних в режиме 1 для АВК-6.

Затем с помощью специальных гибких проводников собирается схема электронной модели САР и производится подсоединение контролируемых(ой) величин(ы) к входам(у) осциллографа, а вход модели САР подключается к выходу соответствующего источника напряжения.

Исследование динамических характеристик ММ САР на АВК-6 осуществляется в режиме 2. Причем если необходимо получить временную характеристику, например, переходную, то на вход модели САР подается единичное ступенчатое напряжение с эталонного источника постоянного напряжения, на вход x осциллографа – развертывающее напряжение с генератора пилообразного напряжения, а выходная величина модели САР подается на вход y осциллографа. Процесс моделирования начинается после нажатия кнопки «Сеть».

11.6. Моделирование САУ на персональном компьютере с помощью пакета расширения *Simulink*

Одним из наиболее универсальных пакетов прикладных программ моделирования (ППМ), который можно применять для моделирования непрерывных, дискретных и дискретно-непрерывных систем управления, как детерминированных, так и стохастических, является пакет программ для визуального моделирования *Simulink* [4, 8]. Он является пакетом расширения достаточно мощной и универсальной интегрированной системы компьютерной математики *MATLAB* [1]. Пакет содержит весь необходимый набор типовых функциональных блоков (нелинейные, непрерывные линейные и дискретные элементы, блоки формирования уравнений состояния в векторно-матричной форме, источники и регистраторы сигналов как в цифровой форме, так и в графической, соединительные узлы и т. п.), т. е. таких, которые соответствуют компонентам реальных систем. В ППМ *Simulink* реализованы принципы визуально-ориентированного программирования, что позволяет легко выбирать нужные блоки и соединять их с целью составления модели анализируемой системы.

Для представления моделируемой системы в виде машинной модели в ППМ *Simulink* используется язык блок-диаграмм. Это графическое представление последовательности операций преобразования сигналов в моделируемой САУ в виде схемы из типовых функцио-

нальных блоков и соединительных стрелок между ними, которые отображают взаимосвязи между блоками. Причем данные, которыми обмениваются функциональные блоки, могут быть как скалярными, так и векторными величинами произвольной размерности.

По удобству графического пользовательского интерфейса, обилию функциональных блоков, разнообразию виртуальных средств регистрации и визуализации результатов моделирования, а также по их надежности и достоверности Simulink выгодно отличается от множества других программ подобного назначения.

ППМ Simulink хорош тем, что, с одной стороны, обеспечивает пользователю доступ ко всем основным возможностям системы MATLAB, а с другой стороны – является достаточно самостоятельной ее компонентой. Имеется в виду то, что при работе с ним не обязательно иметь навыки в использовании других пакетов расширения MATLAB. Другое важное достоинство Simulink заключается в том, что он является открытой системой, т. е. состав его библиотеки может быть пополнен пользователем за счет разработки собственных функциональных блоков.

Основное назначение ППМ Simulink – это имитационное моделирование систем управления. При имитационном моделировании ММ САУ воспроизводит логику (алгоритм) функционирования последней во времени при различных сочетаниях значений параметров системы и внешней среды. Причем часть входных воздействий и параметров системы могут быть случайными. Поэтому имитационное моделирование не ограничивается разработкой имитационной модели и требует подготовки, планирования, проведения и обработки результатов статистического эксперимента.

В зависимости от назначения проводимых исследований с помощью ППМ Simulink можно проводить один из трех наиболее распространенных видов имитационных экспериментов:

- исследование относительного влияния различных факторов на выходные характеристики системы;
- нахождение аналитической зависимости между интересующими исследователя выходными характеристиками и варьируемыми факторами;
- отыскание оптимальных значений параметров системы.

Однако это совсем не означает, что с помощью ППМ Simulink можно проводить только имитационное моделирование. С помощью данного ППМ можно осуществлять и аналитическое, и имитационное, и аналитико-имитационное моделирование систем управления. Данный ППМ позволяет строить модели и исследовать с их помощью переходные и установившиеся процессы любых реальных САУ: детерминированных и стохастических, линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных, непрерывных, дискретных, дискрет-

но-непрерывных, в том числе систем прямого цифрового управления и адаптивных САУ.

Совместно с Simulink можно использовать и другие пакеты расширения системы MATLAB. Например, пакет Nonlinear Control Design (NCD) Blockset [3] совместно с Simulink реализует метод динамической оптимизации. В частности, он предназначен для настройки параметров регуляторов на заданные показатели качества переходных процессов одномерных и многомерных систем с переменными параметрами.

Разработка моделей САУ в виде блок-диаграмм основана на технологии Drag-and-Drop (Перетаски и оставь). Смысл ее заключается в том, что пользователь может с помощью мыши (при нажатой ЛКМ) «перетаскивать» (буксировать) выделенный блок из одного окна в другое. В частности, из окна Library: simulink, содержащего перечень основных разделов с функциональными блоками библиотеки Simulink, в окно Untitled, в котором строится Simulink-модель исследуемой САУ. Указанные окна открываются при запуске Simulink, который можно произвести, либо нажав соответствующую кнопку на панели меню, либо выбрав команду New Model в разделе File главного меню командного окна MATLAB.

Каждый блок, входящий в библиотеку Simulink, имеет по крайней мере один параметр настройки. Задавая требуемое значение параметра (или выбирая его из предлагаемого меню), пользователь имеет возможность скорректировать функцию, реализуемую данным блоком. Чтобы открыть окно настройки параметров, нужно дважды щелкнуть ЛКМ (левой клавишей мыши) на изображении блока. Однако возможность изменения значений параметров появляется лишь тогда, когда блок будет помещен в окно Untitled.

Окна настройки параметров всех блоков имеют идентичную структуру и содержат краткую характеристику блока, поле ввода или выбора значений параметров и четыре кнопки: Apply, Help, Cancel и OK. Причем изменение значений параметров блока вступает в силу после нажатия кнопок Apply и OK.

Помимо настройки параметров блоков перед запуском модели на исполнение устанавливаются параметры моделирования. Они устанавливаются на вкладке Solver в диалоговом окне Parameters раздела Simulation меню окна Untitled. На этой вкладке может быть произведено следующее:

- Simulation time, т. е. установка интервала времени моделирования, величина которого задается посредством указания начального (Start time) и конечного (Stop time) значений модельного времени;
- Solver options, т. е. выбор метода расчета модели с помощью двух выпадающих меню.

Первое меню Type позволяет выбрать способ изменения модельного времени: с переменным шагом (Variable-step) или с фиксированным шагом (Fixed-step). Как правило, Variable-step используется для моделирования непрерывных систем, а Fixed-step – дискретных и дискретно-непрерывных.

Второе меню, расположенное справа, позволяет выбрать метод расчета нового состояния моделируемой системы. Причем первый пункт меню (discrete) обеспечивает расчет дискретных состояний системы (и для непрерывного, и для дискретного времени переходов ее из состояния в состояние). А остальные пять пунктов меню обеспечивают выбор метода расчета нового состояния для непрерывных систем. Эти методы различны для непрерывного времени (Variable-step) и для дискретного времени (Fixed-step), но основаны на единой методике – решении обыкновенных дифференциальных уравнений.

Под полем меню Type находится строка редактирования, название которой меняется в зависимости от выбранного способа изменения модельного времени. Для Fixed-step она называется Fixed-step size и позволяет указывать величину шага моделирования. При выборе Variable-step данная строка получает имя Max step size (Максимальная величина шага) и, соответственно, содержит предельно допустимое значение шага моделирования.

По умолчанию величина шага моделирования для обоих способов изменения модельного времени устанавливается автоматически (auto) в соответствии с параметрами настройки блоков модели.

При моделировании непрерывных систем с использованием переменного шага (Variable-step) необходимо указать также точность вычислений: относительную (Relative tolerance) и абсолютную (Absolute tolerance). По умолчанию они равны соответственно $1 \cdot 10^{-3}$ и $1 \cdot 10^{-6}$. Кроме того, для указанного класса систем можно задать начальное значение шага моделирования в поле Initial step size.

Запуск модели САУ на исполнение можно произвести, нажав соответствующую кнопку меню либо выбрав команду Start в разделе Simulation главного меню окна Untitled.

Рассмотрим применение ППИМ Simulink на примере моделирования релейной САУ, структурная схема которой приведена на рис. 11.4.

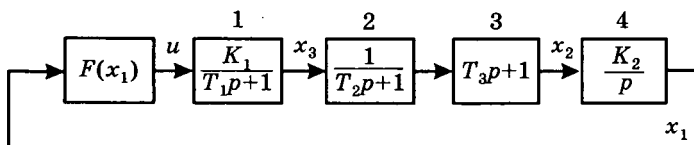


Рис. 11.4

Числовые значения параметров САУ приведены в табл. 11.7, в которой через b и c обозначены соответственно уровень ограничения и зона нечувствительности двухпозиционного реле.

Таблица 11.7

T_1, c	T_2, c	T_3, c	K_1	K_2	b	c	$x_1(0)$
1	1	0,4	2	1	± 25	± 10	50

Моделирование САУ осуществляется в следующем порядке.

1. Запустить Simulink нажатием восьмой кнопки на панели меню командного окна MATLAB или кнопки Start в нижней части того же окна и последовательным выбором в раскрывающихся меню команд Simulink и Simulink Library Browser.

2. Открыть поле Untitled для набора Simulink-модели – нажатием первой кнопки на панели меню окна Simulink Library Browser.

3. В поле Untitled построить Simulink-модель САУ. Для этого необходимо в окне Simulink Library Browser выбрать раздел Simulink и раскрыть, тем самым, каталог разделов библиотеки, в которых хранятся стандартные блоки для набора Simulink-модели. Необходимые для построения Simulink-модели исследуемой САУ блоки отыскиваются путем раскрытия соответствующих разделов каталога библиотеки Library-simulink и перетаскиваются с помощью мыши (при нажатой ЛКМ) в поле Untitled.

Подсоединение одного блока к другому осуществляется перемещением курсора (при нажатой ЛКМ) от входа одного блока до выхода другого (или до точки разветвления уже имеющейся линии связи).

Для введения текстовой информации на поле Simulink-модели необходимо установить курсор в требуемую точку этого поля и дважды щелкнуть ЛКМ. В появившийся прямоугольник ввести с клавиатуры необходимый текст. Схема Simulink-модели исследуемой САУ приведена на рис. 11.5.

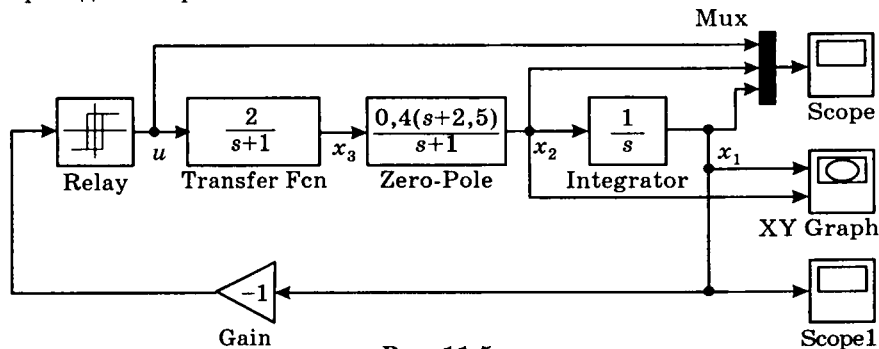


Рис. 11.5

4. Установить параметры моделирования. Для этого на вкладке Solver команды Parameters раздела Simulation меню пользователя на поле Untitled необходимо установить:

- Simulation time (интервал моделирования): 0.0+10.0;
- Solver options (шаг и метод расчета):
- Type: Variable-step, ode 45;
- Max step size: auto;
- Initial step size: auto;
- Output options: Refine output, 1.

5. Осуществить настройку параметров каждого блока Simulink-модели САУ. Для этого необходимо дважды щелкнуть ЛКМ на его изображении и установить значения параметров такими, которые указаны в табл. 11.8. При этом измененные значения параметров настройки вступают в силу после нажатия кнопок Apply и ОК.

Таблица 11.8

№ п/п	Название блока	Параметр настройки	Значение параметра
1	Relay	Swich on point	10
		Swich off point	-10
		Output when on	25
		Output when off	-25
2	Transfer Fcn	Numerator	2
		Denominator	1,1
3	Mux	Number of inputs	3
4	Scope (кнопка 6)	Ymax, Ymin	50; -50
5	Zero-Pole	Zeros	-2,5
		Poles	-1
		Gain	0,4
6	Integrator	Initial Condition	50
7	Gain	Gain	-1
8	XY-Graph	x_{min}	-50
		x_{max}	50
		y_{min}	-50
		y_{max}	50

6. Запустить процесс моделирования введением команды Start раздела Simulation меню пользователя на поле Untitled.

Для просмотра результатов моделирования в виде динамических характеристик САУ достаточно дважды щелкнуть ЛКМ на иконке соответствующего регистратора сигналов: Scope, Scope1 или XY-Graph.

11.7. Особенности моделирования импульсных и микропроцессорных САУ

В настоящее время достаточно широкое распространение получили микропроцессорные САУ с непрерывным объектом управления, которые работают в квазинепрерывном режиме. Simulink-модель одной из таких систем приведена на рис. 11.6. На рис. 11.6 обозначено: Зд – задатчик; ОР – объект регулирования; Кв – квантователь входного сигнала по уровню; РД – регулятор дискретный. Этот регулятор, как и остальные дискретные блоки ППМ Simulink, содержат квантователь входного сигнала по времени и формирователь выходного сигнала в виде экстраполятора нулевого порядка.

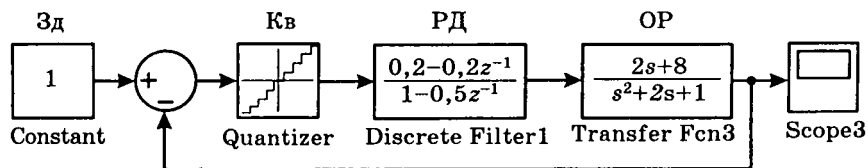


Рис. 11.6

Для моделирования САУ с амплитудно-импульсным (АИМ) и широтно-импульсным (ШИМ) модуляторами можно использовать Simulink-модели указанных преобразователей, представленные соответственно на рис. 11.7 и 11.8.

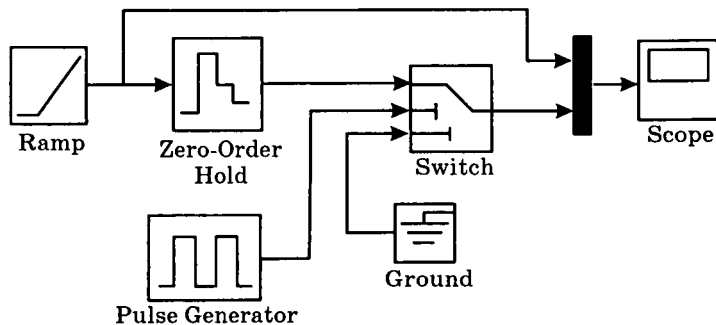


Рис. 11.7

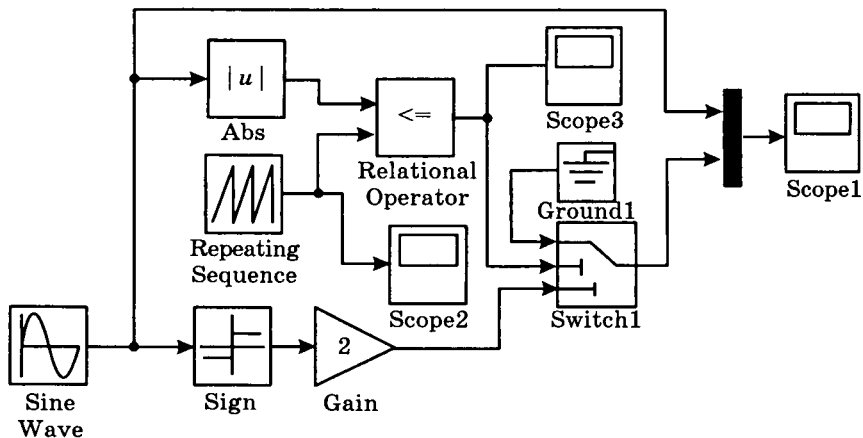


Рис. 11.8

Заметим, что в Simulink-модели двуполярного ШИМ на рис. 11.8 можно использовать генератор пилообразного напряжения с более крутым задним фронтом выходных импульсов. Simulink-модель такого генератора приведена на рис. 11.9. Причем при выборе параметров интегратора этого генератора необходимо установить:

- в позиции **External reset**: rising, т. е. сброс по перепаду управляющего сигнала;
- в позиции **Show state port**: флажок для задания дополнительного выхода состояния.

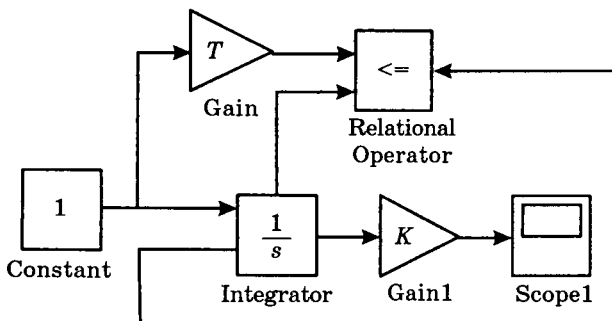


Рис. 11.9

В свою очередь, выбором значения коэффициента K можно установить необходимую амплитуду выходных импульсов генератора в соответствии с формулой

$$u_{\max} = KT,$$

где T – период работы импульсного элемента.

Список литературы

1. Дьяконов В. MATLAB: Учебный курс. – СПб.: Питер, 2001. – 560 с.
2. Дьяконов В. П., Круглов В. В. Математические пакеты расширения MATLAB: Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001.
3. Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем: Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.
4. Дьяконов В. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.
5. Медведев В. С., Потемкин В. Г. Control System Toolbox. MATLAB 5 для студентов. – М.: Диалог-МИФИ, 1999. – 287 с.
6. Рогачев Г. Н. Моделирование систем: Учеб. пособие /Самар. гос. техн. ун-т.– Самара: СамГТУ, 2004. – 170 с.
7. Урмаев А.С. Основы моделирования на аналоговых вычислительных машинах. – М.: Наука, 1978. – 272 с.
8. Гультияев А. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: Практическое пособие. – СПб.: КОРОНА-принт, 1999. – 228 с.
9. Фрер Ф., Ортенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования. – М: Энергия, 1973. – 192 с.
10. Алексаков Г.Н., Гаврилин В. В., Федоров В. А. Персональный аналоговый компьютер АВК-6. – М.: Инженерный центр МИФИ, 1989. – 72 с.

12

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

12.1. Общие сведения об использовании микропроцессорной техники в дипломном проектировании

подавляющее большинство дипломных проектов в рамках подготовки специалистов-инженеров или бакалавров, выполняется с использованием средств микропроцессорной техники. Умелое применение микропроцессорных средств в дипломном проектировании является показателем достижения студентом требуемого уровня квалификации: инженера электронной техники, инженера-электрика, инженера-схемотехника, инженера-системотехника или бакалавров данных специальностей.

Однако применение микропроцессорной техники при проектировании устройств должно быть технически и экономически обоснованным. *Техническое обоснование* – это выявление характеристик, функциональных возможностей устройства, которые значительно улучшаются или расширяются при использовании выбранных микропроцессорных средств. При этом должно быть показано, что достичь этих характеристик, используя другую элементную базу (интегральные матричные схемы, программируемые интегральные схемы, дискретные элементы), сложно или технически нецелесообразно.

Экономическое обоснование предполагает определение прямой или косвенной экономии денежных средств, которая возникнет при производстве либо при эксплуатации данного устройства в случае использования выбранных микропроцессорных средств.

12.2. Характер использования микропроцессорной техники в проектируемых устройствах

Применение микропроцессорной техники в проектируемых устройствах носит различный характер:

- *во-первых*, микропроцессорная техника может использоваться для реализации главных управляющих блоков в проектируемой системе, которые обеспечивают управление, координацию работы всех остальных узлов проектируемой системы;
- *во-вторых*, микропроцессорная техника может использоваться для выполнения строго ограниченных функций в проектируемой электронной системе, в некоторых случаях вспомогательных (обеспечение ввода/вывода информации, первичной обработки информации, обслуживание различных устройств хранения информации).

В первом случае говорят о разработке *микропроцессорной системы*, которая может включать несколько микропроцессорных контроллеров, взаимодействующих между собой, большое количество периферийных устройств, датчиков и устройств сопряжения. Эта система может быть распределенной иерархической и включать управляющие ЭВМ верхних уровней. Разработку сложных микропроцессорных систем ведут, как правило, в рамках комплексных дипломных проектов либо ограничиваются подробной разработкой только конкретных блоков системы.

Во втором случае говорят о разработке *локального микропроцессорного устройства* в рамках проектируемой электронной системы.

Следует подчеркнуть, что специальная часть дипломного проекта может быть посвящена не только разработке новой системы, но и *модернизации* уже существующих как микропроцессорных, так электронных систем. Выполнение данной тематики должно определяться потребностями предприятий, на которых студент проходит практику.

Модернизация может заключаться как в построении дополнительного микропроцессорного устройства к уже существующей системе, так и в переработке существующих устройств системы с использованием современной микропроцессорной техники.

В зависимости от того, осуществляется в рамках специальной части проекта разработка или модернизация, зависит и характер работы студента на преддипломной практике.

В первом случае в результате преддипломной практики студент должен осуществить подборку и разработку следующих документов для проекта:

- подробное описание назначения, работы и структурную схему объекта, для которого осуществляется проектирование системы;
- анализ подобных существующих систем с выбором способа построения;
- общий алгоритм работы проектируемой системы;
- технические требования и требуемые характеристики системы (техническое задание к проекту);

- структурную схему проектируемой системы;
- предварительную оценку способов и микропроцессорной базы построения системы с техническим и экономическим обоснованием;
- разбиение функций системы на программно и аппаратно реализуемые.

В случае модернизации системы в *результате практики* студент должен:

- подробно описать назначение, структуру и работу существующей системы;
- выявить недостатки системы, требующие ее модернизации;
- обосновать техническую и экономическую целесообразность модернизации;
- на основе анализа подобных систем определить основные пути модернизации;
- оценить требуемые технические характеристики проектируемого устройства, составить техническое задание на проект;
- подробно до уровня принципиальных, функциональных схем разобраться с работой и принципом построения модернизируемого блока или блоков, с которыми непосредственно взаимодействует модернизируемый блок;
- составить алгоритм работы модернизируемого блока и структурную схему модернизированной системы;
- осуществить предварительное разбиение функций системы на программно и аппаратно реализуемые.

Эти результаты оформляются как отчет по преддипломной практике и по существу являются выполнением главы дипломного проекта.

12.3. Классификация микропроцессорных систем и особенности проектирования

Все разрабатываемые микропроцессорные устройства и системы можно условно классифицировать на три типа:

- *Системы программно-логического управления (ПЛУ)*, в которых (рис. 12.1) все сигналы \bar{X} , измеряемые на объекте (входные), и все сигналы \bar{Y} управления, подаваемые на объект (выходные), носят логический характер:

$$\begin{aligned}\bar{X} &= [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, \quad \bar{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_k]^T, \\ x_i &= \{0|1\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad y_j = \{0|1\}, \quad j = \overline{1, k}.\end{aligned}$$

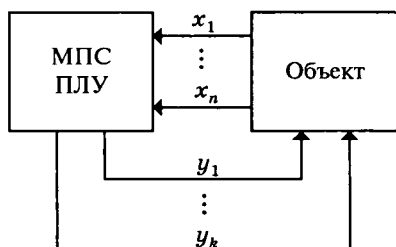


Рис. 12.1

Основные алгоритмы управления в таких системах базируются на вычислениях логических функций и выходных значений конечных логических автоматов с памятью.

- *Системы сбора и обработки информации (СОИ)*, основные функции которых: сбор информации с большого числа распределенных датчиков, циклический контроль измеряемых параметров, сохранение измеренных значений и первичная обработка. Основные алгоритмы микропроцессорных контроллеров в таких системах реализуют обработку сигналов на основе: цифровой фильтрации, спектрального анализа, группировки и распознавания сигналов, идентификации процессов, сжатия и архивации данных, реализации протоколов передачи данных и другие первичные преобразования. Зачастую эти системы используют распределенные базы данных для хранения накопленной информации.

Общая структура системы СОИ представлена на рис. 12.2. Ее основными элементами являются: МПК – микропроцессорный контроллер; АЦП – m -разрядный аналого-цифровой преобразователь; АК – аналоговый коммутатор на n входных сигналах; $НУ_1, \dots, НУ_n$ – нормирующие усилители сигналов с датчиков $Д_1, \dots, Д_n$ и др.

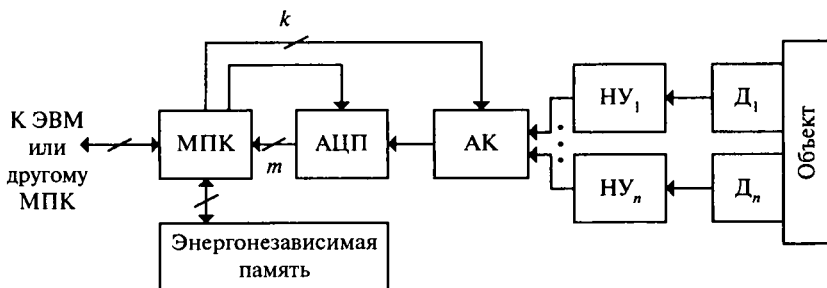


Рис. 12.2

• *Системы цифрового автоматического управления (ЦАУ)*, основное назначение которых реализация управления, путем воздействия на объект, в соответствии с законом управления на основе измеренных и вычисленных параметров. Основные алгоритмы этих систем реализуют: функции регуляторов, описанных в виде z -передаточных функций или в пространстве состояний; функции нечетких регуляторов; функции наблюдателей состояния; оптимальных регуляторов и фильтров; функции идентификации объектов или процессов и др.

Общая структура системы ЦАУ приведена на рис. 12.3. Сигналы управления формируются устройствами типа цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), широтно-импульсного преобразователя (ШИМ). Важную роль в системах ЦАУ играет таймер, задающий интервалы измерения сигналов и выдачи управляющих воздействий.

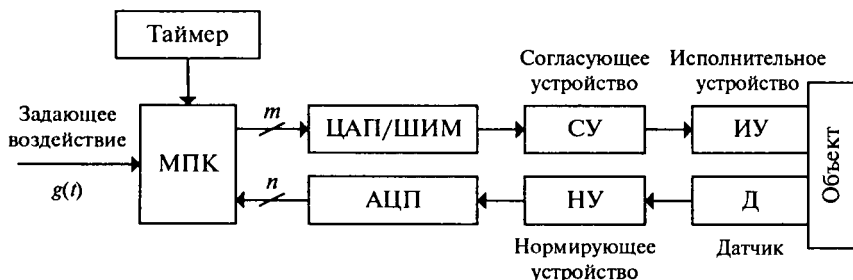


Рис. 12.3

Разработку каждой из перечисленных систем можно рассматривать как триединую задачу, включающую:

- разработку математических *алгоритмов функционирования*, на основе расчета и проектирования регуляторов, фильтров, логических функций или автоматов, наблюдателей, систем распознавания и идентификации и тому подобных;
- разработку *аппаратных средств* системы;
- разработку *программного и информационного обеспечения*.

Каждый из перечисленных этапов должен быть отражен в дипломном проекте. Однако если система достаточно сложная, то задача ее проектирования по объему может выходить за рамки одного проекта. В этой связи встает проблема сочетания *различной глубины проработки* системы в целом и ее отдельных модулей, а также определение степени решения каждой из задач проектирования в дипломном проекте. Эти проблемы должны решаться совместно студентом с руководителями дипломного проекта от университета и

предприятия, предложившего тему дипломного проекта. Они должны быть четко определены в *техническом задании* к дипломному проектированию.

В большинстве проектов реализуется следующий подход. Проектирование *системы в целом* осуществляется до уровня структурных или функциональных схем, при этом разрабатывается общая схема алгоритма функционирования системы в целом, а проектирование выбранного *отдельного модуля* системы доводится до уровня принципиальных схем, подробного алгоритма функционирования. Отдельные процедуры общего алгоритма функционирования, как правило, связанные с обслуживанием построенного модуля, детализируются, а затем реализуются и отлаживаются на выбранном языке программирования (низкого или высокого уровня) и приводятся в приложении дипломного проекта. Разработка информационного обеспечения осуществляется в случае реализации в системе информационной базы данных, зачастую распределенной.

При прохождении преддипломной практики на предприятиях студенту важно определить такую тему дипломного проекта, которая соответствовала бы выпускающим специальностям: 22020165, 21010665 или иным подобным. Для облегчения этого выбора рассмотрим возможные варианты реальных микропроцессорных систем, которые могут являться темой проекта.

Так, вариантами системы *программно-логического управления*, которые являются более простыми с точки зрения алгоритмов работы, программной и аппаратной реализации, могут быть:

- а) микропроцессорные системы защит силовых устройств (трансформаторов, генераторов);
- б) различные системы передачи данных с кодированием и декодированием передаваемой информации;
- в) автоматические телефонные системы (автодозвона, определения номера и др.);
- г) разветвленные системы охранной и пожарной сигнализации;
- д) автоматические регистраторы срабатывания реле защит с определением и ликвидацией аварийных ситуаций;
- е) системы управления некоторым бытовым и промышленным оборудованием.

Системы *сбора и обработки информации*, как правило, представляют собой распределенные иерархические информационно-измерительные микропроцессорные системы. Важную роль в таких системах играют принципы взаимодействия контроллеров и ЭВМ различных уровней иерархии, а также реализуемые алгоритмы первичной обработки и хранения информации. При проектировании таких систем необходимо изначально четко определить функции, выполняемые каждым контроллером и ЭВМ в системе. Эти системы могут предпо-

лагать подробную разработку *информационного обеспечения* в форме различных распределенных баз данных, моделей данных и т. п.

Вариантами систем *сбора и обработки информации*, разрабатываемыми в дипломе, могут быть:

- а) различные системы контроля потребления энергии и других ресурсов;
- б) микропроцессорные системы мониторинга окружающей среды;
- в) микропроцессорные системы медицинской диагностики;
- г) системы технической диагностики и поиска неисправностей;
- д) системы контроля параметров сложных технических объектов;
- е) технологические системы учета количества и проверки качества выпускаемой продукции;
- ж) тренажерные системы;
- з) системы на основе глобальных (*Internet*) и локальных вычислительных сетей.

Системы *цифрового автоматического управления* имеют широкое распространение в технике и на производстве, однако им свойственно более сложное алгоритмическое (в частности, математическое) и программное обеспечение. Характеризуются они различными показателями качества управления, теоретической же базой их проектирования является теория цифровых систем управления. При дипломном проектировании этих систем возможны два подхода:

- первый подход, с выделением и подробной разработкой этапа математического анализа, идентификации объекта управления и структурно-параметрического синтеза регулятора в ущерб другим этапам;
- второй подход, с выделением и подробной разработкой не менее важной части программно-аппаратной реализации функций управления в системе (разработки структур управляющих программ с применением современных методик программирования, особых приемов и методов программной реализации, отладки, эмуляции, взаимной увязки программных и аппаратных средств и т. п.).

Вариантами систем ЦАУ, разрабатываемыми в дипломном проекте, могут быть:

- а) различные микропроцессорные системы управления приводами транспортных средств;
- б) системы программного управления приводами станков с ЧПУ;
- в) системы управления технологическими процессами в электроэнергетике, химической, пищевой или легкой промышленности;
- г) локальные системы управления параметрами различных технических, транспортных или технологических объектов.

Название тем дипломных проектов, посвященных разработке систем ПЛУ, СОИ и ЦАУ, могут звучать следующим образом:

- микропроцессорная система управления компрессорами газоперекачивающей станции;
- микропроцессорная система охранной и пожарной сигнализации административного здания;
- локальное микропроцессорное устройство управления вышивальной машиной;
- микропроцессорная система диагностики работоспособности удаленных автоматических телефонных станций;
- иерархическая микропроцессорная система контроля потребления электроэнергии предприятием;
- распределенная микропроцессорная система учета потребления воды промышленным предприятием;
- микропроцессорная экспертная система диагностики кардиологических заболеваний;
- микропроцессорная система визуального контроля и распознавания объектов на транспортном конвейере;
- микропроцессорная система отбраковки постоянных магнитов;
- микропроцессорная система мониторинга состояния воздушного бассейна города;
- микропроцессорная система управления впрыском двигателя внутреннего сгорания автомобиля;
- микропроцессорная система управления тяговым приводом электровоза ЭП1;
- микропроцессорная система управления котлоагрегатом электростанции;
- микропроцессорная система управления поворотом спутниковой антенны.

Приведенные списки разрабатываемых систем не являются исчерпывающими, они приводятся для примерной ориентировки студента при выборе подходящей тематики для дипломного проекта на предприятиях.

12.4. Типовое содержание специальной части дипломных проектов, посвященных разработке и модернизации микропроцессорных систем

Содержание включает примерное название глав и параграфов специальной части и различается в зависимости от типа разрабатываемой микропроцессорной системы. Так, типовое содержание специальной части и приблизительный перечень чертежей проекта, посвященного разработке систем *программно-логического управле-*

ния, сбора и обработки информации или цифрового автоматического управления, могут иметь вид (главы имеют одинарную нумерацию, параграфы – двойную и подразделы – тройную):

1. Анализ вариантов реализации системы и разработка технического задания.

1.1. Описание работы объекта автоматизации и его технические характеристики. Определение задач и целей контроля, мониторинга или управления.

Данный параграф может содержать описание математической модели объекта.

1.2. Анализ известных вариантов построения подобных систем.

В данном параграфе возможно определение требуемого количества микропроцессорных контроллеров в системе.

1.3. Разработка технического задания на проектирование системы и построение структурной схемы системы.

2. Математическое описание и общий алгоритм работы системы.

2.1. Составление общего алгоритма управления или мониторинга. Определение количества и диапазона изменения входных и выходных сигналов основных модулей системы (регулятора).

2.2. Описание алгоритма работы основных модулей системы (регулятора).

В случае систем ПЛУ это описание регулятора в форме конечного логического автомата или логической функции. В случае систем СОИ – математическое описание алгоритмов первичной обработки информации (фильтрации, распознавания, быстрых преобразований и т. п.) или информационных моделей данных, реализуемых баз данных. В случае систем ЦАУ – выбор типа и расчет цифрового регулятора, выбор и описание алгоритмов идентификации или оценивания и т. п.

2.3. Математическое моделирование работы основных блоков системы и проверка работоспособности с использованием прикладных программных пакетов.

На этой основе осуществляется определение основных характеристик и показателей качества системы. Уточнение параметров системы. В частности, может осуществляться оценка требуемых параметров АЦП и ЦАП, выбор частоты дискретизации и т. п.

2.4. Разработка информационной модели данных, реализуемых баз данных.

Параграф приводится, если в проекте разрабатываются распределенные или сосредоточенные базы данных.

2.5. Определение требований к микропроцессорному (ным) контроллеру (рам) или ЭВМ в системе.

3. Разработка функциональных и принципиальных схем блоков системы.

3.1. Разработка функциональной схемы системы (или отдельных блоков) и описание работы.

Здесь также определяется возможность применения промышленных контроллеров или ЭВМ, осуществляется выбор типа микропроцессоров и однокристалльных контроллеров, применяемых в системе.

3.2. Выбор типов датчиков, исполнительных устройств. Выбор и расчет основных параметров каналов связи.

3.3. Выбор элементной базы и разработка принципиальных схем блоков системы.

3.3.1. Краткая характеристика используемых интегральных схем и обоснование выбора.

3.3.2. Поверочный расчет отдельных узлов принципиальной схемы. Моделирование их работы с использованием прикладных пакетов.

3.3.3. Описание принципиальных схем блоков системы.

3.3.4. Оценка электропотребления построенных блоков.

3.4. Экспериментальное исследование работоспособности отдельных модулей системы на макетных образцах. Составление инструкций по наладке.

4. Разработка алгоритмического и программного обеспечения системы.

4.1. Выбор способа программной реализации логического регулятора (логической функции или логического автомата), цифрового фильтра, алгоритма преобразования или разностного уравнения цифрового регулятора.

4.2. Описание и разработка протоколов взаимодействия по линиям связи несколько совместно работающих контроллеров системы или ЭВМ.

Если необходимо, возможен параграф об особенностях использования локальных вычислительных сетей, сети Internet в системе.

4.3. Детализация алгоритмов отдельных процедур из общего алгоритма работы системы.

4.4. Выбор инструментальной системы разработки программного обеспечения системы, языка и технологии программирования. Описание и отладка отдельных подпрограмм.

4.5. Контрольный пример по оценке работоспособности отдельных составленных подпрограмм.

5. Экспериментальное исследование построенной микропроцессорной системы. Оценка технических характеристик системы.

6. Конструкторско-технологическая реализация одного из блоков системы и расчет эксплуатационной надежности.

Приложение. Листинги разработанных и отлаженных программ системы управления.

Чертежи к проекту:

1. Структурная схема системы вместе с объектом мониторинга или управления.
2. Функциональная схема проектируемой системы (или отдельных проектируемых блоков).
3. Принципиальные схемы проектируемых блоков системы.
4. Общая схема работы системы (алгоритм функционирования).
5. Общая схема программ или схема взаимодействия программ.
6. Схемы программ для отдельных модулей программного обеспечения.
7. Граф состояний разработанного логического автомата (*для систем ПЛУ*). Статические и динамические характеристики цифровых фильтров или общие схемы первичных преобразований информации или форматы кадров сообщений между контроллерами (*для систем СОИ*). Схема математического моделирования системы управления для выбранного прикладного программного пакета или статические и динамические характеристики системы управления (*для систем ЦАУ*).
8. Схемы данных, разрабатываемых информационных баз данных.
9. Конструкторско-технологическая разработка (плата печатная для одного из блоков).

В случае *модернизации* уже существующих микропроцессорных систем названия некоторых глав и параграфов претерпят изменения. Так, первая глава в этом случае может называться:

1. Анализ вариантов модернизации системы и разработка технического задания.

И в названиях параграфов этой главы сочетания «проектирование системы», «разработка системы» заменяются сочетанием «модернизация системы». В последующих главах и параграфах должна указываться и рассматриваться только модернизируемая часть.

Приведенные типовые содержания специальной части дипломного проекта можно рассматривать как расширенные. При выполнении конкретной темы проекта отдельные параграфы могут быть изъяты, и наоборот могут быть добавлены другие параграфы, характерные для разрабатываемой темы.

Уточнение содержания специальной части осуществляется студентом совместно с руководителем проекта в соответствии с темой и материалом, собранным студентом за время преддипломной практики. При уточнении содержания проекта в заголовки параграфов необходимо включать конкретные названия разрабатываемых систем, блоков.

Отсутствие экспериментальной части в проекте может заменяться математическим моделированием работы системы (схемы) с использованием пакетов прикладных программ, эмуляцией и отладкой программ.

12.5. Основные этапы разработки и модернизации микропроцессорных систем

Содержание дипломного проекта является отражением основных этапов реального проектирования и модернизации любой микропроцессорной системы [1–4]. Одной из основных задач дипломной работы и является подробное знакомство студента с этапами реального проектирования микропроцессорной системы на производстве. Перечислим эти этапы:

- *системный анализ* объекта контроля и проектируемой микропроцессорной системы;
- *выбор типа используемого микропроцессора*, однокристалльного контроллера и определение структуры микропроцессорного контроллера;
- *разработка аппаратных средств* микропроцессорной системы;
- *разработка программного и информационного обеспечения* микропроцессорной системы;
- *совместная отладка программного обеспечения и аппаратных средств*; *оценка характеристик* построенной системы.

Следует отметить, что каждый из этапов проектирования может описываться в различных главах содержания специальной части. Рассмотрим подробнее содержание каждого из перечисленных этапов проектирования и модернизации системы.

Выполняемые работы на каждом этапе опишем в хронологическом порядке, т. е. в порядке их выполнения. Это поможет студенту правильно организовать свою работу во время дипломного проектирования.

12.6. Системный анализ объекта контроля проектируемой микропроцессорной системы

К основным работам, выполняемым на этом этапе проектирования, можно отнести следующие:

- описание работы объекта контроля или управления;

- анализ вариантов построения системы;
- разработка технического задания на проект;
- осуществление математического описания системы и математическое моделирование работы;
- составление общего алгоритма функционирования системы;
- разбиение функций системы на программно и аппаратно реализуемые;
- определение требований к микропроцессорным контроллерам, ЭВМ и другим устройствам системы;
- построение структурной схемы системы.

Дадим краткое пояснение каждому виду работ.

Вначале осуществляется подробный *анализ объекта* контроля и управления. Описывается назначение объекта. На основе построенной структурной схемы объекта составляется *словесный алгоритм работы объекта*. Приводятся основные технические характеристики объекта. Определяются основные цели и задачи, решаемые проектируемой микропроцессорной системой.

На основе патентного поиска, обзора периодической и иной литературы *анализируются возможные варианты* построения подобных систем управления. В настоящее время в качестве периодической литературы могут быть рекомендованы журналы [5–7], либо специализированные журналы той области техники, к которой относится объект управления.

Результатом анализа является определение положительных и отрицательных сторон каждого из перечисленных вариантов реализаций и разработка своего варианта построения системы. Определяется требуемое количество контроллеров и ЭВМ в системе, а также структура их соединения (радиальная, магистральная, смещенная) и характер взаимодействия (с централизованным или децентрализованным управлением, иерархическая или нет, связанная или несвязная) [1,8,10]. Определяются количество и диапазон изменения величин контролируемых сигналов с объекта, а также сигналов управления объектом.

Разрабатываются *техническое задание* на проектирование и обобщенная *структурная схема микропроцессорной системы*. Дается краткое экономическое и техническое обоснование предложенного варианта.

Техническое задание должно определять назначение, выполняемые функции, структуру разрабатываемой системы, основные технические параметры, а так же может определяться элементная база, условия эксплуатации, параметры надежности работы устройства и другие важные технические характеристики.

В рамках данного этапа осуществляют *математическое описание* системы. Данный этап может предполагать идентификацию объекта, т. е. построение математической модели объекта. Далее, исходя

из целей и задач управления, осуществляют выбор типа, расчет параметров и описание *регулятора* в форме *z*-передаточной функции [11,12], регулятора состояния [11,12], конечного логического автомата [13], логических функций [13], функций принадлежности нечеткого регулятора [14] или последовательности математических операций (например, в случае нелинейного, оптимального регулятора или фильтра) [11,12]. Работа конечных логических автоматов может поясняться на чертежах двоичным графом работы или сетью Петри [15].

При разработке *систем сбора и обработки информации*, к которым относятся системы автоматизации исследований; учета, контроля и диагностики; экспертные системы, осуществляется математическое описание используемых алгоритмов, следующих типов:

- адаптивной статической и динамической идентификации [11,12] (могут использоваться методы: планирование эксперимента, корреляционный метод идентификации, модели АРСС или Бокса–Дженкинса, методы теорий нейронных сетей, нечетких множеств, частотные методы идентификации и др.);
- оценки состояния (используются, например, наблюдатели состояния, фильтры Калмана и др.) [11,12];
- распознавания образов [14,16];
- цифровой фильтрации [17];
- быстрого преобразований Фурье [22];
- помехоустойчивого кодирования информации [22];
- обработки правил из базы знаний экспертных систем и др.

При математическом описании используемого в системе алгоритма осуществляется расчет требуемых для его реализации параметров, определение характеристик, форматов данных для хранения и преобразования информации. Определяется подробная последовательность математических действий, необходимая для его реализации в системе (*словесный математический алгоритм*). В частности, осуществляется выбор частоты дискретизации сигналов в системе.

После определения состава реализуемых математических алгоритмов разрабатывается общий (укрупненный) *алгоритм работы микропроцессорной системы*, он может состоять из отдельных алгоритмов работы каждого контроллера или ЭВМ в системе. Осуществляются построения: общей схемы работы системы, общей схемы программ или схем взаимодействия программ.

На этапе разработки математического алгоритма работы системы определяются требования к микропроцессорным контроллерам:

- по точности и скорости аналогово-цифрового и цифро-аналогового преобразования;
- по скорости расчета регулирующего воздействия (что связано с частотой дискретизации сигналов в системе) или по времени реакции на изменение входной величины (для логического регулятора);

- по объему хранимой *предыстории* при управлении объектом, объему иных хранимых параметров, что определяет требуемый объем памяти;
- по скорости передачи информации другим контроллерам или ЭВМ и др.

Формулируются требования к датчикам и исполнительным устройствам системы, нормирующим усилителям, согласующим устройствам. Эти требования включают диапазон изменения и иные временные, частотные параметры входных и выходных величин, максимальную допустимую погрешность преобразования, требования гальванической развязки и другие [18].

Если необходимо, осуществляется выбор того или иного принципа формирования управляющего воздействия – *модуляции* (амплитудно-импульсная – АИМ, широтно-импульсная – ШИМ, частотно-импульсная – ЧИМ или др.). Определяются основные параметры устройств формирования управляющих воздействий.

Все сформулированные требования включаются в *техническое задание* на проектирование.

После математического описания системы в целом возможны *математическое моделирование* работы регулятора и проверка работоспособности реализуемых алгоритмов с использованием прикладных программных пакетов моделирования систем (Matlab (Simulink), MathCad, Maple, Mathematica, Statistica или др.). В результате возможно уточнение требуемых параметров регулятора, АЦП и ЦАП, в частности, определение минимальной допустимой разрядности. Определяются статические и динамические характеристики системы.

На основе общей схемы алгоритма работы системы *осуществляется разбиение всех функций системы на аппаратно и программно реализуемые*. Большинство функций могут быть реализованы либо программным, либо аппаратным способом. В первом случае требуется минимальное количество дополнительных аппаратных средств, но скорость выполнения функции может быть низкой. Во втором случае наоборот, требуется использование специальных аппаратных средств, реализующих функцию, но при этом скорость выполнения функции выше, чем при программной реализации. Например, реализация арифметических операций в формате с плавающей точкой в системе может реализовываться либо в виде специальных подпрограмм, либо с использованием специального устройства – арифметического сопроцессора или специализированного устройства, реализованного на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [19–21]. Для реализации быстрых алгоритмов фильтрации, преобразования Фурье, вычисления сверток, разностных уравнений могут применяться специализированные сигнальные процессоры [8,22], что обеспечит при необходимости высокую скорость обработки измеренной информации.

Предварительное разбиение функций на аппаратно и программно реализуемые осуществляется в соответствии с требуемым временем их выполнения и на основе оценки затрат на их аппаратную реализацию.

Аппаратно реализуемые функции определяют структуру аппаратной части микропроцессорной системы и находят отражение на *структурной схеме микропроцессорной системы*. Программно реализуемые определяют структуру программного обеспечения микропроцессорной системы и находят отражение на общей схеме работы системы, схемах программ или схемах взаимодействия программ [23].

На *структурной схеме микропроцессорной системы* отображаются все используемые в системе МПК, ЭВМ (с общей детализацией их структуры), а также блоки, реализующие дополнительные функции на аппаратном уровне (устройства согласования с объектом – УСО, исполнительные устройства, датчики, устройства обеспечения связи, отсчета времени и другие). Обязательно на структурной схеме должны быть выделены блоки, которые подробно разрабатываются в проекте, а также блоки, с которыми они непосредственно взаимодействуют. Описание структурной схемы заключается в отражении названия и назначения каждого ее блока.

Информационная *структурная схема базы данных* или схемы данных могут отображаться на чертежах в случае реализации в системе этих информационных структур.

Содержание данного этапа находит отражение в первой и второй главах специальной части пояснительной записки. Задачей студента является определение наполнения каждой из глав, в соответствии с перечисленными работами.

12.7. Выбор типов используемых микропроцессоров, однокристалльных контроллеров и определение структуры микропроцессорных контроллеров

Основу любой микропроцессорной системы составляют микропроцессорные контроллеры (МПК). При этом программно реализуемые функции системы во многом определяют технические характеристики МПК, а точнее технические характеристики микропроцессорных устройств (однокристалльных микроконтроллеров (ОМК) [24–32] или микропроцессоров (ОМП) [33–36]), на основе которых и реализуется МПК. Основными характеристиками, по которым ведут выбор МК и ОМП для МПК, являются: архитектура и разрядность процессора;

быстродействие; объем адресуемой памяти (ОЗУ и ПЗУ); особенности системы команд.

Процессоры современных ОМК реализуют с использованием следующих архитектур:

- RISC (Reduce Instruction Set Commands) – с сокращенным набором команд;
- CISC (Complex Instruction Set Commands) – с традиционной расширенной системой команд;
- ARM (Advanced RISC-machine) – расширенная RISC-архитектура;
- с двухуровневым программированием и др.

RISC-архитектура нацелена на реализацию максимальной производительности процессора. Основными чертами RISC-архитектуры являются:

- 1) *минимальное число команд* процессора, при этом реализуются только наиболее часто используемые (остальные программируются из реализованных), количество команд равно приблизительно нескольким десяткам;
- 2) *число регистров общего назначения (РОН) процессора максимально* (приблизительно несколько тысяч); при этом в качестве РОН используются ячейки резидентной памяти данных;
- 3) *каждая команда выполняется за минимально возможное время*, что достигается применением в процессоре устройств управления (УУ) с жесткой логикой; использование же данных УУ ограничивает число команд из-за увеличения числа требуемых электронных блоков на кристалле;
- 4) *увеличена разрядность команд процессора* (12, 14, 16 бит и выше) по сравнению с разрядностью обрабатываемых данных, что позволяет реализовывать эффективную систему 1+2 словных команд, быстро выбираемых из памяти и быстро выполняемых в УУ процессора.

В связи с прогрессом в области микроэлектроники и повышением плотности компоновки элементов на кристалле БИС, в настоящее время несколько изменилось понятие RISC-архитектуры. Под ним теперь понимают только перечисленные п. 2, 3 и 4. Первый пункт исключен из-за появившейся возможности теперь реализовать большее число команд процессора (несколько сотен) на основе УУ с жесткой логикой.

ARM-архитектура или расширенная RISC-архитектура используется в современных 32-разрядных ОМК. Иначе эту архитектуру иногда называют ARM-архитектура с суперсокращением команд (THUMB). ARM помимо свойств RISC-архитектуры (пп. 2+4) отличается также тем, что в ОМК реализуются практически две системы команд: стандартная 32-разрядная (ARM-система) и дополнительная 16-разрядная (THUMB-система). THUMB-команды в два раза плотнее

размещаются в памяти, но в то же время могут работать с 32-разрядными операндами, как и 32-разрядные ARM-команды. 32-разрядные ARM-команды применяют в основном при работе с 32-разрядными непосредственными данными и адресами, когда они эффективнее. Таким образом, использование THUMB команд (рис. 12.4) позволяет в два раза экономнее расходовать память при сохранении или увеличении производительности.

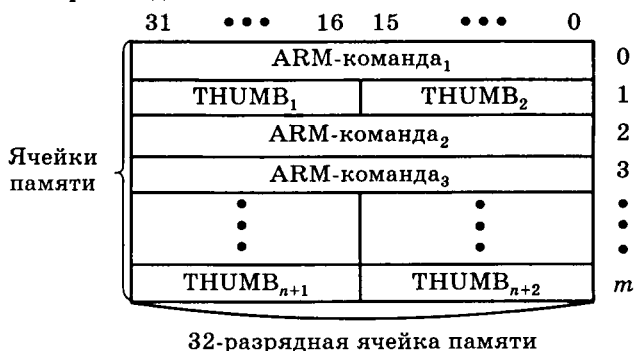


Рис. 12.4

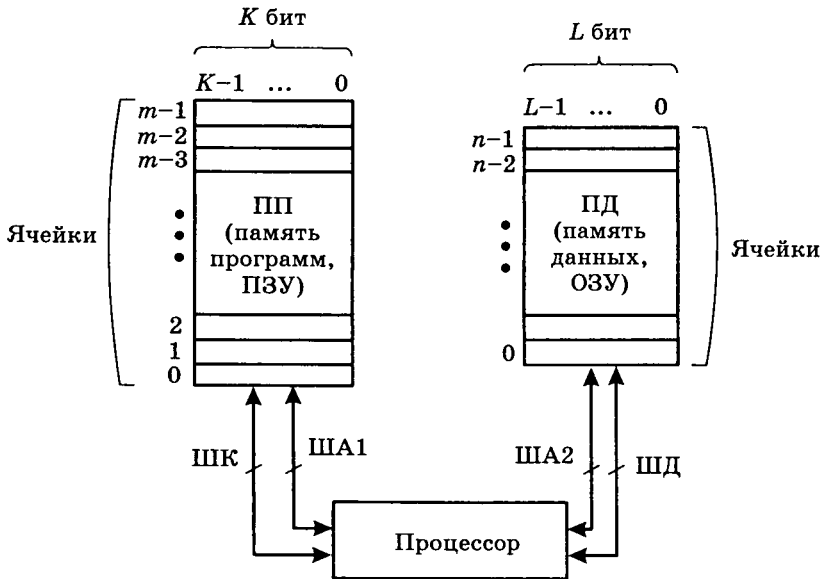
В настоящее время при реализации ОМК используют две основные архитектуры памяти: *гарвардская* и *фон-неймановская*. Каждая из них имеет свои преимущества и недостатки. Охарактеризуем каждую из них.

Отличительными особенностями *гарвардской архитектуры*, структура которой условно представлена на рис. 12.5, являются:

- 1) Память контроллера разделена на два независимых модуля: память программ (ПП) – ПЗУ и память данных (ПД) – ОЗУ. Каждый модуль имеет свою нумерацию ячеек, т. е. расположен в своем адресном пространстве.
- 2) Реализуются две отдельные параллельные линии для передачи данных (шина данных – ШД) и передачи команд (шина команд – ШК).

Преимущества гарвардской архитектуры:

- 1) Увеличение скорости обмена данными и командами, так как используются две параллельные шины ШК и ШД.
- 2) Увеличение разрядности ячеек ПП без изменения разрядности ячеек ПД, что позволяет для хранения команд использовать меньшее число ячеек (малословные команды), следовательно, ускорить их выборку из памяти и выполнение.



ША1, ША2 – шины адреса для ПП и ПД;
 $V_{пд} \ll V_{пп}$ – объем ПП и ПД

Рис. 12.5

- 3) Разбиение памяти на ПП и ПД позволяет использовать ПД меньшего объема, чем ПП ($V_{пд} \ll V_{пп}$). Это в свою очередь позволяет уменьшить число бит в командах, используемых для адресации данных, а следовательно, реализовать компактные по числу бит команды.

К особенностям *фон-неймановской* архитектуры памяти, структура которой условно представлена на рис. 12.6, можно отнести:

- 1) Единое адресное пространство для хранения команд, данных и размещение регистров устройств ввода/вывода (УВВ). Сквозная нумерация всех ячеек.
- 2) Единые ШД и ША как для передачи команд, так и для передачи данных.

Преимущества *фон-неймановской* архитектуры:

- 1) Упрощение системы команд и уменьшение числа требуемых команд, так как одни и те же команды используются как для обращения к памяти (ОЗУ, ПЗУ), так и к УВВ.

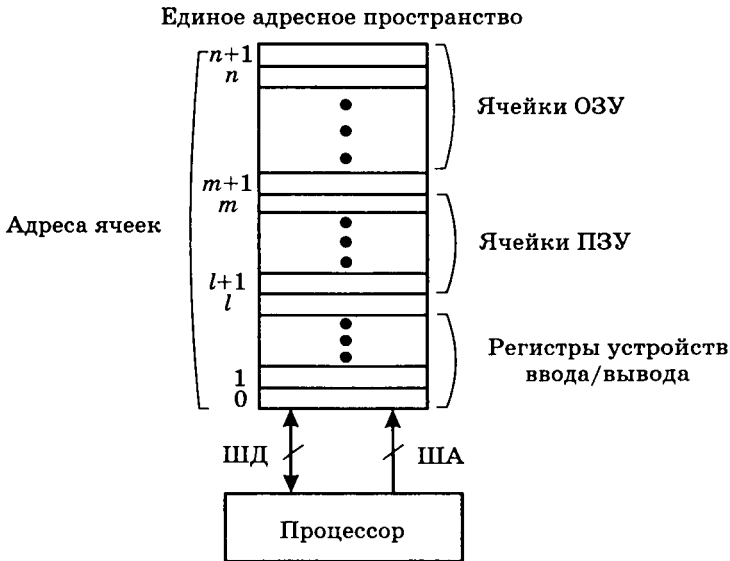


Рис. 12.6

2) Гибкость в управлении, так как данные, загруженные в память, могут рассматриваться в другой момент времени как команды и выполняться (это удобно в случае загружаемых программ).

В настоящее время используются обе архитектуры:

- гарвардская, в основном в периферийных и 8-разрядных универсальных ОМК;
- фон-неймановская, в 16- и 32-разрядных ОМК, а также во всех компьютерах, где используется принцип загружаемой программы (загружаемая операционная система или программа).

Для реализации преимуществ как гарвардской, так и фон-неймановской архитектур в ряде контроллеров (PIC-контроллеры фирмы MicroChip, например, PIC16f87х; AVR-контроллеры фирмы Atmel) [24, 25, 30, 32] с гарвардской архитектурой реализуется оперативно перепрограммируемая непосредственно во время работы контроллера Flash-память программ. Тем самым в гарвардской архитектуре реализуются загружаемые во время работы программы (принцип загружаемых программ). Однако недостатком остается то, что время записи информации во Flash-память программ существенно выше, чем в оперативную память при фон-неймановской архитектуре. Данную архитектуру иногда называют *гарвардской с Flash CMOS*. Кроме Flash-памяти программ в контроллерах с данной архитектурой за-

частую реализуют электрически оперативно перепрограммируемую память данных (*EEPROM*) объемом несколько сотен байт.

Немаловажную роль при выборе ОМК и ОМП играют номенклатура встроенных периферийных устройств (таймеров, последовательных интерфейсов, параллельных портов ввода/вывода, АЦП, модулей ШИМ, модулей обработки прерываний и других), возможность режимов пониженного электропотребления, характеристики питающего напряжения. В некоторых случаях промышленного применения контроллеров важны также параметры: диапазон рабочих температур, потребляемая мощность [1, 37, 38].

Рассмотрим общую классификацию применяемых в настоящее время ОМК:

- 8-разрядные периферийные ОМК, к которым можно отнести PIC-контроллеры (MicroChip, <http://www.microchip.ru>) [24,25,32], контроллеры семейства UPI-42 (Intel, <http://www.intel.ru>) [26], контроллеры AVR (Atmel, <http://www.atmel.ru>) [30] и другие подобные. Отличительными особенностями периферийных ОМК являются: гарвардская архитектура памяти (с Flash CMOS или без); RISC-архитектура процессора; небольшие объемы адресуемой памяти (ОЗУ, ПЗУ) – до 10–100 кбайт; 8-разрядный процессор и система команд, не нацеленная на решение сложных вычислительных задач; не предусмотрена возможность аппаратного формирования сигналов внешней системной магистрали; малые габаритные размеры и электропотребление (КМОП (CMOS)-технология). Они используются для построения простых систем логического управления (PIC16C5X, PIC16C6X, I8042), небольших локальных систем цифрового автоматического управления, не требующих высокой скорости и точности (PIC16C7X, PIC17CXX, PIC1400), иногда они используются для построения «интеллектуальных» датчиков систем сбора и обработки информации. Часто эти ОМК используют как вспомогательные процессоры управления вводом/выводом в контроллерах высокой и средней производительности;
- 8-разрядные универсальные ОМК, к которым можно отнести контроллеры семейств MCS-48, MCS-51/151/251 (Intel, Atmel и других производителей) [2,3,26,31], контроллеры семейств HC5-HC11 (Motorola <http://www.motorola.ru>) [20,29], Z8 (Zilog <http://www.zilog.com>) и другие подобные. Они используются для построения локальных МПК систем программно-логического, цифрового автоматического управления и систем сбора-обработки информации средней и малой производительности. Достаточная производительность, простота системы команд, внутренней архитектуры и большая номенклатура встроенных

в ОМК дополнительных устройств определяют широкое распространение их в настоящее время;

- *16-разрядные универсальные ОМК*, к которым можно отнести контроллеры семейств MCS-96/196/296 (Intel) [27], контроллеры семейства C16X (Infineon, <http://www.infineon.ru>) [28], контроллеры семейств HC12, HC16 [29] (Motorola). Это высокопроизводительные контроллеры, предназначенные для использования в различных системах реального времени: цифрового, логического управления, сбора и обработки информации, системах связи, обработки речи и изображений, где требуется высокая скорость реакции на внешние события. Система команд этих контроллеров оптимизирована по быстродействию (RISC-архитектура) либо ориентирована на быструю обработку сигналов и включает специальные команды реализации нечетких регуляторов, быстрого вычисления сверток сигналов. Широкая номенклатура встроенных устройств (процессор событий, коммуникационный процессор, модули быстрой обработки прерываний и др.) позволяет строить на его базе высокоэффективные распределенные микропроцессорные системы;
- *32-разрядные ОМК*, к которым можно отнести контроллеры семейства ARM на основе расширенной RISC-архитектуры – THUMB с экономией памяти ARM7DTMI (Atmel, Intel), контроллеры на основе процессорных ядер CPU32, ColdFire, PowerPC (Motorola) [29] и другие подобные. Используются в специальных системах, требующих достаточно высокой производительности, они реализуют команды сигнальной обработки. Быстродействие порядка 15–60 MIPS (тактовая частота до 350 МГц);
- *контроллеры (процессоры) цифровой обработки сигналов* (DSP – digital signal processor), к которым относятся сигнальные процессоры семейства TMS320C3X/4X (Texas Instruments, <http://www.ti.com>), SHARC (Analog Device), μ PD77XX (NEC), K1813BE1 (Россия) и другие [22]. Они характеризуются либо высокой скоростью выполнения операций с плавающей точкой, либо системой команд, ориентированной на выполнение операций быстрого преобразования Фурье, фильтрации сигналов. Используются как вспомогательные процессоры в эффективных системах управления реального времени. Имеют разрядность АЛУ 16–32 бита и производительность до 120 MFLOPS (миллионов операций с плавающей точкой в секунду). К данным контроллерам можно отнести и семейство MIPS-контроллеров (Mobile Internet Phone System), предназначенных для мобильных систем Интернет-телефонии.

ОМП в настоящее время используются в промышленных МПК, однако при самостоятельной разработке контроллеров в проекте их

использование не всегда оправданно. Это связано с необходимостью использования большого количества дополнительных внешних периферийных устройств. Но их использование возможно, если это выгодно с точки зрения унификации устройств, если имеется разработанное ПО, если тип ОМП диктуется потребителем и в других подобных случаях.

ОМП, применяемые в МПК 16-, 32- или 64-разрядные, в основном IBM-используемые (I80X86, Pentium II, III, IV, K1810BM86) [33–37], либо 16–64-разрядные архитектуры фирмы Motorola, или простейшие 8-разрядные (I8085, K1821BM85, Z80, MC68XX) [54] фирм-производителей Intel, Motorola, Zilog и др.

В табл. 12.1 представлены производители и основные типы используемых в настоящее время ОМК и ОМП. В табл. 12.2 приведены Web-адреса производителей ОМК и ОМП, наиболее широко распространенных на мировом рынке.

Таблица 12.1

8-разрядные	16-разрядные	32-разрядные	64-разрядные
Atmel AVR	Intel 80186	ARM processors	MIPS R4xxx
Intel 8051	Hitachi H8	Intel 80386	MIPS R5xxx
Intel MCS 151/251	Infineon 16x	Intel 80486	Sun UltraSPARC
Microchip PICmicro family	Intel MCS-96/196/296	Fujitsu SPARC-lite	
Mitsubishi 740	Mitsubishi MELPS7700	Hitachi SuperH Series	
Motorola 68HC05	Mitsubishi M16C	Hyperstone E1-32X	
Motorola 68HC11	Motorola 68HC12	IBM/Motorola PowerPC	
National Semiconductor COP8	Motorola 68HC16	Infineon Tricore	
NEC K Series	Philips 80C51XA	Intel i960	
Oki nX 65K	Toshiba TLCS-900	MIPS R3000	
Scenix SX	Zilog Z80180/80380	Mitsubishi M32Rx/D	
STMicroelectronics ST6		Motorola M CORE	
STMicroelectronics ST9		Motorola ColdFire	
Texas Instruments TMS370		Motorola 680x0	
Toshiba TLCS-90		Motorola 683xx	
Toshiba TLCS-870		NEC V800 – Socket 7 processors	
Xemics CoolRISC		STMicroelectronics ST100	
Zilog Z8/Z80		Sun microSPARC	
Samsung SAM8X		Tensilica Xtensa	

Правильность выбора ОМП или ОМК для МПК по быстродействию в простейшем случае может быть оценена путем написания пробного фрагмента программы.

Для этого выбирается наиболее критичная к времени выполнения программно реализуемая функция системы. Эта функция кодируется на языке ассемблера выбранного ОМК (ОМП) и затем подсчитывается время ее выполнения как суммарное время выполнения всех команд фрагмента. Если полученное время меньше либо равно максимально возможному, то выбор осуществлен верно. Иначе требуется либо применить другой ОМК (ОМП), либо данную функцию реализовать аппаратно. Однако нужно помнить, применение высокопроизводительных ОМК (ОМП) увеличивает стоимость системы.

Определение времени выполнения фрагмента программы удобно осуществлять, используя инструментальные средства разработки ПО МПК – программы-симуляторы (программно-логические модели).

Таблица 12.2

Фирма-производитель	Адрес
AMD	http://www.amd.com/
ARC	http://www.risccores.com/
Atmel	http://www.atmel.com/
Dallas Semiconductor	http://www.dalsemi.com/
Fujitsu	http://www.fujitsumicro.com/
Hyperstone Elelctronics	http://www.hyperstone.com/
IBM Microelectronics	http://www.chips.ibm.com/
Infineon Technologies	http://www.sci.siemens.com/
Integrated Device Technology	http://www.idt.com/
Integrated Silicon Solution Inc	http://www.issi.com/
Intel	http://www.intel.com/
LSI Logic	http://www.lsi.com/
Microchip	http://www.microchip.com/
National Semiconductor	http://www.national.com/
NetSilicon	http://www.netsilicon.com/
NKK	www.nkk.co.jp/LSI
Oki	http://www.okisemi.com/
Philips Semiconductor	http://www.semiconductors.philips.com/
PLX Technology Inc	http://www.plxtech.com/
QED	http://www.qedinc.com/
Rise Technology	http://www.rise.com/
Samsung Semiconductor	http://www.samsungsemi.com/
SandCraft	http://www.sandcraft.com/

Окончание табл. 12.2

Фирма-производитель	Адрес
Scenix Semiconductor Inc	http://www.scenix.com/
Sharp Electronics	http://www.sharpmeg.com/
Silicon Storage Technology Inc	http://www.ssti.com/
STMicroelectronics	http://www.st.com/
Sun Microsystems	http://www.sun.com/
Temic Semiconductor	http://www.temic-semi.com/
Tensilica	http://www.tensilica.com/
Texas Instruments	http://www.ti.com/
Triscend Corp	http://www.triscend.com/
VLSI	http://www.vlsi.com/
Western Design Center	http://www.wdesignc.com/
Xemics	http://www.xemics.ch/
Zilog	http://www.zilog.com/

Разрабатывается или выбирается *структура МПК* на основе выбранного ОМК (ОМП) исходя также из требуемого количества каналов аналогового и дискретного ввода/вывода, объема требуемой памяти, требуемой номенклатуры периферийных устройств (таймеров, последовательных интерфейсов и других). При этом важен выбор типа системной магистрали контроллера (ISA, PCI, VME, MultiBus II, И-41, I2C и т. п.) [40, 41], она определяет скорость обмена информацией между блоками контроллера.

МПК, как правило, имеет магистрално-модульную структуру, т. е. имеется общая системная магистраль (СМ), к которой подключаются основные модули контроллера. СМ может условно начинаться внутри ОМК, а продолжаться вне него. Помимо системных, могут быть и дополнительные – локальные магистрали или магистрали расширения. Общая упрощенная структурная схема МПК может иметь вид, представленный на рис. 12.7.

Поясним обозначения, принятые на рис. 12.7.

МПМ – микропроцессорный модуль, реализуемый на основе ОМП или ОМК; *СС* – схема сброса (начальной установки) и синхронизации работы МПМ, включает генератор тактовой частоты; *БЗУ* – блок запоминающих устройств, включающий ОЗУ и ПЗУ МПК, в том числе память типа *FLASH*, *EEPROM*, «твердые диски»; *БОП* – блок обработки запросов прерываний от различных устройств МПС, включает контроллеры по обработке прерываний, процессоры событий, серверы периферийных транзакций и т. п.; *УВФИ* – устройство формирования и измерения временных интервалов, включает: таймеры, модули захват-сравнение, используемые для подсчета внешних

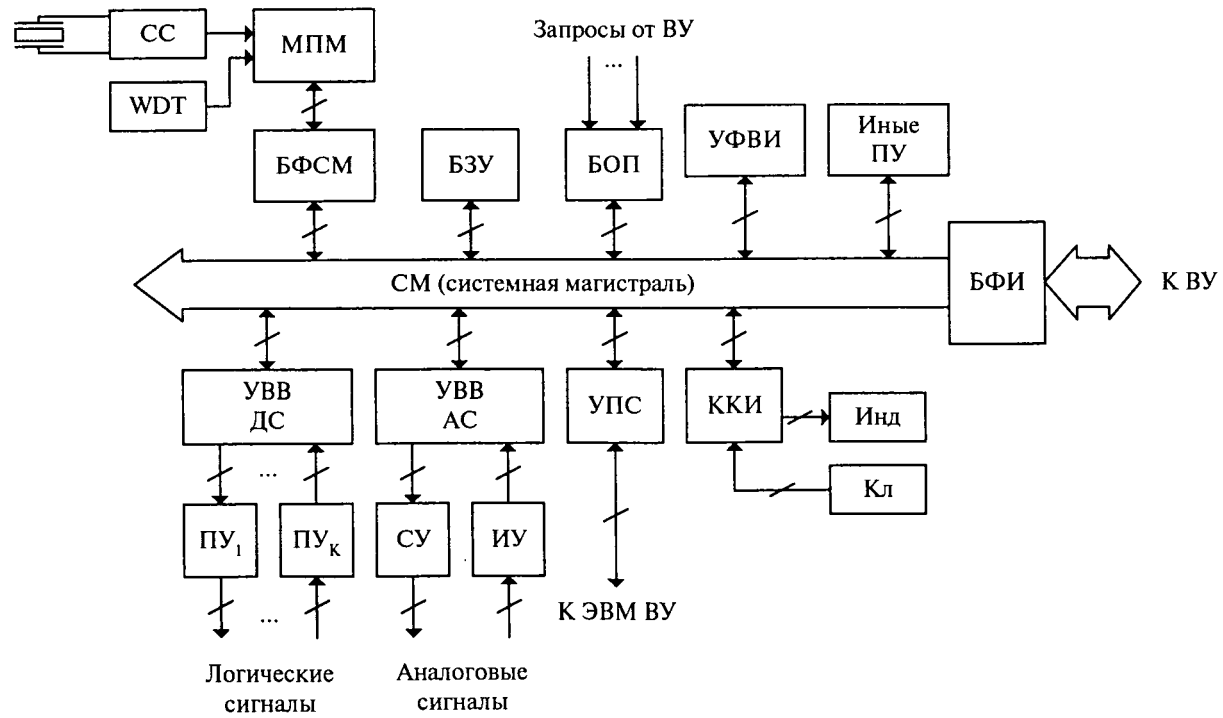


Рис. 12.7

импульсов, измерения временных интервалов, измерения времени; *WDT (watch dog timer)* – сторожевой таймер, исключающий ошибочные зацикливания программного обеспечения МПК; *УВВ ДС* – устройства ввода/вывода дискретных логических сигналов (порты ввода/вывода), при этом сигналы при вводе или выводе могут преобразовываться к тому или иному логическому уровню (ТТЛ, КМОП, ЭСЛ, *RS* и др.) с помощью преобразователей уровней (*ЛУ*); *УВВ АС* – устройства ввода/вывода аналоговых сигналов, при этом устройства ввода реализуются на основе АЦП, а вывода – ЦАП или ШИМ, вводимые сигналы усиливаются (ослабляются) до требуемого уровня с помощью нормирующих устройств (*НУ*), а выводимые – с помощью согласующих устройств (*СУ*); *УПС* – устройства последовательной связи с ЭВМ ВУ или другими МПК, представляют собой последовательные интерфейсы или промышленные вычислительные сети, с помощью которых по 2–4-проводной линии осуществляется взаимодействие между контроллерами и ЭВМ; *ККИ* – контроллеры клавиатуры и индикаторов (жидкокристаллические, светодиодные и т. п.), обеспечивающие работу клавиатуры и индикаторов в составе МПК; *БФСМ* – блок формирования внешней системной магистрали – сигналов шин адреса, данных и управления; *БФИ* – блок формирования интерфейса с внешними системными устройствами, обеспечивает усиление сигналов системной магистрали при выводе их на разъем.

МПК называется с *открытой архитектурой*, если есть возможность доступа к его СМ через разъем. Иначе архитектура – закрытая.

При разработке или выборе МПК для проектируемой системы следует придерживаться следующей последовательности действий:

- подобрать *промышленный микропроцессорный (ПМПК) контроллер*, удовлетворяющий техническим и экономическим требованиям, реализованный на основе выбранного ОМП (ОМК);
- реализовать микропроцессорный контроллер самостоятельно на основе *ОМК*, если подобрать ПМПК не удалось;
- реализовать микропроцессорный контроллер самостоятельно на основе *ОМП*, если это выгодно с экономической или технической точки зрения.

Выбор промышленных МПК осуществляют по каталогам и техническим описаниям фирм-производителей или распространителей, либо используя техническое описание в периодической литературе [5–7]. В настоящее время широко используются контроллеры следующих фирм-производителей: Фитон (Москва), Каскод (С.-Петербург), РЕР (Германия), Siemens (Германия), Motorola (США), Octagon Systems (США) и др.

Краткие сведения о выпускаемых контроллерах могут быть найдены на Web-страницах фирм: ProSoft (<http://www.prosoft.ru>),

RTSoft (<http://www.rtsoft.ru>), Siemens (<http://www.siemens.ru>), Фитон (<http://www.phyton.ru>), Motorola (<http://www.motorola.ru>) и др.

При выборе промышленного МПК немаловажную роль играет наличие развитого инструментального обеспечения по его программированию: кросс-компиляторов с языков высокого уровня, программ отладчиков, операционных систем реального времени, инструментальных сред разработки ПО с использованием CASE-средств и т. п.

Содержание данного этапа разработки системы находит отражение в 3 главе специальной части пояснительной записки (см. п. 12.4).

12.8. Разработка аппаратных средств микропроцессорной системы

Включает две стадии: разработки функциональных и разработки принципиальных схем блоков системы.

Начинается с построения *функциональной схемы микропроцессорной системы* или разрабатываемых блоков. При этом каждый из блоков разбивается на субблоки. Предварительно определяются элементная база, тип интегральных схем для реализации каждого субблока.

В случае разработки МПК должна быть приведена его функциональная схема или же функциональные схемы всех разрабатываемых блоков системы.

На схеме должны быть отражены все субблоки, которые выполняют те или иные функции, определяющие работу контроллера или системы в целом. Субблоки должны объединяться шинами и управляющими сигналами, которые обозначаются, например: А0–А15,

ШД, $\overline{ЧТЗУ}$ и др. Степень детализации схемы должна быть достаточной, чтобы описать подробно все режимы работы контроллера или блоков и чтобы была понятна работа элементов принципиальной схемы, входящих в каждый блок.

Отдельные субблоки могут быть детализированы вплоть до обозначения, подобного обозначению, используемому на принципиальных схемах.

По функциональной схеме в дипломном проекте описывается работа (на уровне сигналов) проектируемых блоков и МПК.

Разрабатываются *карта распределения памяти* контроллера и карта распределения устройств ввода/вывода в адресном пространстве с указанием адресов и назначения основных используемых ячеек и областей памяти в виде, подобном показанному на рис. 12.5, 12.6, или в виде таблицы. Оценивается требуемый объем ОЗУ и ПЗУ контроллера.

Разработка *принципиальных схем* начинается с определения элементной базы реализации каждого блока системы. Осуществляются выбор и обоснование технологии используемых интегральных схем.

При реализации блоков или субблоков для уменьшения количества используемых микросхем, где это возможно, лучше применять специализированные программируемые СБИС, предназначенные для реализации подобных функций. К ним можно отнести: программируемый периферийный адаптер I8255 Intel (K580BB55); универсальный синхронно асинхронный последовательный приемопередатчик I8251 Intel (K580BB51), I8250 Intel; контроллер клавиатуры и индикаторов I8279 Intel (K580BB79) и др. Более высокой степени миниатюризации устройств можно добиться, используя ПЛИС типа SOC (system on chip – «система на кристалле») [19–21], например, АРЕХ20К или иные фирмы Altera. В этом случае на одном кристалле SOC могут быть одновременно реализованы проектировщиком как специализированные БИС типа перечисленных выше, так и некоторые процессоры контроллеров. Специализированные БИС и процессорные ядра при этом хранятся в виде «виртуальных компонент» в блоках интеллектуальной собственности (библиотеках) программ автоматизированного проектирования типа MAX+PLUS II, Quartus и т. п. и доступны проектировщикам.

Модули ПЗУ контроллера реализуют на основе ИС Flash-памяти или с электрическим стиранием информации (EEPROM), это обеспечивает возможность изменения управляющих программ контроллера без замены ИС. Возможно применение в качестве ПЗУ ИС однократно программируемых (EPROM) или с ультрафиолетовым стиранием, но следует помнить, что в ряде производств применение последней запрещено или ограничено.

Модули энергонезависимой оперативной памяти реализуют на основе КМОП ИС ОЗУ статического типа с независимым источником питания (батареей, аккумулятором) или ИС Flash-памяти. Во втором случае необходимо оценить время безотказной работы по максимальному количеству циклов записи/стирания информации, а также следует учесть, что время записи информации во Flash-память на 1–3 порядка больше времени считывания.

Для уменьшения габаритных размеров модулей памяти возможно использование ИС памяти с последовательными интерфейсами типа I2C, SPI, MicroWire, однако при их использовании возрастает время доступа к памяти [40].

Типы ИС ПЗУ и ОЗУ используются как отечественного, так и зарубежного производства, например, фирм Atmel, MicroChip, Samsung (<http://www.samsung.com>), UMC, Texas Instruments и др. Каталоги и краткие описания ИС можно найти на фирменных компакт-дисках или на Web-серверах соответствующих фирм.

В качестве элементов индикации в контроллерах используют либо линейки семисегментных индикаторов, либо малогабаритные жидкокристаллические индикаторы и панели (например, фирмы Volumin <http://www.bolymin.com> или др.). Последние позволяют выводить практически любую символьную информацию на 2–4 строки по 20 символов в каждой, имеют встроенный контроллер индикаторов и просто подключаются к системной магистрали проектируемого микропроцессорного контроллера [1, 4, 42].

Далее осуществляют выбор элементов и расчет основных электронных узлов схемы контроллера и системы:

- нормирующих усилителей для АЦП и аналоговых коммутаторов;
- выходных каскадов исполнительных устройств: тиристорных или транзисторных схем;
- схем оптоэлектронной развязки;
- устройств согласования с линией связи;
- мостовых схем реализации ШИМ для управления асинхронным двигателем или двигателем постоянного тока;
- схем формирования управляющих импульсов для тиристоров и др.

Определяются количество компенсирующих емкостей для цифровых интегральных схем, значение нагрузочных резисторов для схем с открытым коллектором и шин.

Если в системе осуществляется взаимодействие между контроллерами, ЭВМ, то осуществляется выбор используемого последовательного интерфейса (RS-232C, USB, «current loop» и т. п.) [43–45], промышленной сети – field bus (CAN, Profibus и т. п.) [27, 28] или локальной вычислительной сети (Ethernet, Arcnet, FastEthernet и т. п.) [10]. Осуществляется выбор среды передачи: коаксиальный кабель, витая пара, оптическое волокно. При этом реализуется или используется встроенный адаптер сети или последовательного интерфейса. Определяется необходимость использования модемов.

Реализацию сложных комбинационных схем (например, селекторов адреса) или внешних логических автоматов удобно осуществлять с использованием матричных логических схем (ПЗУ, ПЛИМ, ПЛИС (PLD, CPLD, FPGA, SOC)) [19–21]. В случае их использования разрабатываются карты прошивок с использованием специального программного обеспечения.

Современные ПЛИС (программируемые логические интегральные схемы) позволяют реализовывать на их основе логические автоматы практически любой сложности. Например, возможна реализация на аппаратном уровне устройства быстрого преобразования Фурье, устройств, реализующих арифметические операции с плавающей точкой, реализующих быстрое вычисление управляющих воздействий по передаточным функциям регуляторов и др. Как правило, скорость вычислений при этом выше, чем при реализации этих функций в

микропроцессорных контроллерах на программном уровне. Существуют ПЛИС, позволяющие оперативно в процессе работы перегружать свою карту прошивки, тем самым изменять режим функционирования на аппаратном уровне. Подобные ПЛИС выпускаются фирмами Altera (<http://www.altera.ru>), Atmel (<http://www.atmel.ru>), Xilinx (<http://www.xilinx.ru>). Для их прошивки используются специальные инструментальные среды разработки (например, MAX+PLUS II (Altera)), которые позволяют:

- осуществлять программирование структуры ПЛИС в виде схем или на специальных языках описания аппаратуры (AHDL, VHDL) [19–21, 49–52];
- отлаживать составленные программы на языках описания аппаратуры и схемы;
- измерять в режиме эмуляции время функционирования ПЛИС;
- осуществлять непосредственно программирование ПЛИС и др.

Таким образом, если ПЛИС используется в проекте, приводятся карта прошивки на языке программирования и функциональные схемы внутреннего дизайна ПЛИС с описанием.

Для каждой разработанной принципиальной схемы составляются перечни элементов. Оценивается потребление разработанных схем и определяются требования к источнику питания.

Выбор основных электронных компонентов для разрабатываемой системы удобно вести с использованием справочных Internet-сайтов типа: <http://www.chipinfo.ru> или с использованием электронных справочников на CD.

Содержание данного этапа также находит отражение в 3 главе специальной части пояснительной записки дипломного проекта (см. п. 12.4).

12.9. Разработка программного обеспечения микропроцессорной системы

На основе *общего алгоритма работы (схемы программы) микропроцессорной системы* разрабатываются алгоритмы или схемы программ работы каждого контроллера и ЭВМ верхнего уровня, если она есть в системе, в соответствии с выполняемыми ими функциями.

Определяется использование стандартных функций той или иной операционной системы или *операционной системы реального времени (ОС РВ)*, функций программы монитор контроллера, функций библиотек стандартных подпрограмм.

Использование ОС РВ в контроллере или ЭВМ ВУ позволяет регламентировать наибольшее время реакции контроллера на те или иные внешние события, осуществлять параллельное слежение за не-

сколькими событиями одновременно в строго определенных временных рамках (планировщик реального времени). В настоящее время используются следующие исполнительные ОС РВ: RTX, OS9, LinxOS, QNX и др.

При разработке алгоритмов осуществляется разбивка на *подпрограммы, подпрограммы обработки прерываний*. Название и выполняемые функции каждой подпрограммы описываются в пояснительной записке в соответствующей главе (см. п. 12.4).

В проекте, как правило, осуществляется детальная проработка только одной из схем программы (алгоритма), непосредственно связанной с обслуживанием разработанного модуля, и которая в дальнейшем будет программно реализована. В этой схеме осуществляется подробная детализация каждой процедуры. При этом определяются алгоритмы всех программно реализуемых функций системы. Осуществляется выбор *методов программной реализации* основных функций:

- расчета разностных уравнений (передаточных функций) [8];
- расчета логических функций и выходных значений конечных логических автоматов [46,47];
- реализации арифметических функций с плавающей точкой (операции умножения, деления) [47];
- реализации основных математических функций (синус, косинус, радикал и тому подобные) [47];
- реализации быстрого преобразования Фурье [22];
- устранения дребезга контактных датчиков [1] и др.

При этом могут разрабатываться *схема программ и схема взаимодействия программ* системы, на которой отображаются все основные составные части ПО и их размещение на контроллерах и ЭВМ системы.

Разрабатывается *таблица распределения* основных переменных и констант в памяти контроллера с указанием имени, размещения в памяти и их назначения.

Если в системе реализуются взаимодействия между контроллерами, ЭВМ, то в проекте может разрабатываться *протокол взаимодействия, форматы передаваемых сообщений (кадры)*. При этом могут использоваться модификации стандартных протоколов: HDLC, SDLC, Profibus-DP, CAN, CSMA/CD, TSP/IP [5, 6, 10].

Определяется *язык программирования контроллера, инструментальной среды* разработки и отладки программного обеспечения. Следует иметь в виду, что при программировании на языках высокого уровня объем получаемого программного кода может получиться значительно больше, чем при программировании той же функции на языке низкого уровня [48]. И время выполнения полученного кода может оказаться в этом случае существенно больше.

Инструментальная кросс-среда выбирается с точки зрения поддержки требуемого языка программирования, требуемых отладочных

функций (симулятор, отладчик) для выбранного контроллера, простоты и удобства интерфейса с пользователем.

К данному обеспечению можно отнести среды ISAGraf (для систем фирм PEP, Motorola), UltraLogic (Octagon Systems), HI+ (Motorola), μ Vision (Siemens, Intel), Studio-96 (Intel), Genesis (Motorola, Intel), Step7-Micro/Win (Siemens-Simatic) и др.

Ряд сред разработки программного обеспечения (ISAGraf, UltraLogic, Genesis, Matlab) поддерживают *языки визуального графического программирования*: язык последовательных логических схем, язык функциональных блочных диаграмм, язык релейных диаграмм и др. В этом случае написание программы заменяется составлением той или иной графической схемы, которая затем автоматически компилируется в язык высокого уровня (Си) или коды требуемого микропроцессорного устройства.

Правильность разработанного *программного обеспечения проверяется с использованием программ-симуляторов*, при этом осуществляется контрольный расчет с использованием конкретных числовых данных. Полученный результат сравнивается с эталонным результатом. Эталонный результат можно получить на профессиональных моделирующих программах для систем. После сравнения делается вывод о работоспособности. Осуществляется *оценка времени* выполнения основных запрограммированных функций.

Программное обеспечение ЭВМ верхнего уровня системы разрабатывается с использованием языков высокого уровня (Си, Паскаль) или языков визуального программирования (Delphi, C++ Builder) в среде ОС типа Windows, OS/2. При этом реализуются функции распределенных СУБД, алгоритмы экспертных систем и другие требуемые функции управления и контроля. При разработке могут использоваться системы разработки и управления распределенными базами данных типа Paradox, Oracle.

Содержание данного этапа находит отражение в 4 главе специальной части пояснительной записки дипломного проекта (см. п. 12.4).

12.10. Совместная отладка программного обеспечения и аппаратных средств; оценка характеристик построенной системы

Это *экспериментальная часть* дипломного проекта. Она может отсутствовать в проекте или заменяться математическим моделированием системы, отладкой программного обеспечения в среде программ-симуляторов.

Если студентом самостоятельно проводилась отладка аппаратных средств системы, то это отражается в дипломном проекте. Приводится краткое описание приборов, с помощью которых проводилась отладка, разрабатываются схемы отладочных стендов, приводится список выявленных неисправностей, возможна разработка инструкции по наладке и устранению выявленных неисправностей.

Отладка программного обеспечения (ПО) может осуществляться на макетном образце системы или с использованием оценочных МП модулей, имитирующих их работу. ПО записывается в оценочный модуль или макет и осуществляется измерение характеристик системы и сравнение с требуемыми, при этом осуществляется имитация внешних сигналов с объекта. Результаты измерения приводятся в виде временных или иных диаграмм в пояснительной записке. Делаются выводы.

В экспериментальной части возможна разработка тестовых программных процедур для проверки работоспособности основных узлов МПК с описанием их схем программ и принципов использования.

Содержание данного этапа находит отражение в 5 главе специальной части пояснительной записки (см. п. 12.4).

Список литературы

1. Пузанков Д. В. Микропроцессорные системы. – СПб.: Политехника, 2002. – 935 с.
2. Бесекерский В. А., Изранцев В. В. Системы автоматического управления с микроЭВМ. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
3. Предко М. Руководство по микроконтроллерам. В 2-х т. – СПб.: Постмаркет, 2001. – 904 с.
4. Новиков Ю. В., Скоробогатов П. К. Основы микропроцессорной техники. – СПб.: ИНТУИТ.ру, 2003. – 320 с.
5. Мир компьютерной автоматизации. № 1–4. 1996–2006.
6. Современные технологии и автоматизация. № 1–4. 1996–2006.
7. Chip News (Новости микросхемотехники) № 1–12. 1997–2006. (<http://chipnews.gaw.ru>)
8. Хвоц С. Т., Варлинский Н. Н., Попов Е. А. Микропроцессоры и микроЭВМ в системах автоматического управления. – Л.: Машиностроение, 1988. – 640 с.
9. Бабаич Н. П., Жуков А. И. Компьютерная схемотехника. Методы построения и проектирования. – М.: МК-Пресс, 2004. – 576 с.
10. Барановская Т. П., Лойко В. И. и др. Архитектура компьютерных систем и сетей. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 256 с.
11. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. – М.: Машиностроение, 1986. – 447 с.

12. Микропроцессорные автоматические системы регулирования / Под ред. В. В. Солодовникова – М: Высшая школа, 1991. – 255 с.
13. *Савельев А. Я.* Арифметические и логические основы цифровых автоматов. – М.: Высшая школа, 1980. – 248 с.
14. Прикладные нечеткие системы /Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
15. *Советов Б. Я., Кутузов О. И., Головин Ю. А.* и др. Применение микропроцессорных средств в системах передачи информации. – М.: Высшая школа, 1987. – 256 с.
16. *Генкин В. Л., Ерош И. Л., Москалев Э. С.* Системы распознавания автоматизированных производств. – Л.: Машиностроение, 1988. – 245 с.
17. *Хемминг Р. В.* Цифровые фильтры. – М: Недра, 1987. – 220 с.
18. *Фрайден Дж.* Современные датчики: Справочник. – М.: Мир, 2005. – 592 с.
19. *Стешенко В. Б.* ПЛИС фирмы ALTERA: проектирование устройств обработки сигналов. – М.: Додека, 2000. – 128 с.
20. *Грушевицкий Р.* и др. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики. – СПб.: ВHV–Санкт-Петербург, 2002. – 608 с.
21. *Немудров В., Мартин Г.* Системы на кристалле. Проектирование и развитие. – М.: Мир, 2004. – 216 с.
22. *Куприянов М. С., Матюшкин Б. Д.* Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования. – СПб.: Политехника, 2000. – 592 с.
23. ГОСТ 19.701-90. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. – М.: Изд-во стандартов, 1991.
24. Однокристалльные микроконтроллеры MicroChip: PIC16C5X. / Под ред. А.Н. Владимирова – Рига: Ormix, 1996. – 120 с. (<http://www.microchip.com>)
25. Однокристалльные микроконтроллеры MicroChip: PIC16C6X/7X. / Под ред. А.Н. Владимирова – Рига: Ormix, 1997. – 150 с.
26. *Боборыкин А.В., Липовецкий Г.П.* и др. Однокристалльные микроЭВМ – М.: МИКАП, 1994. – 400 с.
27. *Казаченко В. Ф.* Микроконтроллеры: Руководство по применению 16-разрядных микроконтроллеров Intel MCS-196/296 во встроенных системах управления. – М.: Эком, 1997. – 685 с.
28. C167 Derivatives: 16-Bit CMOS Single-Chip Microcontrollers. User's Manual 03.96 Version 2.0 . Siemens, 1996. – 360 p. (<http://www.infineon.com>)
29. *Костин Г.Ю.* Микроконтроллеры фирмы Motorola. – М.: КТЦ-мК, 1997. – 40 с.
30. *Баранов Н.В.* Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы. – М.: Додэка, 2004. – 287 с.

31. *Бойко В., Гуржий А.* и др. Схемотехника электронных систем. Микропроцессоры и микроконтроллеры. – СПб.: ВHV–Санкт-Петербург, 2004. – 464 с.
32. Прокопенко Б. Однокристалльные микроконтроллеры PIC12C5х, PIC12C6х, PIC16х8х, PIC14000, M16C/61/62. – М.: Додека, 2000. – 336 с.
33. *Корнеев В., Киселев А.* Современные микропроцессоры. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 448 с.
34. *Брей Б.* Микропроцессоры Intel: 8086/8088, 80186/80188, 80286, 80386, 80486, Pentium, Pentium Pro Processor, Pentium 4. Архитектура, программирование и интерфейсы. – СПб.: ВHV–Санкт-Петербург, 2005. – 404 с.
35. *Старостин О. В.* Зарубежные микропроцессоры и их аналоги. Справочник-каталог. В 10 т. – М.: РадиоСофт, 2001.
36. *Григорьев В. Л.* Микропроцессор i486. Кн. 1–4. – М.: Бином, 1993. – 380, 340 с.
37. *Бройдо В. П., Ильина О. П.* Архитектура ЭВМ и систем. – СПб.: Питер, 2005. – 718 с.
38. *Гребенюк Е. И., Гребенюк Н. А.* Технические средства информатизации. – СПб.: Academia, 2003. – 272 с.
39. *Рафикузаман М.* Микропроцессоры и машинное проектирование микропроцессорных систем. Кн. 1,2. – М.: Мир, 1988. – 281, 312 с.
40. *Лапин А.* Интерфейсы. Выбор и реализация. – М.: Техносфера, 2005. – 168 с.
41. *Орлов С.А., Цилькер Б.Я.* Организация ЭВМ и систем. – СПб.: Питер, 2004. – 672 с.
42. *Ан П.* Сопряжение ПК с внешними устройствами. – СПб.: Питер, 2004. – 320 с.
43. *Кузьминов А.Ю.* Интерфейс RS232. Связь между компьютером и микроконтроллером. – М.: Радио и связь, 2004. – 168 с.
44. *Агуров П.* Интерфейс USB. Практика использования и программирования. – СПб.: ВHV–Санкт-Петербург, 2004. – 576 с.
45. *Гук М.Ю.* Шины PCI, USB и FireWire: Энциклопедия. – СПб.: Питер, 2005. – 544 с.
46. *Алексеев В.Н.* и др. Микропроцессорные средства производственных систем. – Л.: Машиностроение, 1988. – 287 с.
47. *Майоров В. Г., Гаврилов А. И.* Практический курс программирования микропроцессорных систем. – М.: Машиностроение, 1989. – 266 с.
48. *Каспер Э.* Программирование на языке Ассемблера для микроконтроллеров семейства i8051. – СПб.: Горячая Линия – Телеком, 2003. – 192 с.
49. *Угрюмов Е. П.* Цифровая схемотехника. – М.: ВHV, 2000. – 515 с.



50. *Лачин В. И., Савелов Н. С.* Электроника. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 704 с.
51. *Фрике К.* Вводный курс цифровой электроники. – М.: Техносфера, 2003. – 432 с.
52. *Поляков А.* Языки VHDL и VERILOG в проектировании цифровой аппаратуры. – М.: Солон-р, 2003. – 320 с.

13

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

13.1. Особенности разработки программного обеспечения в дипломном проекте

Дипломные проекты, соответствующие схмотехническим и системотехническим специальностям, обязательно содержат часть, связанную с разработкой программного обеспечения (ПО) ЭВМ или проектируемой микропроцессорной системы. Эта часть проекта рассматривается как квалификационная, демонстрирующая достигнутый студентом уровень знаний и навыков в области разработки программного обеспечения, владения языками программирования, а также работы с операционными системами, системным программным обеспечением и компьютерной техникой в целом.

Вопросы разработки ПО занимают достаточно большой объем в пояснительной записке дипломного проекта.

В дипломных проектах объем части, связанной с разработкой ПО совпадает, но не превышает объема части, связанной с разработкой аппаратных средств. В ряде проектов, выполняемых по некоторым *системотехническим* специальностям, часть, связанная с разработкой программного обеспечения, может превосходить объем части, связанной с разработкой аппаратных средств, и составлять основу специальной части дипломного проекта. Разработка и описание аппаратных средств в этом случае в проекте осуществляется упрощенно на уровне функциональных или простых принципиальных схем. Подобная ситуация может возникнуть в случаях, если:

- разрабатывается сложная микропроцессорная система в рамках комплексного дипломного проекта и одна из его частей, разрабатываемая одним студентом, относится к программному обеспечению;
- темой дипломного проекта является модернизация или разработка программного обеспечения системы, аппаратные средства которой уже построены;
- темой дипломного проекта является разработка программных средств для проектирования, расчета, моделирования работы

систем автоматического управления, контроля, связи или иных электронных систем.

Конструкторско-технологическая часть в подобных проектах может заменяться разработкой инструкции по использованию построенного программного обеспечения.

13.2. Классификация программного обеспечения, разрабатываемого в дипломном проекте

Разрабатываемое в дипломном проекте ПО условно можно отнести к одному из трех типов:

- *ПО функционирования системы;*
- *ПО автоматизированного проектирования;*
- *ПО моделирования системы.*

ПО функционирования системы представляет собой совокупность программ, непосредственно участвующих в функционировании, управлении устройством, системой и работающих в аппаратных средах МПК или управляющей ЭВМ верхнего уровня разрабатываемой системы. В частности, это может быть ПО, связанное с реализацией распределенных или локальных баз данных, работающее в разрабатываемой системе реального времени.

ПО автоматизированного проектирования – это совокупность программ, используемых для расчета и проектирования отдельных узлов или устройств разрабатываемой системы. Это могут быть программы расчета специальных датчиков, электромагнитных и других исполнительных устройств системы, программы компоновки элементов в заказной интегральной схеме или на печатной плате, расчета специализированных измерительных усилителей и других электронных узлов, оптимизационные программы, программы тепловых расчетов, конструирования отдельных модулей и др.

ПО моделирования системы – это программы, обеспечивающие моделирование работы, рассматриваемой в проекте системы или ее отдельных устройств. Данные программы используются для уточнения и проверки характеристик проектируемых систем на основе их математического моделирования. К данному типу ПО также можно отнести и программы визуального, в том числе трехмерного моделирования, объектов для тренажерных или обучающих систем.

Каждое из перечисленных типов ПО имеет свои особенности разработки, отладки и использования. При этом зачастую используются и различные инструментальные средства разработки каждого типа ПО.

В свою очередь ПО *функционирования системы* можно подразделить на:

- ПО *непосредственного (физического) уровня функционирования и управления* отдельными блоками, модулями, устройствами МПК или управляющих ЭВМ. К программам физического уровня функционирования можно отнести: драйверы устройств, процедуры обслуживания и задания режимов работы блоков, модулей и устройств системы. В программах физического уровня наибольшим образом учтена электронная схемотехника устройств;
- ПО *прикладного (логического) уровня функционирования и управления*, которые, базируясь на программах физического уровня, реализуют: высокоуровневую обработку, хранение и преобразование информации в соответствии с моделями и алгоритмами работы системы.

Программы физического уровня пишутся, как правило, на языке ассемблера микропроцессорной системы или на языке высокого уровня, но с ассемблерными вставками или с использованием команд ассемблерного уровня. Схема алгоритма этих программ во многом определяется электронной схемой контролируемого блока, особенностями управления его режимами работы. К основным требованиям, предъявляемым этим программам, обычно относятся:

- обеспечение достаточной скорости управления блоком;
- малый объем памяти, занимаемый программой.

Подобные программы могут разрабатываться как *резидентные драйверы* устройств той или иной операционной системы (ОС), в том числе реального времени. Они могут разрабатываться или содержать подпрограммы обработки прерываний от обслуживаемых устройств.

Примеры и особенности построения программ и процедур управления физического уровня периферийными устройствами ЭВМ типа IBM можно найти в книгах [1–3]. При написании таких программ на языках высокого уровня могут использоваться специальные библиотеки процедур, например, Turbo Professional для Pascal-программ в среде ОС MS Dos [4] и другие подобные для систем программирования Delphi, Си, Forth, ST. В этих программах могут использоваться прямые вызовы функций ОС MS DOS (процедуры прерывания DOS и BIOS) [1], либо прямое использование интерфейса прикладных программ ОС Windows (Windows API) [5], в том числе системные объекты, свойства, события.

ПО логического уровня управления, как и автоматизированного проектирования и моделирования систем, чаще всего разрабатывается с использованием универсальных языков программирования высокого уровня (Object Pascal (Delphi) <http://www.borland.com>, Си). Однако при разработке ПО этих типов могут использоваться и иные программные средства, например:

- программные пакеты математического моделирования технических систем (Matlab (<http://www.mathwork.com>), Mathcad, MicroSim, MicroCap, Electronics Workbench и др.);
- специальные среды разработки ПО верхнего уровня управления (SCADA-системы, Supervisory Control And Data Acquisition – управления верхнего уровня и сбора данных);
- пакеты разработки ПО специализированных систем (например, TRIO – среда разработки ПО для тренажеров, ДФЦТС, г. Новочеркасск; VHSB, Virtual Home Space Builder – система построения виртуальных трехмерных миров и др.);
- различные виды систем управления базами данных (СУБД);
- языки программирования для Internet-систем (HTML, Java) и т. п.

При моделировании электронных и электрических схем с использованием специализированных программных пакетов (типа MicroCap, MicroSim, PSpice и др.) как разработка программного обеспечения может рассматриваться создание программных моделей, описывающих функционирование различных аналоговых и цифровых интегральных схем на языках моделирования подобных, принятых, например, в пакете PSpice, или языках описания аппаратных средств AHDL (Atmel Hardware Description Language), VHDL (Verilog Hardware Description Language) [6, 7].

Основные этапы разработки программного обеспечения управления системой физического уровня достаточно подробно изложены в 12.9 настоящего издания. При разработке же ПО управления системой логического уровня, как и автоматизированного проектирования, либо моделирования систем, описанная очередность разработки в основном сохраняется, однако необходимо учитывать некоторые особенности, в частности, зависимость этапов разработки от используемой методологии программирования, от характера используемых инструментальных средств и др. Остановимся на этом в следующих параграфах.

13.3. Основные методологии разработки программного обеспечения в дипломном проекте

В настоящее время существуют две основные методологии разработки ПО [4, 5]:

- процедурно-ориентированное программирование;
- объектно-ориентированное программирование.

Первая из них базируется на рациональном процедурном разбиении программ при их разработке. Наиболее ярко идеи этого подхода

проявляются в методе *модульного программирования*. Основные идеи этого метода таковы [4]:

- алгоритм, реализуемый в разрабатываемой программе, разбивается на отдельные модули (процедуры), причем каждый модуль реализует единственную и независимую функцию;
- каждый модуль имеет единственную точку входа и точку выхода;
- размер модуля стремятся минимизировать;
- основной алгоритм программы может быть представлен как упрощенный алгоритм вызова модулей в соответствии с реализуемыми функциями.

Чаще всего при использовании этой методологии реализуют подход так называемого *восходящего программирования* (от простого к сложному). В этом случае разработка программы идет от разработки отдельных модулей к разработке программы в целом путем функционального объединения модулей, вызывая их в соответствии с реализуемыми функциями в системе. Преимущества этого подхода в облегчении написания и отладки программ, так как отдельные модули могут разрабатываться и отлаживаться отдельно и параллельно.

Объектно-ориентированное программирование [5, 8, 9] предполагает, что разработка программы начинается с анализа и структурирования обрабатываемых в ней данных. Основной идеей этого подхода является связывание (инкапсуляция) данных и процедур их обработки в единое целое – *объект*. В результате такого связывания процедуры во многом теряют самостоятельное значение и могут рассматриваться только в контексте обрабатываемых ими данных. В этом случае при программировании делается акцент на смысловую связь данных и алгоритмов их обработки.

Каждый программируемый объект характеризуется *свойствами и методами*. Свойства определяют те или иные параметры созданного объекта или данные, а методы представляют собой процедуры обработки параметров объекта.

Механизм *наследования* свойств и методов объектами-потомками от объектов-родителей позволяет легко наращивать количество свойств и методов у объекта без переделки объекта-родителя. Это позволяет вести программирование отдельного объекта по принципу «от простого к сложному». Таким образом, программист может строить свои объекты на основе уже существующих стандартных объектов, добавляя нужные свойства и методы.

Инкапсуляция придает объектам свойства максимальной независимости от остальных частей программы, поэтому объектно-ориентированный подход удобно применять при разработке *библиотек* программирования.

Разработку прикладных программ на основе объектно-ориентированного подхода удобно осуществлять по принципу *нисходящего*



программирования. Это означает: идти от построения и связывания самих объектов (определения их свойств, методов, событий) к написанию процедур, реализующих сами эти методы и реализующих вычисление (представление) тех или иных свойств объекта, а также осуществляющих обработку событий объекта.

Объектно-ориентированный подход при построении программы чаще всего используют совместно с *архитектурой, управляемой событиями* [5, 11]. Отличие программы, построенной в соответствии с архитектурой, *управляемой событиями*, от программы, построенной в соответствии с традиционной архитектурой, *управляемой данными*, состоит в следующем.

При *традиционной архитектуре* программа состоит из процедур, каждая процедура обрабатывает данные и передает полученные данные следующей процедуре и т. д. Если в процедуре происходит ввод данных, например, с клавиатуры, то процедура переходит на ожидание этого ввода и, как правило, других действий не осуществляет.

Программа, управляемая событиями, не имеет привычных переходов от процедуры к процедуре. При этом вводится понятие *события*, под которым понимают некоторую ситуацию, вызванную либо действием манипулятора мышь, либо вводом информации с клавиатуры, либо какой-то внутренней ситуацией, сложившейся при работе в программе. Возникновение события в программе вызывает передачу управления процедуре, связанной с этим событием (процедуре-обработчику события). Таким образом, вызов той или иной процедуры осуществляется только при возникновении события, связанного с ней, и очередность вызовов определяется очередностью возникновения событий. События же и процедуры их обработки определяются программистом во время создания программы.

Следует отметить, что достаточно часто используют *смешанную архитектуру* программы. Некоторые фрагменты удобнее реализовывать с использованием архитектуры, управляемой событиями, иные с использованием традиционной архитектуры.

При объектно-ориентированном подходе с каждым объектом связывают целый перечень событий (*events*), при возникновении которых в объекте вызывается своя процедура-обработчик – метод (*method*). Задача программиста при этом часто состоит в определении событий и написании своих процедур-обработчиков событий.

Объектно-ориентированный подход и управление событиями удобно использовать: при реализации элементов интерфейса пользователя (различных видов меню, кнопок, окон ввода и вывода данных, мнемосхем, графиков и т. п.) [10, 11], при реализации СУБД (например, при разработке концептуальных баз данных) [10], а также при реализации достаточно сложных расчетных задач [12].

Однако следует отметить, что преимущества объектно-ориентированного программирования ярко проявляются при разработке лишь

достаточно сложных расчетных программ. При программировании несложных алгоритмических действий, связанных, например, с расчетами по готовым формулам, когда сами обрабатываемые данные просты, использование объектно-ориентированного подхода приводит к излишним нагромождениям ненужных языковых конструкций [8,9].

Широкое внедрение объектно-ориентированного подхода при создании прикладных систем происходит за счет распространения *визуальных средств быстрой разработки программ* (RAD-средств, Rapid Application Development) [10]. RAD-средства позволяют процесс написания модулей программ, выполняющих: ввод/вывод информации на экран (форму), взаимодействие с базами данных, построение и управление диаграммами, мнемосхемами и другим, осуществлять как процесс размещения и рисования этих объектов на форме. Эти средства широко используются в так называемых языках визуального программирования: Visual Basic, Delphi, Visual C, Borland C++ Builder, C# и др. (<http://www.borland.com>).

Средства визуального программирования полностью базируются на объектно-ориентированном подходе и архитектуре управления событиями.

Использование RAD-средств позволяет вести разработку программы, используя механизм «Two Way Tools», т. е. одновременно:

- осуществлять разработку программы на визуальном уровне в автоматическом режиме;
- использовать традиционный способ составления исходных текстов программ на языке программирования.

При написании исходных текстов процедур, как в случае модульного, так и в случае объектно-ориентированного программирования, необходимо использовать метод *структурного программирования* [5, 8]. Этот метод основан на предположении, что программный код легче создается, читается и отлаживается, если он сконструирован без использования операторов безусловного перехода (типа GOTO). Структурное программирование предполагает использование операторных скобок (типа Begin ... end).

Выбор той или иной методологии программирования в дипломном проекте осуществляется исходя из реализуемого алгоритма, а также в соответствии с вышеизложенными рекомендациями. От этого выбора зависят и особенности описания программ в проекте. В случае процедурно-ориентированной методологии описываются реализованные процедуры и их входные и выходные параметры, в случае объектно-ориентированной – реализованные объекты, их свойства, методы и события.

Большинство языков программирования высокого уровня в настоящее время поддерживают все изложенные методологии. Так, модульное и объектно-ориентированное программирование, а также архитектура программ, управляемая событиями в среде операцион-



ной системы (ОС) MS-DOS или в ее эмуляторах, поддерживаются языками программирования Borland Pascal 7.0, Turbo C++ и др. При разработке программ в среде ОС MS-DOS для реализации различных элементов интерфейса пользователя (меню, кнопок, панелей для ввода/вывода данных, графиков, диаграмм и др.), могут использоваться объектно-ориентированные библиотеки типа Turbo Vision [11], библиотеки процедур Turbo Professional, Tool Box Graphics [5] или другие подобные.

В средах операционных систем Windows '95, '98, NT, '2000, 'Millennium, 'XP объектно-ориентированное программирование и архитектура управления событиями поддерживаются на уровне операционной системы (Windows API – application programming interfaces или «интерфейса программируемых приложений») и легко реализуются и используются в разрабатываемых программах средствами языков программирования: Delphi (Object Pascal), Borland Pascal for Windows, Visual Basic, C++ Builder, Matlab, Visual C, а также языками программирования СУБД: Paradox 5.0, Visual FoxPro 5.0, Oracle, Informix, Sybase и др.

На основе вышеизложенного студент в пояснительной записке дипломного проекта в части, связанной с разработкой ПО, должен привести:

- обоснование и описание выбранной методологии разработки ПО;
- обоснование и описание выбранной архитектуры построения программ (традиционная или управляемая событиями);
- обоснование и описание своих разработанных программных средств в соответствии с рекомендациями, изложенными выше.

13.4. Выбор операционной системы и языка программирования для разрабатываемого программного обеспечения

При разработке ПО функционирования логического уровня, автоматизированного проектирования и моделирования важной проблемой является выбор операционной системы для разработки и реализации разрабатываемых программ.

В настоящее время наиболее часто используются следующие ОС: MS DOS 6.0 и выше, Novel DOS 7.0, Ms Dos с оболочкой Windows 3.11 [13], Windows 95/98, Windows NT Server и Workstation, Millennium, XP, '2000, OS/2, UnixWare, Linux и др. Выбор той или иной ОС определяется многими критериями, основными из которых являются:

- особенности аппаратных средств используемой инструментальной или управляющей ЭВМ. В частности, микропроцессорная

- платформа: Intel, DEC Alpha, SPARC, HP, Motorola и др.; быстродействие; объем ОЗУ, ПЗУ и тому подобные характеристики;
- требуемая поддержка сетевых конфигураций (в том числе с выделенным сервером или серверами, одноранговая сеть);
 - требуемые особенности системы защиты от несанкционированного доступа к информации и система администрирования;
 - поддержка режима многозадачности;
 - надежность функционирования (например, наличие и особенность системы обработки ошибочных ситуаций) и поддержка режима реального времени (важный показатель при этом – скорость реакции на внешние события);
 - особенности работы с памятью (линейное адресное пространство, сегментация памяти) и внешними устройствами и т. п.

Следует заметить, очень часто выбор ОС во многом определяется уже заранее predetermined языком программирования, инструментальной средой разработки программного обеспечения или используемой СУБД. Иногда выбор ОС диктуется заказчиком разрабатываемой системы на основе широкой распространенности этого типа ОС на данном производстве.

Выбор языка программирования и среды разработки ПО во многом определяется критериями, изложенными в предыдущем пункте (13.3). И как было уже упомянуто выше при разработке ПО возможно использование:

- универсальных языков и сред программирования (типа Borland Pascal, C, Delphi и др.);
- сред разработки информационных систем или систем управления базами данных (СУБД);
- специальных сред разработки ПО верхнего уровня для многоуровневых систем управления или SCADA-систем (Supervisory Control And Data Acquisition – управления верхнего уровня и сбора данных) [14] и др.

Выбор универсальных языков программирования высокого уровня и их сред программирования осуществляют по следующим параметрам:

- возможность программирования в среде выбранной ОС (MS DOS, Windows, OS/2 и др.);
- поддержка объектно-ориентированной методологии программирования, архитектуры программ, управляемой событиями (если необходимо);
- возможность визуального программирования (если необходимо);
- наличие стандартных библиотек объектов и процедур требуемых свойств;
- поддержка работы с базами данных, поддержка элементов ActiveX (OLE, Object Linking and Embedding – технология связывания и погружения объектов), технологии DDE (Dynamic

- Data Exchange – динамический обмен данными), поддержка работы с библиотеками типа DLL и др. (если необходимо);
- поддержка взаимодействия с сетью Internet (протоколы FTP, Web-сервер, электронная почта и др.) и с корпоративными сетями (типа Intranet и т. п.);
- эффективность компилятора (оценивается по объему генерируемого программного кода и скорости работы полученного программного модуля) и др.

Наиболее часто в настоящее время для разработки ПО используют среды программирования: Borland Pascal V 7.0, Delphi 2.0–9.0, Borland C++ Builder 5.0, Borland C/C++ V6.0, Turbo C, C#, Visual Basic V5.0 и др.

Если основными функциями разрабатываемого ПО являются создание, накопление и обслуживание баз данных, то при разработке могут использоваться среды разработки информационных систем – системы управления базами данных (СУБД). Подробнее на особенностях их использования остановимся в следующих параграфах.

Другим инструментальным средством разработки ПО управления логического уровня являются SCADA-системы [14]. Они позволяют значительно упростить процесс написания ПО верхнего уровня для иерархических систем управления. На основе объектно-ориентированного и визуального подходов с помощью них процесс реального программирования заменяется процессом графической сборки программы из отдельных стандартных блоков в виде схемы. При этом используется терминология, привычная для инженеров-технологов, а необходимость специфических знаний вычислительной техники сведена к минимуму. Эти системы поддерживают взаимодействие с большинством серийных МПК, позволяют реализовывать различные алгоритмы первичной обработки сигналов с объекта, алгоритмы управления, алгоритмы создания и обслуживания распределенных систем и баз данных, алгоритмы резервирования основных МПК в системе.

SCADA-системы позволяют наглядно представлять информацию о работе системы в виде графиков, мнемосхем, диаграмм, таблиц, а также легко реализовывать визуальные объекты управления системой (кнопки, переключатели, ползунковые регуляторы и т. п.) на экране монитора. Наиболее распространенными в нашей стране являются SCADA-системы: Trace Mode (Россия), Image (Россия), Genesis, InTouch, Factory Link и др.

Выбор того или иного средства разработки во многом определяется его ценой, возможностью применения для конкретной задачи и условиями технического задания.

13.5. Особенности разработки программного обеспечения для проектирования и моделирования автоматических и электронных систем

Перед разработкой ПО этого типа студенту следует убедиться, что отсутствуют уже разработанные универсальные программы или среды автоматизированного проектирования и моделирования, решающие поставленную техническую задачу. Например, работа большинства электронных схем может успешно моделироваться, оптимизироваться с использованием универсальных пакетов типа MicroSim, MicroCap, Electronic WorkBench и др. Предпосылкой для разработки своего ПО данного типа могут явиться: отсутствие универсального пакета, высокая цена его приобретения, не соизмеримая с решаемой задачей, или иные ограничения.

Разработка *ПО автоматизированного проектирования и моделирования систем* может осуществляться с использованием универсальных языков программирования высокого уровня. Но в этом случае лучше использовать библиотеки стандартных подпрограмм и объектов, реализующие интерфейсные функции, основные численные методы (Tool Box, Tool Box Graphics, Turbo Professional, Turbo Vision) [4, 11] или другие требуемые функции.

Оптимальным вариантом разработки данного ПО во многих случаях может стать использование специализированных программных сред, предназначенных для математического моделирования технических объектов, математического анализа данных и автоматизированного проектирования (типа Matlab, MathCad, Mathematica, Statistica, Maple и др.) [12]. Последние версии перечисленных программных продуктов имеют достаточно мощные языки программирования, поддерживающие объектно-ориентированное и визуальное программирование. Основные отличия их от универсальных языков программирования – это реализация различных матричных, векторных операций, наличие библиотек подпрограмм и объектов, реализующих основные численные и аналитические методы решения большинства математических и технических задач. Некоторые из пакетов, например Matlab, имеют среды для визуального математического моделирования и исследования систем и объектов – Simulink, позволяющие значительно упростить процесс моделирования, анализа и свести его к построению из стандартных библиотечных блоков и схемному исследованию моделируемой динамической системы. Разработано огромное количество таких библиотек и модулей для

Simulink, реализующие различные теоретические принципы математического моделирования и исследования систем.

Отличительной особенностью построения ПО для моделирования и проектирования систем является широкое использование в программах численных методов решения различных вычислительных задач [9, 10], таких как:

- решение систем обыкновенных дифференциальных уравнений;
- решение систем линейных и нелинейных алгебраических уравнений;
- решение задач интерполяции, аппроксимации, экстраполяции;
- решение задач интегрирования, дифференцирования;
- проведение оптимизационных расчетов и др.

Эта особенность требует от студента умения осуществлять выбор численного метода, наиболее подходящего для решения поставленной задачи [15]. Основными критериями выбора численного метода могут быть: простота программной реализации; обеспечение требуемой точности расчета; обеспечение требуемой скорости расчета; возможность реализации при заданных ограничениях на объем памяти ЭВМ и др.

В этой связи должна быть проведена *оценка погрешности расчета* и моделирования на ЭВМ, которая складывается из трех составляющих [15]: погрешности округления, погрешности численного метода, неустранимой погрешности. Погрешность округления возникает из-за усечения (округления) чисел в формате с плавающей точкой при представлении их в ЭВМ. Погрешность округления конкретной ЭВМ во многом определяется ее «машинным эpsilon». «Машинным эpsilon» называют максимальную относительную ошибку округления конкретной ЭВМ:

$$\varepsilon = k \cdot 2^{1-t},$$

где k – величина, определяемая способом округления (1 – отбрасывание, 0,5 – симметричное округление); t – число двоичных разрядов представления мантиссы вещественного числа в ЭВМ или МПК.

Неустранимая погрешность определяется неточностью изначального математического описания задачи.

Важна в этом случае и оценка *обусловленности вычислительной задачи*, т. е. чувствительности ее решения к малым погрешностям исходных данных и погрешностям округления. Задачу называют хорошо обусловленной, если малым погрешностям исходных данных соответствуют малые погрешности решения, и плохо обусловленной, если возможны сильные изменения решения при малых изменениях исходных данных. Количественной мерой обусловленности и корректности задачи может являться *число обусловленности* [15].

Кроме того, при построении любых вычислительных программ в проекте необходимо учитывать основные приемы программирования, позволяющие избежать катастрофического роста погрешности вычис-

лений и неверной работы программ [15]. К этим приемам необходимо отнести следующие способы работы с числами в формате с плавающей точкой (ПТ):

- суммирование длинных последовательностей чисел (рядов) лучше проводить от меньших чисел к большим;
- не осуществлять сравнение чисел в формате с ПТ непосредственно с нулем; лучше сравнивать модуль числа с малым числом, которое учтет ошибку округления ЭВМ;
- не осуществлять вычитание близких по значению чисел, так как это приводит к катастрофическому росту погрешности; лучше изменить порядок расчета, чтобы избежать подобной ситуации;
- проверку на равенство двух чисел лучше осуществлять как проверку разности этих чисел на то, что она меньше, чем заданная малая величина; малая величина позволит учесть ошибки округления при вычислении каждого из чисел и др.

Таким образом, можно подытожить, что если в разрабатываемых программах используются численные методы, то в дипломном проекте должны быть приведены критерии выбора того или иного численного метода для решения задачи. Кроме того, в программе должна оцениваться погрешность получаемого решения. Должна быть подробно описана используемая математическая модель системы.

13.6. Реализация информационных баз данных в разрабатываемом программном обеспечении

Если в дипломном проекте разрабатывается достаточно сложная распределенная информационно-вычислительная система, которая осуществляет обработку, хранение и доступ к большим объемам информации, то ПО этой системы должно обеспечивать хранение этой информации в виде электронных *баз данных* и выполнять основные функции системы управления базой данных (СУБД).

В задачах обработки информации, основанных на системах баз данных и компьютерной сети, существуют два варианта расположения данных: *локальный* и *удаленный (распределенный)*. Локальные данные, как правило, располагаются на жестком диске или ином носителе компьютера, на котором работает пользователь, и находятся в монопольном ведении этого пользователя. Удаленные данные располагаются вне компьютера пользователя (пользователей) – на сервере (файл-сервере) компьютерной сети или на специально выделенных в сети для этих целей компьютерах.



Существуют две технологии работы с удаленными базами данных типа [10]:

- «*файл-серверная*»;
- «*клиент-серверная*».

В стандартной *технологии «файл-сервер»* данные располагаются на файл-серверах и являются, по сути, пассивными источниками информации. Вся ответственность за их получение, обработку, а также за поддержание целостности базы данных лежит на программе-приложении СУБД, запущенной с рабочей станции сети. Поскольку обработка данных осуществляется на рабочей станции, то по сети пересылается вся необходимая для этой обработки информация, хотя интересующий пользователя объем данных может быть значительно меньше пересылаемого.

Исторически на персональных компьютерах использовался именно этот подход как более простой в реализации. Однако большой объем пересылаемых по сети данных быстро исчерпывает возможности сети по передаче данных уже при небольшом числе пользователей, существенно ограничивая возможность роста. Дополнительные трудности возникают из-за необходимости синхронизации работы приложений СУБД, запущенных на разных рабочих станциях и работающих с одними и теми же данными на файл-сервере.

В *технологии «клиент-сервер»* для обработки данных выделяется специальное ядро – так называемый *сервер баз данных*, который принимает на себя функции обработки запросов всех пользователей, именуемых теперь *клиентами*. Сервер базы данных представляет собой программу, выполняющуюся, как правило, на мощном компьютере в сети. Приложения-клиенты посылают с рабочих станций запросы на выборку (поиск, вставку, обновление, удаление) данных. При этом сервер выполняет всю «грязную» работу по отбору данных, отправляя клиенту только требуемую «выжимку». Такой подход обеспечивает решение трех важных задач:

- уменьшение нагрузки на сеть;
- уменьшение требований к компьютерам-клиентам;
- повышение надежности работы и сохранение логической целостности базы данных.

Выбор той или иной технологии работы зависит от размеров базы данных, характера и интенсивности обращений к базе, количества клиентов, производительности аппаратных средств и сети. Технология «клиент-сервер» может использоваться и при работе на одном компьютере в многозадачных ОС типа Windows и др. В этом случае программа-клиент обращается к программе-серверу с запросом, который та обрабатывает и результат передает клиенту.

Хранимая информация чаще всего представляется в форме *реляционных баз данных*, т. е. в виде взаимосвязанных через ключевые поля таблиц [10]. Для работы с реляционной базой данных в режиме

«клиент-сервер» запросы клиентами для сервера обычно формируются на языке SQL (Structure Query Language) [10]. Программы, работающие с базой данных в режиме «клиент-сервер», используют программный интерфейс для отправки запросов и получения ответов от сервера. Этот интерфейс зависит от языка программирования или может быть скрыт в драйвере связи с базой данных (например, в драйвере ODBC, BDE или IDAPI) [10].

Универсальные языки программирования высокого уровня Delphi, Borland C++ Builder имеют достаточно мощные средства организации и работы с базами данных как в режимах прямой навигации, так и в режиме SQL-запросов. Эти средства включают расширенные библиотеки компонентов (VCL, Visual Component Library) работы с реляционными как распределенными, так и локальными базами данных. При этом поддерживаются форматы баз данных, принятые в СУБД типа dBase (dbf-файлы), типа Paradox (db-файлы), BDE – Borland Database Engine (gdb-файлы) и др. Средства этих языков программирования обеспечивают взаимодействие с удаленными серверами данных, построенными на основе СУБД Oracle, Sybase, Informix, InterBase, MS SQL Server и др.

Построение программ работы с базами данных возможно с использованием и иных языков программирования (Borland Pascal, Turbo C и других), но при этом, как правило, используют библиотеки процедур или объектов работы с файлами баз данных и файл-серверами.

Для построения и управления базой данных возможно использование широко распространенных СУБД типа Paradox, dBase, FoxPro, MS Access, Clipper, InterBase, Sybase, Informix, Oracle, Clarion. В этом случае при разработке программы управления базой данных используется язык программирования выбранной СУБД.

Разработку реляционной базы данных для проектируемой системы можно осуществлять вручную, анализируя данные и разбивая их на таблицы, определяя ключевые поля, осуществляя нормализацию таблиц. Этот процесс называют созданием *модели базы данных* или *модели данных*. Однако если информационная база сложна, то для проектирования часто используют специальный программный инструментарий – так называемые CASE-средства (Computer Aided Systems Engineering – компьютерные системы поддержки проектирования) [10]. Современные CASE-средства разработки информационных баз данных позволяют: создать модель реляционной базы данных, реализовать ее на компьютере физически, сгенерировать прототип для конечного пользовательского приложения. К современным CASE-средствам разработки баз данных относятся разработки ERWin 3.0, System Architect 3.1, S-Designor 4.0, MetaBase и др.

С использованием CASE-средств проектирование модели базы данных осуществляют графически в виде так называемой ER-диаграммы. На диаграмме связь между отдельными сущностями базы дан-



ных изображается в виде линий связи. Каждая сущность представляет, по сути, отдельную реляционную таблицу. Определяются ключевые поля, индексы, атрибуты и т. п. На основе ER-диаграммы формируется непосредственно физическая база данных на основе технологии «клиент-сервер» для конкретной СУБД.

Современные языки программирования Delphi, Borland C++ Builder в составе своих инструментальных сред разработки имеют средства переноса построенных с использованием CASE-средств моделей баз данных в виде ER-диаграмм в словарь данных языка. Эти средства переноса называют CASE Expert (<http://www.borland.com>) [10].

Если в дипломном проекте разрабатывается база данных для проектируемой системы, то в пояснительной записке должны быть отражены вопросы, связанные с вариантом расположения данных, технологией доступа, описана модель базы данных, выбраны средства управления базой данных. В случае использования CASE-средств разработки приведена ER-диаграмма базы данных.

13.7. Основные алгоритмы, реализуемые программным обеспечением микропроцессорных систем

Перечислим и кратко охарактеризуем основные алгоритмы, реализуемые ПО микропроцессорных систем. К ним относятся:

- алгоритмы программной реализации логических функций и логических автоматов в системах ПЛУ;
- алгоритмы расчета разностных уравнений, описывающих линейные регуляторы, цифровые фильтры в системах ЦАУ и СОИ;
- алгоритмы линейной и нелинейной цифровой фильтрации сигналов;
- алгоритмы вычисления математических функций;
- алгоритмы быстрого преобразования Фурье, Уолша и другие для отсчетов сигнала;
- алгоритмы управления с использованием нечетких регуляторов;
- алгоритмы распознавания образов и кластеризации;
- алгоритмы помехоустойчивого кодирования информации;
- алгоритмы тестирования ОЗУ, ПЗУ и процессора микропроцессорной системы;
- алгоритмы сжатия и поиска информации.

Алгоритмы реализации логических функций в системах ПЛУ позволяют вычислять значения логических функций, представленных в виде совершенной дизъюнктивной нормальной формы (СДНФ):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) = \bigcup_{j=1}^m \left(\bigcap_{i=1}^N \tilde{x}_i \right),$$

где y – значение логической функции, $x_i, i = \overline{1, N}$ – входные логические переменные, \tilde{x}_i – входная логическая переменная или инверсное значение; m – число конъюнктов в СДНФ, N – число переменных в конъюнкте; \bigcap, \bigcup – операции логического умножения и сложения, соответственно.

Можно выделить четыре основных алгоритма вычисления логической функции: *операторный, табличный, бинарного дерева и масок* [16, 17]. Выбор конкретного алгоритма определяется: требуемой скоростью расчета логической функции, требуемым для этого объемом памяти, возможностью гибкого изменения реализуемой логической функции без переделки программы.

В частности, в основу метода *бинарного дерева* положено разложение логических функций по Шеннону:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_N) = x_N f(x_1, x_2, \dots, 1) + \bar{x}_N f(x_1, x_2, \dots, 0),$$

где $f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ – разлагаемая логическая функция, например, в виде СДНФ, с дальнейшим построением по полученному разложению бинарного дерева расчета логической функции. Так, например, разложение по Шеннону логической функции

$$y = x_1 x_2 x_3 + \bar{x}_1 x_2 + \bar{x}_2 \bar{x}_3$$

будет иметь вид:

$$\begin{aligned} y &= x_3 (x_1 x_2 + \bar{x}_1 x_2) + \bar{x}_3 (\bar{x}_1 x_2 + \bar{x}_2) = \\ &= x_3 (x_2 (x_1 + \bar{x}_1) + \bar{x}_2 \cdot 0) + \bar{x}_3 (x_2 \bar{x}_1 + \bar{x}_2 \cdot 1) = \\ &= x_3 x_2 + \bar{x}_3 (x_2 \bar{x}_1 + \bar{x}_2), \end{aligned}$$

а соответствующее бинарное дерево приведено на рис. 13.1. Для расчета выходного значения достаточно осуществить не более N операций.

Расчет же выходных значений конечного логического автомата (Мура или Мили) можно осуществлять путем параллельного вычисления нескольких логических функций, образующих комбинационную схему автомата с сохранением

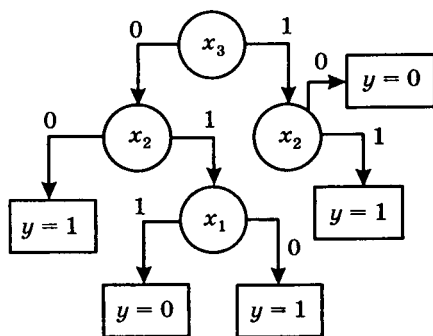


Рис. 13.1

и учетом значения логических переменных состояния автомата [16]. В более простых случаях для расчета выходных значений автомата программно реализуют логический граф состояния логического автомата [17].

Алгоритмы расчета разностных уравнений, описывающих линейные регуляторы, цифровые фильтры в системах ЦАУ и СОИ, позволяют вычислять значение управляющего воздействия или выходной величины с требуемой скоростью, используя при этом определенный объем памяти контроллера. Пусть Z -передаточная функция линейного регулятора или фильтра задана выражением:

$$W_{\text{пер}}(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_M z^{-M}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_N z^{-N}} = \frac{u(z)}{\varepsilon(z)}, \quad (13.1)$$

при этом $M \leq N$. Передаточной функции (13.1) соответствует разностное уравнение, которое и используется для расчета выходной величины:

$$u[m] = \sum_{K=0}^M a_K \cdot \varepsilon[m - K] - \sum_{K=1}^N b_K \cdot u[m - K], \quad (13.2)$$

где $\varepsilon[m - K]$ – отсчет входной величины регулятора (расогласование) или входной величины цифрового фильтра в момент времени, который на K -тактов предшествует текущему m -му моменту времени; $u[m - K]$ – отсчет выходной величины регулятора (управляющее воздействие) или выходной величины цифрового фильтра, который на K -тактов предшествует текущему m -му моменту времени; $a_0, \dots, a_M, b_1, \dots, b_N$ – коэффициенты z -передаточной функции (13.1) линейного регулятора или фильтра.

Можно выделить три основных алгоритма расчета (13.1): *прямого вычисления*, алгоритм с *заменой операции умножения сдвигом-сложением* и *табличный* [18]. Выбор конкретного алгоритма определяется задачей, но следует помнить, что алгоритм, имеющий большую скорость вычисления выходного значения, требует, как правило, большего объема памяти для хранения вспомогательных переменных.

В случае алгоритма с *заменой операции умножения сдвигом-сложением* коэффициенты a_K, b_K из выражения (13.2) заменяют их двоичными разложениями. Разностное уравнение (13.2) при этом приобретает вид:

$$u[m] = \sum_{i=1}^L \sum_{K=0}^M a_{K,i} \cdot \varepsilon[m - K] \cdot 2^{P_a - i} - \sum_{i=1}^L \sum_{K=1}^N [b_{K,i} \cdot 2^{P_b - i} \cdot u[m - K]], \quad (13.3)$$

где $a_{K,i}, b_{K,i}$ – отдельные биты мантисс коэффициентов a_K, b_K , соответственно (их значение 0 или 1); P_a, P_b – порядки двоичных коэф-

фициентов a_K и b_K , соответственно; L – разрядность мантиссы коэффициентов.

Так как умножение любого числа на коэффициент 2^{P-i} равносильно сдвигу этого числа влево либо вправо на $P-i$ бит, то выражение в квадратных скобках в (13.3) представляет собой сдвинутые влево, либо вправо отсчеты входного сигнала $\varepsilon[m - K]$ или выходного сигнала $u[m - K]$. Таким образом, используя для расчета разностного уравнения (13.2) выражение (13.3), заменяем операции умножения просто сдвигом с последующим сложением. Если в двоичных представлениях коэффициентов a_K и b_K содержится много нулевых бит, то выражение (13.3) дает значительное ускорение вычисления (умножения).

Алгоритмы линейной и нелинейной цифровой фильтрации сигналов используются для устранения помех, а также выделения определенной полосы частот в измеренном сигнале. Выделение полосы частот осуществляется, как правило, с использованием линейных цифровых фильтров с конечной (КИХ) или бесконечной (БИХ) импульсной характеристикой [19]. Фильтры с КИХ имеют идеальную линейную фазовую характеристику, фильтры с БИХ обеспечивают заданные показатели качества при невысоком порядке фильтра [19].

Для устранения единичных импульсных помех в сигнале используют либо нелинейные цифровые фильтры (например, медианный), либо фильтры, построенные на основе методов робастной цифровой фильтрации [20].

Алгоритмы вычисления математических функций представляют собой способы вычисления значения той или иной элементарной математической функции (типа синус, косинус, экспонента и др.) в среде микропроцессорного контроллера, если стандартные подпрограммы отсутствуют. В этом случае используют три подхода: табличный, разложение функций в ряды или применяют рекуррентные формулы [16]. Выбор конкретного подхода определяется требуемой скоростью и точностью вычислений. Наибольшую скорость имеет табличный метод, а точность два последних. Например, если не требуется высокая скорость расчета, то в вычислении корня квадратного числа x можно использовать рекуррентную формулу:

$$y_{n+1} = 0,5 (y_n + x/y_n),$$

где x – подкоренное значение; y_{n+1} , y_n – значение корня на двух последних итерациях.

Алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ) в МПС используют для вычисления спектра измеренного сигнала, вычисления корреляционных функций, умножения полиномов, помехоустойчивого кодирования и декодирования информации, быстрого расчета сверток сигналов, адаптивной фильтрации сигналов и др. [21]. Эти алгоритмы представляют собой способы ускоренного расчета дискретно-

го преобразования Фурье [21] для отсчетов $\{x[0], x[T], x[2T], \dots, x[(N-1)T]\}$ сигнала $x(t)$, которое может быть представлено в виде:

$$X(\omega_n) = \sum_{k=0}^{N-1} x[kT] e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} = \sum_{k=0}^{N-1} x[kT] W^{nk} = \frac{a_n - j\epsilon_n}{2}, \quad n = \overline{0, N-1},$$

где $\{X(\omega_n)\}$ – последовательность отсчетов комплексного спектра сигнала $x(t)$; $W^{nk} = \exp(-j2\pi nk/N)$ – поворачивающий множитель; $\omega_n = 2\pi n/(NT)$ – частота n -ой гармоники сигнала $x(t)$.

Наиболее часто для выполнения БПФ используются алгоритмы Кули–Тьюки по основанию 2 с прореживанием по частоте или по времени [21]. Эти алгоритмы просты в понимании и легки в реализации. Для обеспечения высокой скорости расчета используют алгоритмы БПФ с переменным основанием или алгоритм Винограда для последовательностей малой длины.

Вместо БПФ в ряде случаев удобнее использовать иные более простые с расчетной точки зрения быстрые преобразования типа Уолша–Адамара и др. [21].

Алгоритмы управления с использованием нечетких регуляторов [22] широко используют в современных системах управления. Они позволяют реализовать регуляторы, разработка которых традиционными методами потребовала бы несоизмеримых затрат из-за сложности поведения объекта управления, его нелинейности или многомерности. Использование теории нечетких систем позволяет реализовывать эффективное управление, используя следующие нечеткие исходные данные: опыт и знания экспертов; напрямую смоделированные действия оператора или созданные нечеткие модели оборудования.

Правила управления формулируются при этом в форме нечетких логических высказываний типа «если..., то...». В качестве переменных в правилах могут выступать *лингвистические* нечеткие переменные, принимающие значения типа «больше», «меньше», «немного больше», «немного меньше», «значительно больше» и т. п. С каждой входной и выходной переменной связана ее функция принадлежности. Такое описание позволяет легко понимать работу регулятора оператору, не связанному с его разработкой, а следовательно, корректировать его действия на языковом уровне (осуществлять обучение регулятора).

Определены операции над нечеткими переменными: нечеткое отрицание, нечеткое логическое произведение, нечеткая логическая сумма, импликация и др. Алгоритмы определения выходной величины нечеткого регулятора на основе нечетких правил называют построением нечетких выводов. В настоящее время используются два

основных алгоритма построения нечетких выводов: алгоритм Мамдани и алгоритм Сугэно [22]. Первый алгоритм более универсальный, второй же имеет лучше сформулированные методики по построению систем нечетких выводов и легче алгоритмизируется.

Нечеткие принципы управления используются при построении автопилотов самолетов, устройств автовождения метрополитенов, устройств управления роботами-манипуляторами, доменными печами, прокатными станами, автомобилями и т. п. Ряд современных однокристальных микропроцессорных контроллеров, например фирмы *Motorola* (<http://www.motorola.ru>), в своей системе команд имеют реализованные операции над нечеткими переменными.

Алгоритмы распознавания образов и кластеризации [23] применяются в микропроцессорных робототехнических системах распознавания визуальной обстановки, распознавания текстовой информации, звуковых сигналов, речи, визуального и иного контроля качества изделий, медицинской и технической диагностики, системах идентификации процессов и др. Основная задача систем распознавания образов – это отнесение объектов или процессов к одной из нескольких заранее известных групп.

При построении систем распознавания образов можно выделить два основных этапа: построение признакового пространства распознавания и выбор решающего правила. Признаковое пространство – это минимальный набор числовых параметров, достаточно полно характеризующих распознаваемый объект. При построении признакового пространства основная решаемая задача – это снижение размерности, т. е. уменьшение числа требуемых параметров, но так чтобы информация об объекте не терялась. Объект, представленный минимальным числом параметров в признаковом пространстве, часто называют *образом* объекта.

Решающее правило – это перечень условий, позволяющих с требуемой точностью отнести образ объекта, следовательно, и сам объект, к одной из возможных групп (кластеров). Правило считается выбранным верно, если при классификации объектов по группам число неверно отнесенных объектов не превышает заранее заданного процента. Это проверяется по обучающей выборке объектов, когда принадлежность каждого объекта к группам заранее известна.

Методы *кластерного анализа* (кластеризации) позволяют с определенной достоверностью определять количество возможных групп (кластеров) в произвольной выборке объектов.

Алгоритмы помехоустойчивого кодирования информации [21] используются в различных системах передачи и хранения числовой информации. Основной задачей кодирования являются выявление и

исправление ошибок в информации, возникших в результате помех или неправильной работы (неисправности).

Одной из основных характеристик помехоустойчивого кода является *кодовое расстояние* d . Это минимальное число элементов (бит) которыми одна кодовая комбинация отличается от любой другой возможной в данном коде.

Другой характеристикой является *избыточность* кода, которую можно определить как разность количества всех возможных двоичных комбинаций и числа, используемых в данном коде двоичных комбинаций. Число комбинаций определяют при заданной разрядности кода.

По значению кодового расстояния определяются возможности помехоустойчивого кода так: если $d = 2$, то код может только обнаруживать одиночные ошибки, $d = 3$ – исправлять все одиночные или обнаруживать одиночные и двойные, $d = 4$ – обнаруживать одиночные, двойные и тройные ошибки или исправлять одиночные и обнаруживать двойные и т. д.

Кодирование информации в устройствах наиболее часто осуществляют с использованием кодов: с проверкой на четность ($d = 2$), Хемминга ($d = 3, 4$) или циклических ($d = 3, 4, \dots$), в частности, БЧХ-кодов (Боуза–Чоудхури–Хоквингема) ($d \geq 5$). Однако следует помнить, чем выше значение d , тем выше избыточность кода и сложнее процесс кодирования и декодирования.

Выбор конкретного кода определяется требуемым кодовым расстоянием, скоростью работы алгоритма кодирования/декодирования и заданной разрядностью кода.

Алгоритмы тестирования ОЗУ, ПЗУ и процессора микропроцессорной системы [24–26] реализуются в виде процедур системного программного обеспечения МПК. Они позволяют проводить программное тестирование работоспособности основных узлов контроллера во время работы.

В простейшем случае *тестовая процедура процессора* представляет собой программу, содержащую последовательность основных команд, результат выполнения которой заранее известен. Однако следует отметить, что при этом проверяется не только процессор, но и память, из которой считываются команды и данные, системная магистраль, схемы синхронизации и т. д. Поэтому часто говорят о тестировании *системного ядра*.

Программы достаточно полного тестирования всех внутренних узлов процессора сложны, требуют больших затрат на разработку и значительного времени выполнения, такие программы используются при контроле микропроцессора во время его производства.

Простейшая процедура тестирования ПЗУ [24] представляет собой процедуру расчета контрольных сумм для каждой из интегральных схем (ИС) и сравнение их с заранее известными требуемыми значениями. Контрольная сумма – это чаще всего сумма всех ячеек ИС ПЗУ без учета переноса.

Простейшая процедура тестирования ОЗУ [24] реализует алгоритм записи информации в ячейку с последующим чтением и сравнением ее с ранее записанной информацией. В качестве записываемого байта используются значения типа 0ААН, 055Н, 0Н, 0FFН, байты типа «бегущая единица», «бегущий ноль» и др. Для выявления неисправностей с адресацией ячеек ОЗУ используют запись в ячейки младшего байта их адреса с последующим чтением и сравнением.

Алгоритмы сжатия и поиска информации характерны для систем, обрабатывающих большие массивы данных, электронных баз данных.

В заключение данного параграфа отметим, что в дипломном проекте могут использоваться и иные алгоритмы обработки информации для микропроцессорных систем. Выбор алгоритмов определяется решаемой технической задачей.

13.8. Детализация главы дипломного проекта по разработке алгоритмического и программного обеспечения

Типовое содержание специальной части дипломного проекта, изложенное в 12.4, должно корректироваться в соответствии с задачами, решаемыми в конкретном дипломном проекте. Подытожив все вышесказанное, можно констатировать, что глава по разработке алгоритмического и программного обеспечения в общем случае может содержать:

- разработку и описание основных алгоритмов, реализуемых ПО. Отдельно описываются алгоритмы ПО МПК, отдельно ПО ЭВМ верхнего уровня и инструментальной ЭВМ. Степень детализации различных алгоритмов ПО определяется с руководителем проекта. Здесь же может приводиться описание используемых в ПО численных методов, математических моделей;
- разработку модели данных, если разрабатываемое ПО использует автоматизированные базы данных для хранения информации. При этом определяются расположение данных, технология доступа, выбираются средства управления базой данных;

- разработку и описание протоколов взаимодействия контроллеров между собой, с ЭВМ верхнего уровня в системе с использованием последовательных интерфейсов, корпоративных, промышленных сетей или Internet;
- выбор для каждого типа ПО инструментальной системы разработки, ОС, языка программирования, методологии разработки ПО, архитектуры построения программ. При этом осуществляется построение схем программ [27] с разбивкой на процедуры. Описание реализуемых объектов: их свойств и методов, событий, взаимодействия объектов и т. п.;
- детальную проработку нескольких программных модулей с реализацией на языке программирования и отладкой [28,29]. Разрабатываются подробные схемы алгоритмов этих модулей. Осуществляется описание интерфейса этих модулей, построение таблиц используемых переменных с краткими пояснениями и возможно с размещением в памяти;
- оценку работоспособности реализованных программных модулей на основе расчета контрольного примера.

Не все из приведенных работ могут одновременно отражаться в главе по программному и алгоритмическому обеспечению, их перечень приводится как ориентир при составлении содержания главы проекта. Конкретное ее наполнение определяется темой проекта и уточняется студентом совместно с руководителем проекта.

Основные этапы разработки ПО для МПК разрабатываемой системы изложены в 12.9 и могут использоваться как справочная информация при разработке содержания главы по программному и алгоритмическому обеспечению. Они позволяют студенту понять наполнение главы и параграфов, касающихся разработки ПО МПК.

Список литературы

1. *Джордейн Р.* Справочник программиста персональных компьютеров типа IBM. – М.: Финансы и статистика, 1992. – 543 с.
2. *Брей Б.* Микропроцессоры Intel: 8086/8088, 80186/80188, 80286, 80386, 80486, Pentium, Pentium Pro Processor, Pentium 4. Архитектура, программирование и интерфейсы. – СПб.: ВHV–Санкт-Петербург, 2005. – 404 с.
3. *Агуров П.* Интерфейс USB. Практика использования и программирования. – СПб.: ВHV–Санкт-Петербург, 2004. – 576 с.
4. *Довгаль С. И., Литвинов Б. Ю., Сбитнев А. И.* Персональные ЭВМ: Турбо Паскаль V 7.0, объектное программирование, локальные сети. – Киев: Информсистема сервис, 1993. – 470 с.

5. Федоров А., Рогаткин Дм. Borland Pascal в среде Windows. – Киев: Диалектика, 1993. – 510 с.
6. Грушевицкий Р. и др. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики. – СПб.: ВHV–Санкт-Петербург, 2002. – 608 с.
7. Поляков А. Языки VHDL и VERILOG в проектировании цифровой аппаратуры. – М.: Солон-р, 2003. – 320 с.
8. Фаронов В. В. Турбо Паскаль. В 3-х кн. – М.: МВТУ–ФЕСТО Дидактик, 1992. – 304 с.
9. Буч Г. Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения. – Киев: Диалектика, 1994. – 528 с.
10. Орлик С. В. Секреты Delphi на примерах. – М.: Бином, 1996. – 351 с.
11. Федоров А. Borland Pascal: практическое использование Turbo Vision 2.0. – Киев: Диалектика, 1993. – 271 с.
12. Потемкин В. Г. Система Matlab 5 для студентов. – М.: Диалог МИФИ, 1997. – 314 с.
13. Эззель Б. Windows 98: руководство разработчика. В 2 т. Т. 1. – 672 с. Т.2 – 416., Киев: Ирина, 1999.
14. Куцевич Н. А. SCADA – системы и муки выбора // Мир компьютерной автоматизации. № 1. 1999. – с.72.
15. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. – М.: Мир, 1998. – 575 с.
16. Майоров В. Г., Гаврилов А.И. Практический курс программирования микропроцессорных систем. – М.: Машиностроение, 1989. – 266 с.
17. Алексеев В. Н. и др. Микропроцессорные средства производственных систем. – Л.: Машиностроение, 1988. – 287 с.
18. Хвоц С. Т., Варлинский Н. Н., Попов Е. А. Микропроцессоры и микроЭВМ в системах автоматического управления. – Л.: Машиностроение, 1988. – 640 с.
19. Хемминг Р. В. Цифровые фильтры. – М.: Недра, 1987. – 220 с.
20. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 300 с.
21. Лосев В. В. Микропроцессорные устройства обработки информации: алгоритмы цифровой обработки. – Минск: Вышэйшая школа, 1990. – 130 с.
22. Прикладные нечеткие системы / Под ред. Т. Тэрано и др. – М.: Мир, 1993. – 370 с.
23. Генкин В. Л., Ерош И. Л., Москалев Э. С. Системы распознавания автоматизированных производств. – Л.: Машиностроение, 1988. – 245 с.

24. Уильямс Г. Б. Отладка микропроцессорных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 250 с.
25. Пузанков Д. Микропроцессорные системы. – СПб.: Политехника, 2002. – 935 с.
26. Новиков Ю. В., Скоробогатов П. К. Основы микропроцессорной техники. – СПб.: ИНТУИТ.ру, 2003. – 320 с.
27. ГОСТ 19.701-90. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. – М.: Изд-во стандартов, 1991.
28. Куприянов М. С., Матюшкин Б. Д. Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования. – СПб.: Политехника, 2000. – 592 с.
29. Каспер Э. Программирование на языке Ассемблера для микроконтроллеров семейства i8051. – СПб.: Горячая Линия – Телеком, 2003. – 192 с.

14

СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

Тема дипломного проекта определяется материалами преддипломной практики. Ниже приводятся возможные варианты тем по электронике и микросхемотехнике, по промышленным электронным устройствам:

- система (устройство) контроля (и управления) параметров объекта (температуры, давления, расхода жидкости, газа и т. д.);
- электронное устройство сопряжения системы контроля (и управления) с ЭВМ;
- силовой электронный преобразователь (многофазный управляемый выпрямитель, многофазный инвертор тока (напряжения), многофазный преобразователь частоты);
- система управления силовым электронным преобразователем (многофазным управляемым выпрямителем, многофазным автономным инвертором тока (напряжения), многофазным преобразователем частоты).

Типовое содержание специальной части дипломного проекта состоит из двух разделов.

Обзорно-постановочный раздел (анализ технического задания и формулирование требований к разрабатываемому устройству (системе)).

- Общая характеристика устройства (системы), выполняемые функции, предполагаемое конструктивное исполнение.
- Описание параметров, которые подлежат контролю или регулированию (управлению).
- Описание алгоритма работы проектируемого устройства.
- Изучение технической документации и технической литературы.
- Патентный поиск.
- Сравнительный анализ возможных вариантов устройств, реализующих данный алгоритм.
- Выбор варианта реализации данного устройства.

Раздел по проектированию разрабатываемого устройства.

Разработка структурной схемы.

- Разработка и описание структурной схемы, описание функционального назначения каждого ее узла (или группы узлов как отдельного функционального блока).

Разработка функциональной схемы.

- Составление функциональной схемы.
- Уточнение структурной схемы (возможно ее разукрупнение: разделение блоков на отдельные узлы), детализация функций узлов.
- Выбор элементной базы для отдельных функциональных узлов устройства (на этом этапе нужно определить, какие узлы рационально выполнить аналоговыми и какие цифровыми, необходимо ли применение микроконтроллера МК).
- Описание окончательного варианта функциональной схемы (с указанием выбранных элементов).

Разработка принципиальной схемы.

Разработка принципиальной схемы выполняется по полученной в предыдущем разделе *функциональной схеме* на базе выбранных функциональных элементов с проведением расчетов и уточнением их конкретных типов.

Ниже рассматривается общая методика проектирования аналоговых и цифровых блоков (или узлов) разрабатываемого устройства. (Многие приведенные ниже рекомендации по расчету параметров и выбору элементной базы носят оценивающий или уточняющий характер; в каком именно случае это необходимо, зависит от конкретной реализации дипломного проекта.) В качестве примера будут более подробно рассмотрены разработки активного фильтра и некоторых других аналоговых и цифровых узлов (блоков).

Разработка аналоговых узлов (для каждого узла отдельно):

- исходные данные для расчета (конкретно какие именно данные должны быть заданы, зависит от того, какие функции выполняет проектируемый узел: усилитель, активный фильтр и т. д.);
- описание функционального назначения узла;
- выбор принципа действия (с приведением внутренней функциональной схемы);
- предварительный выбор элементной базы;
- составление принципиальной схемы;
- расчет параметров схемы (с изложением методики расчета);
- корректировка по результатам расчета выбранной элементной базы и составление ведомости с перечнем активных (транзисторов, операционных усилителей...) и пассивных (резисторов, конденсаторов...) элементов;
- моделирование работы спроектированного узла в системе схемотехнического моделирования.

Разработка цифровых узлов (для каждого узла отдельно):

- исходные данные для расчета (описание входных и выходных сигналов, задание связей между ними);
- описание функционального назначения узла и алгоритма работы;

- выбор принципа действия (с приведением внутренней функциональной схемы);
- предварительный выбор элементной базы (жесткая логика разной степени интеграции – логические интегральные микроселектронные схемы ИМС определенной серии [29], микроконтроллер МК (PIC контроллеры фирмы MicroCHIP [22], AVR контроллеры фирмы ATMAL [23–27]), программируемые логические интегральные схемы ПЛИС [19], тип которых также должен быть определен);
- составление блок-схемы алгоритма работы.

Далее методика расчета определяется выбранной элементной базой:

- *при применении ИМС [29] необходимо выполнить:*
- абстрактный синтез (математическое описание работы устройства с составлением логических уравнений) [1, 9–11];
- структурный синтез (разработка принципиальной схемы на конкретных элементах определенной ранее серии, составление ведомости с перечнем выбранных элементов [1, 9–11]; временной анализ полученной схемы в системе схемотехнического моделирования [30–32]);
- *при применении МК [22–27] необходимо выполнить:*
- распределение линий ввода-вывода, выделение входных и выходных линий, присвоение линиям целевых назначений;
- разбиение алгоритма на смысловые блоки, выделение подпрограмм;
- разработка принципиальной схемы (цифровой части) и составление ведомости с перечнем выбранных элементов;
- определение функций каждой подпрограммы с разделением крупных подпрограмм на модули или меньшие подпрограммы [22–27];
- написание программного кода для выбранной подпрограммы или всей программы [22–25];
- отладка программного кода (в системе программирования и эмуляции MpLab, AVR Studio ...);
- *при применении ПЛИС [19,20]:*
- математическое описание работы (составление логических уравнений – абстрактный синтез) [20, 21];
- ввод логических уравнений, полученных при абстрактном синтезе (в специальных системах программирования на управляющем языке) [9, 20, 21];
- отладка созданной программы;
- отладка программы в эмуляторе;
- разработка принципиальной схемы и составление ведомости с перечнем выбранных элементов.

Завершающим этапом проектирования устройства (системы) контроля и управления, как указано выше, является *моделирование ра-*



боты отдельных блоков, результаты которого должны или подтвердить правильность их функционирования, или выявить возможные недочеты, на устранение которых должны быть представлены рекомендации.

При *моделировании на ЭВМ* работы основных узлов принципиальной схемы необходимо:

- выбрать пакет программ, моделирующий работу электронных устройств, например, [30 ÷ 32], дать его краткую характеристику;
- выбрать и описать режим, в котором будет выполнен анализ;
- привести результаты анализа и выводы к ним;
- откорректировать параметры схемы по результатам моделирования (если в этом будет необходимость).

Расчет надежности спроектированного устройства.

Этот раздел должен быть последним при разработке принципиальной схемы.

14.1. Обзорно-постановочный раздел

Анализируя техническое задание, необходимо:

- сформулировать основные требования, которым должно удовлетворять проектируемое устройство. Прежде всего необходимо отметить, разрабатывается новое устройство или модернизируется существующее; кроме того, является оно частью системы или автономным устройством; каким должно быть его конструктивное исполнение; каков рабочий диапазон температур; если разрабатывается автономное устройство (система), нужно решить, требуется ли разработка блока питания, и если да, то каковы его основные параметры;
- составить перечень параметров, которые необходимо измерять, контролировать, преобразовывать или регулировать и с какой допустимой погрешностью;
- составить (описать) алгоритм работы проектируемого устройства;
- изучить техническую литературу и полученную на производстве техническую документацию, привести известные (типовые) решения подобной задачи.

При разработке *системы (устройства) контроля (и управления)* необходимо определить, на какой элементной базе наиболее рационально ее выполнение. Если используются аналоговые датчики, то будут необходимы аналоговые согласующие (нормирующие) усилители. Часто бывает необходимо применить фильтры, обеспечивающие работу устройства в заданном диапазоне частот; для этого случая воз-

можно применение аналоговых фильтров, методика проектирования которых имеет хорошую математическую базу, позволяющую получить колебания в полосе пропускания до 0,1 дБ и подавления сигнала в полосе задерживания до -100 дБ [1, 6, 7]. Аналоговые фильтры позволяют получить различного вида амплитудно-частотные характеристики АЧХ: абсолютно гладкие (фильтры Баттерворта) или допускающие колебания в полосе пропускания или задерживания, но имеющие узкую переходную область между областью пропускания и областью задерживания (фильтры Чебышева, эллиптические).

При проектировании *силового электронного преобразователя*, если вид схемы не оговорен в задании, в зависимости от параметров входного источника нужно решить, по какой схеме он может быть выполнен. Например, для выпрямителя решить, будет он однофазным или трехфазным и далее, в зависимости от параметров нагрузки, выбрать конкретную схему: с нулевым выводом, или однофазную мостовую, или трехфазную мостовую – мост Ларионова. Для входного инвертора, предназначенного для преобразования высоковольтного (1 ÷ 10) кВ входного напряжения, рационально использовать полумостовую схему, у которой два плеча выполнены на активных силовых элементах (тиристорах, IGBT транзисторах и т. д.), а вторые два плеча представляют собой делитель напряжения на двух конденсаторах.

Системы (устройства) управления силовыми электронными преобразователями выполняются, как правило, на цифровой элементной базе: жесткой логике [29], микропроцессорных устройствах [22–25] или на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) [1, 9, 19, 20]. Какой именно вид цифровых элементов нужно применить в проекте, определяется техническим заданием и сложностью алгоритма, который должен быть реализован;

- выполнить патентный поиск по разрабатываемой теме;
- проанализировать полученные варианты технического исполнения разрабатываемого устройства;
- выбрать наиболее полно отвечающий техническим требованиям, приведенным в задании, вариант.

14.2. Расчетная часть

Разработка структурной схемы

Структурная схема любого устройства содержит четыре типовые группы узлов:

- *входные узлы* (датчики, органы управления),
- *основная группа – функциональные узлы*,
- *выходные узлы* (исполнительные устройства, устройства индикации),

- *каналы связи* (специфический тип устройств, цель которых передача информации).

Вначале необходимо описать, в соответствии с полученным заданием, функции, которые должен выполнять каждый узел из названных групп узлов.

Независимо от типа устройства основная группа узлов – *функциональные узлы* – это *основа* устройства, которые управляют, контролируют, реализуют *алгоритм* всех действий, выполняемых устройством (системой).

Можно также независимо от типа устройства (системы) дать общую характеристику *каналов связи*.

Каналы связи состоят из физических входящих и исходящих линий (витых пар, многопроводных кабелей, волоконно-оптических кабелей, инфракрасных оптических линий, ультразвуковых линий, аналоговых и цифровых радиоканалов) и устройств сопряжения с ними. Канал связи никогда не принадлежит одному устройству, он всегда объединяет группу устройств (2 устройства – это тоже группа). Только малые системы не имеют каналов связи. Канал связи это и сложно (спутниковый канал) и просто (I²C, TWI, UART, COM, RS232, RS432, SPI, I-Button ...).

Функции, которые выполняют *входные* и *выходные* узлы, определяет *вид устройства*, которому они принадлежат.

Система (устройство) контроля (и управления) параметров объекта

Входные узлы – принимают информацию от датчиков и преобразователей, контролирующих параметры объекта, и сигналы от органов управления (кнопки, переключатели, клавиатура), задающих режим работы объекта.

Выходные узлы – исполнительные механизмы или каналы связи.

Для *устройств контроля и управления* *входные* параметры (информация, поступающая от датчиков: температуры, влажности, давления и т. д.), *алгоритм* работы, *выходные* параметры (в частности, параметры исполнительных механизмов или каналов связи) обычно описаны в задании.

Электронное устройство сопряжения системы контроля (или управления) с ЭВМ

Для *электронных устройств сопряжения систем контроля и управления с ЭВМ* *входные* величины и *алгоритм* работы описаны в задании. *Выходные* величины – это информационный поток, передаваемый в канал связи. Хотя любое устройство может по заданию формировать информационный поток для управляющей или контролирующей ЭВМ.

Силовой электронный преобразователь

Основные функциональные блоки:

- для преобразователей постоянного тока: входной автономный инвертор, выпрямитель со сглаживающим фильтром, выходной инвертор – преобразователь частоты;
- для преобразователей переменного сигнала входной инвертор не нужен, остальные узлы такие же.

При расчете электронного силового преобразователя:

- входными величинами (они же исходные данные для проектирования) являются: в зависимости от типа преобразователя: или постоянное входное напряжение, или переменное входное напряжение и частота питающей сети; напряжение, ток и частота напряжения нагрузки (для многофазных схем: напряжения и токи в каждой фазе, как входной, так и выходной). В случае управляемого выпрямителя или стабилизатора напряжения (тока) частота напряжения нагрузки тождественна частоте сети. В случае автономных инверторов выходная частота определена в задании, или, если нагрузкой инвертора является выпрямитель и преобразователь частоты, то частота коммутации силовых ключей инвертора должна выбираться в пределах (1–2) кГц, что согласуется с быстродействием существующей элементной базы и дает возможность спроектировать сглаживающий фильтр с минимальными потерями мощности;
- алгоритм работы или описан в задании, или выбирается методом сравнения из приведенных в литературе вариантов (если алгоритм работы устройства и есть в задании, то задан укрупненно и требует уточнения);
- выходные величины – это токи и напряжения нагрузки (потребители электроэнергии).

Система управления силовым электронным преобразователем

Для систем управления силовыми преобразователями:

- входные сигналы управления поступают от датчиков тока и напряжения, установленных в управляемой силовой схеме, т. е. объекте управления;
- выходным устройством, т. е. объектом управления, являются силовые ключи электронного преобразователя (силовые тиристоры; полевые, биполярные и комбинированные транзисторы IGBT);
- основной блок обрабатывает информацию, полученную от датчиков, и, учитывая заданные уставки токов и напряжений, оговоренные в задании или рассчитанные по заданным (допустимым) изменениям токов и напряжений в нагрузке, вычисляет в реальном времени угол открытия α силовых ключей объекта управления.

Разработка функциональной схемы

Функциональная схема разрабатывается на основании структурной схемы. Основной задачей является *предварительный выбор элементной базы* для основных функциональных блоков (узлов) системы (устройства).

Устройства управления и индикации *систем управления и контроля, а также устройств сопряжения с ЭВМ* задаются либо выбираются из соображений эргономики и функциональности.

Система (устройство) контроля (и управления) параметров объекта

Проектирование *функциональной схемы системы управления* нужно начать с выбора *элементной базы*. Уже на уровне функциональной схемы нужно решить вопрос, будет каждый отдельный блок цифровым или аналоговым. При решении этого вопроса нужно учитывать внешние связи и условия работы разрабатываемого устройства в целом и каждого блока в отдельности. Необходимо оценить, какая элементная база наиболее надежно и дешево обеспечит заданную погрешность, ремонтпригодность и взаимозаменяемость деталей блока, и, кроме того, обязательно учитывать требования заказчика, по заданию которого выполняется дипломный проект.

Прежде всего нужно решить вопрос, каким будет *основной функциональный блок*: цифровым или аналоговым и на какой элементной базе он будет выполнен.

Если обработку информации от *входного блока*: датчиков – будет проводить *аналоговый регулятор*, то нужно согласовать его входы с выходными сигналами датчиков. При применении аналоговых датчиков нужно помнить, как отмечалось выше, что в этом случае, как правило, требуются *нормирующие усилители* [1, 4–8] для передачи сигнала в основной блок.

Если датчики выдают сигналы в *цифровом* коде, то рациональнее применить *цифровое* устройство в качестве *основного блока*. Цифровой блок также *наиболее удобен* в качестве основного *при большом объеме внешней информации и сложном алгоритме управления*, причем в этом случае, конечно, нужно применять *микроконтроллер МК* и при выборе *датчиков* нужно по возможности отдавать предпочтение тем, которые формируют на выходе *цифровой* сигнал.

Так как в большинстве случаев устройство содержит как аналоговые, так и цифровые блоки, возникает необходимость в использовании аналого-цифровых (АЦП) и цифро-аналоговых (ЦАП) преобразователях [1–5, 7, 8], тип которых нужно выбрать по рекомендованной литературе или подобрать в системе *Internet*. Если есть необходимость в применении аналоговых активных фильтров [1, 5–7], нужно четко определить, каким требованиям должны отвечать параметры филь-

тра. Более подробно вопросы выбора ЦАП, АЦП, схемы активного фильтра, а также рекомендации по методике их расчета приведены в параграфе «Разработка принципиальной схемы». Кроме того, нужно помнить, что АЦП может являться *функциональным элементом* МК и, если в системе есть аналоговые датчики и используется МК, его желательно выбирать со встроенным в структуру АЦП. Вообще, используя в схеме микроконтроллер, нужно помнить, что МК *многофункциональная* большая интегральная схема БИС и большая часть логических функций может быть передана ему [22–27].

Выходные сигналы основного блока должны быть согласованы с *нагрузкой*: исполнительными механизмами, устройствами индикации или каналами связи. В зависимости от типа нагрузки, ее параметров могут потребоваться усилители (аналоговые или импульсные) [1–5, 7, 8, 13], различного рода преобразователи. Все эти вопросы могут быть решены для конкретного устройства.

Силовой электронный преобразователь

При разработке *силового электронного преобразователя* исходными данными, как сказано выше, являются следующие: параметры входного источника питания – напряжение, ток, частота сети и параметры нагрузки – коммутируемые ток I_H , напряжение нагрузки U_H и частота переключения F полупроводниковых ключей в режиме коммутации. Кроме того, должны быть учтены нестандартные режимы, например возможные повышения напряжения, режим короткого замыкания (КЗ) и т. д.

Основной элементной базой для них являются *силовые полупроводниковые приборы* [1, 12, 18], работающие в *режиме коммутации* различных узлов схемы, которые и определяют качество работы проектируемого устройства. Поэтому нужно выбрать тип *силовых ключей* (тиристоры, симисторы или какой-то тип транзисторов – полевые, биполярные, комбинированные – биполярные с изолированным затвором IGBT), которые наиболее полно будут отвечать требованиям технического задания и работать в экономичном режиме.

Задачей разработчика является проектирование схемы, надежно работающей при заданных технических условиях, потребляющей *минимальную мощность* в элементах коммутации в силовой цепи и по цепи управления. Желательна *гальваническая развязка* между источником управляющего сигнала и управляющим входом силового прибора (наличие гальванической развязки повышает надежность схемы управления и позволяет снизить мощность источника, формирующего сигналы управления). Элементы коммутации должны быть достаточно *быстродействующими*, чтобы их временные параметры не ограничивали рабочую частоту преобразователя.

С этой точки зрения нужен идеальный силовой ключ: способный практически мгновенно (время включения $t_{вкл} \Rightarrow 0$, время выклю-

чения $t_{\text{выкл}} \Rightarrow 0$, т. е. рабочая частота $F \equiv \infty$) при нулевой мощности ($P_{\text{упр}} = I_{\text{упр}} \times U_{\text{упр}} = 0$) управления переключать бесконечно большие токи и блокировать бесконечно большие напряжения; обладать нулевым внутренним сопротивлением при прямом включении (во включенном – открытом состоянии) $r_{\text{пр}} \Rightarrow 0$ ($U_{\text{пр}} \Rightarrow 0$) и бесконечно большим сопротивлением при обратном включении (в отключенном – закрытом состоянии) $r_{\text{обр}} \equiv \infty$ ($I_{\text{обр}} \Rightarrow 0$). Кроме того, силовые полупроводниковые ключи должны быть полностью управляемыми, т. е. включаться и выключаться по цепи управления. Так как реально таких ключей нет, нужно из многообразия существующих в настоящее время силовых полупроводниковых приборов выбрать тот тип, который в наибольшей степени отвечает заданным техническим требованиям, предъявляемым к разрабатываемому устройству и оговоренным в техническом задании.

В настоящее время в силовых преобразователях находят широкое применение силовые биполярные транзисторы БТ, силовые полевые транзисторы ПТ, биполярные транзисторы с изолированным затвором – IGBT транзисторы (комбинированный прибор, на входе которого имеется полевой транзистор, а на выходе – биполярный), не полностью и полностью управляемые тиристоры.

Для грамотного выбора конкретного типа ключа нужно знать примерную сравнительную оценку параметров перечисленных выше приборов и рекомендации по их техническому использованию. Такие данные приводятся в технической литературе, в каталогах фирм Mitsubishi Electric, International Rectifier [12], Motorola, Semikron, в каталогах заводов отечественных производителей тиристоров (Саранск) и Таллинского завода (Эстония), а также на сайтах в сети Internet.

Рассмотрим коротко характеристики и параметры основных видов силовых ключей [1, 12, 18].

Биполярный транзистор (БТ) (используется в силовых схемах с включением по схеме общего эмиттера ОЭ).

Достоинства:

- полная управляемость по цепи базы ($I_{\text{упр}} = I_{\text{б}}$);
- малое напряжение насыщения в открытом состоянии ($U_{\text{кэ нас}} \leq (1-2) \text{ В}$);
- относительно высокое быстродействие (рабочая частота $F \leq (1-3) \text{ МГц}$).

Недостатки:

- зависимость коэффициента передачи тока базы ($\beta = h_{21э}$), равного коэффициенту усиления по току в схеме ОЭ, от тока коллектора $I_{\text{к}}$: чем выше рабочий ток $I_{\text{к}}$, тем меньше коэффициент усиления ($\beta = h_{21э}$); при высоких уровнях инжекции [1–5, 7, 8, 18], т. е. при больших значениях тока $I_{\text{к}}$, коэффициент переда-

чи тока базы становится малым $\beta = h_{21\beta} < 10$. Следовательно, чтобы поддерживать ток I_K на рабочем уровне, необходимо увеличивать во входной цепи управляющий ток базы I_B и мощность, расходуемую в цепи управления.

Одним из способов увеличения коэффициента передачи тока ($\beta = h_{21\beta}$) является изготовление в одном корпусе (в виде модуля) нескольких транзисторов, включенных по схеме Дарлингтона (составного транзистора) [1, 5, 7, 8], например КТ827; в этом случае коэффициент передачи

$$\sum \beta = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \beta_n,$$

где n – количество транзисторов в модуле.

Но при таком включении возрастает падение напряжения на открытом (насыщенном) транзисторе $U_{КЭнас}$ и, следовательно, потребляемая мощность в выходной цепи. И, кроме того, невозможно полностью выключить силовой транзистор, так как в запертом состоянии его базовый ток в точности равен $I_{К0}$ предыдущего каскада. (В реальных силовых схемах создают многоэлементные блоки управления силовыми транзисторами или используют готовые микросхемы-драйверы [1, 12, 18].)

Полевые транзисторы (ПТ) (класс МДП-транзисторов с изолированным затвором используется в силовых схемах с включением по схеме общего истока ОИ).

Достоинства:

- бесконечно малая потребляемая мощность во входной цепи (цепи управления), так как входной ток $I_{зи} \Rightarrow 0$ за счет бесконечно большого входного сопротивления $r_{зи} \equiv \infty$;
- относительно высокое быстродействие, так как в образовании выходного тока I_C (тока стока) в отличие от БТ участвует один вид зарядов (или электроны, или дырки).

Недостатки:

- высокое выходное сопротивление $r_{си}$ (сопротивление канала сток–исток), которое растет с увеличением напряжения $U_{си}$, что приводит к высоким потерям мощности в силовом ключе;
- ПТ не работают с высоким обратным напряжением (нет силовых приборов на обратные напряжения свыше 150 В).

Применение различных технологических приемов, уменьшающих сопротивление канала, в частности выпуск многоканальных так называемых V-МДП структур с V-образным каналом и другой конфигурацией каналов, дает возможность применять ПТ в преобразователях *высокой частоты* с напряжением не более 100 В.

Тиристоры (управляемые полупроводниковые диоды).

Достоинства:

- возможность коммутировать большие мощности: *токи* нагрузки, измеряемые в *килоамперах*, *напряжения*, измеряемые в *киловольтах*;
- малая мощность, расходуемая в цепи управления, так как управление выполняется короткими импульсами, длительность $t_{И}$ которых соизмерима с временем включения тиристора $t_{ВКЛ}$ и составляет не более нескольких десятков микросекунд, так как длительность импульса обычно принимают равной: $t_{И} = (2-3)t_{ВКЛ}$;
- наличие силовых *оптотиристор*ов, позволяющих гальванически разделить входную цепь тиристора и схему, формирующую импульсы управления.

Недостатки:

- низкое быстродействие при выключении из-за сложной четырехслойной структуры тиристора (с двумя широкими базами) и наличия двух видов носителей в каждом слое, время выключения $t_{ВЫК}$ может составлять сотни микросекунд.

Фактически *рабочая частота преобразователя* F полностью определяется временем выключения $t_{ВЫК}$, которую обычно вычисляют из выражения:

$$F = \frac{1}{(10 \div 20) \cdot t_{ВЫК}};$$

- возможность по цепи управления *только включать* тиристоры; *отключение* для основной массы тиристоров выполняется по *анодной* (выходной) цепи (или подачей обратного напряжения, или снижением анодного тока ниже тока удержания).

Выпускаются так называемые *двухоперационные тиристоры*, позволяющие включать и выключать их по цепи управления. Главнейший их недостаток: ток управления *соизмерим* с коммутируемым током. Потребляя слишком большую мощность в цепи управления, они экономически не выгодны.

В настоящее время ведутся разработки «комбинированных» тиристоров, у которых в цепь управления будут встроены полевые транзисторы. Такого типа приборы проходят успешные испытания.

Транзисторы IGBT (биполярные транзисторы с изолированным затвором).

Компромиссным техническим решением, позволившим объединить положительные качества как ПТ, так и БТ транзисторов, явилась разработка биполярных транзисторов с изолированным затвором, названных IGBT транзисторами.

Эти транзисторы представляют собой комбинацию силовых полевого МДП и биполярного транзисторов, причем технология изготов-

ления ПТ почти сохранена. В результате получен универсальный прибор с высоким входным сопротивлением и низким выходным сопротивлением, даже несколько более низким, чем у БТ транзистора. Кроме того, они обладают хорошими силовыми показателями. Приведем их основные характеристики.

Достоинства:

- способность коммутировать токи нагрузки до 800–1000 А, блокируемые напряжения 600–800 В;
- малая мощность, расходуемая в цепи управления, так как на входе включен полевой транзистор;
- высокое быстродействие, свойственное БТ. Рабочими являются три поколения IGBT транзисторов.

Совершенствуя структуру и технологию производства прибора, старались добиться повышения быстродействия и увеличения пробивного напряжения. В настоящее время разрабатывается четвертое поколение, у которого блокируемые напряжения составляют 1200 В и даже 1700 В. Для рабочих токов добиваются высокой скорости из-

менения $\frac{dI}{dt}$, но это связано с понижением надежности и возможным перегревом структуры.

Система управления силовым электронным преобразователем

Системы управления силовыми электронными преобразователями являются в настоящее время, как правило, цифровыми устройствами. По функциям, которые выполняет основной блок, его можно выполнить на жесткой логике, программируемых логических интегральных схемах ПЛИС или на микроконтроллере МК – все зависит от сложности алгоритма управления. Тем не менее аналоговые схемы управления еще находят практическое применение и вариант их использования тоже нужно иметь в виду.

Основной проблемой при проектировании силовых преобразователей является разработка надежной помехозащищенной схемы управления [18]. Проблемы также возникают в мостовых и полумостовых схемах при управлении ключами так называемого «верхнего» уровня по отношению к нагрузке, которые не связаны непосредственно с «землей», с общей шиной силовой схемы.

В настоящее время, как уже упоминалось выше, чтобы управлять различными типами силовых ключей, выпускают управляющие интегральные микросхемы-драйверы. Драйверы хотя бы со стороны входной цепи управления превращают реальные ключи в идеальные [1, 12, 18].

Драйверы принимают информационные сигналы и вырабатывают сигналы заданной формы и мощности для конкретного типа силового ключа. Кроме того, драйверы имеют встроенные оптоэлектронные



и трансформаторные узлы для развязки входных и выходных цепей. Имеются драйверы, предусматривающие подключение внешних цепей развязки. Имеются драйверы синхронного управления несколькими ключами. Выпускаются специальные драйверы, состоящие из двух блоков управления силовых ключей «верхнего» и «нижнего» уровней (для мостовых и полумостовых схем). И самое главное, большинство драйверов самостоятельно защищает ключи от токов короткого замыкания с автоматическим закрытием ключа и формированием сигнала аварии. Применение драйверов оправдано тем, что они лучше и надежнее, чем схема из десятков дискретных элементов, управляют силовым ключом, задавая ему более экономичный режим переключения. Драйвер на печатной плате занимает меньше места, не требует настройки; имея внутренний стабилизатор, не критичен к помехам по питанию, полностью взаимозаменяем. Новые силовые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) без драйверов не ставят (ТУ изготовителей). Например, фирма Hitachi выпускает ключевые модули на 500, 1000 и более ампер напряжением 600, 800 вольт в виде законченных неразборных конструкций, в которые входят силовые элементы, драйверы, радиаторы и внутренние силовые шины. Для высоковольтных преобразователей электровозов выпускаются конструктивно законченные плечи мостовых схем, представляющие собой последовательно-параллельное включение силовых элементов со всеми цепями коррекции и защиты от помех и системой драйверов управления от блока ключей до конкретного силового элемента. В таких модулях фирма рассчитывает размер каждого конкретного проводника [12, 18].

Разработка принципиальной схемы

Разработка *принципиальной* схемы полностью базируется на функциональной схеме, для которой уже определена элементная база.

Проектирование принципиальной схемы, как было сказано выше, предполагает выполнение следующих действий.

- 1) Уточнение элементной базы, т. е. выбор конкретного элемента в соответствии с параметрами его нагрузки и входными данными.
- 2) Расчет отдельных блоков (или узлов) схемы с уточнением типа отдельных элементов по результатам расчета.

Блоки (или узлы), подлежащие расчету, определяются назначением системы (устройства), частью которой они являются. В современных системах много блоков, имеющих универсальное назначение, например, такие узлы, как блок питания; АЦП, ЦАП и активные фильтры, которые могут быть использованы в любом устройстве (системе) контроля и управления. Поэтому без привязки к какой-то одной из четырех типовых тем дипломного проекта для источников

питания дан перечень технической литературы [1, 2, 4, 5, 7, 8, 28], которая может быть использована при их проектировании; для АЦП, ЦАП и активных фильтров далее приводятся основные параметры и рекомендации по расчету.

Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП, ЦАП)

Выбирая схему АЦП или ЦАП, можно воспользоваться выпускаемыми промышленностью интегральными микросхемами (ИМС) [1, 5, 8, 14–17].

Стандартные отечественные ИМС имеют систему электрических параметров, отражающую особенности их построения и функционирования, которая объединяет несколько десятков параметров. Важнейшие из них, наиболее полно описывающие работу преобразователей в статическом и динамическом режимах при воздействии внешних факторов, включены в нормативно-техническую документацию и могут быть использованы при разработке принципиальной схемы. При разработке принципиальной схемы необходимо и достаточно проверить соответствие техническим характеристикам устройства (системы) следующих параметров ЦАП (АЦП) [1, 13–16].

Статические параметры

Число разрядов b – количество разрядов кода, которое может воспринимать ЦАП или вырабатывать АЦП. (Для двоичных АЦП и ЦАП в соответствии с ГОСТ 24736-81 под числом разрядов понимается двоичный логарифм максимального числа кодовых комбинаций на входе ЦАП или выходе АЦП.)

Дифференциальная нелинейность (δ_{LD}) – отклонение разности двух аналоговых сигналов, соответствующих соседним кодам, от значения единицы младшего разряда MR измеряется δ_{LD} в процентах от значения диапазона входного (выходного) сигнала или в единицах MR . Превышение δ_{LD} значения $\pm 1 MR$ приводит к *немонотонности* характеристики преобразования.

Монотонность характеристики преобразования – идентичность знака приращения мгновенных значений входного и выходного сигналов преобразователя.

Динамические параметры

Время преобразования $t_{прб}$ (t_c) – интервал времени от момента заданного изменения сигнала на входе АЦП (аналоговом или цифровом) до появления на его выходе соответствующего устойчивого кода.

Максимальная частота преобразования $f_{прб\max}$ ($f_{c\max}$) – наибольшая частота дискретизации, при которой заданные параметры соответствуют установленным нормам.



Время установления выходного напряжения или тока $t_{устU}$ $t_{устI}$ (t_{sU} t_{sI}) – интервал времени от момента заданного изменения кода на входе ЦАП до момента, при котором выходное аналоговое напряжение или ток окончательно войдут в зону шириной 1 МР (или другой оговоренной величины), симметрично расположенную относительно установившегося значения.

Приведенные *статические параметры* характеризуют точность преобразования аналогового или цифрового сигнала (значения этих параметров для отечественных ИМС примерно следующие: число разрядов $b = 8, 10, 12$; дифференциальная нелинейность (δ_{LD}) изменяется в следующих пределах: $\pm 0,012, \pm 0,025, \dots \pm 0,1\%$).

Динамические (временные) *параметры* определяют быстродействие схемы управления и ограничивают максимальную частоту входного сигнала для ЦАП и выходного для АЦП.

Рассчитать число разрядов b , т. е. определить шаг квантования сигнала по уровню и шаг дискретизации по времени можно, зная погрешность преобразования (она должна быть одного порядка с δ_{LD}).

Математической базой для этой цели является теория преобразования непрерывных сигналов в дискретные, изложенная в технической литературе.

Если исходная функция имеет вторую производную, например, преобразовывается синусоидальный сигнал и т. д., то, составив математическую модель (описание) сигнала и определив его первую и вторую производные, можно вычислить шаг дискретизации и, следовательно, число разрядов b в двоичном коде.

Если вторая производная равна нулю (например, для периодически линейно-возрастающей или линейно-убывающей функции), можно воспользоваться теоремой Котельникова и определить шаг квантования по уровню и так же, как и в предыдущем случае, параметр b .

Выбирая элементную базу, работающую с ЦАП или АЦП, нужно проверять соответствие ее временных параметров динамическим параметрам применяемого преобразователя. В частности, необходимо, чтобы суммарное время срабатывания цепей управления ЦАП или АЦП составляло не более 0,1 – 0,5 от значения единицы младшего разряда МР.

В настоящее время многие микроконтроллеры имеют хорошие встроенные 10- или 12-разрядные АЦП последовательного приближения.

Аналоговые активные фильтры

При обработке аналоговых сигналов возникает необходимость в использовании фильтров, наибольшее распространение среди которых находят активные фильтры [1–7, 13, 17].

Активные фильтры построены из сопротивлений, конденсаторов и усилителей (обычно операционных – ОУ) и предназначены для того,

чтобы из всех подаваемых на их вход сигналов пропускать на выход сигналы лишь некоторых заранее заданных частот. Эти обладающие частотной избирательностью схемы используются для усиления или ослабления определенных частот. Например, для защиты от помех необходимо исключать из спектра сигнала высокие частоты, т. е. использовать фильтр низкой частоты (ФНЧ). Для повышения мощности передаваемых по линиям связи цифровых кодов их преобразуют в аналоговые сигналы определенной частоты: одна из частот соответствует высокому уровню сигнала (единице), другая – низкому (нулю). При таком кодировании цифровых сигналов, чтобы исключить ошибки при приеме информации, нужно выделить каждую частоту, применяя полосовые (полосно-пропускающие) фильтры ППФ. Можно привести еще ряд примеров, подтверждающих необходимость применения фильтров.

Основными характеристиками фильтров являются [1, 6] передаточная функция $H(s)$ и амплитудно-частотная характеристика АЧХ $|H(j\omega)|$ (или фазо-частотная ФЧХ $\varphi(\omega)$).

Передаточные функции цепей (содержащих пассивные элементы и ОУ, работающие в линейном режиме) представляют собой отношение двух операторных полиномов. Аппроксимация характеристик активных фильтров сводится к выбору таких коэффициентов этих полиномов, которые обеспечивают наилучшее в том или ином смысле приближение к желаемым амплитудно-частотной (АЧХ) или фазо-частотной (ФЧХ) характеристикам фильтра.

Наиболее широко применяются следующие типы активных фильтров, отличающихся друг от друга подходом к нахождению наилучшей аппроксимации: фильтры Баттерворта, Чебышева, инверсный Чебышева, эллиптический и Бесселя [1, 5–7].

Основные параметры, характеризующие фильтр

$F_c(\omega_c)$ – частота среза (спада) характеристики АЧХ (или F_1, F_2 – диапазон частот, которые, например, пропускает фильтр);

n – порядок фильтра (степень полинома знаменателя передаточной функции или число ее полюсов, $n = 1, \dots, 10$);

TW – ширина переходной области между полосами пропускания и заграждения (она характеризуется скоростью спада АЧХ);

A_1 – заранее выбранное число, значение которого должно превышать АЧХ в полосе пропускания (принятые значения: 0,1; 0,5; 1; 2; 3 дБ);

A_2 – заранее выбранное число, значение которого не должно превышать АЧХ в полосе задерживания – заграждения (принятые значения: –20, –30, –35, –40 ... –100 дБ);

Q – добротность полюсов: $Q < 10$ – низкая; $Q \approx 10 \dots 100$ – высокая.

Вопрос об использовании фильтров решается при разработке функциональной схемы, конкретный тип фильтра с учетом перечислен-

ных выше параметров должен быть выбран на основании анализа технического задания *при разработке принципиальной схемы*. Так, если характеристика не должна иметь пульсаций (должна быть «гладкой»), но допустима довольно значительная протяженность переходной области TW , то целесообразно использовать фильтры *Баттерворта*.

Наибольшую скорость спада АЧХ в переходной области (между полосами пропускания и заграждения) имеет эллиптический фильтр. Далее следуют фильтры *Чебышева*, *инверсный Чебышева* и *Баттерворта*. Наихудшим в этом смысле является фильтр *Бесселя*. Однако *при скачке входного сигнала* (импульсном воздействии) выходное напряжение фильтра *Бесселя* устанавливается *наиболее быстро*, а у эллиптического фильтра и фильтра *Чебышева* – *наиболее медленно*.

Передаточные функции фильтров могут быть разложены на множители 2-го и 1-го порядка; фильтры высоких порядков физически реализуются каскадным соединением звеньев первого и второго порядков.

Каскадное соединение фильтров 2-го порядка (если порядок четный) или одного звена 1-го порядка и звеньев 2-го порядка (при нечетном порядке) позволяет выполнить фильтр любого порядка. *Общепотребительны фильтры 1+6 порядков*, для специального применения – фильтры 7–10 порядков; фильтры более высоких порядков практически не реализуются, так как параметры далее не улучшаются, а увеличение числа активных элементов добавляет шум, увеличение же числа пассивных элементов увеличивает разброс параметров и требует большего количества корректирующих элементов. *Каскадное проектирование фильтра является самым распространенным методом расчета* активных фильтров по умеренным требованиям. Именно на этом методе основаны все практические расчеты, описываемые в литературе [1, 5, 6].

Выбор такой методики объясняется тем обстоятельством, что в современных системах связи и обработки данных значительная часть обработки сигнала осуществляется с помощью цифровых БИС. Поэтому требования на периферийные аналоговые фильтры часто умеренные, что соответствует, в частности, относительно низкой добротности полюсов. С другой стороны, еще больше снижается минимум потребляемой мощности. В этих условиях каскадное проектирование звеньев второго порядка на одном усилителе представляет почти идеальное решение проблемы фильтрации.

Каскадное проектирование имеет еще преимущество в простоте расчетов, подгонке элементов и настройке фильтра. Число операционных усилителей в звене фильтра второго порядка может изменяться в соответствии с заданными параметрами на фильтр. Так, малоизбирательный (т. е. с низкой добротностью полюсов) фильтр можно строить на одном ОУ, тогда как для обеспечения стабильной работы

звена с более высокой добротностью может потребоваться звено на двух или трех усилителях.

Алгоритм проектирования АФ может быть представлен:

1. Технические требования (например, характеристики: амплитудно-частотная, затухания, фазо-частотная, их параметры).
2. Передаточная функция $H(s)$ (т. е. полюсы и нули функции $H(s)$).
3. Конструирование активного фильтра.

По заданным техническим требованиям на амплитудно-частотную ($|H(j\omega)|$), фазо-частотную ($\varphi(\omega)$) или характеристику затухания можно синтезировать такую передаточную функцию $H(s)$, которая будет удовлетворять этим требованиям. Поскольку определена подходящая функция $H(s)$, далее начинается этап конструирования активного фильтра. Он состоит в выборе схемы активного фильтра, обладающей передаточной функцией $H(s)$. При этом, в зависимости от назначения, на эту схему накладываются дополнительные ограничения (например, минимальная потребляемая мощность – количество ОУ в звене 2-го порядка; минимальная чувствительность – значения коэффициентов A_1 , A_2 и добротности Q и т. д.).

Один из аспектов разработки фильтров связан с получением реализуемой характеристики, аппроксимирующей с некоторой заданной степенью точности идеальную характеристику при наименьших затратах.

Из многочисленных фильтровых звеньев второго порядка (на одном и нескольких усилителях), пригодных для каскадного проектирования, желательно отбирать те, которые лучше всего удовлетворяют требованиям простоты расчета и качеству реализуемых параметров. В частности, можно делать выбор по минимальной мощности, простоте настройки и по умеренным требованиям на допуски используемых элементов.

Следует отметить главное достоинство аналоговых активных фильтров – простота настройки схемы и соответствие реальных характеристик их расчетным значениям.

В настоящее время для проектирования фильтров может быть использована программа *SystemView* фирмы *Elanix* (www.Elanix.com) [21]. Вызвав оператор (функциональный элемент) *Linear Sys/Filters* из группы *Filters/System* библиотеки *Operator*, обозначающий линейный фильтр, можно разными способами задать параметры фильтра:

- непосредственно задать коэффициенты полиномов дробно-рациональной передаточной функции в s -области или z -области;
- задать требования к АЧХ или ФЧХ ($F_c(\omega_c)$), n , A_1 , A_2 , TW (расшифровку параметров см. в разделе «Основные параметры, характеризующие фильтр»).

На основании полученных данных выполняется параметрический синтез. Пользователь может задавать требования различным обра-

зом: в виде графиков, таблиц; далее нужно указать тип фильтра (Bessel, Butterworth, Chebyshev...). В результате синтеза определяется передаточная функция фильтра в z -области:

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}}{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}.$$

На основании полученного выражения рассчитываются различные характеристики: импульсная (Time), АЧХ в дБ (Gain), ФЧХ в градусах (Phase) и т. д.

Силовой электронный преобразователь

Разработка *силовой схемы* электронного преобразователя сводится к *выбору* по справочной литературе *силовых ключей*, тип которых определен при разработке функциональной схемы. *Предварительно* должны быть выполнены *расчеты* среднего значения тока $I_{\text{ср}}$, протекающего через ключ в открытом состоянии при угле регулирования $\alpha \Rightarrow 0$, максимальное значение напряжения U_m , прикладываемого к ключу, находящемуся в закрытом состоянии, и мощность, рассеиваемая в структуре P_{max} . Далее *производится расчет* токов и напряжений в элементах схемы *при различных углах регулирования* α .

Исходные данные для расчета: параметры нагрузки – ток I_H , напряжение U_H , мощность P_H , частота F_H , а также параметры входного источника питания.

Затем *по результатам* расчета строят *временные диаграммы* и выполняют *моделирование* схемы.

Методика расчета силовых схем электронных преобразователей разработана достаточно давно, проверена практикой, приводится в специальной технической литературе и учебниках по преобразовательной технике таких известных авторов, как И. М. Чиженко, В. С. Руденко, В. И. Сенько и др.

Система управления (СУ) многофазным электронным преобразователем

Функции и структуры

Задача любой схемы управления электронным преобразователем в реализации четкой последовательности включения и выключения силовых ключей.

Характеристики и параметры СУ определяются схемой и режимом работы преобразователя, а также выбранными законами регулирования, характером нагрузки и видом ее изменения, стабильностью питающей сети. Способов регулирования выходного напряжения всего три: фазо-импульсный, широтно-импульсный и частотно-импульсный [18]. Фазо-импульсный – самый первый, классический, подроб-

но описанный в литературе способ управления: импульс управления сдвинут на угол α по отношению к началу периода сетевого напряжения. Эти системы когда-то реализовались только на аналоговых элементах. Функциональные блоки такой системы: генератор линейно изменяющегося напряжения, работающий синхронно с частотой сети, совместно с компаратором формирующий угол задержки α , усилители – формирователи импульсов управления силовыми тиристорами. Такие системы имеют разработанную методику расчета (в настоящее время по этой методике можно создавать как цифровые – на жесткой логике, так и программные – на микроконтроллерах системы).

Широтно-импульсный способ регулирования выходного напряжения предусматривает изменение длительности управляющего импульса, поддерживающего силовой ключ в открытом состоянии при неизменной частоте следования импульсов. Чаще всего реализуется в автономных инверторах, импульсных преобразователях постоянно-го напряжения.

Существует также частотно-импульсный способ регулирования: длительность импульса постоянна, меняется частота их следования, этот способ в прошлом не нашел широкого применения. В настоящее время с увеличением числа накопительных высокочастотных трансформаторов и появлением повышающих стабилизаторов (корректоров формы потребляемого тока) с высокочастотными накопительными дросселями этот способ регулирования вспомнили основательно. Ведь индуктивность нельзя заряжать малой энергией (она просто ничего не отдаст) и чрезмерный ток, насыщающий индуктивность, вреден (большая часть энергии идет в потери), таким образом целесообразно задать время импульса (заряжать индуктивность оптимальной для нее энергией), а менять паузы между импульсами (только помнить, что индуктивность и накапливает и отдает энергию не мгновенно, а за определенное время).

С увеличением сложности обслуживаемых нагрузок (особенно многообразием их режимов), а также с ростом возможностей управляющих систем (вместо 10 транзисторов – один микроконтроллер, не справится один – разделим функции, поставим несколько) приходят комбинированные способы. Стремясь получить большую надежность, высокий КПД, для известной нагрузки под каждый режим ее работы сначала теоретически, а затем экспериментально подбирают свой закон регулирования, беря все лучшее из трех классических способов.

Цифровые импульсные системы находят в последнее время широкое применение, в данном разделе рассматривается методика проектирования на дискретных цифровых элементах СУ с жестким алгоритмом переключения во времени работающих в ключевом режиме силовых приборов. Основные функциональные узлы системы управления (СУ) преобразователями: генератор импульсов (ГИ), задающий



частоту переключения силовых приборов (f_n); цифровой автомат (ЦА), реализующий алгоритм работы устройства управления; импульсный усилитель мощности (ИУМ), формирующий сигналы заданной мощности и длительности для управления силовыми переключателями.

Генератор импульсов (ГИ) выполняется на цифровых интегральных микросхемах (ИМС), частота его колебаний может быть стабилизирована кварцевым резонатором. В зависимости от назначения преобразователя, например для управляемых выпрямителей, как говорилось выше, работа ГИ может синхронизироваться с частотой силовой сети, для СУ автономных инверторов ГИ могут работать в автоколебательном режиме.

Импульсный усилитель (ИУМ) [1, 5, 8] может быть выполнен на транзисторах по схеме с общим эмиттером, у которого связь с входной цепью управляемого прибора трансформаторная. Такая схема применяется при параллельном включении двух или более силовых приборов. Схема ИУМ на эмиттерном повторителе с непосредственной связью применяется при управлении одним силовым ключом. Все чаще в роли ИУМ выступают специализированные микросхемы – драйверы.

Исходными данными для проектирования ИУМ являются параметры цепи управления силового ключа.

Для симисторов и тиристоров

статические:

- входная мощность (*отпирающие* ток: 0,1–0,5 А и напряжение: 5–10 В);

динамические:

- время включения ($t_{\text{вкл}} \leq 5\text{--}20$ мкс);
- время выключения ($t_{\text{выкл}} \leq 20\text{--}300$ мкс).

Для биполярных транзисторов

статические:

- ток нагрузки (ток коллектора (или эмиттера)) транзистора;
- коэффициент передачи тока базы $h_{21\beta}$ (β);

динамические:

- внутренние емкости переходов (коллекторного и эмиттерного),
- время рассасывания зарядов в базе;
- граничная частота $f_{\text{гр}}$ ($f_{h_{21\beta}}$, $f_{h_{21\alpha}}$).

Статические параметры определяют мощность импульса, который формирует ИУМ, а динамические определяют время действия импульса, его длительность.

Для надежного включения тиристоров (симисторов) длительность импульса управления должна быть в 1,5–2 раза больше их времени включения $t_{\text{вкл}}$, при высокой скорости нарастания импульса (крутом

переднем фронте). Для транзисторов длительность импульса управления должна быть равна времени их открытого состояния.

Если непосредственное подключение выполняется через оптрон, то соответственно исходными данными для расчета ИУМ будут параметры входной цепи оптрона.

Если к силовому ключу выпускается драйвер, то он выполняет, как говорилось выше, функции усилителя мощности и устройства гальванической развязки между схемой управления и силовым блоком. Но нужно помнить, что кроме логического импульса управления на драйвер должно быть подано напряжение питания [12, 18].

Основным узлом системы управления является маломощное цифровое устройство (цифровой автомат – ЦА), определяющее порядок переключения каждого из ключей в соответствии с алгоритмом работы силовой схемы. Главной задачей при проектировании ЦА является составление четкого формального алгоритма его работы в виде временных диаграмм и таблицы переходов. Таблица переходов отражает в каждый фиксированный момент времени состояние ключа (замкнут – «1»; разомкнут – «0»). Дискретизация по времени определяется: частотой переключения силовых приборов $f_{\text{п}}$, условиями работы системы и временными параметрами элементной базы, на которой выполняется ЦА.

Далее процесс проектирования ЦА, выполняемого на жесткой логике [1, 9–11], сводится к двум этапам:

- абстрактному синтезу (составлению на ЭВМ математической модели ЦА);
- структурному синтезу реализации полученной модели на конкретной элементной базе.

Элементной базой таких автоматов может быть, в зависимости от сложности и помехоустойчивости, как простейшая дискретная логика: триггеры, схемы и-не, или-не; так и логика малой интеграции – регистры, счетчики, дешифраторы, ПЗУ. Применение таких автоматов очень удобно, так как ЦА выполняется на недорогой общедоступной элементной базе и, следовательно, является ремонтно-пригодным в любых условиях эксплуатации. ЦА занимает малый объем, так как количество ячеек памяти определяется количеством силовых ключей, а логическое устройство, реализующее ОС, при грамотно выполненном абстрактном синтезе (при использовании *машинного* метода проектирования) также представляет собой простую компактную схему.

Кроме того, полученный в результате *абстрактного синтеза алгоритм* можно с успехом реализовать и на программируемых интегральных микросхемах ПЛИС [19] и на микроконтроллерах [22–27].

При использовании ПЛИС фирмы Xilinx данные, полученные в результате синтеза, могут быть введены в программу SystemView фирмы Elanix (www.Elanix.com) (средство системного проектирова-

ния радиозлектронных устройств) [21], которая передаст эти данные специализированной программе синтеза ПЛИС Core Generator, где заданный алгоритм будет реализован. Данные можно вводить в виде схемы, полученной после структурного синтеза, набирая элементы, используя библиотеку Logic DSP, и затем передать их конкретной микросхеме, выбрав ее в библиотеке Xilinx FPGA [19].

Из всего многообразия микропроцессоров сложности дипломного проекта отвечают восьмиразрядные микропроцессоры [22–27].

В настоящее время абсолютное первенство среди микропроцессоров (кроме процессоров специального применения) завоевала Гарвардская RISC-архитектура, позволяющая выполнять большинство команд за 1 такт.

Микропроцессоры PIC16Fxxx Microchip Technology [22] наиболее употребительные на сегодняшнем рынке. Это набор нескольких семейств от младших к старшим с примерно одной архитектурой и похожей системой команд (при переходе от семейства к семейству добавляются или изымаются 2–4 команды) и расширяющейся периферией. Они относятся к гарвардской архитектуре с полным разделением не только пространств памяти программ и данных, но и шин доступа к ним. Память программ поделена на страницы по 512, 1024 или 2048 ячеек. Память данных разделена на банки от 2 кБ до 8 кБ в зависимости от конкретного семейства. В книгах и системе Internet на них есть большое число отлаженных блоков программ. Фирма Microchip Technology создала среду программирования, отладки и эмуляции всех своих микроконтроллеров MpLab [22]. Этот программный комплекс позволяет записывать тексты программ на языке Ассемблер (создавая проекты), транслировать и отлаживать полученный код. Отладчик – он же эмулятор в MpLab может выполнять программу по шагам с подсчетом числа тактов, при этом показывая состояния всех входов и выходов всех внутренних модулей (память, регистры, таймеры, АЦП ...) микроконтроллера. Эмулятор может выводить выходные сигналы – результаты моделирования в текстовый файл, эмулировать входные сигналы (внешние воздействия), задавая их время прихода, эмулировать прихождение внешних прерываний. Эмулятор в каждый момент времени, точно зная состояние всего контроллера, может эмулировать внешнее воздействие при достижении определенного состояния (воздействием может быть изменение содержимого любой ячейки памяти, данных, регистра, воздействие внешнего прерывания...). Файлов внешних воздействий можно написать множество, в каждой эмуляции в равной мере учитываются только подключенные. Язык Ассемблер мощен и гибок: в нем и многофайловость проекта, макросы, и библиотеки подпрограмм, а также многое другое.

Сторонней фирмой MicroEngineering Labs для Microchip Technology выпускается вариант управляющего алгоритмического языка

Бейсик. Он хоть и платный, но достаточно мощный. Заявлена программная поддержка всех внешних интерфейсов, включая USB.

Подробная работа в Mplab описана в [22].

Микропроцессоры AVR фирмы ATMEL – это наиболее полная группа из трех семейств (Classic, Tiny, Mega) [23–27]. Все семейства объединены одной *системой команд*, одной *внутренней структурой*, с *полной переносимостью программ* от младших к старшим моделям. Популярность микроконтроллеров AVR постоянно увеличивается. Не последнюю роль в этом играет соотношение показателей «цена/быстродействие/энергопотребление», являющееся одним из лучших на рынке 8-разрядных микроконтроллеров. Кроме того, постоянно растет число выпускаемых сторонними производителями разнообразных программных и аппаратных средств поддержки разработок устройств на их основе. Все это позволяет говорить о микроконтроллерах AVR как о новом индустриальном стандарте среди 8-разрядных микроконтроллеров общего применения. Как и положено для гарвардской архитектуры, пространство команд отделено от пространства данных. Но в отличие от других контроллеров оно линейно, без разделения на страницы. У микроконтроллеров AVR также линейно пространство статического ОЗУ (SRAM) и энергонезависимой ЭСППЗУ (EEPROM) памяти. Обращения ко всем внутренним устройствам микроконтроллера идут как к регистрам ввода-вывода по мнемоническим именам. Все AVR имеют 32 регистра общего назначения, каждый из которых может использоваться как операнд приемник (таким образом у AVR нет выделенного регистра аккумулятора), поэтому стандартные для других процессоров: загрузка первого операнда в аккумулятор и выгрузка результата из аккумулятора, не нужны; эта особенность сильно сокращает программный код, особенно для подпрограмм обработки прерываний.

Семейство Classic [23] в настоящее время постепенно снимается с производства, но каждая снимаемая микросхема имеет более мощный аналог в семействе Mega [25].

Семейство Tiny [25] – крайне дешевые маломощные микроконтроллеры, которые могут применяться в интеллектуальных датчиках или как дополнительный контроллер блока индикаторов и клавиатуры. Они содержат 4-канальный АЦП разрядностью 12 бит, 1 или 2 килобайта программной FLASH-памяти, аналоговый компаратор, внутренний таймер, 6 или 19 линий ввода-вывода. Имеют возможность программно отрабатывать простейшие интерфейсы I-button или I2C. В настоящее время семейство растет.

Семейство Mega [25], наиболее полное семейство микроконтроллеров (реализует все аналоги семейства Classic). Любой из контроллеров содержит АЦП, внутренний таймер, SPI, UART, I2C интерфейсы. В зависимости от модели имеет: FLASH-память программ от 4 до 128 килобайт, память данных SRAM (ОЗУ) от 1 до 4 килобайт.



EEPROM (электрически стираемая), т. е. энергонезависимая память от 512 байт до 2 Кбайт. Кроме того, имеется возможность обращаться к внешнему ОЗУ как к продолжению пространства памяти (доводя пространство памяти внутренней плюс внешней до 64 килобайт). Но и это не все: по интерфейсу I2C возможно подключение энергонезависимых внешних часов реального времени со встроенным ОЗУ или внешнего ОЗУ до 256 килобайт в одной микросхеме. По интерфейсу SPI возможно подключение внешних модулей памяти Mascomedia flash объемом от 2 мегабайт до 1 гигабайта, при этом высшие модели контроллеров могут работать в режиме поддержания файловой системы, что дает возможность непосредственно передавать результаты на ЭВМ.

Система прерываний содержит от 10 до 24 внутренних прерываний и от 2 до 8 внешних. Каналов АЦП от 4 до 8 с разрядностью 12 бит. Как положительные качества следует отметить наличие одного или двух как 8-, так и 16-разрядных таймер-счетчиков с режимами подсчета длительности интервала, выработка внутреннего прерывания через заданный интервал времени, подсчет внешних событий, ШИМ генератор.

Фирма ATMEL создала и развивает среду программирования AVR studio [24], которая включает в себя редактор текста программы, ассемблер, симулятор отладки (который дает возможность вводить входные сигналы не вручную, а через файл, аналогично и все выходные сигналы можно записать в файл). AVR студия может физически программировать все контроллеры через интерфейс JTAG. AVR студия полностью бесплатна и распространяется на рекламных дисках или через Internet: www.atmel.com, www.atmel.ru.

Помимо этого фирма ATMEL создает и развивает дополнительные бесплатные программные продукты AVR Development Tools version – отдельный отладчик, работающий под Windows 3.11. CodeVision AVR – собственный компилятор Си. GNU C compiler for Atmel AVR – открытый – с возможностью доработки и участия в разработке проекта языка Си для AVR.

Для AVR сторонними фирмами выпускаются:

Фирмой ImageCraft Creations Inc – Вариант Си – платный.

Фирмой microEngineering Labs – Вариант Бейсик – платный.

Фирмой E-LAB Computers – Вариант Pascal – платный для крупных разработок.

Подробное описание микроконтроллеров AVR семейства дано в Classic [23].

Подробное описание микроконтроллеров AVR семейств Tiny и Mega дано в [25].

Описание работы с AVR studio версий 4.xx дано в [24].

И на момент написания данного раздела заявлена среда внутрисхемной эмуляции фирмы Electronics Review www.labcentre.co.uk, на

основе разработанного в университете Беркли программного ядра SPICE 3f5. Внешне похожая на программу моделирования Electronics Workbench программная среда позволяет собирать на экране схемы почти так же, как и в системе Micro-Cap, но включать в них микроконтроллеры. Для микроконтроллера задается частота внешнего или внутреннего генератора и загружается исполняемый код программы. Система эмулирует схему по временным шагам, на каждом шаге можно остановиться и просмотреть не только все напряжения и токи схемы (что стандартно), но и содержимое всех внутренних регистров и всей памяти микроконтроллера. Фирмой заявлено, что поддерживаются PIC16, PIC18 Microchip Technology, все AVR фирмы ATMEL и некоторые другие.

Список литературы

1. *Лачин В. И., Савелов Н. С.* Электроника: Учеб. пособие. 5-е изд., пререраб. и доп. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 704 с.
2. *Быстров Ю. А., Великсон Я. М.* и др. Электроника: Справочная книга / Под ред. Быстрова Ю. А. – СПб.: Энергоатомиздат, 1996. – 544 с.
3. *Опадчий Ю. Ф., Глудкин О. П., Гуров А. М.* Аналоговая и цифровая электроника (полный курс): Учебник для вузов / Под ред. О.П. Глудкина – М: Горячая линия – Телеком, 2005. – 768 с. : ил.
4. *Гальперин М. В.* Электронная техника: Учебник. 2-е изд., исп. и доп. – М.: Форум: ИНФРА-М, 2005 г. 325 с.: ил.
5. *Титце У., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника/ Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
6. *Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Г.* Справочник по активным фильтрам/ Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.
7. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники: В 3-х томах. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005.
8. *Бойко В. И.* и др. Схемотехника электронных схем. Аналоговые и импульсные устройства. – СПб.: БХВ – Петербург, 2004. – 496 с.: ил.
9. *Угрюмов Е. П.* Цифровая схемотехника: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., пререраб. и доп. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 800 с.: ил.
10. *Уилкинсон Б.* Основы проектирования цифровых схем / Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 320 с.: ил.
11. *Нефедов Б. Л., Пирогов Л. Г.* Практическое пособие по цифровой схемотехнике. – М.: Мир, 2004. – 408 с.: ил.
12. *Силовые полупроводниковые приборы/ Пер. с англ.; Под ред. В.В. Токарева.* С разрешения фирмы International Rectifier. – Воронеж, 1995.

13. Быстров Ю. А., Великсон Я. М. и др. Электроника: Справочная книга / Под ред. Ю. А. Быстрова – СПб.: Энергоатомиздат, 1996. – 544 с.
14. Федорков В. Т., Телец В. А., Дегтяренко В. Л. Микроэлектронные цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи. – М.: Радио и связь, 1984. – 120 с.
15. Марцинкявичюс А. К., Багданскис Э. К., Пошюнас Р. Л. и др. Быстродействующие интегральные микросхемы ЦАП и АЦП и измерение их параметров. – М.: Радио и связь, 1988. – 224 с.
16. Никамин В. А. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи: Справочник. – СПб.: КОРОНА принт, М.: Алтекс-А, 2003. – 224 с.: ил.
17. Кауфман М., Сидман А. Справочное руководство по расчетам схем в электронике. В 2 т./ Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
18. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2001. – 384 с.
19. Кузилин М. О., Кнышев Д. А., Зотов В. Ю. Современные семейства ПЛИС фирмы Xilinx: Справочное пособие. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 440 с.: ил.
20. Соловьев В. В. Проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002.
21. Радзевиг В. Д., Лаврентьев Г. В., Знатин И. Л. System View – средство системного проектирования радиоэлектронных устройств / Под ред. В.Д. Радзевига. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 352 с.: ил.
22. Яценков В.С. Микроконтроллеры Microchip →. Практическое руководство. 2-е изд. испр. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 280 с.: ил.
23. Евстифеев А. В. Микроконтроллеры AVR семейства Classic фирмы «ATMEL». – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. – 288 с.: ил.
24. Баранов В. Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – 288 с.: ил.
25. Евстифеев А. В. Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы ATMEL. 2-е изд., стер. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 560 с.
26. Голубцов М. С., Кириченко А. В. Микроконтроллеры AVR: от простого к сложному. Изд 2-е, испр. и доп. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 304 с.
27. Белов Ф. В. Конструирование устройств на микроконтроллерах. – СПб.: Наука и Техника, 2005. – 256 с.: ил.

28. Источники вторичного электропитания: Справочное пособие/
Под ред. Ю.И. Конева. – М.: Радио и связь, 1983, 1992. – 279 с.
29. Шило В. В. Популярныe микросхемы КМОП: Справочник (Мас-
совая радиобиблиотека; Вып. 1246).
30. Разевиг В. Д. Система схемотехнического моделирования
MICRO-CAP5. – М.: ТОО «САЛОН», 1997. – 272 с.
31. Разевиг В. Д. Система схемотехнического моделирования MICRO-
CAP6. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 344 с.: ил.
32. Разевиг В. Д. Схемотехническое моделирование с помощью
MICRO-CAP7. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 292 с.

15

СРЕДСТВА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

15.1. Схемотехническое моделирование в дипломном проектировании

Мощным и очень эффективным средством проектирования является схемотехническое моделирование [1, 2]. По существу схемотехническое моделирование представляет собой математическое моделирование устройства, описанного схемой. Обычно используются электрические принципиальные схемы. Но применяются также и функциональные схемы.

Квалифицированное использование схемотехнического моделирования в дипломном проектировании резко сокращает затраты времени на получение количественных результатов, необходимых для принятия проектных решений. Если такие результаты нужно получить в определенном объеме, то моделирование значительно сократит сроки выполнения соответствующих этапов проектирования. Если же проектант ориентируется на определенный ресурс времени, то моделирование позволяет резко увеличить число прорабатываемых вариантов проекта и найти наилучший вариант. Это преимущество моделирования особенно ярко проявляется при автоматизированном синтезе.

Схемотехническое моделирование самым существенным образом повышает достоверность результатов, представляемых и защищаемых автором дипломного проекта. Современные программные системы дают высокоточные результаты моделирования. Немаловажным является тот факт, что эти системы позволяют документировать результаты моделирования. Настоятельно рекомендуется помещать наиболее важные информативные и убедительные результаты (графики, диаграммы, таблицы и др.) в пояснительную записку или графическую часть дипломного проекта. Эти данные окажут существенную помощь автору проекта в отстаивании своих выводов на защите дипломного проекта.

Вообще схемотехническое моделирование может рассматриваться как средство доказательства работоспособности спроектированного устройства. Конечно, наиболее убедительным аргументом в этом отношении являются результаты испытаний реального образца устрой-

ства. Но и результаты моделирования уже сами по себе вполне весомый аргумент.

Очень важна роль схемотехнического моделирования при глубоком изучении принципа действия рассматриваемого объекта, осознании его свойств и характерных особенностей. Изучение принципиальной или функциональной схемы, а также описания устройства или системы является необходимым, но не всегда достаточным условием для понимания сути технических решений. И здесь неоценимую помощь может оказать схемотехническое моделирование. Программные моделирующие системы с высокой точностью имитируют функционирующий объект и показывают его реакцию на все изменения в схеме. Поэтому вдумчивая работа с этими системами позволяет хорошо понять суть процессов, происходящих в объекте, и осознать влияние на эти процессы его параметров.

Полученные в процессе схемотехнического моделирования глубокие знания помогают найти наилучшие технические решения и давать убедительные ответы во время защиты дипломного проекта.

В настоящее время особая важная роль схемотехнического моделирования является общепризнанной. Уровень как учебных, так и производственных проектов прямо определяется уровнем используемых моделирующихся программных систем и степенью подготовки проектанта в области их применения. Поэтому рекомендуется включать в дипломный проект, который является квалификационной работой, раздел, посвященный схемотехническому моделированию (при условии, что оно сыграло важную роль при проектировании). Это позволяет автору проекта продемонстрировать свою подготовку в области моделирования.

Таким образом, использование схемотехнического моделирования в дипломном проектировании:

- позволяет находить наилучшие технические решения с минимально возможными затратами времени;
- может дать убедительные аргументы, подтверждающие работоспособность спроектированного устройства или системы;
- помогает осознать суть технических решений;
- демонстрирует подготовку автора проекта в области математического моделирования.

15.2. Основные возможности программных систем схемотехнического моделирования и рекомендации по их выбору

В настоящее время для схемотехнического моделирования широко используются программные системы Micro-Cap [3, 4], Electronics

Workbench [8, 9], Design Center [5], DesignLab [6], OrCAD [7] и др. В системах Design Center, DesignLab и OrCAD используется широко известная программа моделирования электронных схем PSpice.

Некоторые из программных систем (Design Center, DesignLab, OrCAD) обеспечивают кроме схемотехнического моделирования и автоматизированное проектирование печатных плат. Поэтому такие системы называют также *системами сквозного проектирования*.

Для разработки цифровых устройств на основе программируемых логических интегральных схем (интегральных микросхем с программируемой или репрограммируемой структурой) кроме систем сквозного проектирования широко используются специализированные программные системы автоматизированного проектирования (MAX+PLUS II – для разработки устройств на основе программируемых микросхем фирмы Altera, Foundation – для разработки устройств на основе микросхем фирмы Xilinx и др.).

Программные системы схемотехнического моделирования моделируют аналоговые, цифровые и смешанные схемы (состоящие из аналоговых и цифровых устройств). При этом в схемах допускается наличие обратных связей. При моделировании определяются как токи и напряжения, так и уровни логических сигналов.

Электрическая принципиальная схема (и никакая другая) настолько полно и детально характеризует разрабатываемое устройство, что моделирование на ее основе очень часто дает наиболее ценную информацию, необходимую для принятия проектных решений.

Большую помощь разработчику может оказать и моделирование на основе функциональной схемы.

Моделирование на основе принципиальной схемы позволяет определить:

- начальный (стационарный) режим работы устройства, т. е. получить значения токов и напряжений, а также уровни логических сигналов на выходах цифровых устройств при подключенных источниках питания и неизменных входных сигналах;
- переходный процесс (динамический режим) в устройстве при практически любом воздействии и практически любых начальных условиях;
- частотные свойства устройства в очень широком диапазоне частот;
- шумовые свойства устройства;
- влияние изменения параметров элементов схемы, источников питания, источников входных сигналов, а также температуры на режим работы устройства и его параметры (анализ чувствительности);
- наилучшее соотношение параметров элементов устройства, обеспечивающее экстремум целевой функции, заданной пользователем (параметрический синтез).

Программные системы оснащены совершенными графическими редакторами (редакторами схем), обеспечивающими быстрый ввод принципиальных и функциональных схем. Такие системы имеют развитые библиотеки моделей элементов электронных схем. Все это значительно упрощает моделирование.

Кроме схемотехнического моделирования программные системы выполняют спектральный анализ сигналов, разлагая их в усеченные ряды Фурье, а также статистическую обработку результатов значительного количества численных экспериментов при изменении параметров элементов схемы в соответствии с выбранным законом распределения случайных величин.

В составе систем моделирования имеются программы расчета параметров математических моделей элементов схем. Для выполнения этого расчета пользователь должен осуществить ввод определенных справочных данных элемента.

Имеется возможность создавать новые и корректировать уже имеющиеся условные графические обозначения элементов схем. Для этих целей используются программы-редакторы графических символов.

Современные системы схемотехнического моделирования позволяют также разрабатывать устройства цифровой электроники на базе программируемых логических интегральных схем.

К примеру, программная система DesignLab обеспечивает разработку цифровых устройств на основе программируемых микросхем, производимых фирмами Altera, Xilinx, AMD, Atmel, Motorola и др.

Программные системы включают в себя специализированные программы автоматизированного структурного синтеза пассивных и активных фильтров.

Программные системы сквозного проектирования позволяют подготовить проект электронного устройства на основе печатной платы. Обычно оно вновь моделируется на схемотехническом уровне, но уже с учетом влияния на его работу печатной платы. При этом величины токов и напряжений определяются не только параметрами элементов схемы, но и значениями паразитных индуктивностей, емкостей и сопротивлений проводников печатной платы. Результаты этого моделирования используются для корректировки принципиальной схемы и печатной платы.

Учет особенностей печатной платы при схемотехническом моделировании позволяет существенно улучшить качество проекта. При этом обеспечивается хорошее соответствие значений параметров устройства, определяемых в результате моделирования, и значений параметров реального электронного устройства, изготовленного по разработанному проекту.

После разработки печатной платы программная система сквозного проектирования может сформировать файлы, управляющие рабо-

той графопостроителей и обеспечивающие изготовление фотошаблонов, а также файлы, управляющие работой сверлильных станков с числовым программным управлением, использующихся при изготовлении печатных плат.

Данные, полученные системой сквозного проектирования, можно передавать в другие системы, использующиеся для разработки конструкторской документации, а также преобразовывать в другие форматы, если этого требует технологическое оборудование.

Изложенное показывает, что современные программные системы, обладающие широкими функциональными возможностями, позволяют успешно решать многие очень важные задачи, возникающие при проектировании.

Дадим рекомендации по выбору программной системы схемотехнического моделирования.

Система Electronics Workbench характерна тем, что использует изображения устройств, применяющихся при натуральных экспериментах (осциллографов, генераторов, логических анализаторов и др.). Это делает моделирование особенно наглядным. Она не требует значительного времени для изучения. Содержит простейшую программу разработки печатных плат. Рекомендуется для проектирования несложных устройств.

Система Micro-Cap по подходу к организации моделирования и представлению полученных данных близка к наиболее сложным профессиональным системам и вместе с тем проста в освоении. Она кроме многих других функций обеспечивает синтез аналоговых пассивных и активных фильтров. Может использоваться совместно с программами разработки печатных плат. Рекомендуется пользователям, не имеющим большого опыта работы с системами схемотехнического моделирования, для проектирования достаточно сложных устройств.

Системы схемотехнического моделирования и сквозного проектирования Design Center, DesignLab и OrCAD являются сложными мощными профессиональными системами. Они используются на многих предприятиях России. Системы DesignLab и OrCAD позволяют кроме прочего моделировать программируемые логические интегральные микросхемы, производимые многими фирмами, совместно с другими цифровыми и аналоговыми элементами. Однако освоение этих систем может потребовать значительных затрат времени. Рекомендуется опытным пользователям при проектировании наиболее сложных устройств и систем.

Специализированные системы автоматизированного проектирования устройств на основе программируемых логических интегральных схем MAX+PLUS II, Foundation и др. рекомендуется использовать в случае, когда в качестве элементной базы выбраны микросхемы со-

ответствующих фирм и отсутствуют сложные проблемы согласования спроектированных и других цифровых и аналоговых устройств.

15.3. Рекомендации по выбору объектов схемотехнического моделирования

Схемотехническое моделирование дает особенно полезные результаты и не требует чрезмерных затрат времени только в случае продуманного выбора объектов моделирования.

Далеко не всегда рациональным оказывается очевидный на первый взгляд подход, когда в качестве объекта моделирования выбирается вся электронная часть разрабатываемого устройства.

Часто наибольшую пользу дает моделирование отдельных фрагментов (узлов) проектируемой электронной схемы, дополненное моделированием объектов, не разрабатываемых в рамках дипломного проекта, в том числе и тех, которые не описаны электрическими принципиальными или функциональными схемами.

Дадим соответствующие пояснения.

При разработке системы управления, контроля, защиты и диагностики одной из наиболее важных задач является всесторонний учет свойств и самой системы, и того исходного объекта, для которого проектируется данная система.

К примеру, при разработке системы управления силового преобразователя на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором, который используется для питания электродвигателя, очень серьезной проблемой является совокупный учет свойств системы управления, транзисторов, преобразователя и электродвигателя. Без этого учета практически невозможно спроектировать не только конкурентоспособную, но и просто работоспособную систему управления. Конечно, здесь большую помощь может оказать длительный опыт проектирования систем управления для подобных исходных объектов. Но и при его наличии совместное схемотехническое моделирование транзисторного преобразователя, нагруженного на электродвигатель, и его системы управления поможет оптимизировать систему управления (а возможно, и схему преобразователя). Если же такого опыта нет, то схемотехническое моделирование объекта управления, взаимодействующего с управляющей системой, практически незаменимо.

Следует учитывать, что электрическими схемами могут быть описаны объекты различной физической природы. Схемотехническое моделирование разнородных объектов основано на подобию дифференциальных уравнений, описывающих различные динамические процессы. На схемотехническом уровне можно моделировать меха-

нические, гидродинамические, тепловые, диффузионные и другие процессы. Например, при схемотехническом моделировании устройств сильноточной электроники могут быть отражены процессы нагрева и охлаждения силовых электронных приборов.

Во многих случаях перед схемотехническим моделированием целесообразно осуществить корректировку принципиальных схем разрабатываемого устройства и объекта управления, контроля, защиты или диагностики.

Рациональная корректировка может значительно упростить ввод схемы, сократить время моделирования и уменьшить погрешность получаемых результатов. Иногда только корректировка делает моделирование возможным.

Основная задача при корректировке схемы состоит в выделении фрагментов и элементов, отражающих наиболее важные в отношении целей моделирования свойства и особенности рассматриваемого устройства и в исключении фрагментов и элементов, несущественных в отношении этих целей.

К примеру, из электрической принципиальной схемы следует исключить электрические соединители (электрические разъемы), если не ставится цель исследовать влияние их паразитных емкостей и сопротивлений на работу схемы (во многих схемах эти параметры практически не оказывают влияния на электрические процессы в схеме).

Как правило, не дает заметного положительного эффекта использование при моделировании стандартных, хорошо изученных и многократно испытанных фрагментов электронных схем, работающих в стандартных режимах и соединенных типовыми, рекомендованными линиями связи.

Пусть, к примеру, в разрабатываемой системе контроля используются стандартные устройства: датчик, линия связи и 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь. При моделировании остальной части системы указанные устройства могут быть заменены 16-разрядным источником (генератором) цифровых сигналов, который будет формировать сигналы, заданные пользователем.

Наибольшую пользу схемотехническое моделирование может дать при анализе схем или фрагментов, в которых протекают наиболее сложные, различные по характеру, плохо поддающиеся прогнозу процессы. Такие процессы, в частности, имеют место в объектах, описываемых нелинейными системами обыкновенных дифференциальных уравнений высокого порядка. Отметим, что далеко не всегда такие объекты состоят из особенно большого числа элементов.

Приведем примеры электронных устройств, схемотехническое моделирование которых может быть особенно полезным:

- формирователи импульсов управления для силовых полупроводниковых приборов;

- разнообразные усилители электрических сигналов на различной элементной базе;
- управляемые и неуправляемые выпрямители;
- инверторы и регуляторы напряжения на тиристорах и силовых транзисторах;
- вторичные источники питания с компенсационными и импульсными стабилизаторами напряжения;
- пассивные и активные, слаботочные и силовые фильтры;
- генераторы гармонических колебаний и импульсных сигналов различной формы;
- цифровые и смешанные схемы на основе интегральных микросхем малой степени интеграции;
- цифровые устройства на основе программируемых логических интегральных схем;
- цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи.

Приведем примеры процессов различной физической природы, которые могут быть отражены при схемотехническом моделировании:

- тепловые процессы в силовых полупроводниковых приборах;
- электромагнитные процессы в устройствах для индукционного нагрева;
- электромеханические процессы в электродвигателях.

15.4. Рекомендации по выполнению схемотехнического моделирования

Схемотехническое моделирование подобно экспериментальному исследованию макетного образца устройства (которое ранее было практически безальтернативным способом проверки идей разработчика), хотя при моделировании ставят численные эксперименты, а при макетных испытаниях экспериментируют с реальным объектом.

Перед моделированием, как и перед натурными испытаниями, необходимо определить конкретные цели исследований, общий план действий и детальный порядок выполнения отдельных экспериментов. Без этого трудно надеяться, что моделирование, как и испытание реального устройства, даст действительно полезные результаты.

Проектанту, имеющему опыт натурных испытаний, рекомендуется обращаться к нему во время моделирования, так как это дисциплинирует и помогает правильно организовать моделирование.

Естественно, моделирование имеет и специфические особенности в сравнении с испытаниями макетов устройств. С одной стороны, оно предоставляет исследователю практически неограниченные возмож-



ности в отношении элементной базы, входных сигналов и определения значений всех необходимых пользователю величин (токов, напряжений, периодов колебаний и др.), а также гарантирует от аварий. Но, с другой стороны, оно требует наличия знаний в области математических моделей элементов и методов математического моделирования, так как результаты численных экспериментов прямо зависят от использующихся моделей и методов.

Одним из наиболее полезных принципов моделирования, способным существенно сократить затраты времени пользователя, является поэтапный переход от менее сложных к более сложным экспериментам.

В соответствии с этим принципом рекомендуется вначале разделить сложную схему на достаточно простые фрагменты, о работе которых у пользователя имеется ясное представление, и добиться для каждого из них правильных результатов моделирования при простых воздействиях. Только после этого указанные фрагменты можно объединить в сложную схему, которая должна моделироваться как единое целое.

Пусть, к примеру, преобразователь частоты содержит управляемый выпрямитель и инвертор. Тогда можно вначале отдельно отладить модель управляемого выпрямителя с резистивной нагрузкой, а также модель инвертора, питаемого от источника постоянного напряжения.

Если при моделировании отдельных фрагментов будут получены хорошие результаты, то моделирование всей схемы будет значительно облегчено. Если пользователь сразу же приступает к моделированию сложной схемы, то велика вероятность чрезмерных затрат времени на поиск ошибок, корректировку схемы и настройку программной системы.

Моделирование как отдельных фрагментов, так и всей схемы во многих случаях целесообразно начинать с их наиболее простых вариантов, еще обеспечивающих выполнение заданных функций. Упрощение может быть достигнуто исключением из схемы элементов, являющихся второстепенными в отношении цели моделирования, а также использованием более простых математических моделей элементов.

К примеру, при моделировании инвертора вначале могут не использоваться RC -цепочки, предотвращающие перенапряжения силовых полупроводниковых приборов, и применяться простые варианты математических моделей этих приборов (в наиболее простом варианте такими моделями могут быть ключи).

Поэтапное моделирование кроме сокращения затрат времени способствует глубокому пониманию принципа действия устройства.

Часто наиболее информативные результаты как для аналоговых, так и для цифровых схем дает моделирование динамических режи-

мов. Однако при его выполнении могут возникнуть серьезные проблемы, обусловленные жесткостью системы обыкновенных дифференциальных уравнений, характеризующей схему.

Если при моделировании учитываются процессы, протекающие с разной степенью интенсивности, что обычно соответствует использованию подробных принципиальных схем и детализированных математических моделей элементов, то обычно система дифференциальных уравнений оказывается жесткой.

Основная проблема при моделировании схемы, описываемой жесткой системой, состоит в том, что программа не может развить шаг численного решения, существенно превосходящий наименьшую постоянную времени, характеризующую схему. Из-за этого моделирование переходного процесса на значительном отрезке времени требует большого числа шагов и значительных затрат машинного времени, а погрешность моделирования может оказаться чрезмерно большой. Иногда моделирование вообще оказывается невозможным.

В таком случае подробную схему и детализированные модели элементов рекомендуется использовать только при моделировании динамических режимов на малых отрезках времени, при анализе быстротекущих процессов. Такие процессы, в частности, имеют место при переключениях транзисторов, работающих в ключевом режиме.

Перед анализом переходного процесса на большом отрезке времени схему целесообразно упростить с целью уменьшения жесткости соответствующей системы дифференциальных уравнений. Часто это может быть достигнуто исключением из схемы конденсаторов с малыми емкостями и катушек индуктивности с малыми индуктивностями, а также переходом на менее сложные математические модели элементов схем.

Пользователь должен быть готовым к тому, что программная система моделирования оказывается не в состоянии выполнить его задание.

Математическое моделирование статических и динамических режимов как линейных, так и нелинейных схем сводится к решению систем линейных алгебраических уравнений. Для решения этих систем используется метод LU -факторизации с выбором ведущего элемента. Типичной причиной прекращения моделирования является отсутствие ненулевого ведущего элемента на некотором этапе прямого хода (т. е. на этапе получения треугольных матриц L и U). Это означает, что матрица системы уравнений является вырожденной. В подобной ситуации программная система останавливает моделирование и делает сообщение о том, что матрица вырождена или что ненулевой ведущий элемент не найден. В этом случае пользователь обязан определить причину вырожденности матрицы, а затем соответствующим образом изменить схему или параметры элементов.

Укажем две типичные причины вырожденности:

- моделируемая схема имеет принципиально неопределенные режимы;
- при вводе схемы и параметров элементов допущены ошибки.

При неправильном выборе режима моделирования результаты могут иметь чрезмерную погрешность. Поэтому рекомендуется выполнять проверку правильности этого выбора.

Простым и эффективным способом проверки является уменьшение задаваемых пользователем максимально допустимых погрешностей, а также максимально допустимого шага решения и максимально допустимого изменения переменных на шаге решения (все это означает ужесточение требований в отношении погрешности расчета). Малое изменение результатов моделирования после указанного уменьшения подтверждает правильность выбора режима.

Может оказаться, что в библиотеках программной системы отсутствует математическая модель некоторого элемента схемы. В этом случае может быть использована математическая модель другого элемента, являющегося аналогом применяемого. Другой вариант решения проблемы – использование программы расчета математических моделей.

Хорошо продуманное, квалифицированное моделирование позволяет получать высокодостоверные результаты, обеспечивающие принятие правильных проектных решений.

15.5. Рекомендации по оформлению результатов схемотехнического моделирования

Программные системы способны выдавать данные в практически неограниченном объеме. Задача разработчика – рационально использовать эти возможности и представлять наиболее показательные результаты моделирования.

По каждому вычислительному эксперименту, нашедшему отражение в проекте, должны быть указаны:

- цель эксперимента;
- схема и математические модели элементов;
- порядок выполнения эксперимента;
- полученные результаты и выводы.

Здесь основная задача – как можно более кратко и определенно пояснить, для чего и как проводилось моделирование и что оно дало разработчику.

Для сокращения объема описания моделирования рекомендуется объединять эксперименты в серии (группы), для которых общими являются цель, схема, набор моделей и выводы.

Если определенность сохраняется, то вместо изображения отдельной схемы эксперимента следует делать соответствующую ссылку на электрическую принципиальную схему устройства (или на фрагмент этой схемы).

В случае использования стандартных математических моделей элементов со стандартными параметрами достаточно указать этот факт (и не приводить описания моделей).

Применение нестандартных математических моделей и параметров должно быть обосновано.

Из всего полученного объема для отражения в проекте должны быть отобраны только те данные, которые наиболее наглядно характеризуют разработанное устройство и позволяют сделать наиболее важные выводы.

Рациональное оформление результатов моделирования упростит поиск оптимальных технических решений и их отстаивание на защите дипломного проекта.

Список литературы

1. *Лачин В. И., Савелов Н. С.* Электроника: Учеб. пособие. 5-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 704 с.
2. *Алексеев О. В., Головкин А. А., Пивоваров И. Ю., Чавка Г. Г.* Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств: Учеб. пособие / Под ред. О.В. Алексеева. – М.: Высшая школа, 2000. – 479 с.
3. *Разевиг В. Д.* Система схемотехнического моделирования MICRO-CAP V. – М.: Солон, 1997. – 280 с.
4. *Разевиг В. Д.* Система схемотехнического моделирования Micro-Cap 6. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 344 с.
5. *Разевиг В. Д.* Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center. – М.: СК Пресс, 1996. – 272 с.
6. *Разевиг В. Д.* Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. – М.: Солон, 1999. – 704 с.
7. *Разевиг В. Д.* Система проектирования цифровых устройств OrCAD. – М.: Солон-р, 2000. – 160 с.
8. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench: В 2 т. / Под общ. ред.



- Д. И. Панфилова. Т. 1. Электротехника. – М.: ДОДЕКА, 1999. – 304 с.
9. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench: В 2 т. / Под общ. ред. Д. И. Панфилова. Т. 2. Электроника. – М.: ДОДЕКА, 2000. – 288 с.

16

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРИВодОВ ДЛЯ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ МЕХАТРОНИКИ

16.1. Общие вопросы проектирования электромагнитных приводов

Электромагнитным приводом называется электромагнитная система, в которой при изменении или перераспределении магнитного потока происходит перемещение подвижной части системы, совершающей полезную работу.

Электромагнитный привод состоит из двух основных элементов (рис. 16.1): одной или нескольких обмоток 1 и магнитной цепи 2.

Обмотки служат для создания необходимого магнитного потока, который определяет перемещение подвижной части магнитной цепи, называемой *якорем* – 2а. При поступательном или вращательном движении якорь совершает полезную работу. Магнитная цепь служит для проведения магнитного потока, создаваемого обмотками. Она представляет собой совокупность элементов, через которые замыкается поток магнитной индукции. Часть магнитной цепи, к которой притягивается якорь, называется *сердечником* – 2б. Магнитная цепь может иметь один или несколько сердечников. В приводах (рис. 16.1, з) сердечник, к которому притягивается якорь, называют стопом.

Неподвижная часть магнитной системы, соединяющая сердечник и якорь или же два и более сердечников между собой, называется *ярмом* – 2в. Промежуток между якорем и сердечником называется *рабочим воздушным зазором* и обозначается δ .

Элементы, образующие магнитную систему, соединяются между собой с помощью сварки, заклепок, болтов, шпилек, а также шарнирными устройствами. В месте сочленения этих элементов образуются небольшие воздушные зазоры, называемые *нерабочими зазорами*. Например, нерабочими являются зазоры между ярмом и сердечником, между сердечником и полюсным наконечником, зазоры, определяемые толщиной немагнитных покрытий в месте сопряжения деталей магнитопровода. Обычно величина таких зазоров составляет 0,04–0,05 мм.

Обмотка может быть расположена на одном сердечнике (рис. 16.1, а), на двух сердечниках (рис. 16.1, б) или же на ярме (рис. 16.1, в).

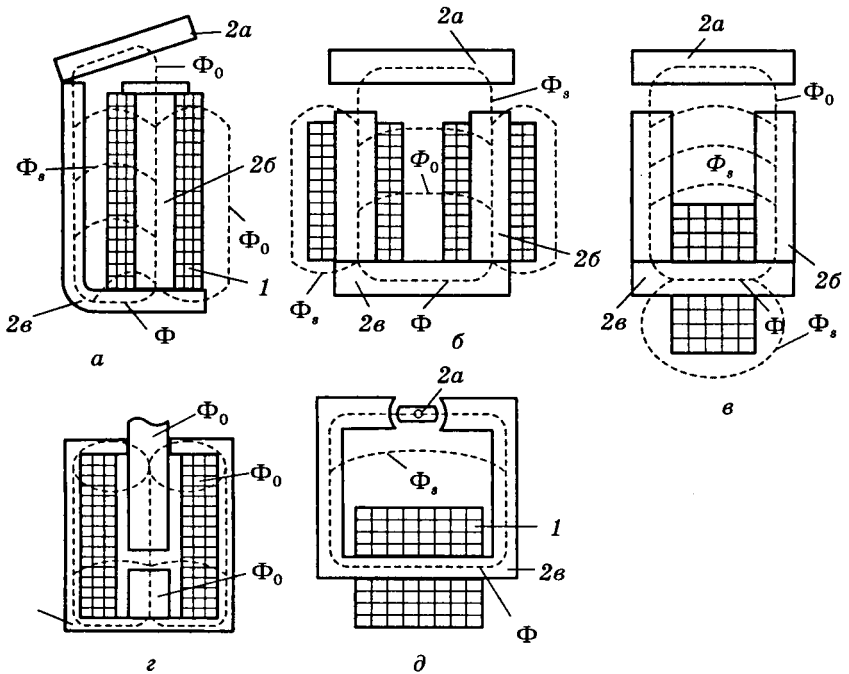


Рис. 16.1

Полный магнитный поток Φ_0 , создаваемый обмоткой, состоит из потока Φ , проходящего вдоль всей магнитной цепи, и потока Φ_s , проходящего по магнитной цепи лишь частично и замыкающегося по воздуху (рис. 16.1) или через иные части магнитной системы, находящиеся поблизости. Часть магнитного потока, замыкающегося по воздуху, называется *потокom рассеяния*. Таким образом, полный магнитный поток состоит из рабочего магнитного потока и потока рассеяния.

Магнитный поток, проходящий через рабочий воздушный зазор, называется *рабочим магнитным потоком* и обозначается Φ_s , так как именно он обуславливает возникновение механических сил, под действием которых происходит перемещение якоря. Следует отметить, что потоки рассеяния также могут участвовать в работе, совершаемой якорем.

Величина потока рассеяния зависит от конфигурации магнитной цепи, взаимного расположения ее элементов, степени ее насыщения,

а также от величины воздушных зазоров. С увеличением степени насыщения элементов магнитной цепи потоки рассеяния увеличиваются. В электромагнитных приводах поток рассеяния изменяется при изменении положения якоря относительно сердечника.

Обмотка может быть расположена на магнитной системе таким образом, что поток рассеяния либо сцеплен со всеми витками обмотки, либо же с различными витками обмотки сцеплены различные потоки рассеяния. В первом случае электромагнитная система называется системой с сосредоточенной магнитодвижущей силой (рис. 16.1, *в*), а во втором – системой с распределенной магнитодвижущей силой (рис. 16.1, *а, б*).

Электромагнитные приводы можно классифицировать по следующим признакам:

- а) по роду тока, питающего обмотки, – привода постоянного и переменного тока;
- б) по исполнению магнитной цепи – разветвленная магнитная цепь (рис. 16.1, *з*) и неразветвленная (рис. 16.1, *а–в*);
- в) по характеру движения якоря – с внешним поворотным якорем (клапанные, рис. 16.1, *а*); с якорем, втягивающимся внутрь обмотки (соленоидные, рис. 16.1, *з*); с поперечно движущимся якорем (рис. 16.1, *д*); с внешним прямоходовым якорем (рис. 16.1, *б, в*);
- г) по времени срабатывания – быстродействующие (единицы миллисекунд); нормальные (от 10 до 200 мс); замедленного действия (до 1 с);
- д) по чувствительности к направлению тока в обмотке электромагнитные привода постоянного тока бывают: нейтральные, срабатывающие при любом направлении тока, и поляризованные, срабатывающие при определенном направлении тока в обмотке.

В магнитной системе последних за счет внешнего источника задается дополнительно магнитный поток, называемый *поляризующим*.

При расчетах магнитных систем электромагнитных приводов, используя принцип дуальности, переходят к эквивалентным электрическим схемам замещения магнитной цепи, в которых ток заменяется магнитным потоком, напряжение – МДС, а электрическое сопротивление – магнитным сопротивлением. Для более точных расчетов применяются методы теории электромагнитного поля.

Характерной особенностью ферромагнитных материалов, из которых выполняются магнитные цепи, является нелинейная зависимость его магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля. Следовательно, магнитное сопротивление любого участка магнитопровода не постоянно, а зависит от величины магнитного потока, проходящего по данному участку, что значительно усложняет расчет магнитных цепей. Дополнительные сложности вносит также учет магнитных потоков рассеяния.

Основной характеристикой электромагнитного привода является *тяговая характеристика* – зависимость тягового усилия (момента), развиваемого электромагнитом, от рабочего воздушного зазора. Статическая тяговая характеристика определяется при заданной неизменной МДС обмотки, динамическая – при значениях МДС, изменяющейся в процессе срабатывания электромагнита. Для расчета тяговой характеристики используют энергетическую формулу или формулу Максвелла. Применение энергетической формулы требует предварительного определения потокоцепления обмотки и его производной, применение формулы Максвелла – расчета распределения магнитной индукции на поверхности якоря.

Наиболее общий вид энергетической формулы для электромагнитного усилия P при поступательном движении якоря

$$P = - \int_0^i \frac{\partial \Psi}{\partial \delta} di, \quad (16.1)$$

и электромагнитного момента M при вращательном движении якоря

$$M = - \int_0^i \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi} di, \quad (16.2)$$

где Ψ , i – потокоцепление обмотки и ток в ней; δ и φ – рабочий воздушный зазор, выраженный в линейной и угловой мерах.

Знак минус лишь показывает, что P и M возрастают при уменьшении рабочего зазора.

Если индуктивность электромагнита $L = \Psi/i$ остается постоянной во всем диапазоне изменения тока, то его магнитная система считается линейной. При этом энергетическая формула упрощается:

$$P = -0,5 \cdot i^2 \frac{dL}{d\delta}. \quad (16.3)$$

В общем случае формула Максвелла имеет вид

$$\bar{P} = \oint_S \left[\frac{1}{\mu_0} (\bar{B}\bar{n})\bar{B} - \frac{1}{2\mu_0} B^2\bar{n} \right] dS, \quad (16.4)$$

где \bar{B} – вектор магнитной индукции на внешней поверхности якоря S ; \bar{n} – единичный вектор внешней нормали к \bar{S} .

Силы, действующие на боковые поверхности якоря электромагнита, в большинстве реальных конструкций вследствие симметрии взаимно компенсируются. На поверхности якоря, противоположной поверхности, ограничивающей рабочий зазор, индукция обычно весьма мала. Для таких случаев вместо интеграла по всей поверхности якоря можно ограничиться интегрированием только по поверхности,

обращенной к рабочему воздушному зазору. Кроме того, в большинстве реальных электромагнитных приводов значение магнитной индукции в рабочем зазоре существенно ниже значения индукции насыщения, поэтому можно считать, что направление векторов \vec{B} и \vec{n} совпадают. При этих допущениях формула (16.4) примет вид

$$P = \frac{1}{2\mu_0} \int_{S_{\delta Я}} B^2 dS, \quad (16.5)$$

где $S_{\delta Я}$ – площадь поверхности якоря, ограничивающей рабочий зазор.

Если среднее квадратическое значение индукции мало отличается от среднего арифметического, то (16.5) можно записать в виде

$$P = B_{\delta}^2 S_{\delta} / (2\mu_0), \quad (16.6)$$

где S_{δ} – расчетное сечение рабочего воздушного зазора; B_{δ} – среднее значение магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре.

В общем случае электромагнитный привод следует рассматривать как нелинейную систему с переменными параметрами. Протекающие в нем процессы могут быть описаны системой уравнений.

Электрическая цепь обмотки

$$u = ir + \frac{\partial \Psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \frac{dx}{dt}. \quad (16.7)$$

Зависимость потокосцепления от тока в обмотке и координаты, определяющей положение якоря x

$$\Psi = \Psi(i, x). \quad (16.8)$$

Характеристика магнитного материала системы

$$B = B(H). \quad (16.9)$$

Движение якоря совместно с механической системой привода

$$P = m \frac{d^2 x}{dt^2} + P_1 \left(\frac{dx}{dt} \right) + P_2(x) + P_3, \quad (16.10)$$

где m – масса подвижных частей привода, приведенная к якорю электромагнита; P_1 , P_2 , P_3 – составляющие силы, противодействующей движению якоря, зависящие соответственно от скорости (например, вязкое трение), от координаты x (например, сила сжимаемых пружин), постоянные составляющие (вес и др.).

Электромагнитная сила, действующая на якорь, определяется по формулам (16.1)–(16.6).

Зависимость средней (по объему) температуры θ обмотки от тока, ее сопротивления и времени

$$\theta_{CP} = \theta(i, r, t). \quad (16.11)$$

Зависимость сопротивления обмотки от ее средней температуры

$$r = r_{20}[1 + \alpha(\theta_{\text{CP}} - 20)], \quad (16.12)$$

где r_{20} – сопротивление обмотки при 20 °С; α – температурный коэффициент сопротивления материала провода обмотки.

Для расчета динамических характеристик электромагнитного привода [$x(t)$, $dx(t)/dt$, $P(t)$, $i(t)$ и др.] необходимо решить совместные уравнения (16.1)–(16.12).

Алгоритмы определения потокосцепления обмотки и ее средней температуры конкретизируются при проектировании соответствующих конструкций электромагнитных приводов.

Силы, противодействующие движению, зависят от конкретных характеристик и параметров устройства, которое приводится в действие электромагнитным приводом.

Электромагнитные приводы обычно являются устройствами циклического действия. Цикл их работы состоит из ряда этапов, существенно отличающихся протекающими процессами. Так, процесс срабатывания разбивают на этап трогания, которому соответствует *время трогания*, и этап движения, которому соответствует *время движения*. Из таких же этапов состоит и процесс возврата.

При начальном положении якоря индуктивность обмотки электромагнита почти полностью определяется магнитным сопротивлением воздушных зазоров. В таких условиях магнитную систему можно считать линейной и уравнение (16.7) приводится к виду

$$u = ir + Ldi/dt. \quad (16.13)$$

Для определения температуры обмотки в установившемся режиме используют формулу Ньютона–Рихмана:

$$\theta_{\text{CP}} = \theta_0 + \frac{N}{k_T S_{\text{ОХ}}}, \quad (16.14)$$

где N – мощность потерь, преобразуемых в теплоту; k_T – коэффициент теплоотдачи, который определяется экспериментально или путем соответствующих расчетов; $S_{\text{ОХ}}$ – площадь поверхности охлаждения обмотки.

При расчете электромагнитных приводов различают задачи поверочных и проектных расчетов. При поверочном расчете заданы конфигурация, размеры и материал конструкции магнитной системы и необходимо определить ее характеристики. При проектном расчете заданы желаемые характеристики привода и требуется выбрать или синтезировать конструкцию, определить ее параметры, при которых реализуются желаемые характеристики и обеспечиваются наилучшие технико-экономические показатели.

16.2. Выбор типа, исполнения и конструкции электромагнитного привода

Электромагниты постоянного тока, как правило, проектируются с относительно меньшими перемещениями якоря, чем электромагниты переменного тока [4]. Выбор вида движения якоря определяется кинематической схемой механизма, для которого предназначен электромагнит. При большом ходе механизма и, соответственно, якоря на постоянном токе целесообразно применять прямоходовые электромагниты. По целому ряду показателей, основными из которых являются высокая себестоимость и потребляемая мощность, низкая надежность и срок службы, электромагниты переменного тока уступают электромагнитам постоянного тока. В то же время электромагниты переменного тока по сравнению с электромагнитами постоянного тока имеют меньшее время срабатывания, малые величины постоянной времени обмотки и ЭДС самоиндукции.

Выбор конструкции электромагнита проводят, используя конструктивный фактор $\Gamma = \sqrt{P} / \delta$, который связывает тяговое электромагнитное усилие и соответствующий ему рабочий воздушный зазор электромагнита. Так, по [2–5] при Γ от 0,9 до 25 кг^{0,5}/см применяется броневой электромагнит (см. рис. 16.1, *з*) с коническим якорем, при Γ от 1 до 400 кг^{0,5}/см – броневой с плоским якорем, при Γ от 10 до 2000 кг^{0,5}/см – цилиндрический электромагнит с внешним притягивающимся дисковым якорем.

Некоторые рекомендации по выбору конструкции электромагнитов приведены [15] в виде табл. 16.1. В [3] проведено сравнение ряда конструкций электромагнитов переменного тока по зависимостям удельной (на единицу веса) тяговой силы от δ и показано, что лучшей конструкцией из рассмотренных пяти является электромагнит с плоским ярмом и Ш-образным якорем (рис. 16.2, *а*). Близок к нему по эффективности электромагнит с Ш-образным ярмом и якорем (рис. 16.2, *б*). На третьем месте по значению указанного критерия стоит соленоидная конструкция с Т-образным якорем (рис. 16.2, *в*).

На четвертом месте – конструкция с Е-образным ярмом и Т-образным якорем (рис. 16.2, *г*). Наименьшей эффективностью обладает электромагнит с Ш-образным ярмом и плоским якорем (рис. 16.2, *д*). При этом лучшая тяговая характеристика имеет место при $n = a_1/a = 0,995$; $m = b/a/n = 2$; $d/a = 0,86$; $l/a = 1,425$ и при $n = 0,995$; $m = 1,73$; $d/a = 0,925$; $l/a = 1,48$, где a_1 и a – ширина крайнего и среднего стержней Ш-образного магнитопровода, b – толщина пакета магнитопровода, l , d – высота и ширина обмоточного окна.

Таблица 16.1

Величины конструктивных факторов для разных конфигураций магнитных систем

Конструкция магнитной системы	$G, \text{H}^{0,5}/\text{м}$	Ход якоря $\delta, \text{мм}$	Питающее напряжение
Втягивающийся якорь без стопа	< 125	1,2-10	Переменное
Втягивающийся якорь и стоп с плоскими торцами	$(1-3) \cdot 10^4$	$< 0,6a_c$	Переменное
Втягивающийся якорь и стоп с коническими торцами:			
$a_{ск}/a_c = 0,1-0,2$	$(3-4) \cdot 10^3$		Постоянное
$2\alpha = 60^\circ$	$(8-10) \cdot 10^3$	$\geq 0,6a_c$	Постоянное
$2\alpha = 90^\circ$	$(1-20) \cdot 10^3$	> 50	
Втягивающийся якорь, ненасыщенный магнитный шунт	$> 2 \cdot 10^4$	< 2	Постоянное
Внешний притягивающийся якорь (дисковый)			

Примечание: a_c – диаметр якоря; $a_{ск}$ – диаметр отверстия в стопе.

Для получения максимальной величины электромагнитной силы средний стержень Ш-образной магнитной системы целесообразно выполнять квадратного сечения, с размером 55–60% от внешнего размера катушки. При этом отношение высоты катушки к ее ширине l/d должно быть 0,8–1,2, соответственно $l/a = 1,3-1,9$.

Для качественного сравнения различных электромагнитов переменного тока можно использовать тяговые характеристики (рис. 16.3), построенные по данным [3, 6, 10].

Из рисунка 16.3 видно, что по сравнению с электромагнитом (рис. 16.2, б) конструкция с внедряющимся поворотным П-образным якорем (рис. 16.2, е) имеет более пологую и ниже расположенную тяговую характеристику, конструкция с внешним поворотным плоским якорем и П-образным ярмом (рис. 16.2, ж) имеет еще более низкую характеристику, но и более крутую (жесткую), чем предыдущие две. Конструкция с внедряющимся прямоходовым якорем и плоским стопом (рис. 16.2, з) имеет пологую характеристику, которая в зоне больших зазоров расположена выше, а в зоне малых зазоров – ниже трех описанных выше характеристик. Наиболее «высокую» и жесткую тяговую характеристику имеет электромагнит (рис. 16.2, к), ниже ее располагаются характеристики электромагнитов (рис. 16.2, б, к), а еще ниже – характеристика электромагнита (рис. 16.2, ж). «Высокая», но пологая характеристика свойственна электромагниту (рис. 16.2, и).

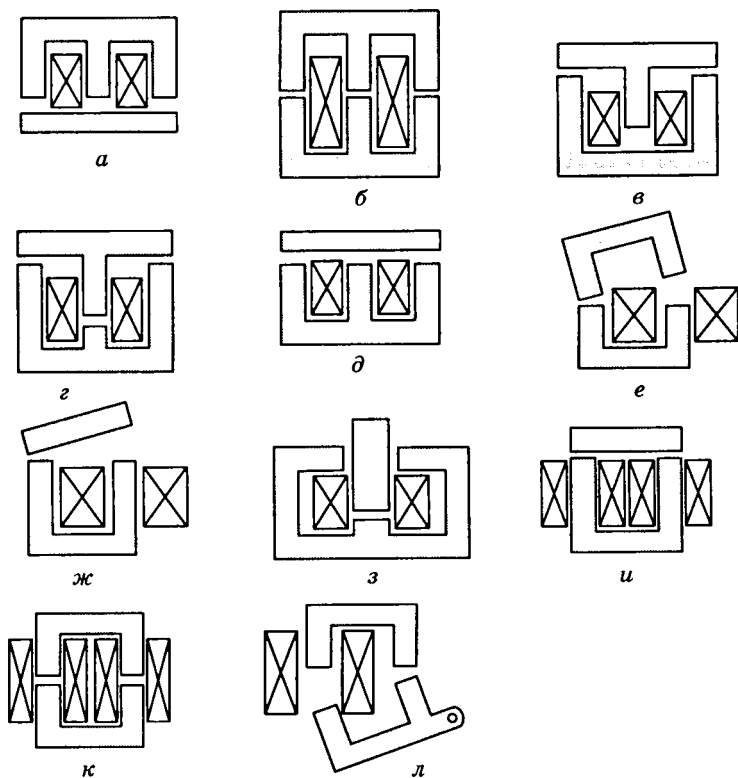


Рис. 16.2. Эскизы электромагнитов переменного тока

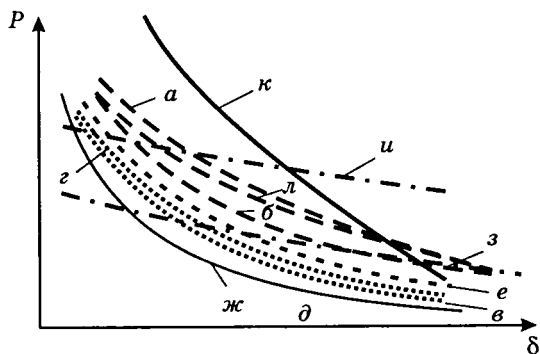


Рис. 16.3. Тяговые характеристики электромагнитов переменного тока

Аналогичные характеристики имеют электромагниты постоянного тока (рис. 16.4), построенные по данным [14]. Автор рекомендует при большом ходе якоря (до 100 мм) использовать системы (рис. 16.4, *a*–*в*), при малом ходе (до 10 мм) – системы (рис. 16.4, *г* и *д*).

Большое число работ посвящено исследованию оптимальных соотношений размеров различных электромагнитов. Так, по данным [5], у малогабаритных реле, имеющих магнитную систему (рис. 16.4, *г*), отношение длины сердечника к его диаметру равно 3,7–6, а у телефонных – 6–8. При этом диаметр полюсного наконечника в 1,6–2

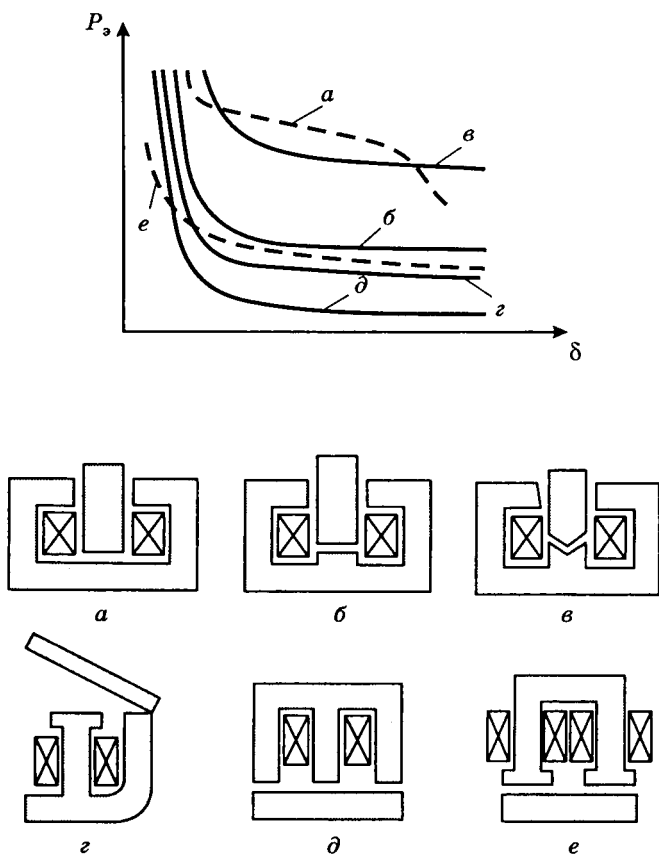


Рис. 16.4. Тяговые характеристики и эскизы электромагнитов постоянного тока

раза больше диаметра сердечника. При коротких сердечниках увеличивается диаметр катушки и средняя длина витка, растет расход меди. Для быстродействующих реле и электромагнитов, работающих кратковременно, отношение длины сердечника к его диаметру должно быть 3–6.

При постоянном значении наружного диаметра обмотки мощность, потребляемая при срабатывании реле, имеет минимальную величину при отношении диаметра сердечника d_c к наружному диаметру обмотки, равному 0,535. Следовательно, оптимальная толщина обмотки d равна $0,435 d_c$. При отклонении d от номинальной в пределах $(0,25-0,76) d_c$ мощность (N) увеличивается на 10%. Поэтому у малогабаритных и миниатюрных реле $d/d_c = (0,5-1)$, а у реле больших габаритов $d/d_c = (0,25-0,5)$.

При минимизации потребляемой мощности N оптимальная величина отношения $d/d_c = 0,306$. При минимизации стоимости для электромагнитов рис. 16.4, *а-в* оптимальными соотношениями являются $d/d_c = 0,4-0,6$; $l/d_c = 3-4,5$. Для различных типов электромагнитов рекомендуются следующие значения l/d :

Системы постоянного тока:

- 1) рис. 16.4, *г* с полюсным наконечником 4–6;
- 2) рис. 16.4, *г* без полюсного наконечника 5–7;
- 3) рис. 16.4, *е* при малых силах и большом ходе:
с полюсными наконечниками 5–7;
без полюсных наконечников 6–8;
- 4) то же при больших силах и малом ходе 2–4;
- 5) рис. 16.4, *а-в* 7–8;
- 6) системы переменного тока $d/d_c = (0,5-0,8)$; $l/d = 1,5-2,5$.

Подробный анализ влияния размеров магнитных шунтов на форму тяговой характеристики броневых электромагнитов приведен в [2]. Для электромагнитов рис. 16.4, *а-г* рекомендуются следующие соотношения размеров:

- 1) магнитные системы с внешним якорем:
малогабаритные $c/d_c = 0,5-0,8$; $l/c = 6-8$; $d_n/d_c = 1,1-1,2$;
крупногабаритные $c/d_c = 0,25-0,5$; $l/c = 4-6$; $d_n/d_c = 1,4-1,5$;
 d_n – диаметр полюсного наконечника;
- 2) магнитные системы с втяжным якорем:
короткоходовые $c/d_c = 0,4-0,5$; $l/d = 3-5$; $d_z/d_c = 0,2-0,25$;
 $l_{CT}/d_c = 0,3-0,5$;
длинноходовые $c/d_c = 0,3-0,4$; $l/d = 6-8$; $d_z/d_c = 0,1-0,2$;
 $l_{CT}/d_c = 0,0-0,2$, d_z – толщина гильзы, l_{CT} – высота стопа.

Для систем переменного тока с прямоходовым и поворотным якорем:

$$d/a = 0,4-0,8; l/a = 1,2-2,5; l/d = 2-4; b/a = 0,8-1,2; a_1/a = 0,6-0,8.$$

Для электромагнита рис. 16.4, *e* при заданных значениях электромагнитной энергии и плотности тока минимум стоимости достигается при $c/d_c = 0,46$; $l/c = 3,15$; $l/d_c = 1,45$. Для магнитной системы рис. 16.2, *u*, при заданных значениях температуры обмотки, потребляемой мощности и габаритном объеме максимум магнитного потока в рабочем воздушном зазоре обеспечивается при $d/a = 0,14$. Если при тех же условиях дополнительно задана величина тягового усилия, то отношение $d/a = 0,3$. Рекомендации по выбору оптимальных соотношений размеров для конкретных электромагнитных систем постоянного тока приведены в [8, 13].

В качестве критериев оптимальности выступают минимумы относительных значений габаритного объема (V_Γ^*), массы (m^*), стоимости (C^*) электромагнита, потребляемой им мощности (N^*), временных параметров: времени трогания ($t_{\text{ТР}}^*$) и др.

Полученные при оптимизации по указанным критериям зависимости основных соотношений размеров от логарифма тягового усилия ($\ln F_3^*$) и коэффициента заполнения обмотки (κ_3), при различных режимах и условиях эксплуатации, позволяют выбрать оптимальные соотношения для электромагнитов клапанного и броневого типа. Так, при минимизации $V_\Gamma^* x_{\text{опт}} = d/r_c = 1,8-1,88$ при $b = 0,9$ (где b – коэффициент, характеризующий условия теплоотдачи с внутренней боковой поверхности катушки к магнитопроводу); $x_{\text{опт}} = 1,74-1,8$ при $b = 1,7$ и $x_{\text{опт}} = 1,72-1,75$ при $b = 2,4$.

Оптимальными по $t_{\text{ТР}}^*$ для броневых электромагнитов следует считать отношения: $x_{\text{опт}} = 3$ и $h_{\text{СВ}}/r_c = (0,8-1,0)h_{\text{СТ}}/r_c$. Минимумы $t_{\text{ТР}}^*$ для клапанного электромагнита наблюдаются при $l/r_c = 1,2-2,0$ (независимо от изменения других параметров).

16.3. Полевые методы анализа процессов в электромагнитных приводах

Для анализа процессов в электромагнитных приводах применяют: метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ), методы, основанные на интегральных уравнениях, а также комбинированные методы, использующие достоинства различных методов.

При выборе численного метода следует учитывать особенности объекта исследования. Электромагнитные системы (ЭМС) аппаратов имеют следующие особенности: ЭМС – открытые системы, а следова-

тельно, невозможно указать строго границы магнитных полей; при расчете полей необходимо, как правило, решать трехмерные краевые задачи; ферромагнитные участки магнитопровода ЭМС насыщены и могут быть массивными, что требует учета вихревых токов; взаимное положение ферромагнитных частей изменяется; необходимо определение величин электромагнитных сил, действующих на ферромагнитные части, что требует знания распределения векторов магнитной индукции \vec{B} или напряженности \vec{H} .

При решении полевых задач для уменьшения числа уравнений и переменных обычно вводят векторный магнитный потенциал \vec{A} и представляют $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$, причем $\text{div } \vec{A} = 0$. В этом случае уравнение для стационарного и квазистационарного магнитного поля имеет вид

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{A} \right) = \vec{\delta};$$

для нестационарных процессов в электромагнитных системах, в которых имеются элементы с отличной от нуля электрической проводимостью γ , перемещающиеся со скоростью \vec{V}

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{A} \right) = \gamma \left([\vec{V}, \text{rot } \vec{A}] - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad } \varphi \right),$$

где $\mu = f(B)$ – магнитная проницаемость ферромагнитных элементов; φ – электродинамический потенциал; $\vec{\delta}$ – вектор плотности тока источников поля.

На границах раздела сред с различными физическими свойствами должны выполняться условия непрерывности для нормальной составляющей вектора \vec{B} и касательной \vec{H} . Кроме того, должно быть определено поведение вектора \vec{A} на границе расчетной области, т. е. формулируется краевая задача расчета электромагнитного поля.

Методы МКР и МКЭ сводят решение краевых задач к решению хорошо обусловленных систем алгебраических уравнений с разреженными матрицами. Последнее обстоятельство позволяет использовать специальные приемы хранения и обработки матриц. Однако эти методы эффективны только для решения внутренних задач, когда области расчета имеют четкие границы. Во многих случаях необходимо вводить искусственную границу, положение которой определяется с помощью вычислительных экспериментов, что приводит к

большим затратам машинного времени. Формулировка задачи расчета относительно векторного магнитного потенциала \bar{A} приводит к необходимости применения операции численного дифференцирования для определения векторов \bar{B} и \bar{H} , что вносит дополнительную погрешность. Определенные затруднения для МКР и МКЭ возникают в тех случаях, когда требуется учитывать взаимное перемещение ферромагнетиков, так как для каждого рассматриваемого варианта расположения ферромагнитных частей необходимо строить новую сетку.

Для анализа электромагнитных процессов ЭМС в мировой практике широко используются общеизвестные программные комплексы: Profi, Maxwell, Femm. Profi базируется на МКР и позволяет рассчитывать как стационарные, так и нестационарные электромагнитные процессы с учетом насыщения ферромагнетиков и вихревых токов в сплошных элементах.

В комплексах Maxwell и Femm реализован МКЭ. Причем Maxwell позволяет рассчитывать трехмерное магнитное поле. Известные версии Femm ориентированы в основном на расчет стационарных и квазистационарных электромагнитных полей. Однако, используя специальный язык программирования LUA, можно выполнять расчеты динамики в ЭМП с подвижными элементами.

При использовании этих программных комплексов пользователь должен последовательно определить и задать:

- в выбранной системе координат конфигурацию расчетной области для исследуемой ЭМС;
- граничные условия для искомого вектора на границе расчетной области;
- характеристики используемых материалов и источников поля.

В процессе расчета проводится автоматическое разбиение расчетной области на конечные элементы (триангуляция) и определяются дифференциальные и интегральные характеристики электромагнитного поля. К ним относятся интенсивность распределения магнитной индукции и потока, потерь на гистерезис и вихревые токи, энергии, запасаемой в отдельных элементах, и т. п.

Полевые методы, основанные на применении интегральных уравнений, имеют два существенных для ЭМС электрических аппаратов достоинства: уравнения составляются только для ферромагнитных областей и их граничных поверхностей и, как следствие, сокращается размерность задачи, не возникает трудностей при рассмотрении открытых систем, при взаимном перемещении элементов магнитной системы нет необходимости перестраивать расчетную сетку.

Основным методом из этой группы является метод вторичных источников (МВИ). Согласно концепции вторичных источников расчет поля в неоднородной, анизотропной и нелинейной среде может быть сведен к расчету поля в однородной изотропной среде, созданному как первичными источниками – токами обмоток намагничивания, так и вторичными – фиктивными объемными с плотностью ρ и поверхностными с плотностью u магнитными зарядами или фиктивными поверхностными токами.

Преимущества МВИ наряду с минимальной размерностью задачи: возможность расчета поля без искусственного его ограничения, результатом расчета являются величины, непосредственно определяющие вектора поля, т. е. исключается операция численного дифференцирования.

Недостатки МВИ: матрицы систем алгебраических уравнений полностью заполнены, имеют относительно большие числа обусловленности; требуется применение специальных приемов, обеспечивающих сходимость итерационных процессов.

В последние годы широкое применение получили комбинированные методы. Метод граничных элементов базируется на интегральной теореме Грина, согласно которой значение искомой функции во внутренних точках области выражается через значения этой функции и ее нормальной производной на поверхности, окружающей эту область. Алгебраизация полученного интегрального уравнения осуществляется с помощью техники конечных элементов. Сочетание метода конечных элементов и вторичных источников позволяет значительно сократить время расчета.

Известно множество версий программных продуктов, реализующих алгоритмы метода вторичных источников и комбинированные методы. Однако они чаще всего ориентированы на решение конкретной задачи и не обладают той степенью универсальности, которую имеют программные комплексы Profi, Maxwell, Femm.

16.4. Проектирование быстродействующих электромагнитных интегрированных приводов

При заданной механической характеристике исполнительного механизма, который управляется электромагнитным приводом, повышение быстродействия электромагнита (ЭМ) означает уменьшение времени перехода якоря из одного положения в другое, т. е. уменьшение времени срабатывания.

Традиционное решение такой задачи заключается в увеличении электромагнитной силы, что неизбежно ведет к росту массогабаритных показателей ЭМ и увеличению скорости подвижных элементов в конце хода якоря. Наименьшее время срабатывания может быть достигнуто с использованием индукционно-динамического или электродинамического приводов. В них за счет форсировки тока в обмотке ЭМ можно получить значительное увеличение электромагнитной силы, но при этом и скорость в конце хода наибольшая.

Во многих других применениях быстродействующих ЭМ от него требуется обеспечить заданное время срабатывания, но и иметь скорость в конце хода, близкую к нулю. Это означает, что на начальном участке перемещения якоря его скорость должна возрастать, а затем уменьшаться. Следовательно, на якорь должно действовать знакопеременное усиление, имеющее экстремумы в начальном и конечном положениях якоря.

Электромеханическая система, позволяющая реализовать подобную характеристику, представлена на рис. 16.5. В ней общий для двух ЭМ якорь может совершать гармонические колебания с соб-

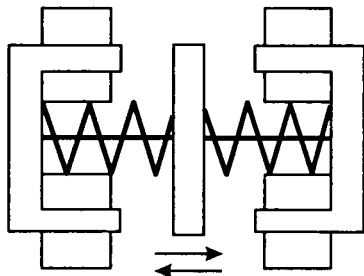


Рис. 16.5

ственной частотой механического резонанса, которая определяется массой подвижной системы m_c и жесткостью, ускоряющей и замедляющей пружину C . Время срабатывания составляет половину периода этой частоты $\pi\sqrt{C/m_c}$. Роль ЭМ сводится к захвату якоря при подходе его к конечным положениям и удержанию в них. При этом чем быстрее организован спад и нарастание электромагнитной силы, тем ближе будет процесс перемещения якоря к идеальному.

Использование в магнитной системе ЭМ постоянных магнитов позволяет организовать импульсный режим управления ЭМ и, следовательно, значительно сократить его энергопотребление.

В подобных приводах задача проектирования сводится к определению геометрических размеров и обмоточных данных ЭМ, его температурного режима, а также закона изменения тока в обмотке ЭМ, обеспечивающего захват якоря при подходе к конечным положениям и его удержание. Таким образом система управления током обмотки ЭМ становится неотъемлемой частью привода, образуя с последним интегрированный электромагнитный привод.

Решение этой задачи ниже производится на примере минимизации объема активных материалов приводного ЭМ. Эскиз конструкции такого привода представлен на рис. 16.6.

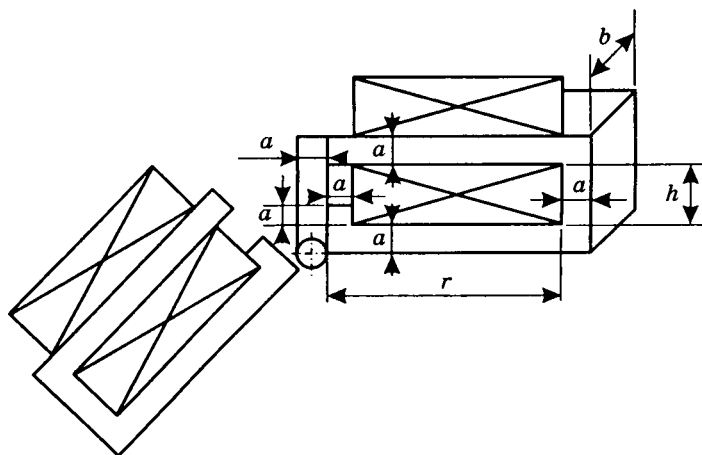


Рис. 16.6

Основные соотношения для проектирования быстродействующего ЭМ, обеспечивающего заданное время срабатывания $t_{\text{ср}}$, требуемую скорость якоря V_K , в конце хода x_K и имеющего минимальный объем V , приведены ниже.

Общий объем ЭМП складывается из объемов ферромагнитного магнитопровода и обмотки управления

$$V(h, l, a, b, a_\gamma) = 2ab(l+h+2a) + l(\pi h^2 + 2h(a+b)) + a_\gamma^2, \quad b, \quad (16.15)$$

где V – объем активных материалов; h – ширина обмотки; l – высота обмотки; a – толщина магнитопровода; b – ширина магнитопровода.

Допустимая МДС обмотки намагничивания

$$F(h, l, a, b, a_r) = (l - a_r)(h + a)K_Z \sqrt{\frac{K_r \tau_{\text{доп}} 2((1 + \beta)(a + b) + \pi(h + a))}{\rho(2(a + b) + \pi(h + a))(h + a)K_Z}}, \quad (16.16)$$

где K_r – коэффициент теплоотдачи с поверхности обмотки; $\tau_{\text{доп}}$ – допустимая температура перегрева обмотки управления; β – коэффициент, учитывающий неравномерность теплоотдачи с внутренней и наружной поверхностей обмотки; ρ – удельное электрическое сопротивление материала обмотки; K_Z – коэффициент заполнения обмотки.

Магнитная проводимость рабочего зазора электромагнита в вытянутом состоянии λ и магнитная проводимость рассеяния между сердечниками магнитопровода λ_S определяются по формулам соответственно:

$$\lambda(h, a, b) = \mu_0 \frac{a \cdot b}{\delta}, \quad (16.17)$$

$$\lambda_S(h, l, a, b, a_r) = \mu_0 \left(\frac{(l - a_r) \cdot b}{h} + \frac{a_r \cdot b}{h - a_r} \right), \quad (16.18)$$

где h, a, b – геометрические параметры области рабочего зазора; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; δ – заданная величина рабочего зазора.

При минимизации объема ЭМ наибольшее значение магнитной индукции в магнитопроводе не должно превышать заданного значения B_{max} и собственная частота механической системы ограничена требуемым временем переключения t_p . Эти условия являются ограничениями при выборе параметров ЭМ и могут быть сформулированы в виде:

$$\frac{\lambda_{\Sigma}(F - l_{sr}H(B))}{S_{\text{min}}} \leq B_{\text{max}}, \quad (16.19)$$

$$\pi \sqrt{\frac{\Phi_{\text{max}} \cdot J \cdot K}{M}} \leq t_p, \quad (16.20)$$

где λ_{Σ} – суммарная магнитная проводимость для рабочих зазоров и потоков рассеяния; l_{sr}, S_{min} – средняя длина силовой линии и площадь минимального сечения для рабочего магнитного потока; $H(B)$ – характеристика намагничивания материала магнитопровода; Φ_{max} – максимальное значение угла поворота якоря относительно нейтраль-

ного положения; J – суммарный момент инерции, который складывается из моментов инерции якоря и приводного механизма, взаимодействующим с ЭМ; M – электромагнитный момент, действующий на якорь в притянутом состоянии; K – коэффициент, показывающий, во сколько раз была бы меньше жесткость пружины идеального маятника, совершающего свободные колебания с таким же периодом.

Список литературы

1. *Лобов Б. Н.* Выбор конструкции электромагнитного привода // Изв. вузов. Сев.-Кавк. рег. Технические науки. Специальный выпуск. Проблемы мехатроники. 2003. – С 16–20.
2. *Любчик М. А.* Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. – М.: Энергия, 1974. – 392 с.
3. *Гордон А. В., Сливинская А. Г.* Электромагниты переменного тока. – М.: Энергия, 1968. – 200 с.
4. *Сахаров П. В.* Проектирование электрических аппаратов. – М.: Энергия, 1975. – 560 с.
5. *Витенберг М. И.* Расчет электромагнитных реле. – Л.: Энергия, 1975. – 319 с.
6. *Таев И. С.* Электрические аппараты управления. – М.: Высшая школа, 1969. – 444 с.
7. *Чунихин А. А.* Электрические аппараты. Общий курс. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
8. *Никитенко А. Г.* Проектирование оптимальных электромагнитных механизмов. – М.: Энергия, 1974. – 135 с.
9. *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
10. *Никитенко А. Г.* Автоматизированное проектирование электрических аппаратов – М.: Высшая школа, 1983. – 192 с.
11. *Никитенко А. Г., Пеккер И. И.* Расчет электромагнитных механизмов на вычислительных машинах. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 275 с.
12. *Никитенко А. Г., Щербаков В. Г., Лобов Б. Н., Лобанова Л. С.* Математическое моделирование и автоматизация проектирования тяговых электрических аппаратов / Под ред. А. Г. Никитенко, В. Г. Щербакова. – М.: Вышш. школа, 1995. – 610 с.
13. *Никитенко А. Г., Гринченков В. П., Иванченко А. Н.* Программирование и применение ЭВМ в расчетах электрических аппа-

- ратов: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1990. – 231 с.
14. *Сливинская А. Г.* Электромагниты и постоянные магниты. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.
 15. *Щучинский С. Х.* Электромагнитные приводы исполнительных механизмов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

17

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Большое количество дипломных проектов может содержать экспериментальную часть, связанную с изготовлением макетного образца разрабатываемого устройства или системы (или части ее) и проведением экспериментальных исследований, которые являются неотъемлемой составляющей процесса проектирования различных устройств и систем.

В процессе выполнения дипломного проекта будущие специалисты учатся пользоваться приборами и оборудованием, самостоятельно проводить эксперименты, определяя их методики и программы. После завершения экспериментальных исследований проводятся обработка результатов, их анализ и сопоставление с данными расчета и моделирования, на основании чего может быть выполнена корректировка расчетных методик и математических моделей. По данным экспериментов формулируются выводы и заключение, даются рекомендации по доработке и изготовлению опытного образца проектируемого устройства или системы.

17.1. Основные положения

Погрешностью измерения той или иной физической величины называют отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. В зависимости от характера изменения различают следующие основные виды погрешностей: 1) систематические – погрешности, остающиеся постоянными или закономерно изменяющиеся при повторных измерениях физической величины; 2) случайные – погрешности, изменяющиеся случайным образом при повторных измерениях физической величины.

Систематические погрешности могут быть в значительной степени уменьшены или исключены путем введения соответствующих поправок, поверки измерительных приборов или устранения источников погрешностей. Применение того или иного способа устранения систематических погрешностей зависит от требуемой точности, условий проведения эксперимента, наличия поправочных формул.

Случайные погрешности имеют место при многократном измерении физической величины, когда повторные измерения проводятся

одинаково тщательно при выполнении тех же условий. Результат измерений всегда содержит оба вида погрешностей, как систематическую, так и случайную.

В связи с этим погрешность результата измерения в общем случае нужно рассматривать как случайную величину. В этом случае систематическая погрешность – математическое ожидание этой величины, а случайная погрешность – центрированная случайная величина.

Анализ случайных погрешностей основывается на теории случайных ошибок, дающей возможность с определенной гарантией вычислить действительное значение измеренной величины и оценить возможные ошибки.

Основу теории случайных ошибок составляют предположения о том, что при большом числе измерений случайные погрешности одинаковой величины, но разного знака встречаются одинаково часто; большие погрешности встречаются реже, чем малые; при бесконечно большом числе измерений истинное значение измеряемой величины равно среднеарифметическому значению всех результатов измерений, а появление того или иного результата измерения как случайного события описывается нормальным законом распределения.

Различают генеральную и выборочную совокупность измерений. Под генеральной совокупностью подразумевают все множество возможных значений измерений x_i или возможных значений погрешности. Для выборочной совокупности число измерений n ограничено и в каждом конкретном случае строго определяется. Можно считать, что если $n > 30$, то среднее значение данной совокупности измерений \bar{x} приближается к его истинному значению.

Теория случайных ошибок позволяет оценить точность и надежность измерения при данном количестве замеров или определить минимальное количество замеров, гарантирующее требуемую (заданную) точность и надежность измерений. Наряду с этим возникает необходимость исключить грубые ошибки ряда и определить достоверность полученных данных.

17.2. Интервальная оценка погрешности результатов измерений

Основными характеристиками законов распределения погрешностей являются математическое ожидание и дисперсия. Математическое ожидание ряда наблюдений представляет собой величину, относительно которой рассеиваются результаты отдельных измерений. При отсутствии систематической погрешности и грубых промахов в ходе измерений математическим ожиданием будет истинное значение измеряемой величины.

Дисперсия характеризует степень рассеяния отдельных наблюдений вокруг математического ожидания. Чем меньше дисперсия, тем меньше разброс отдельных результатов, тем точнее выполнены измерения.

Оценкой математического ожидания ряда наблюдений может служить среднее арифметическое результатов отдельных наблюдений:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

где x_i – результаты отдельных наблюдений; n – число наблюдений.

При большой выборке и нормальном законе распределения для оценки дисперсии D можно использовать формулу

$$D = \sigma^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}. \quad (17.1)$$

Дисперсия характеризует однородность измерения. Для оценки изменчивости измерений относительно средних значений и разброса при нескольких выборках используется коэффициент вариации k_b :

$$k_b = \frac{\sigma}{\bar{x}},$$

где σ – среднеквадратичное отклонение ряда наблюдений.

Доверительным называется интервал значений x , в который попадает истинное значение x_d измеряемой величины с заданной вероятностью. Доверительной вероятностью (достоверностью) измерения называется вероятность того, что истинное значение измеряемой величины попадает в данный доверительный интервал, т. е. в зону $a \leq x_d \leq b$. Эта величина определяется в долях единицы или в процентах. Доверительная вероятность p_d описывается выражением

$$p_d = p[a \leq x_d \leq b] = \frac{1}{2} \left[\Phi \frac{(b - \bar{x})}{\sigma} - \Phi \frac{(a - \bar{x})}{\sigma} \right],$$

где $\Phi(t)$ – интегральная функция Лапласа (табл. 17.1), определяемая выражением

$$\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Аргументом этой функции является гарантийный коэффициент t , определяемый соотношением

$$t = \mu / \sigma, \quad (17.2)$$

где $\mu = b - \bar{x}$; $\mu = -(a - \bar{x})$.

Если на основе определенных данных установлена доверительная вероятность (часто ее принимают равной 0,90; 0,95; 0,9973), то устанавливается точность измерений (доверительный интервал 2μ на основе соотношения $p_d = \Phi(\mu/\sigma)$). При этом половина доверительного интервала

$$\mu = \sigma \arg \Phi(p_d) = \sigma t. \quad (17.3)$$

Здесь, при $n \geq 30$ $\arg \Phi(p_d)$ – аргумент функции Лапласа, а при $n < 30$ – функции Стьюдента (табл. 17.2). При этом доверительный интервал характеризует точность измерения данной выборки, а доверительная вероятность – достоверность измерения.

Таблица 17.1

Интегральная функция Лапласа

t	p_d	t	p_d	t	p_d
0,00	0,0000	0,75	0,5467	1,50	0,8664
0,05	0,0399	0,80	0,5763	1,55	0,8789
0,10	0,0797	0,85	0,6047	1,60	0,8904
0,15	0,1192	0,90	0,6319	1,65	0,9011
0,20	0,4585	0,95	0,6579	1,70	0,9109
0,25	0,1974	1,00	0,6827	1,75	0,9199
0,30	0,2357	1,05	0,7063	1,80	0,9281
0,35	0,2737	1,10	0,7287	1,85	0,9357
0,40	0,3108	1,15	0,4106	1,90	0,9426
0,45	0,3473	1,20	0,7699	1,95	0,9488
0,50	0,3829	1,25	0,7887	2,00	0,9545
0,55	0,4177	1,30	0,8064	2,25	0,9756
0,60	0,4515	1,35	0,8230	2,50	0,9876
0,65	0,4843	1,40	0,8385	3,00	0,9973
0,70	0,5161	1,45	0,8529	4,00	0,9999

Пусть, например, выполнено 30 измерений напряжения на зажимах обмотки электромагнита при среднем значении напряжения $U = 170$ В и вычисленном значении среднеквадратического отклонения $\sigma = 3,1$ В.

Требуемую точность измерений можно определить для разных уровней доверительной вероятности ($p_d = 0,9; 0,95; 0,9973$), приняв значения t по табл. 17.1. В этом случае соответственно $\mu = 3,1 \times 1,65 = 5,1; \pm 3,1 \cdot 2,0 = 6,2; \pm 3,1 \cdot 3,0 = 9,3$ В. Следовательно, при данных

Таблица 17.2

Коэффициент Стьюдента
(n – число параллельных серий опытов)

n	P_D					
	0,80	0,90	0,95	0,99	0,995	0,999
2	3,080	6,31	12,71	63,70	127,30	637,20
3	1,886	2,92	4,30	9,92	14,10	31,60
4	1,638	2,35	3,188	5,84	7,50	12,94
5	1,533	2,13	2,77	4,60	5,60	8,61
6	1,476	2,02	2,57	4,03	4,77	6,86
7	1,440	1,94	2,47	3,71	4,32	9,96
8	1,415	1,90	2,36	3,50	4,03	5,40
9	1,397	1,86	2,31	3,36	3,83	5,04
10	1,383	1,83	2,26	3,25	3,69	4,78
12	1,363	1,80	2,20	3,11	3,50	4,49
14	1,350	1,77	2,16	3,01	3,37	4,22
16	1,341	1,75	2,13	2,95	3,29	4,07
18	1,333	1,74	2,11	2,90	3,22	3,96
20	1,328	1,73	2,09	2,86	3,17	3,88
30	1,316	1,70	2,04	2,75	3,20	3,65
40	1,306	1,68	2,02	2,70	3,12	3,55
50	1,298	1,68	2,01	2,68	3,09	3,50
60	1,290	1,67	2,00	2,66	3,06	3,46
∞	1,282	1,64	1,96	2,58	2,81	3,29

условиях доверительный интервал возрастает примерно в два раза, если увеличить p_D только на 10%.

Если необходимо определить достоверность измерений для установленного доверительного интервала, например, $\mu = \pm 7$ В, то по формуле (17.2) $t = \mu/\sigma = 7/3,1 = 2,26$. По табл. 17.1 для $t = 2,26$ определяем $p_D = 0,97$. Это означает, что в заданный доверительный интервал из 100 измерений не попадают только три. Значение $(1 - p_D)$ называют уровнем значимости. Из него следует, что при нормальном законе распределения погрешность, превышающая доверительный интервал, будет встречаться один раз из n_H измерений, где

$$n_H = p_D / (1 - p_D), \quad (17.4)$$

или иначе приходится браковать одно n_H из измерений. По данным приведенного выше примера можно вычислить количество измере-

ний, из которых одно измерение превышает доверительный интервал. По формуле (17.4) при $p_D = 0,9$ определяется $n_{и} = 0,9/(1 - 0,9) = 9$ измерений. При p_D , равной 0,95 и 0,9973, соответственно 19 и 367 измерений.

17.3. Определение минимального количества измерений

При выполнении экспериментальных исследований с заданной точностью и достоверностью необходимо знать количество измерений, обеспечивающее положительный результат. В связи с этим одной из задач при статистических методах оценки является установление минимально достаточного числа измерений для данных условий. В этом случае задача сводится к установлению минимального объема выборки (числа измерений) N_{\min} при заданных значениях доверительного интервала 2μ и доверительной вероятности. При выполнении измерений необходимо знать их точность:

$$\Delta = \sigma_0 / \bar{x}, \quad (17.5)$$

где σ_0 – среднеарифметическое значение среднеквадратичного отклонения σ , равное $\sigma_0 = \sigma / \sqrt{n}$.

Значение σ_0 называют средней ошибкой. Доверительный интервал ошибки измерения Δ определяется аналогично для измерений $\mu = t\sigma_0$. По величине t можно определить доверительную вероятность ошибки измерений (используя табл. 17.1). По заданной точности Δ и доверительной вероятности измерения определяется минимальное количество измерений, гарантирующих требуемые значения Δ и p_D . В соответствии с уравнением (17.3) с учетом (17.5) можно получить

$$\mu = \sigma \arg \varphi(p_D) = \sigma_0 / \sqrt{nt}. \quad (17.6)$$

При $N_{\min} = n$ получаем

$$n_{\min} = \sigma^2 t^2 / \sigma_0^2 = k_B^2 t^2 / \Delta^2, \quad (17.7)$$

где Δ – точность измерений, %.

Для определения N_{\min} может быть принята следующая последовательность вычислений:

- 1) проводится предварительный эксперимент с количеством измерений n , которое составляет в зависимости от трудоемкости опыта от 20 до 50;
- 2) вычисляется среднеквадратичное отклонение σ по формуле (17.1);

- 3) в соответствии с поставленными задачами эксперимента устанавливается требуемая точность измерений Δ , которая не должна превышать точности прибора;
- 4) устанавливается нормированное отклонение t , значение которого обычно задается;
- 5) по формуле (17.7) определяют n_{\min} , и тогда в дальнейшем в процессе эксперимента число измерений не должно быть меньше n_{\min} .

Например, при приемке тяговых двигателей в качестве одного из параметров измеряется сопротивление обмотки якоря. В соответствии с инструкцией требуется выполнять 25 измерений, при этом допустимое отклонение параметра $\pm 0,1$ мОм. Если предварительно вычисленное значение $\sigma = 0,4$ мОм, то можно определить, с какой достоверностью комиссия по приемке оценивает данный параметр.

В соответствии с инструкцией $\Delta = 0,1$ мОм. Из формулы (17.7)

можно записать: $t = \sqrt{n} \frac{0,1}{0,4} = 1,25$. Согласно табл. 17.1 для $t = 1,25$

доверительная вероятность $p_d = 0,79$. Погрешность, превышающая доверительный интервал $2\mu = 0,2$ м, при такой малой вероятности согласно выражению (17.4) будет встречаться один раз (0,79 / (1 - 0,79)) = 3,37 из четырех измерений, что недопустимо.

В связи с этим необходимо вычислить минимальное количество измерений с доверительной вероятностью p_d , равной 0,9 и 0,95. По формуле (17.7) имеем $N_{\min} = 43$ измерения при $p_d = 0,90$ и 64 измерения при $p_d = 0,95$, что значительно превышает установленные 25 измерений.

Оценки измерений с помощью σ и σ_0 по приведенной методике справедливы при $n > 30$. При определении границы доверительного интервала при малых значениях n используют метод Стьюдента. Кривые распределения Стьюдента при $n \rightarrow \infty$ (практически при $n > 20$) переходят в кривые нормального распределения.

Для малой выборки доверительный интервал

$$\mu_{\text{Ст}} = \sigma_0 \alpha_{\text{Ст}}, \quad (17.8)$$

где $\alpha_{\text{Ст}}$ – коэффициент Стьюдента, определяемый из табл. 17.2 по величине доверительной вероятности p_d .

По известной величине $\mu_{\text{Ст}}$ можно вычислить действительное значение измеряемой величины для малой выборки:

$$x_d = \bar{x} \pm \mu_{\text{Ст}}. \quad (17.9)$$

При необходимости определения доверительной вероятности p_d по n известным измерениям малой выборки, при условии, что погрешность среднего значения не выйдет за пределы $\pm \mu_{\text{Ст}}$, задачу решают в такой последовательности: вначале вычисляется среднее значение

σ и $\alpha_{C_T} = \mu_{C_T}/\sigma_0$. С помощью величины α_{C_T} , известного n и табл. 17.2 определяют доверительную вероятность.

17.4. Исключение грубых ошибок ряда

В процессе обработки экспериментальных данных возникает необходимость исключения грубых ошибок ряда. Появление этих ошибок вполне вероятно, а наличие их ощутимо влияет на результат измерений. Однако, прежде чем исключать то или иное измерение, необходимо убедиться, что это действительно грубая ошибка, а не отклонение вследствие статистического разброса. Наиболее простым способом является правило трех сигм: разброс случайных величин не должен превышать

$$x_{\max, \min} = \bar{x} \pm 3\sigma. \quad (17.10)$$

Более достоверными являются методы, базирующиеся на использовании доверительного интервала. Пусть имеется статистический ряд малой выборки, подчиняющийся закону нормального распределения. При наличии грубых ошибок критерии их появления вычисляются по формулам

$$\beta_1 = \frac{(x_{\max} - \bar{x})}{\sigma} \sqrt{\frac{(n-1)}{n}}; \\ \beta_2 = \frac{(\bar{x} - x_{\min})}{\sigma} \sqrt{\frac{(n-1)}{n}}; \quad (17.11)$$

где x_{\max} , x_{\min} – наибольшее и наименьшее значения из n измерений.

В табл. 17.3 приведены в зависимости от доверительной вероятности максимальные значения β_{\max} , возникающие вследствие статистического разброса. Если $\beta_1 > \beta_{\max}$, то значение x_{\max} необходимо исключить из статистического ряда как грубую погрешность. При $\beta_2 < \beta_{\min}$ исключается величина x_{\min} . После исключения грубых ошибок определяют новые значения x и σ из $(n-1)$ или $(n-2)$ измерений.

Второй метод установления грубых ошибок основан на использовании критерия Романовского и применим также для малой выборки. Методика выявления грубых ошибок сводится к следующему. задается доверительной вероятностью p_D и по табл. 17.4 в зависимости от n находится коэффициент q . Вычисляется предельно допустимая абсолютная ошибка одного измерения:

$$\varepsilon_{вр} = \sigma q. \quad (17.12)$$

Если $x - x_{\max} > \varepsilon_{вр}$, то измерение x_{\max} исключают из ряда наблюдений. Этот метод более требователен к очистке ряда наблюдений.

Таблица 17.3

Критерий появления грубых ошибок

n	β_{\max} при p_d			n	β_{\max} при p_d		
	0,90	0,95	0,99		0,90	0,95	0,99
3	1,41	1,41	1,41	15	2,33	2,49	2,80
4	1,64	1,69	1,72	16	2,35	2,52	2,84
5	1,79	1,87	1,96	17	2,38	2,55	2,87
6	1,89	2,00	2,13	18	2,40	2,58	2,90
7	1,97	2,09	2,26	19	2,43	2,60	2,93
8	2,04	2,17	2,37	20	2,45	2,62	2,96
9	2,10	2,24	2,46	25	2,54	2,72	3,07
10	2,15	2,29	2,54	30	2,61	2,79	3,16
11	2,19	2,34	2,61	35	2,67	2,85	3,22
12	2,23	2,39	2,66	40	2,72	2,90	3,28
13	2,26	2,43	2,71	45	2,76	2,95	3,33
14	2,30	2,46	2,76	50	2,80	2,99	3,37

Таблица 17.4

Коэффициент для вычисления предельно допустимой ошибки измерения

n	Значение q при p_d			
	0,95	0,98	0,99	0,995
2	15056	38,97	77,96	779,7
3	4,97	8,04	11,46	36,5
4	3,56	5,08	6,58	14,46
5	3,04	4,10	5,04	9,43
6	2,78	3,64	4,36	7,41
7	2,62	3,36	3,96	6,37
8	2,51	3,18	3,71	5,73
9	2,43	3,05	3,54	5,31
10	2,34	2,96	3,41	5,01
12	2,29	2,83	3,23	4,62
14	2,24	2,74	3,12	4,37
16	2,20	2,68	3,04	4,20
18	2,17	2,64	3,00	4,07
20	2,15	2,60	2,93	3,98
∞	1,96	2,33	2,58	3,29

Таким образом, при анализе результатов измерений можно применять для приближенной оценки погрешности и такую методику: вычислить по (17.1) среднеквадратичное отклонение σ ; определить с помощью (17.5) σ_0 ; принять доверительную вероятность p_d и найти доверительные интервалы μ_{C_T} из (17.8); окончательно установить действительное значение измеряемой величины x_d по формуле (17.9).

В случае более глубокого анализа экспериментальных данных рекомендуется такая последовательность:

- 1) полученные экспериментальные данные анализируются и исключаются систематические ошибки;
- 2) обнаруживаются грубые ошибки и промахи: устанавливаются подозрительные значения x_{\max} и x_{\min} ; определяется среднеквадратичное отклонение σ ; вычисляются по (17.11) критерии β_1, β_2 и сопоставляются с $\beta_{\max}, \beta_{\min}$, исключаются, при необходимости, из статистического ряда x_{\max} или x_{\min} и формируется новый ряд;
- 3) вычисляются среднеарифметическое \bar{x} , погрешности отдельных измерений $(\bar{x} - x_i)$ и среднеквадратичное отклонение нового ряда σ ;
- 4) находятся среднеквадратичное σ_0 серии измерений и коэффициент вариации k_B ;
- 5) при большой выборке задаются доверительной вероятностью $p_d = \varphi(t)$ или уравнением значимости $(1 - p_d)$ и по табл. 17.1 определяют t ;
- 6) при малой выборке ($n < 30$) в зависимости от принятой доверительной вероятности p_d и числа членов ряда n принимают коэффициент Стьюдента α_{C_T} ; с помощью формулы (17.2) для большой выборки или (17.8) для малой выборки определяют доверительный интервал;
- 7) устанавливают по (17.9) действительное значение исследуемой величины.
- 8) оценивают относительную погрешность (%) результата серии измерений при заданной доверительной вероятности p_d

$$\sigma = \frac{\sigma_0 \alpha_{C_T}}{x} \cdot 100. \quad (17.13)$$

Если погрешность серии измерений соизмерима с погрешностью прибора $B_{пр}$, то границы доверительного интервала

$$\mu_{C_T} = \sqrt{\sigma_0^2 \alpha_{C_T} + \left[\frac{\alpha_{C_T}(\infty)}{3} \right]}. \quad (17.14)$$

Формулой (17.14) следует пользоваться при $\sigma_0 \alpha_{C_T} \leq 3B_{пр}$.

Список литературы

1. Крутов В. И., Грушко И. М., Попов В. В. и др. Основы научных исследований: Учебник для техн. вузов / Под ред. В. И. Крутова, В. В. Попова. – М.: Высшая школа, 1989. – 400 с.
2. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. 14-е изд. – М.: Большая медведица, АПП «Джангар», 1999. – 864 с.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1973. – 366 с.
4. Щиголаев Б. М. Математическая обработка наблюдений. – М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1965. – 344 с.
5. Байда Л. И., Доброворский Н. С., Душин Е. М. и др. Электрические измерения: Учебник для вузов. – Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1980. – 392 с.

18

ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

18.1. Характеристика возможностей силовой электроники

В соответствии с заданием на разработку многие проектируемые устройства промышленной электроники, управления и информатики должны создавать мощные электрические сигналы, характеризующиеся большими токами и напряжениями. Одним из наиболее эффективных подходов к решению таких проблем является использование современных средств силовой электроники.

Практика применения силовых электронных устройств показывает, что именно они во многих случаях обеспечивают наилучшие технико-экономические показатели. Поэтому при выборе технических решений целесообразно рассмотреть возможность использования силовой электроники даже там, где традиционно используются другие средства. К примеру, для оперативного подключения нагрузки к источнику питания и для ее отключения широко применяются электромеханические устройства (реле, контакторы, пускатели). Но в настоящее время вместо них все чаще успешно применяют бесконтактные переключающие устройства (прерыватели, твердотельные реле).

Достоинства устройств силовой электроники являются:

- большое быстродействие;
- высокая надежность;
- большой срок службы;
- высокие значения коэффициента полезного действия;
- малые размеры и вес;
- простота обслуживания и малые эксплуатационные расходы;
- малый уровень шума;
- простота сопряжения с устройствами информативной электроники.

Часто устройства силовой электроники выполняют типовые функции (указанные ниже в скобках термины также широко используются в электронике):

- соединение и рассоединение нагрузки и источника постоянно-го и переменного напряжения;

- преобразование переменного напряжения в однонаправленное (выпрямленное);
- преобразование постоянного напряжения в переменное (инвертирование);
- изменение (преобразование) частоты переменного напряжения;
- изменение (преобразование) числа фаз переменного напряжения;
- уменьшение (компенсация) реактивной мощности, потребляемой от питающей сети;
- уменьшение (компенсация) высших гармонических составляющих тока, потребляемого от питающей сети.

Для выполнения подобных функций разработано большое число типовых устройств силовой электроники (бесконтактные переключатели, выпрямители, инверторы и т. д.). Существуют многочисленные варианты типовых устройств, каждый из которых наилучшим образом соответствует конкретным условиям.

Вполне возможно, что типовые устройства в той или иной комбинации позволят решить некоторую задачу во всей полноте. В этом случае разработчик должен выбрать из существующих типовых оптимальное техническое решение.

Но устройства силовой электроники широко используются также для выполнения таких функций, которые обычно не относят к типовым, в связи с чем их следует называть специальными (а соответствующие устройства – специализированными). К примеру, в сварочном оборудовании применяют электронные узлы, создающие короткие импульсы высокого напряжения, облегчающие возникновение электрической дуги. К настоящему времени разработано большое число специализированных силовых электронных устройств. Поэтому вполне возможно, что разработчику удастся использовать уже предложенные устройства для решения даже особой технической задачи.

Вместе с тем может возникнуть необходимость разработки нового решения. Область применения силовой электроники постоянно расширяется, а накопленный опыт демонстрирует ее высокую эффективность. Поэтому оправданными являются усилия по применению силовых электронных устройств для выполнения новых функций. Это может потребовать разработки новых схем или новых алгоритмов функционирования уже существующих устройств.

Устройства силовой электроники по существу предназначаются для обеспечения требующейся временной диаграммы напряжения или тока нагрузки. Большим преимуществом силовой электроники является принципиальная возможность получения сигналов практически любой заданной формы, несмотря на то, что силовые электронные приборы для обеспечения высоких значений коэффициента полезного действия работают в ключевом режиме, который требует применения особых алгоритмов и схемотехнических решений.



Однако, решаясь на отыскание нового решения, нужно помнить, что успех не гарантирован. Дипломное проектирование, как и практически всякое другое, выполняется в жестких временных рамках, и для него удовлетворительное стандартное решение несоизмеримо лучше отличного оригинального, но найденного после установленных сроков.

18.2. Общие рекомендации по использованию силовых электронных устройств

В настоящее время силовая электроника развивается особенно быстро. Постоянно появляются новые, все более совершенные силовые электронные приборы и устройства, а также предназначенные для них устройства управления и защиты (в частности, драйверы и контроллеры). Поэтому в начале проектирования полезно, используя специальную литературу и ресурсы Интернета, ознакомиться с последними, наиболее совершенными разработками, имеющимися на рынке.

Может оказаться, что более современные приборы и устройства существенно упростят проектирование и вместе с тем обеспечат более высокие технико-экономические показатели. Например, появление силового полевого транзистора с увеличенным значением максимального допустимого тока стока может позволить отказаться от параллельного соединения менее мощных транзисторов, что упростит не только силовую часть, но и систему управления разрабатываемого устройства.

Устройство силовой электроники потребляет от источника питания значительную мощность, поэтому одной из основных задач при проектировании является достижение по возможности большего значения коэффициента полезного действия. В связи с ростом стоимости электроэнергии эта проблема становится все более актуальной.

Обычно основные потери электроэнергии имеют место в силовых электронных приборах, силовых трансформаторах, катушках индуктивности (реакторах) и конденсаторах, а также в силовых проводах и шинах.

Конечно, существенные потери возможны и в других элементах. Например, в устройствах для индукционного нагрева значительная мощность теряется в индукторах. Даже в конструктивных элементах, особенно при непродуманном выборе их материалов, конфигураций и взаимного расположения, возможны существенные потери энергии.

Мощность, идущая на нагрев силового электронного прибора, определяется напряжением на открытом приборе при заданном постоянном токе, а также его динамическими свойствами: чем быстрее

включается и выключается прибор, тем меньше потери на его переключение. При увеличении частоты переключения общие потери, естественно, увеличиваются. Но приборы с меньшими потерями обычно имеют более высокую стоимость. Все эти соображения необходимо учитывать при комплексном анализе требований к устройству, который должен предшествовать одному из важнейших проектных решений – выбору типа силовых приборов.

Тепловые потери в трансформаторе и катушке индуктивности зависят от материала и конструктивных параметров как магнитного сердечника, так и обмоток. При увеличении частоты переменного напряжения эти потери могут существенно увеличиваться.

При выборе конденсатора необходимо учитывать, что мощность, идущая на его нагрев, сильно зависит от формы и частоты импульсов тока (от частоты и амплитуды переменной составляющей напряжения). Использование конденсаторов, не соответствующих режиму работы силового электронного устройства, может не только снизить коэффициент полезного действия, но и привести к выходу их из строя.

Проектирование силовых электрических цепей, выбор используемых в них проводов и шин является ответственной задачей, существенно более сложной в сравнении с разработкой слаботочных цепей. Она особенно усложняется при использовании повышенных частот.

С повышением частоты все большую роль играет поверхностный эффект, состоящий в неравномерном распределении тока по сечению проводника, при котором наибольшая плотность тока имеет место у поверхности проводника. Значительное влияние на процесс протекания тока может оказывать эффект близости, который выражается в концентрации токов у определенных поверхностей проводников в результате взаимодействия электромагнитных полей токов нескольких проводников. При уменьшении расстояния между проводниками эффект близости усиливается. Часто эффект близости рассматривают как разновидность поверхностного эффекта.

Наличие поверхностного эффекта означает неэффективное использование сечения проводника, следствием которого являются повышенные тепловые потери. Одним из методов борьбы с поверхностным эффектом является применение проводников, состоящих из скрученных изолированных проволок.

Приступая к проектированию, разработчик должен выбрать способ гальванической развязки системы управления и защиты с силовой частью устройства.

Отсутствие этой гальванической развязки существенно повышает опасность поражения электрическим током для обслуживающего персонала, а также может повысить вероятность сбоев в работе системы управления и защиты и даже выхода ее из строя под действи-

ем высоких напряжений силовой части. Поэтому устройства без гальванической развязки используются достаточно редко.

Для обеспечения указанной гальванической развязки в настоящее время наиболее широко используются оптоэлектронные приборы (в частности, оптопары) и трансформаторы. Полезно иметь в виду, что оптоэлектронные приборы постоянно совершенствуются и, в частности, напряжение, выдерживаемое их изоляцией, увеличивается. Это значительно облегчает проектирование узлов гальванической развязки.

Во многих случаях желательна или необходима гальваническая развязка между силовой питающей электрической сетью и нагрузкой. Такая гальваническая развязка может существенно повысить безопасность обслуживающего персонала, упростить эксплуатацию устройства и снизить вероятность крупных аварий.

Рассматриваемая гальваническая развязка обеспечивается с помощью трансформаторов. Однако нужно учитывать, что силовой трансформатор для напряжения промышленной частоты (50 Гц) при высоком коэффициенте полезного действия может иметь значительную массу, размеры и стоимость, а трансформатор для напряжения повышенной частоты, обладающий меньшими размерами и массой, может характеризоваться существенно меньшим значением коэффициента полезного действия.

Силовые электрические цепи мощных электронных устройств рассчитаны на длительное протекание достаточно больших токов. Кратковременно они могут выдерживать во много раз большие токи. Поэтому, в случае аварии (например, пробоя силового диода или сбоя в системе управления, формирующей импульсы управления для силовых транзисторов), возможно быстрое развитие сильноточных процессов, опасных и для обслуживающего персонала, и для электронного устройства, и для питающей электрической сети. Это требует от разработчика предусмотреть меры по максимальному снижению или недопущению ущерба от возможных аварий.

В общем случае нейтрализация аварий может быть достигнута использованием специальных схемотехнических решений в силовой части и надением системы управления и защиты соответствующими функциями. Например, во входной части силовой электрической цепи могут быть предусмотрены катушки индуктивности (реакторы), снижающие скорость нарастания тока в случае аварии, что увеличивает время, предоставляемое системе управления и защиты на отключение силового устройства от сети. Вместе с этим система управления и защиты может быть оснащена соответствующими датчиками и программным обеспечением микроконтроллеров с целью выявления опасных режимов на возможно более ранних стадиях.

Важнейшие элементы силовых устройств – силовые электронные приборы, – работая в ключевом режиме и формируя мощные импульсы тока и напряжения с крутыми фронтами и срезами, сами могут

вызывать опасные перенапряжения, перегрузки по току, недопустимо быстрый рост тока или напряжения. Опасность усугубляется очень быстрым развитием процесса пробоя и малой тепловой инерционностью полупроводниковых приборов. Естественно, перенапряжения могут быть вызваны также и скачками напряжения в питающей сети (например, из-за влияния других силовых устройств).

В соответствии с этим разработчик должен предусмотреть меры по защите силовых полупроводниковых приборов. В частности, для защиты от перенапряжений широко используют RC-цепочки и варисторы.

Для силовых электронных устройств характерны большие значения токов, потребляемых от питающей сети, причем по форме эти токи могут существенно отличаться от синусоидальных, что искажает напряжение и оказывает негативное влияние на электрооборудование сети, а также на другие подключенные к ней устройства.

Разрабатываемые устройства должны соответствовать достаточно жестким требованиям к форме тока, потребляемого от сети. В некоторых случаях это вынуждает применять специальные устройства (компенсаторы, корректоры), уменьшающие искажение напряжения.

Непременным условием успеха в разработке силового электронного устройства является глубокое понимание особенностей протекающих в нем электрических процессов, которые отличаются большой сложностью. Неоценимую пользу в изучении этих процессов может дать схемотехническое моделирование, рассматриваемое в настоящем учебнике.

18.3. Бесконтактные переключающие устройства (прерыватели)

Прерыватели широко используют для подключения нагрузки к питающей сети и отключения от сети. Если допустимая частота коммутаций прерывателя достаточно высока, он может применяться для регулирования мощности нагрузки. В этом случае средняя на некотором значительном отрезке времени мощность определяется частотой подключений нагрузки и продолжительностью подключенного состояния.

В прерывателях переменного тока для коммутаций в цепях промышленной частоты, как правило, используются незапираемые тиристоры.

Для включения тиристоров в ряде случаев применяют простейшие схемы управления, создающие ток управляющего электрода при использовании анодного напряжения тиристора. Однако такие схемы управления не обеспечивают включение тиристора непосредственно



в момент перехода питающего напряжения через ноль (т. е. не обеспечивают нулевой угол управления), а параметры импульса управления могут сильно изменяться в зависимости от режима работы, что не гарантирует включение тиристора в строго заданные моменты времени и снижает надежность.

Во многих случаях предпочтение следует отдавать более совершенным системам управления, которые формируют стабильные импульсы с заданными параметрами и, в частности, с крутыми фронтами.

Включение незапираемого тиристора происходит при изменении полярности анодного напряжения и поэтому его недостаток, состоящий в неполной управляемости, практически не проявляется.

При проектировании прерывателей переменного тока необходимо учитывать, что, согласно действующему стандарту, недопустимо использование таких способов управления, которые вызывают появление в токе, потребляемом от питающей сети, постоянной составляющей и четных гармоник. Поэтому не могут применяться способы регулирования мощности, создающие различные по форме положительные и отрицательные импульсы потребляемого тока (что, например, исключает использование однополупериодных схем).

В прерывателях постоянного тока в настоящее время наиболее широко применяют полевые транзисторы, IGBT и запираемые тиристоры.

Полевые транзисторы обычно способны осуществлять коммутации с частотой в сотни килогерц, биполярные транзисторы – в десятки килогерц, а запираемые тиристоры – в сотни герц. Однако следует учитывать, что максимально допустимая частота коммутаций прерывателей, выпускаемых промышленностью, может быть очень малой и составлять всего единицы герц.

В некоторых случаях необходимо выполнять коммутации в таких цепях постоянного тока, в которых полярность питающего напряжения может изменяться. Тогда следует использовать двунаправленные прерыватели, которые предназначены для решения таких задач. Эти прерыватели могут использоваться и в цепях переменного тока.

18.4. Управляемые выпрямители

Выпрямители преобразуют переменное напряжение в напряжение одной полярности (выпрямленное).

В управляемых выпрямителях обычно используют незапираемые тиристоры.

К настоящему времени разработано большое число различных схем выпрямителей, каждая из которых обладает некоторыми преимуществами в определенных условиях работы. В некоторых случа-

ях для осознания этих преимуществ недостаточно иметь только общие представления о работе схемы. Может потребоваться детальное изучение режимов работы выпрямителя и требований, предъявляемых к нему с учетом особенностей нагрузки. Для сокращения затрат времени на выбор конкретной схемы выпрямления полезно, используя специальную литературу, ознакомиться с опытом применения выпрямителей для решения аналогичных задач.

Вместе с тем на практике наиболее широко используется сравнительно небольшое число типов выпрямителей, обладающих универсальными свойствами. Если при решении задачи преобразования переменного напряжения в однонаправленное не требуется выполнять явно выраженные специфические требования, то такие выпрямители обычно оказываются наилучшими. К ним прежде всего относятся однофазный мостовой и трехфазный мостовой выпрямители.

Однофазное переменное напряжение обычно используется для питания устройств сравнительно небольшой мощности – не больше сотен ватт или, в некоторых случаях, единиц киловатт. Поэтому и однофазные мостовые выпрямители обычно характеризуются относительно малой мощностью.

Однако при больших достоинствах однофазного мостового выпрямителя иногда оказывается, что он потребляет заметную мощность, идущую на нагрев тиристоров, что снижает коэффициент полезного действия. Причиной этого является протекание тока нагрузки через два включенных последовательно тиристора. Несмотря на то, что падение напряжения на включенном тиристоре невелико (около одного вольта), этот недостаток может проявить себя при небольших значениях выпрямленного напряжения и больших токах. В такой ситуации, возможно, лучшим вариантом будет использование однофазного двухполупериодного выпрямителя со средней точкой, в котором ток нагрузки протекает через один тиристор (но такой выпрямитель требует применения трансформатора).

Трехфазный мостовой выпрямитель широко применяют в устройствах большой мощности.

Принцип действия рассматриваемого выпрямителя подобен принципу действия однофазного мостового, однако более сложен. Поэтому проектирование как самого трехфазного выпрямителя, так и его системы управления и защиты требует существенно больших усилий разработчика.

Для трехфазного мостового выпрямителя характерно то, что каждый тиристор в течение периода питающего напряжения проводит ток нагрузки совместно с двумя другими тиристорами. При прерывистом токе это требует использования вдвоенных импульсов управления.

Выбирая способ изменения выпрямленного напряжения, нужно учитывать, что при больших углах управления мощный выпрями-



тель может сильно искажать напряжение питающей сети. Одним из вариантов решения этой проблемы являются использование нулевого угла управления и применение дополнительного устройства, осуществляющего изменение напряжения (преобразователя постоянного напряжения).

18.5. Инверторы

Инверторы осуществляют преобразование постоянного напряжения в переменное.

В инверторах, как правило, используются тиристоры, полевые транзисторы и IGBT.

Если в цепи нагрузки имеется источник энергии, задающий частоту и величину входного напряжения, то используется зависимый инвертор (ведомый сетью). Иначе применяется автономный (независимый) инвертор.

Ранее в инверторах обычно применялись незапираемые тиристоры и поэтому не удавалось достичь больших значений частоты выходного напряжения. Обычно она составляла единицы килогерц и, в редких случаях, при использовании схем умножения частоты, была большей.

Важный недостаток незапираемых тиристоров – неполная управляемость – сильно проявляется в инверторах. Если выключающийся тиристор находится под обратным напряжением недостаточно большое время, при возникновении прямого анодного напряжения он может включиться самопроизвольно. В результате возникнет аварийный режим работы инвертора – срыв инвертирования (опрокидывание инвертора), который может привести даже к выходу инвертора из строя.

Использование запираемых тиристоров упрощает управление и позволяет применять силовые схемы, имеющие лучшие технико-экономические показатели. Однако и в этом случае достижение высоких частот выходного напряжения затруднительно.

В настоящее время в качестве силовых полупроводниковых приборов, составляющих основу инверторов, очень широко используют полевые транзисторы и IGBT. Полевые транзисторы способны обеспечить частоту выходного напряжения инвертора, превышающую 100 кГц, а IGBT – в десятки килогерц. Но, естественно, как IGBT, так и полевые транзисторы могут с успехом применяться и на более низких частотах.

Использование полевых транзисторов и IGBT позволяет, применяя широтно-импульсную модуляцию, формировать напряжение на нагрузке или ток нагрузки с различными требуемыми временны-

ми диаграммами. Это радикально расширяет область применения силовой электроники.

18.6. Преобразователи частоты

Преобразователи частоты преобразуют переменное напряжение одной частоты в переменное напряжение другой частоты. При этом в некоторых случаях изменяется также и число фаз напряжения. Например, трехфазное напряжение преобразуется в однофазное. Преобразование частоты обычно сопровождается изменением и величины напряжения.

Частота должна быть преобразована, если имеющийся в наличии силовой источник напряжения (например, питающая сеть) не удовлетворяет требованиям нагрузки. Например, для питания индуктора, использующегося в установках индукционного нагрева или плавки металлов, часто требуется напряжение с частотой в сотни герц или единицы килогерц, что существенно больше частоты напряжения промышленной сети. Но может оказаться необходимым и уменьшение частоты (например, для питания электродвигателей).

Наряду с этим повышение частоты (до десятков килогерц) все шире используется для резкого снижения габаритных размеров и массы силовых трансформаторов, обеспечивающих гальваническую развязку и изменение уровней напряжений в силовых цепях.

Для преобразования частоты могут использоваться два основных подхода:

- выпрямление переменного напряжения с последующим инвертированием;
- формирование переменного напряжения требуемой частоты при непосредственном использовании имеющегося переменного напряжения.

Первому подходу соответствует преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока, содержащий выпрямитель, сглаживающий фильтр и инвертор, а второму – преобразователь частоты с непосредственной связью (непосредственный преобразователь).

Конечно, выбор способа преобразования должен производиться на основе всестороннего анализа предъявляемых к преобразователю требований. Однако перед выбором следует рассмотреть уже применяющиеся на практике решения и проанализировать накопленный опыт. Например известно, что для индукционного нагрева на повышенных частотах целесообразно применять преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока.

В преобразователях частоты с промежуточным звеном постоянного тока, характеризующихся малой мощностью (до сотен ватт, а в



некоторых случаях и до единиц киловатт) очень широко используется однофазный мостовой выпрямитель. Если мощность значительная, то обычно применяется трехфазный мостовой выпрямитель.

Между выпрямителем и инвертором необходимо устанавливать сглаживающий фильтр, который должен, с одной стороны, снижать пульсации выпрямленного напряжения, а с другой – уменьшать влияние инвертора на питающую сеть. Хорошие результаты обычно дают индуктивный и индуктивно-емкостной фильтр. Если применяется инвертор тока, то роль индуктивного фильтра может играть входная катушка индуктивности (входной реактор) инвертора.

Свойства преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока обычно в наибольшей степени определяются свойствами инвертора. Поэтому выбору типа инвертора и типа его силовых полупроводниковых приборов следует уделить особое внимание.

Во многих случаях преобразователь частоты должен обеспечивать регулирование как частоты, так величины выходного напряжения. В преобразователях с промежуточным звеном постоянного тока изменение частоты может быть достигнуто изменением режима работы инвертора, а изменение величины выходного напряжения – изменением режима работы как выпрямителя, так и инвертора. Однако нужно учитывать, что работа выпрямителя с большими значениями угла управления может иметь следствием существенное искажение напряжения питающей сети. Для минимизации этого искажения может потребоваться переход к малому или нулевому углу управления. Но тогда глубокое регулирование выходного напряжения будет возможным только при использовании или соответствующих схем инвертора, или дополнительного преобразователя постоянного напряжения, устанавливаемого между выпрямителем и инвертором.

18.7. Преобразователи постоянного напряжения (импульсные преобразователи напряжения)

При разработке различных устройств управления, информатики и промышленной электроники часто требуется изменять уровень постоянного напряжения. Для решения этой задачи используют преобразователи постоянного напряжения. Так как в этих устройствах силовые электронные приборы работают в импульсном режиме, их называют также импульсными преобразователями напряжения.

Но изменение уровня напряжения не всегда является единственной функцией рассматриваемых устройств. Определенные схемы преобразователей постоянного напряжения могут обеспечивать полу-

чение нескольких различных выходных напряжений, изменять полярность напряжения относительно точки с нулевым потенциалом (т. е. относительно «земли»), выполнять гальваническую развязку силовых входных и выходных цепей. При оснащении преобразователя соответствующей системой управления он оказывается в состоянии стабилизировать и регулировать выходное напряжение.

В настоящее время промышленность выпускает различные типы преобразователей постоянного напряжения. Возможно, что некоторые из них будут удовлетворять предъявляемым требованиям и тогда работа проектировщика сведется к выбору наилучшего варианта. В противном случае необходимо выполнить новую разработку.

Важнейшими решениями при проектировании постоянного напряжения является выбор схемы силовой части, типа силовых полупроводниковых приборов и частоты переключения этих приборов.

В настоящее время наилучшие результаты обычно дает использование в рассматриваемых преобразователях полевых транзисторов и IGBT.

Если необходимо обеспечить гальваническую развязку между источником входного напряжения и нагрузкой, то должен использоваться трансформаторный преобразователь. Трансформатор позволяет также достаточно просто изменить уровень напряжения. Используя несколько вторичных обмоток, можно получить выходные напряжения различных уровней, причем соответствующие вторичные цепи также могут быть гальванически развязаны. Переданное через трансформатор напряжение должно быть выпрямлено, а пульсации должны быть уменьшены с помощью сглаживающего фильтра.

На практике используются различные схемы трансформаторных преобразователей и каждая из них имеет в конкретных условиях определенные преимущества. Здесь, как и при проектировании других устройств, выбору схемы должны предшествовать детальный анализ конкретных требований, предъявляемых к преобразователю, и изучение накопленного специалистами опыта.

Для питания нагрузок сравнительно малой мощности (в десятки ватт, а иногда и более) хорошие результаты дает использование одноконтурных трансформаторных преобразователей, для которых характерно то, что энергия из цепи первичной обмотки передается в цепь вторичной обмотки или при включенном, или при выключенном силовом транзисторе. При этом часто при более значительных мощностях преимущество имеют прямоходовые преобразователи, в которых передача энергии происходит при включенном транзисторе.

Проектируя одноконтурные преобразователи, следует учитывать их характерный недостаток – подмагничивание сердечника трансформатора.

Если мощность значительна, то целесообразно применить двухконтурный преобразователь, в котором энергия передается во вторичную в

оба полупериода переменного напряжения. В двухтактных схемах сердечник трансформатора используется наиболее эффективно.

В том случае, когда гальваническая развязка не требуется, следует рассмотреть вариант применения бестрансформаторного преобразователя. К настоящему времени разработаны схемы таких преобразователей, способные как понижать, так и повышать напряжение, а также изменять его полярность.

Для управления преобразователями постоянного напряжения, имеющими типовые схемы, часто целесообразно использовать выпускаемые промышленностью специализированные микросхемы. Их применение может существенно облегчить задачу проектировщика.

Список литературы

1. *Лачин В. И., Савелов Н. С.* Электроника: Учеб. пособие. 5-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 704 с.
2. *Зиновьев Г. С.* Основы силовой электроники. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
3. *Прянишников В. А.* Электроника: Полный курс лекций. 4-е изд. – СПб.: КОРОНА принт, 2004. – 416 с.
4. *Семенов Б. Ю.* Силовая электроника для любителей и профессионалов. – М.: Солон-Р, 2001. – 327 с.

19

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

19.1. Содержание конструкторско-технологической части дипломного проекта

В конструкторско-технологической части разрабатываются конструкция и технология изготовления проектируемого устройства или системы, а также составляется эксплуатационная документация. Глубина проработки диктуется сложностью аппаратных средств. Для технически сложных систем и устройств детально рассматриваются их отдельные фрагменты, например, конструктивно законченный электронный блок (ЭБ), имеющий собственный корпус, или функционально законченный бескорпусный электронный модуль. Остальная часть конструкции описывается в общих чертах с указанием требований, которые предъявляются с ее стороны к габаритным и установочным размерам и другим параметрам разрабатываемого блока или модуля.

Конкретное содержание конструкторско-технологической части устанавливается руководителем дипломного проекта и, в общем случае, предусматривает решение следующих задач:

- выбор типов комплектующих изделий;
- компоновка электронного блока;
- разработка конструкции одного из электронных узлов;
- выбор радиаторов для силовых полупроводниковых приборов;
- расчет параметров теплового режима ЭБ;
- проектирование системы виброизоляции ЭБ;
- описание технологии изготовления отдельных деталей, сборки и регулировки узлов и устройства в целом;
- разработка инструкции по эксплуатации устройства и др.

Результатом данной работы являются спецификация и сборочный чертеж электронного блока, спецификация и сборочный чертеж электронного узла, чертеж печатной платы и другие документы, предусмотренные ЕСКД. Для сложных устройств вместо сборочного черте-



жа может быть разработан чертеж общего вида ЭБ, который требует менее детальной проработки конструкции.

19.2. Выбор типов комплектующих изделий

В электронной аппаратуре, как, пожалуй, ни в какой другой, велика доля покупных комплектующих изделий. Выбор типов комплектующих изделий – это компетенция разработчика принципиальной схемы, а не конструктора. Однако, поскольку студент-дипломник выступает одновременно в обеих указанных ипостасях, считаем уместным привести некоторые рекомендации по этому поводу. Тем более что и в реальной инженерной деятельности конструктор может лучше, чем разработчик, разбираться в покупных унифицированных корпусах аппаратуры, установочных изделиях (электрических соединителях, коммутационных изделиях, держателях предохранителей, светодиодов и т. п.), кабельной продукции и ряде других вопросов.

В проектируемом устройстве должны использоваться современные комплектующие изделия отечественного и импортного производства. Источниками информации при выборе данных изделий могут служить:

- справочная литература, желательно, не ранее 2000 г. издания;
- каталоги продавцов и производителей электронных компонентов и других изделий в виде печатной продукции, на лазерных дисках, либо в сети Internet: www.eltech.spb.ru, www.symmetron.ru, www.elpro.ru, www.rtkt.ru, www.prosoft.ru и др.

Выбирая типы любых комплектующих изделий, кроме функциональных параметров, необходимо учитывать условия их эксплуатации: рабочий диапазон температур, механические воздействия и другие внешние факторы, которые часто нормируются указанием группы условий эксплуатации в соответствии с государственными стандартами. По этим критериям некоторые изделия могут оказаться непригодными для вашего конкретного применения. Необходимо иметь в виду, что большинство изделий имеют исполнения для аппаратуры широкого и специального применения (авиационная, автомобильная, военная и другая подобная техника). Например, одна и та же микросхема для аппаратуры широкого применения может выпускаться в пластмассовом корпусе, а для специальной аппаратуры – в металлокерамическом или металлоглазном корпусе.

При оценке функциональных характеристик наиболее распространенных изделий, монтируемых на панелях или шасси ЭБ, в первую очередь необходимо учитывать следующее.

Тумблеры, кнопки, реле выбираются с учетом числа и типа контактных групп, коммутационной способности (обращать внимание на

вид тока: постоянный или переменный!), способа монтажа и размеров. Для электромагнитных реле важными параметрами являются также напряжение (ток) питания катушки, время срабатывания и отпускания, время непрерывного нахождения катушки под током. Важно помнить, что большинство типов малогабаритных электромагнитных реле не рассчитаны на продолжительное непрерывное нахождение обмотки под током.

Цифровые светодиодные индикаторы должны иметь высоту знака, обеспечивающую уверенное считывание показаний, например, для щитового оборудования – не менее 15...25 мм. В случае необходимости нужное число разрядов может быть получено установкой нескольких элементов с меньшим числом знаков.

Унифицированные сетевые трансформаторы должны иметь паспортную мощность вторичных обмоток не менее мощности, потребляемой схемой. Номинальную мощность встраиваемых импульсных блоков питания рекомендуется выбирать с запасом 20–30%.

Для подключения печатных плат используются соединители с числом контактов не менее заданного. Вилка соединителя может быть навесным элементом или иметь вид концевых печатных контактов на плате. Необходимо обращать внимание на предельно допускаемые параметры соединителя: минимальное и максимальное значения силы тока через контакт, а также рабочее напряжение.

Для межблочного монтажа применяется большое количество типов соединителей: универсальные негерметичные (СНП101, ОНЦРГ09 и др.), универсальные герметичные (2РМГ и др.), специальные (например, ДВ-9 для интерфейса RS232) и др. Для каждой цепи, как правило, необходимо использовать отдельный соединитель, число контактов которого может быть больше необходимого. Должна быть исключена или сведена к минимуму возможность неправильного подключения внешних цепей путем выбора разных типов соединителей и вариантов расположения штырей и гнезд. Со стороны подвода сетевого напряжения на соединителе должны быть гнезда.

Для блоков со степенью защиты ниже IP54 в качестве внешних соединителей широко используются клеммники под зажим провода. Допускается объединять на одном клеммнике провода разных цепей, в том числе питающей сети. Для снижения вероятности вывода прибора из строя при неправильном подключении между контактами высокого и низкого напряжения иногда оставляют неиспользуемые или заземленные контакты. Для блоков со степенью защиты IP54 и выше используются только специальные кабельные вводы с зажимным уплотнительным резиновым кольцом (приложение Г). При этом внутри блока для подключения кабелей предусматриваются клеммники.

Для защиты от перегрузки по току применяются плавкие вставки, устанавливаемые в держатели на панели ЭБ. Плавкие вставки срабатывают при токах, более чем в два раза превышающих номинальный ток I_H . При выборе номинального тока I_H можно руководствоваться ампер-секундной характеристикой вставки ВПБ 6, которая достаточно типична:

<i>Ток</i>	<i>Время срабатывания</i>
$I = 2,1I_H$	не более 20 с
$I = 2,75I_H$	0,02–1,5 с
$I = 4I_H$	0,008–0,4 с
$I = 10I_H$	не более 0,08 с

При низких рабочих напряжениях все более широкое распространение получают самовосстанавливающиеся полупроводниковые предохранители.

19.3. Компоновка электронного блока

Компоновка электронного блока относится к числу наиболее сложных и творческих инженерных задач и предусматривает решение следующих взаимосвязанных вопросов:

- выбор корпуса блока с учетом заданных условий эксплуатации;
- обеспечение устойчивости блока к дестабилизирующим воздействиям (влаге, пыли, вибрациям, ударам, электромагнитным помехам и др.);
- выбор типов и мест расположения элементов управления и индикации с учетом эксплуатационных и эргономических требований;
- распределение электронных компонентов по печатным платам (ПП), выбор размеров и числа печатных плат;
- обеспечение охлаждения блока в целом и его отдельных элементов;
- компоновка составных частей блока внутри корпуса;
- разработка печатного и объемного электрического монтажа;
- выбор или разработка источников питания, а также моточных изделий (трансформаторов, дросселей).

Перед началом компоновки должно быть принято решение о том, в каком корпусе будет выполнено устройство: унифицированном или специально разработанном. Корпус собственной конструкции часто

способен наиболее полно удовлетворить требования технического задания, но для него нужно разрабатывать рабочую документацию и технологию изготовления, приобретать необходимые материалы и комплектующие изделия.

В связи с этим при проектировании электронной аппаратуры широко используются унифицированные (базовые) несущие конструкции. Важным преимуществом базовых конструкций является то, что они производятся специализированными предприятиями по отработанной технологии. Это гарантирует высокое качество и относительно невысокую стоимость этих изделий.

Выбор базовых несущих конструкций должен осуществляться с учетом возможности их поставки. На практике оказывается, что типовые конструкции по ГОСТ 20504-81, ГОСТ Р 51623-2000 приобрести практически невозможно либо они очень дороги. Вместе с тем в широком ассортименте доступны несущие конструкции импортного производства: от простейших пластмассовых корпусов до сложных систем типа конструктивов Евромеханики [1–3].

Корпус блока должен обеспечивать необходимую степень IP защиты схемы от проникновения твердых тел и воды по ГОСТ 14254-96 и МЭК 529 [4]. Маркировка IP (табл. Б.1) позволяет определить, возможно ли выполнение в корпусе вентиляционных отверстий и каковы максимальные размеры этих отверстий. Некоторые типы корпусов электронной аппаратуры описаны в приложении В.

Для степеней защиты IP53 и выше необходима защита органов управления от воды и пыли. Возможные варианты:

- герметизированные элементы управления (пленочные клавиатуры, кнопки с резиновым протектором);
- расположение органов управления под общей герметичной крышкой блока;
- крышки с прокладками, закрывающие отдельные органы управления.

В передней панели или герметичной крышке блока под индикаторы предусматриваются окна, исполнение которых определяется заданной степенью пылевлагозащиты корпуса. Для цифровых светодиодных индикаторов обязательно предусматриваются светофильтры:

- для индикаторов красного цвета – темно-пурпурный или нейтральный (серый) светофильтр;
- для индикаторов зеленого цвета – желто-зеленый или зеленый светофильтр при низких уровнях внешней освещенности; нейтральный светофильтр при умеренной и высокой освещенности;
- для индикаторов желтого цвета – темно-желтый или оранжевый светофильтр при низкой внешней освещенности; нейтральный или оранжевый светофильтр при умеренной и высокой освещенности.

Необходимо учитывать способ монтажа блока (на столе, на панели, на DIN-рейке, в стойке и др.). Для крепления внутри несущей конструкции более высокого уровня блок должен иметь соответствующие конструктивные элементы (отверстия в передней панели, крепежные уголки или кронштейны, держатели, невыпадающие винты).

При распределении элементов схемы устройства по печатным платам следует руководствоваться, как правило, функционально-узловым принципом. Функционально-узловой принцип предполагает размещение на каждой из плат одного функционально законченного узла целиком, что обеспечивает минимальное число внешних связей. В случае необходимости, на одной плате могут располагаться несколько небольших функциональных узлов. Размещение элементов функционального узла на двух печатных платах допускается лишь в отдельных случаях, причем деление схемы на части должно производиться по границам каскадов или функциональных групп.

Площади печатной платы $S_{\text{ПП}j}$, требуемые для установки компонентов, определяются методом аналитической компоновки по формуле

$$S_{\text{ПП}j} = \frac{1}{K_{\text{ЗП}}} \sum_{i=1}^m S_{y_i} n_{\text{Э}i},$$

где j – номер функционального узла; $K_{\text{ЗП}}$ – средний коэффициент заполнения печатной платы, который выбирается в пределах 0,5 – 0,8; S_{y_i} – средние установочные площади компонентов i -го вида; $n_{\text{Э}i}$ – число компонентов i -го вида; m – число видов компонентов.

При использовании унифицированных несущих конструкций размеры печатных плат округляются до ближайших больших значений, взятых из числовых рядов, приводимых в стандартах. Размеры всех плат в этом случае должны быть одинаковыми. Шаг установки монтажных подвижных плат выбирается, исходя из максимальной высоты навесных элементов, и округляется до ближайшего большего стандартного значения. Зазор между максимально выступающими элементами соседних ячеек должен быть не менее 4–5 мм.

Массивные элементы (сетевой трансформатор, крупногабаритные конденсаторы блока питания и др.) размещаются на шасси, под которым чаще всего понимается металлическая пластина, закрепленная внутри несущего каркаса. При выборе способа монтажа электролитических конденсаторов следует учитывать, что их корпус соединен с минусовым выводом. Современные конденсаторы имеют снаружи защитный полиэтиленовый чехол, тем не менее при использовании металлических крепежных скоб или хомутов обязательно применяются эластичные диэлектрические прокладки между конденсатором и крепежной деталью.

Размеры корпуса определяются условиями размещения в нем печатных узлов и элементов, устанавливаемых на панелях и шасси

блока. Размеры унифицированного корпуса ЭБ округляются до ближайших больших значений, взятых из соответствующих числовых рядов.

После выбора размеров корпуса и печатных плат проводится графическая компоновка ЭБ, в процессе которой уточняется взаимное расположение его составных частей. Крепление последних внутри несущего каркаса осуществляется с помощью дополнительных элементов несущей конструкции: уголков, стоек, планок и т. п.

Компоновка блока производится следующим образом:

- мысленно представить и сравнить возможные варианты расположения и крепления составных частей блока в корпусе;
- выбрать наиболее приемлемый вариант и детально проработать его путем вычерчивания на фоне изображений проекций корпуса блока изображений его составных частей (печатных узлов и других элементов);
- сделать сборочный чертеж блока.

Конструирование электронной аппаратуры, как и любой другой творческий процесс, является итерационным. Окончательное решение, как правило, не получается сразу и требуется проработать несколько возможных вариантов. Критерии приемлемого решения – минимальные размеры корпуса и простота конструкции блока при условии обеспечения заданной температуры его элементов (п. 19.7). При сравнении конструктивных вариантов важным является обеспечение удобства сборки блока и доступности его отдельных составных частей для проведения операций монтажа, ремонта и технического обслуживания.

Результатом графической компоновки является сборочный чертеж или чертеж общего вида ЭБ. Вариант компоновки ЭБ в унифицированном приборном корпусе показан на рис. 19.1.

19.4. Компоновка модульных систем

Применение распределенных систем управления и сбора данных на основе SCADA-технологии в настоящее время является одной из основных тенденций в автоматизации технологических процессов. Такие системы собираются из функционально и конструктивно законченных программируемых модулей с унифицированными параметрами (модули серий ADAM – 4000, I – 7000 и др.). Использование принципа модульности позволяет легко изменять конфигурацию системы, снизить расходы на ее модернизацию и наращивание возможностей. Становится возможным поэтапный ввод системы в эксплуатацию.

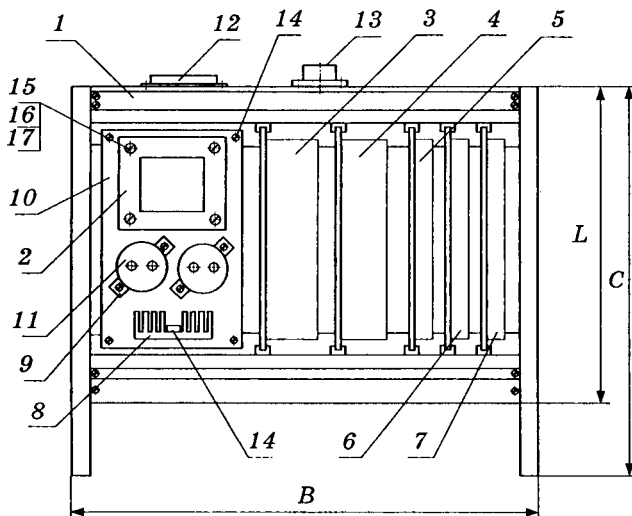


Рис. 19.1. Вариант компоновки ЭБ
в унифицированном приборном корпусе:

1 – блочный приборный каркас; 2 – трансформатор; 3–7 – электронные модули; 8 – радиатор; 9 – хомут для крепления конденсатора; 10 – шасси; 11 – конденсатор; 12, 13 – электрические соединители; 14 – транзистор; 15–17 – крепежные элементы (винт, гайка, шайба)

Разработка конструкции таких систем требует минимальных усилий и в простейшем случае может быть сведена к выполнению чертежа общего вида и схемы электрической соединений. Для установки аппаратных средств модульных систем обычно используются настенные электротехнические шкафы с застекленной или глухой дверцей. Внутри шкафа установлены *DIN*-рейки, на которые при помощи защелок крепятся модули системы. Имеются исполнения шкафов, снабженные также металлическим шасси, на которое можно установить блоки системы с другим способом монтажа (рис. 19.2).

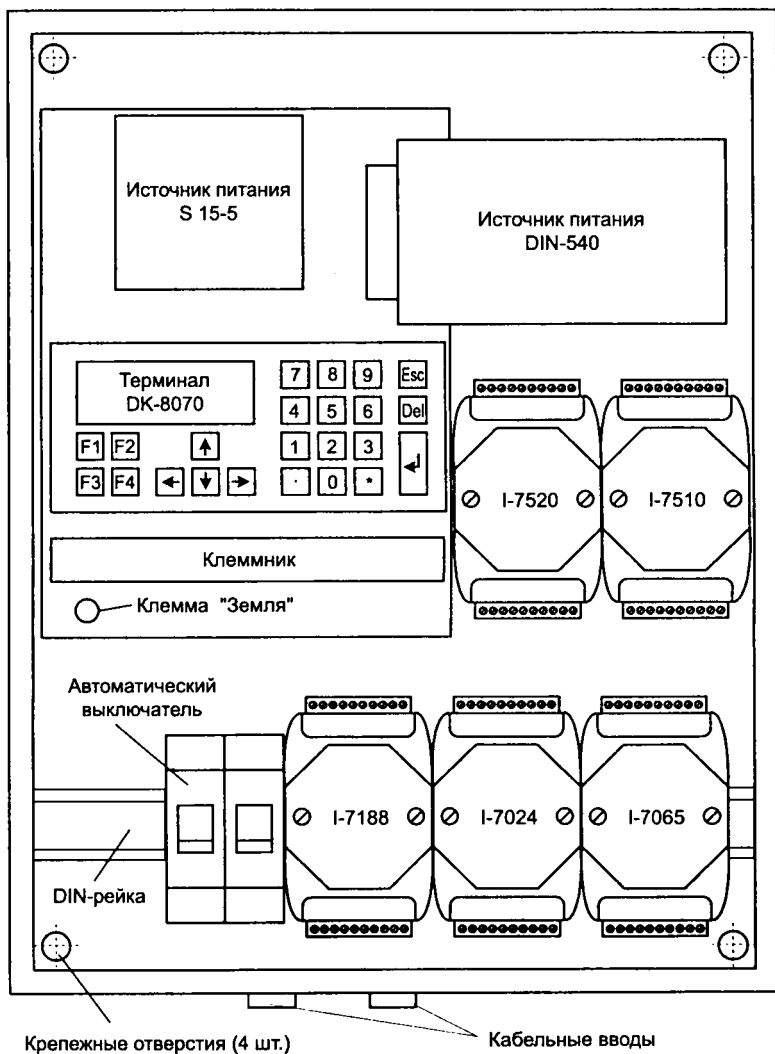


Рис. 19.2. Вариант компоновки компонентов SCADA-системы в настенном электротехническом шкафу

19.5. Конструирование печатных узлов

Печатный узел является основой электронной аппаратуры не только сегодня, но и на обозримую перспективу. ППП применяются практически на всех уровнях конструктивной иерархии: на нулевом – в качестве основания гибридных микросхем и микросборок, на первом – в качестве основания, механически и электрически объединяющего отдельные электронные элементы, на последующих – для соединения электронных элементов, узлов и блоков (объединительные платы, кросс-платы). В настоящее время используются две технологии установки навесных элементов на ППП.

Согласно традиционной технологии элементы монтируются в отверстия ППП (рис. 19.3, *а, б*). Данный способ установки элементов по мере развития микроэлектроники стал препятствием в миниатюризации аппаратуры. Для элементов, монтируемых в отверстия, и по сей день стандартный шаг выводов составляет 2,5 мм в метрической или 2,54 мм (0,1 дюйма) в дюймовой системе.

Попытки уменьшить шаг выводов и размеры корпусов элементов привели к технологии поверхностного монтажа. Основным отличием этой технологии является монтаж элементов не в отверстия, а на поверхность печатной платы со стороны печатных проводников (рис. 19.3, *в*). При этом используются элементы специальной конструкции, так называемые SMD-элементы (SMC, чип-элементы), у которых выводы либо отсутствуют (их заменяют металлизированные площадки на корпусе), либо имеют такую форму, чтобы их можно было без дополнительной формовки припаивать к контактным площадкам ППП. Применение поверхностного монтажа обеспечивает уменьшение массы и габаритов печатного узла, снижение паразитных индуктивностей и емкостей монтажа, а также стоимости элементов.

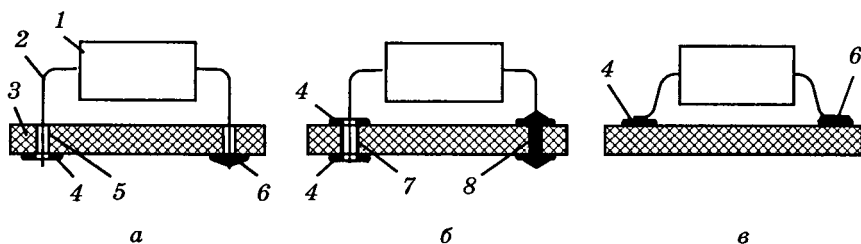


Рис. 19.3. Установка элементов при монтаже в отверстия (*а, б*) и на поверхность (*в*):

1 – навесной элемент; 2 – вывод элемента; 3 – основание ППП; 4 – контактная площадка; 5 – неметаллизированное отверстие; 6 – паяное соединение; 7, 8 – металлизированное отверстие до и после заполнения припоем

Бурный рост технологии монтажа на поверхность породил у многих мнение, что обычные выводные компоненты доживают свой век и эта технология уйдет в историю в скором будущем. Однако во второй половине 90-х гг. XX в. стало ясно, что традиционная технология выжила, показав себя достаточно конкурентоспособной по ряду важнейших факторов. Кроме того, новые подходы и решения в области поверхностного монтажа в ряде случаев нашли свое второе применение в технологии монтажа в отверстия. Как результат, традиционная технология остается популярной в ряде тех областей, где делал попытки закрепиться поверхностный монтаж.

Обозначила свои границы группа электронных компонентов, которых не существует в поверхностномонтируемом виде либо они слишком дороги. К таким элементам относятся мощные транзисторы, диоды, резисторы, ряд электролитических конденсаторов, переменных резисторов, индуктивностей, реле, соединителей, держателей, оптоэлектронных устройств.

Технология монтажа в отверстия не требует больших капитальных вложений и предъявляет существенно меньшие требования к квалификации обслуживающего персонала и технологов, а потому имеет прочные позиции в значительном количестве сборочных производств, в том числе с большой программой выпуска. Тем не менее нельзя отрицать неуклонное наступление технологии поверхностного монтажа, сопровождающееся увеличением доли потребляемых SMD-компонентов. Сегодня наибольшие процентные доли потребления SMD-компонентов приходятся на компьютерную технику, средства связи и автомобильную электронику.

Современные электронные узлы значительно отличаются от изделий разработки конца 80-х – начала 90-х гг. прошлого века. Во-первых, новые технологии поверхностного монтажа привели к уменьшению габаритов компонентов в 3–6 раз. Во-вторых, появились новые корпуса интегральных схем с малым шагом выводов (0,5–0,65 мм и менее), корпуса с шариковыми выводами (BGA), новые малогабаритные дискретные компоненты и соединители. В-третьих, повысилась точность изготовления ПП, увеличились возможности для реализации сложной топологии в малых габаритах платы. Появление новой элементной базы позволяет говорить о воплощении устройства с многочисленными функциями на одной плате и даже на одном кристалле.

Кардинально изменилась технология конструирования ПП, которая теперь основана исключительно на применении систем автоматизированного проектирования (САПР). Современные САПР обеспечивают сквозное проектирование электронных узлов – от моделирования и оптимизации принципиальной схемы до разработки топологии многослойной печатной платы. С помощью этой же САПР обеспечивается оформление конструкторской документации на бумаге и создание электронного файла, в котором содержатся все необходимые дан-

ные для автоматизированного изготовления ПП. Рассмотрение указанных САПР выходит за рамки настоящего издания, укажем лишь, что среди профессионалов наибольшее распространение получила система P-CAD [5]. Системам автоматизированного проектирования электронных устройств посвящена достаточно обширная литература, сведения о которой можно найти по адресу www.pcad.ru.

Любая САПР является пусть мощным, но всего лишь инструментом в руках конструктора. При разработке топологии ПП на человека возложены формулирование исходных данных, задание настроек системы, оценка промежуточных результатов и принятие решений о внесении изменений или завершении процесса. Решение этих задач невозможно без понимания принципов установки навесных элементов, выбора материала и размеров ПП, параметров проводящего рисунка, особенностей технологии ПП, правил оформления конструкторской документации.

19.5.1. Основные термины и определения

В печатном монтаже электрические проводники имеют вид тонких электропроводящих полосок, нанесенных на изоляционное основание. Характерной особенностью печатных проводников является то, что их ширина значительно больше толщины. Кроме монтажных проводников таким путем могут быть получены и некоторые элементы электронной схемы: низкоомные резисторы, конденсаторы малой емкости, индуктивности, контактные детали электрических соединителей. ПП является деталью, так как она не требует при изготовлении сборочных операций. При изготовлении материала будем придерживаться терминологии по ГОСТ 20406-75.

Печатная плата – материал основания, вырезанный по размеру, содержащий необходимые отверстия и, по меньшей мере, один проводящий рисунок.

Проводящий рисунок – рисунок, образованный проводниковым материалом ПП (совокупность печатных проводников, контактных площадок и печатных элементов электронной схемы).

Основание ПП – элемент конструкции ПП, на поверхности или в объеме которого выполняется проводящий рисунок.

Печатный проводник – отдельная токопроводящая полоска или площадка в проводящем рисунке.

Контактная площадка ПП – часть проводящего рисунка, используемая для соединения или подсоединения элементов радиоэлектронной аппаратуры.

Монтажное отверстие ПП – отверстие, используемое для соединения выводов навесных элементов с ПП, а также для любого электрического подсоединения к проводящему рисунку.

Металлизированное отверстие ПП – отверстие в ПП с осажденным на стенках проводниковым материалом.

Переходное отверстие ПП – металлизированное отверстие, служащее для электрического соединения проводящих слоев ПП.

Крепежное отверстие ПП – отверстие, используемое для крепления ПП на шасси или для механического крепления элементов к ПП.

Печатный контакт – участок проводящего рисунка, служащий в качестве одной части контактной системы.

Навесные элементы – электронные компоненты, установленные на ПП и электрически соединенные с проводящим рисунком.

Сторона монтажа ПП – сторона ПП, на которой устанавливается большинство навесных элементов.

Сторона пайки ПП – сторона ПП, с которой производится пайка большинства навесных элементов.

Печатный узел – печатная плата с подсоединенными к ней электрическими и механическими элементами и (или) другими печатными платами и с выполненными всеми процессами обработки (пайка, покрытие, приклеивание элементов, маркировка и др.). Печатный узел представляет собой сборочную единицу.

Координатная сетка чертежа ПП – сетка, определяющая положение элементов рисунка ПП в прямоугольной или полярной системе координат.

Шаг координатной сетки – постоянная величина, определяющая расстояние между соседними линиями координатной сетки.

Узел координатной сетки – точка пересечения линий координатной сетки.

Свободное место – участок печатной платы, где элементы проводящего рисунка и расстояния между ними могут быть выполнены номинальной ширины.

Узкое место – участок печатной платы, где элементы проводящего рисунка и расстояния между ними могут быть выполнены только с минимально допустимыми значениями.

Гарантированный поясок контактной площадки – минимально допустимая ширина контактной площадки отверстия ПП в узком месте.

Толщина ПП – толщина материала основания, включая проводящий рисунок или рисунки.

Односторонняя ПП – печатная плата, имеющая одно основание, на одной стороне которого выполнен проводящий рисунок.

Двусторонняя ПП – печатная плата, имеющая одно основание, на обеих сторонах которого выполнены проводящие рисунки и все требуемые соединения.

Многослойная печатная плата (МПП) – печатная плата, состоящая из чередующихся слоев изоляционного материала с проводящими

рисунками на двух и более слоях, между которыми выполнены требуемые соединения.

Фольгированный материал – материал основания ПП, имеющий с одной или двух его сторон проводящую фольгу.

Формовка выводов элемента – технологическая операция придания выводам элемента конфигурации, необходимой для установки на ПП. Многие типы микросхем, реле и некоторые другие элементы имеют неформуемые выводы.

19.5.2. Виды печатных плат

Различают односторонние, двусторонние и многослойные ПП. У односторонних ПП проводящий рисунок располагается на одной из сторон диэлектрического основания (рис. 19.4, *а*). В таких ПП монтажные отверстия, как правило, не имеют металлизации и необходимы для закрепления выводов навесных элементов. Для повышения прочности крепления элементов возможно изготовление односторонних печатных плат с металлизацией отверстий, но стоимость таких ПП будет сопоставима с двусторонними. Односторонние печатные платы, благодаря их дешевизне, используются преимущественно в бытовой аппаратуре (теле-, видео-, аудиотехника и др.).

В двусторонних ПП проводящий рисунок имеется на обеих сторонах основания (рис. 19.4, *б*). Электрическое соединение печатных проводников на противоположных сторонах ПП обеспечивается металлизированными переходными и монтажными отверстиями. Последние служат также для закрепления выводов навесных элементов. Двусторонние ПП без металлизации отверстий распространения не получили. Двусторонние ПП с металлизацией отверстий получили наибольшее распространение в промышленной и специальной аппаратуре.

По сравнению с односторонними ПП, двусторонние обеспечивают большие возможности для трассировки (реализации необходимых соединений). Из этого вытекают следующие преимущества:

- при одной и той же электрической схеме двусторонняя плата может иметь размеры меньше, чем односторонняя;
- при одинаковых размерах на двусторонней плате может быть выполнена более сложная схема.

Многослойная печатная плата представляет собой монолитный пакет, состоящий из проводящих слоев, разделенных слоями диэлектрика (рис. 19.4, *в*). МПП имеют соединения между проводниками, расположенными в различных слоях, и отличаются очень высокой трассировочной способностью и плотностью монтажа элементов.

Наибольшее распространение получили МПП, в которых для образования межслойных переходов используется метод металлизации

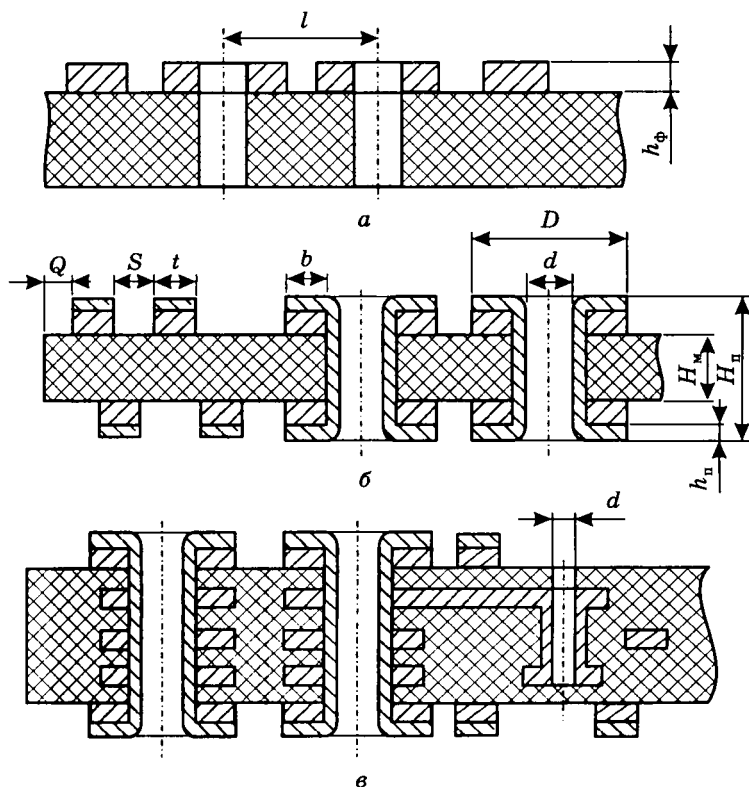


Рис. 19.4. Конструкции односторонней (а), двусторонней (б) и многослойной (в) печатных плат:

H_n – толщина ПП; H_m – толщина материала основания ПП; $h_ф$ – толщина фольги; h_n – толщина химико-гальванического покрытия; b – гарантированный поясок контактной площадки; D – диаметр контактной площадки; d – диаметр отверстия; S – расстояние между краями соседних элементов проводящего рисунка; t – ширина печатного проводника; Q – расстояние от края ПП, выреза, паза до элементов проводящего рисунка

сквозных отверстий. На рис. 19.5 показана шестислойная плата, состоящая из трех двусторонних ПП, собранных в пакет и изолированных друг от друга прокладками из стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой. В процессе прессования при повышенной температуре происходят полимеризация смолы и формирование монолитной

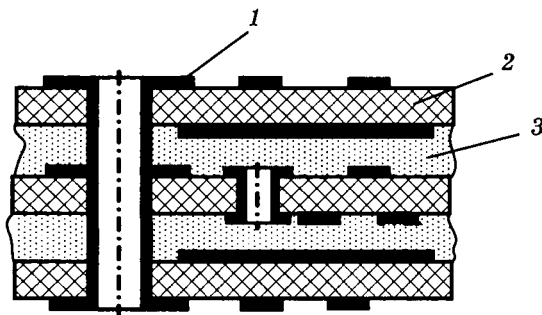


Рис. 19.5. Шестислойная ПП:

- 1 – сквозное металлизированное отверстие; 2 – двусторонняя ПП;
3 – склеивающая прокладка

структуры. Далее в плате сверлят сквозные отверстия, которые металлизуют, чем обеспечивают необходимые электрические соединения слоев. В реальных МПП число слоев обычно не превышает 8–12, хотя отдельные уникальные образцы могут содержать до 100 слоев. Увеличение числа слоев связано с проблемами металлизации сквозных отверстий (требуются сложное специализированное оборудование и тонкие технологии).

Стоимость МПП высока и зависит от количества слоев, причем при наличии межслойных переходов она почти в два раза выше, чем без них. МПП применяются в технически и экономически оправданных случаях, а именно:

- когда трассировку соединений не удастся реализовать с помощью двусторонней ПП даже при использовании печатных проводников и зазоров минимальной ширины;
- когда применение МПП позволяет улучшить технические характеристики устройства (сократить размеры ПП, уменьшить задержки распространения сигнала, уменьшить паразитные связи).

Одной из основных сфер применения МПП являются цифровые устройства на микросхемах с малым шагом и большим числом выводов, например, компьютерная техника.

В зависимости от варианта монтажа элементов различают:

- печатные платы с монтажом элементов в отверстия;
- печатные платы с поверхностным монтажом;
- печатные платы со смешанным монтажом (часть элементов монтируется в отверстия, а часть – на поверхность).

19.5.3. Материалы для печатных плат

В качестве основания ПП используют фольгированные и нефольгированные листовые диэлектрики: гетинакс, стеклотекстолит, полиимид, фторопласт и др. Наибольшее распространение получили фольгированные листовые диэлектрики, у которых в процессе изготовления на одну или обе плоскости листа наносится медная фольга. Типичный фольгированный материал для односторонних и двусторонних ПП имеет толщину 1,5 мм при толщине фольги 35 мкм.

Диэлектрическое основание печатных плат промышленной и специальной аппаратуры, как правило, выполняется из стеклотекстолита – слоистой пластмассы на основе стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой. Для ПП бытовой аппаратуры обычно применяются более дешевые диэлектрики, например, гетинакс – слоистый материал, полученный методом горячего прессования бумаги, пропитанной термореактивным связующим на основе фенолформальдегидных или эпоксидных смол. В МПП используются тонкие травящиеся фольгированные стеклотекстолиты, обладающие способностью к травлению диэлектрической основы в специальных растворах. Более подробная информация по материалам, используемым при производстве ПП, приведена в [6, 7, 11, 12].

Для двусторонних ПП не выше 3-го класса точности, работающих в диапазоне температур от минус 60 до плюс 80°C, подойдет практически любой стеклотекстолит нужной толщины. С экономической точки зрения предпочтение часто отдается стеклотекстолиту марки СФ (табл. 19.1). По толщине материала выбор практически predetermined, как правило, это 1,5...1,6 мм. Для повышения жесткости ПП иногда используются материалы толщиной 2 мм и более. При необходимости применяются стеклотекстолиты с улучшенными электрическими и механическими характеристиками и повышенной устойчивостью к воздействию расплавленного припоя (СОНФ-У), терmostойкие и негорючие (СТФ, СТНФ) и др. Выбор материала для ПП более высокого класса должен производиться совместно с технологами предприятия, где будет выполняться заказ на изготовление ПП.

19.5.4. Классы точности печатных плат

Класс точности ПП определяет минимально возможные размеры фрагментов проводящего рисунка. На максимальные размеры фрагментов проводящего рисунка ограничений нет, конечно, в разумных пределах. При низких рабочих токах и напряжениях расчетная ширина печатных проводников и зазоров не превышает сотых долей миллиметра. Чем уже печатные проводники, меньше зазоры между

Таблица 19.1

Некоторые отечественные фольгированные диэлектрики

Наименование	Марка	Толщина материала, мм	Толщина фольги, мкм	Рабочий диапазон температур, °С
Стеклотекстолит фольгированный	СФ-1-35Г СФ-2-35Г	0,5-3,0	35	-60...+85
	СФ-1-50Г СФ-2-50Г		50	
	СОНФ-У-1-35Г СОНФ-У-2-35Г	0,5-3,0	35	-60...+85
	СОНФ-У-1-50Г СОНФ-У-2-50Г		50	
Стеклотекстолит теплостойкий фольгированный	СТФ-1-18Г СТФ-2-18Г	0,1-2,0	18	-60...+105
	СТФ-1-35Г СТФ-2-35Г		35	
Стеклотекстолит теплостойкий негорючий фольгированный	СТНФ-1-18 СТНФ-2-18	0,1-2,0	18	-60...+105
	СТНФ-1-35 СТНФ-2-35		35	
Стеклотекстолит травящийся для МПП	ФТС-1-18А ФТС-2-18А	0,09-0,5	18	-60...+105
	ФТС-1-35А ФТС-2-35А	0,1-0,5	35	-60...+105
Гетинакс фольгированный	ГФ-1-35Г ГФ-2-35Г	1,0-3,0	35	-60...+85
	ГФ-1-50Г ГФ-2-50Г		50	

ними, тем компактнее будет ПП и тем больше возможностей для ее оптимальной разводки. Вместе с тем при попытке уменьшить размеры фрагментов проводящего рисунка ниже некоторого предела резко уменьшается процент выхода годной продукции. Появляются такие дефекты, как разрывы проводников и отсутствие зазоров между соседними элементами проводящего рисунка. Это обусловлено нестабильностью параметров технологического процесса изготовления

ПП, обусловленной случайными факторами. Указанный предел (технологическое ограничение) определяет максимальный класс точности ПП, которые могут изготавливаться на данном производстве, и зависит от используемой технологии и материалов. ГОСТ 23751-86 предусматривает пять классов точности печатных плат, отличающихся наименьшими значениями основных размеров элементов конструкции для узкого места (табл. 19.2).

Таблица 19.2

Наименьшие номинальные значения основных размеров элементов конструкции печатных плат для узкого места

Параметр	Номинальное значение основных размеров для класса точности				
	1	2	3	4	5
Ширина печатного проводника, t , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Зазор между краями соседних элементов проводящего рисунка, S , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Гарантированный поясок контактной площадки, b , мм	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025
Отношение диаметра наименьшего из металлизированных отверстий к толщине ПП, γ	0,40	0,40	0,33	0,25	0,20
Предельное отклонение ширины печатного проводника, контактной площадки, концевого печатного контакта, экрана, Δt , мм:					
без металлического покрытия	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$	+0 -0,03
с металлическим покрытием	+0,25 -0,20	+0,15 -0,10	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$
Позиционный допуск расположения печатного проводника относительно соседнего элемента проводящего рисунка, T_l :					
односторонние и двусторонние ПП, МПП (наружный слой)	0,2	0,10	0,05	0,03	0,02
МПП (внутренний слой)	0,3	0,15	0,10	0,08	0,05

Печатные платы 1-го и 2-го классов предназначены для несложных устройств с малой плотностью монтажа и могут производиться на рядовом оборудовании. Печатные платы 3-го класса – наиболее распространенные, поскольку, с одной стороны, обеспечивают достаточно высокую плотность трассировки и монтажа, а с другой – для их производства требуется рядовое, хотя и специализированное оборудование. Платы 3-го класса обычно применяются для микросхем со штыревыми и планарными выводами с шагом не менее 1,25 мм.

Печатные платы 4-го класса выпускаются на высокоточном оборудовании, но требования к материалам, оборудованию и помещениям ниже, чем для 5-го класса. Изготовление печатных плат 5-го класса требует применения современного высокоточного оборудования, специальных (как правило, дорогих) материалов, безусадочной фотопленки и создания в производственных помещениях «чистой зоны» с термостатированием. Таким требованиям отвечает далеко не каждое производство. ПП небольшого размера могут выполняться по 5-му классу на оборудовании, обеспечивающем получение плат 4-го класса. Платы 4-го и 5-го классов применяются в основном при использовании SMD-элементов с шагом выводов менее 1,25 мм.

Уровень современных технологий и материалов опережает требования отечественных нормативных документов. В настоящее время имеется возможность получать минимальную ширину печатных проводников и зазоров между ними порядка 0,05 мм. Тем не менее, назначая на начальном этапе разработки класс точности, не следует завышать требования к элементам конструкции ПП. Необходимо исходить из технологических возможностей конкретного производства, где будет выполняться заказ на изготовление данной платы. Попытка решить эту задачу в обратном порядке может привести к тому, что ваш проект не будет реализован.

19.5.5. Исходные данные для конструирования печатных плат

До начала конструирования в результате анализа принципиальной схемы и условий эксплуатации узла формулируются следующие исходные данные:

- форма и размеры печатной платы, метод ее крепления и ориентация в корпусе устройства;
- типы навесных элементов, размещаемых на ПП;
- расположение элементов, места которых предопределены, например, условиями обеспечения стыковки с другими узлами, доступом к регулировочным элементам и т. п.;
- механические воздействия на узел в процессе эксплуатации, определяющие варианты установки элементов;

- климатические воздействия на узел в процессе эксплуатации, влияющие на выбор защитных покрытий;
- напряжения и токи в отдельных цепях узла, определяющие ширину печатных проводников и зазоров между элементами проводящего рисунка;
- рекомендации по исключению взаимного влияния узлов устройства;
- мощности, рассеиваемые теплонагруженными элементами схемы, необходимость применения и конструкция радиаторов;
- способы реализации внешних соединений печатного узла: электрический разъем, монтажные провода, спаиваемые в отверстия ПП, винтовые зажимы;
- сечение и тип внешних проводов, конфигурация жгутов, способ крепления жгутов и кабелей;
- класс точности ПП, т. е. технологические ограничения на минимальную ширину печатных проводников, зазоров и другие, зависящие от того, где будет изготавливаться ПП.

19.5.6. Компоновка печатных плат

Размеры и форма ПП выбираются исходя из рационального использования пространства внутри корпуса устройства и способа крепления ПП. При применении унифицированных несущих конструкций размеры и другие параметры ПП, как правило, однозначно определяются выбранным типоразмером корпуса устройства.

Наиболее распространены двусторонние платы. При равной площади они немного дороже односторонних и существенно дешевле многослойных ПП. Следует стремиться к минимизации размеров ПП, поскольку ее стоимость пропорциональна площади.

Согласно ГОСТ 10317-79 основные размеры сторон ПП должны быть кратными:

- 2,5 – при длине до 100 мм;
- 5,0 – при длине до 350 мм;
- 10,0 – при длине более 350 мм.

Предельные отклонения на сопрягаемые размеры контура ПП должны быть не более 12-го качества по ГОСТ 25347-82, на несопрягаемые размеры контура ПП – не более 14-го качества.

Используется как односторонний, так и двусторонний монтаж элементов. Однако следует иметь в виду, что установка элементов на обеих сторонах ПП влечет за собой усложнение сборки и удорожание печатного узла, особенно при использовании групповой пайки.

По периметру платы необходимо оставить поле шириной 5 мм, свободное от элементов и проводящего рисунка. Внутри контура ПП необходимо выделить зоны расположения элементов, места которых



предопределены с той или иной точностью. Например: световые индикаторы на ПП должны устанавливаться напротив соответствующих им отверстий в панели прибора; контакты для подключения внешних элементов должны находиться рядом с этими элементами; расположение контактов для внешних соединений должно быть согласовано с конфигурацией жгутового объемного монтажа и т. д. Иными словами, разработку печатной платы в общем случае нельзя производить в отрыве от компоновки электронного блока в целом.

Компоновку остальных элементов и трассировку соединений следует производить так, чтобы суммарная длина проводников была минимальной. Элементы и цепи, между которыми возможно возникновение емкостных или индуктивных паразитных связей, следует разносить дальше друг от друга. Цепь общего провода с целью ослабления емкостных помех часто выполняется в виде экрана, заполняющего свободные от проводников части ПП. Экран не должен образовывать замкнутый контур. Экран располагается между проводниками взаимовлияющих цепей либо возле этих проводников в соседнем слое ПП.

Особое внимание следует обращать на разводку общего провода. Нельзя, чтобы токи узлов с различающимся на порядки энергопотреблением (силовые и сигнальные узлы) или с различным видом информационного сигнала (аналоговые и цифровые узлы) протекали через один и тот же участок общего провода. Проблема связана с тем, что общий провод имеет конечное сопротивление, которое обуславливает падение напряжения, воспринимаемое в равной мере всеми подключенными к этому проводу узлами. Поэтому импульсные всплески и провалы напряжения, создаваемые на общем проводе цифровым узлом, будут накладываться на информационный сигнал аналогового узла. Увеличение ширины печатных проводников общего провода для снижения его электрического сопротивления полезно, но имеет ограниченные возможности. Поэтому общие провода цепей, между которыми возможно взаимное влияние (перекрестные помехи), следует вести отдельно и объединять их непосредственно на выходе источника питания.

Характерными приемниками перекрестных помех являются узлы обработки маломощных аналоговых сигналов – измерительные усилители сигналов термопар и тензодатчиков, микрофонный усилитель и т. п. Источниками перекрестных помех могут являться цепи коммутации мощных исполнительных органов, выходная цепь усилителя звуковой частоты, цифровой узел того же устройства и др.

В фирменных руководствах по применению микросхем нередко указываются требования к монтажу конкретных цепей данных элементов, которые также должны учитываться при компоновке элементов ПП и трассировке соединений. Типичный пример – конденсаторы,

шунтирующие цепи питания микросхем, должны устанавливаться непосредственно у выводов микросхем.

Центры монтажных и переходных отверстий, а также контактных площадок SMD-элементов располагаются в узлах координатной сетки. Для некоторых элементов (электромагнитные реле, подстроечные резисторы, импульсные трансформаторы и т. д.) расстояние между неформуемыми выводами не соответствует шагу координатной сетки. В этом случае в узле сетки располагается один из выводов. Координаты остальных выводов необходимо указать относительно вывода, находящегося в узле сетки, с помощью размерных выносных линий.

В прямоугольной системе координат шаг координатной сетки должен быть кратен 0,05 мм либо 0,5 мм и выбирается из рядов по ГОСТ Р 51040-97: 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25 мм или 0,50; 1,0; 2,50; 3,0; 5,00 мм. Допускается применение шага координатной сетки, основанного на дюймовой системе: 2,54 или 0,635 мм.

Для каждого вывода элемента предусматривается отдельное монтажное отверстие. Установка в одно отверстие двух выводов или объемных проводников не допускается.

Печатные проводники, как правило, выполняются одинаковой ширины на всем протяжении и располагаются параллельно линиям координатной сетки либо под углом, кратным 15° . В узких местах проводники сужаются до минимально допустимого значения на возможно меньшей длине. Между близко расположенными отверстиями проводник нужно вести перпендикулярно линии, соединяющей центры отверстий. На односторонних ПП со стороны элементов допускается установка проволочных перемычек, число которых должно быть по возможности минимальным.

Часто на одной плате компонуются элементы с различным шагом выводов и с различной системой измерения (метрической и дюймовой). В подобной ситуации можно ориентироваться на шаг большинства элементов. При небольшом числе выводов элементы с метрической и дюймовой системой измерения шага являются взаимозаменяемыми.

Толщина односторонних и двусторонних ПП определяется толщиной используемого листового материала и выбирается из соображений механической прочности и жесткости. Толщина МПП рассчитывается по формуле

$$H_{\text{п}} = \sum H_{\text{с}} + (0,6 \dots 0,9) \sum H_{\text{пр}},$$

где $H_{\text{с}}$ – толщина слоя МПП; $H_{\text{пр}}$ – толщина прокладки по стеклоткани.

Эта формула позволяет решить и обратную задачу – определить, сколько слоев можно «вложить» в плату заданной толщины. Например, печатные платы с толщиной 1,5...1,6 мм обычно могут содержать не более восьми слоев.

19.5.7. Ширина печатных проводников

При протекании тока печатный проводник нагревается. Чтобы избежать чрезмерного перегрева, ширина печатного проводника должна определяться по формуле

$$t = \frac{I}{jh},$$

где I – сила тока, А; j – допустимая плотность тока, А/мм²; h – толщина печатного проводника, мм.

Толщина h одинакова для всех проводников и зависит от материала и технологии изготовления печатной платы. Поэтому ширина печатного проводника при выбранном значении j определяется силой протекающего тока I .

ГОСТ 23751-86 устанавливает следующую допустимую токовую нагрузку j на элементы проводящего рисунка в зависимости от допустимого превышения температуры проводника относительно температуры окружающей среды:

- для медной фольги – от 100 до 250 А/мм²;
- для гальванической меди – от 60 до 100 А/мм².

Существуют номограммы, связывающие температуру перегрева печатных проводников, расположенных на наружных слоях ПП, с их размерами и силой протекающего тока в условиях естественной конвекции воздуха [6]. Например, перегрев проводника толщиной 35 мкм и шириной 1 мм составляет:

- порядка 20°C при токе 3 А (плотность тока 85 А/мм²);
- порядка 50°C при токе 6 А (плотность тока 171 А/мм²).

Высокая кратковременная токовая нагрузка может влиять на адгезию (сцепление) между проводником и основанием. Зависимости максимально допустимой длительности импульса от величины тока в печатном проводнике приведены в [8].

Наиболее часто используются значения j , при которых перегрев проводников пренебрежимо мал, а именно, не более 20...30 А/мм² для наружных и 15 А/мм² для внутренних слоев ПП. Таким значениям j при $h = 35...50$ мкм соответствует правило – на 1 А силы тока принимается 1 мм ширины печатного проводника.

Достаточно широкие печатные проводники обеспечивают дополнительный отвод тепла, выделяющегося в электронных компонентах (особенно SMD-компонентах), что способствует повышению их надежности. По этой причине в узких местах ПП существенного локального перегрева тонкого участка проводника не наблюдается, поскольку выделяющееся там тепло отводится в соседние широкие области проводящего рисунка.

Электрическое сопротивление цепи печатных проводников рассчитывается по формуле

$$R_{\text{ц}} = \frac{\rho}{h} \sum_1^k \frac{L_i}{t_i},$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление меди; h – толщина проводников; L_i и t_i – длина и ширина проводника i -го участка цепи; k – число участков с различной шириной проводника.

Для ПП, изготавливаемых путем травления фольгированных материалов, $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$; для проводников, получаемых осаждением меди, $\rho = 0,0235 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, поскольку в этом случае слой меди менее плотный. Нанесенное поверх меди проводящее покрытие (обычно из сплава олово – свинец) при толщине менее 12 мкм может не учитываться. При более толстом покрытии $R_{\text{ц}}$ рассчитывается как параллельное соединение сопротивлений меди и покрытия. Сопротивление сквозных металлизированных отверстий практически не влияет на сопротивление цепи и может не учитываться.

При конструировании ПП ширина проводника рассчитывается по допустимой плотности тока (1 мм на 1 А), а потом округляется в большую сторону с учетом выбранного класса точности и унификации. В свободных местах даже для слаботочных цепей не следует без необходимости делать ширину печатного проводника менее 0,5 мм. С учетом этого в пределах ПП обычно используется не более 2–3 унифицированных значений ширины печатного проводника, например: 0,5 мм для информационных цепей и 1,5 мм для силовых цепей. Ширина проводников в узких местах должна быть не менее значения t , указанного в табл. 19.2 для выбранного класса точности ПП.

Если схема критична к падению напряжения на проводнике, его ширину выполняют максимально возможной, значительно большей, чем получается по допустимой плотности тока. Пределы увеличения ширины проводника ограничены соседними фрагментами проводящего рисунка, поэтому для существенного снижения сопротивления могут применяться накладные медные шины, присоединяемые (механически и электрически) к печатному проводнику. Такой прием используется, например, в силовых устройствах для снижения потерь мощности на проводниках.

Сплошные участки фольги должны иметь отверстия произвольной формы для отвода газов, которые могут выделиться из изоляционного основания вследствие нагрева при пайке (особенно групповой). Для предотвращения отслоения фольги из-за газовыделения из основания проводники шириной более 5 мм также рекомендуется выполнять с перфорацией.

19.5.8. Ширина зазоров между элементами проводящего рисунка

Зазор между печатными проводниками – это изоляция, которая характеризуется следующими параметрами:

- электрическая прочность, т. е. способность без пробоя выдерживать рабочее напряжение между проводниками;
- электрическое сопротивление, которое определяет величину тока утечки между проводниками, поскольку идеальной изоляции не существует.

При строгом соблюдении технологии изготовления и отсутствии загрязнений на поверхности ПП минимальное сопротивление изоляции $R_{из}$ между двумя параллельными на длине l печатными проводниками

$$R_{из} = \frac{160 R_m S}{l},$$

где R_m – поверхностное сопротивление материала основания при данной температуре, оговоренное в публикации МЭК 249; S – расстояние между проводниками.

На практике даже в нормальных условиях вследствие загрязнений, пыли, воздействия различных веществ при пайке сопротивление изоляции ПП с установленными навесными элементами, как правило, в 100 – 1000 раз ниже расчетного [8].

Согласно ГОСТ 23752-79 для ПП из стеклотекстолита сопротивление между любыми элементами проводящего рисунка должно быть не менее:

- в нормальных условиях 10 000 МОм
- после выдержки при влажности $93 \pm 3\%$ и температуре 25°C в течение 1 часа 700 МОм
- то же после выдержки при температуре 40°C в течение 2 суток 30 МОм
- то же после выдержки при температуре 40°C в течение 10 суток 5 МОм

При конструировании ПП из фольгированного стеклотекстолита минимальные зазоры между элементами проводящего рисунка определяются по табл. 19.3 с учетом реальных условий эксплуатации ПП.

В свободных местах без необходимости не следует принимать ширину зазоров между элементами проводящего рисунка менее 0,5 мм. В узких местах минимальные зазоры назначаются не менее значения S , указанного в табл. 19.2 для выбранного класса точности ПП. В высоковольтных цепях для повышения качества изоляции на пути токов утечки в основании платы иногда делается сквозная прорезь.

Таблица 19.3

Допускаемые значения рабочего напряжения для ПП из фольгированного стеклотекстолита в зависимости от зазора между элементами проводящего рисунка и внешних факторов

Расстояние между элементами проводящего рисунка, мм	Значение рабочего напряжения, В			
	Нормальные условия	Относительная влажность 93±3% при 40±2°C в течение 48 ч	Пониженное атмосферное давление	
			53600 Па (400 мм рт. ст.)	666 Па (5 мм рт. ст.)
От 0,10 до 0,20 включительно	25	15	20	10
Свыше 0,20 ▶ 0,30 ▶	50	30	40	30
▶ 0,30 ▶ 0,40 ▶	150	100	110	50
▶ 0,40 ▶ 0,70 ▶	300	200	160	80
▶ 0,70 ▶ 1,20 ▶	400	300	200	100
▶ 1,20 ▶ 2,00 ▶	600	360	300	130
▶ 2,00 ▶ 3,50 ▶	830	430	400	160
▶ 3,50 ▶ 5,00 ▶	1160	600	560	210
▶ 5,00 ▶ 7,50 ▶	1500	830	660	250
▶ 7,50 ▶ 10,00 ▶	2000	1160	1000	300
▶ 10,00 ▶ 15,00 ▶	2300	1600	1160	330

Примечания:

1. Цепи с напряжением более 250 В в МПП применять не рекомендуется.
2. Цепи с напряжением более 2300 В для фольгированного стеклотекстолита в печатных платах применять не рекомендуется.

Защитные покрытия способствуют сохранению качества изоляции ПП в условиях воздействия пыли и влаги. Однако каких-то общих правил здесь не существует, так как все зависит от конкретных условий эксплуатации, толщины и материала покрытия.

19.5.9. Размеры отверстий и контактных площадок

Диаметры монтажных отверстий выбираются из условия собираемости – при любых допускаемых отклонениях размеров ПП и эле-

мента последний должен нормально устанавливаться в свое посадочное место. Диаметры монтажных отверстий определяются размерами выводов элементов, монтируемых в эти отверстия. Если вывод некруглый, то диаметр отверстия диктуется максимальным размером вывода в сечении, например, диагональю. В многовыводных компонентах с неформуемыми выводами разница между диаметром отверстия и размером вывода не должна быть меньше суммы допусков на точность положения выводов и отверстий на печатной плате. К элементам с формуемыми выводами такое требование не предъявляется, поскольку гибкость выводов компенсирует все неточности.

Вместе с тем зазоры между выводами и проводящим рисунком должны быть такой величины, при которой обеспечивается образование паяных соединений. В любых металлизированных отверстиях следует предусматривать гарантированный зазор не менее 0,1 мм для заполнения отверстия расплавленным припоем. Максимальный размер отверстия ограничен особенностями пайки выводов. Если отверстия металлизированные, то разница более 0,5 мм недопустима, иначе припой может вытекать. В случае отверстий без металлизации, куда припой не попадает, а пайка осуществляется только на поверхности контактной площадки в виде выпуклого мениска, разница в размерах не должна превышать 0,3 мм.

С учетом изложенного для всех видов ПП и классов точности диаметр d монтажных отверстий можно найти из соотношений, мм:

$$d = d_B + 0,2 \text{ при } d_B \leq 1 \text{ мм};$$

$$d = d_B + 0,3 \text{ при } d_B >> 1 \text{ мм},$$

где d_B – максимальный размер монтируемого в отверстие вывода.

Для получения металлизированного отверстия заданного диаметра d отверстие в основании платы должно быть больше на удвоенную толщину металлизации. Выбирая диаметр сверла, изготовитель ПП самостоятельно делает поправку на особенности технологии и толщину металлизации (обычно диаметр сверла принимается равным $d + 0,1$ мм). В конструкторской документации, как правило, указывается только диаметр d отверстия в готовой плате (контролируемый размер), а диаметр сверления отсутствует. Следует стремиться к сокращению типоразмеров отверстий.

Контактные площадки печатных плат бывают следующих видов:

- площадки монтажных и переходных отверстий;
- площадки для установки компонентов поверхностного монтажа;
- концевые печатные контакты (ламели) разъемов.

Контактные площадки выбираются из библиотеки САПР или создаются разработчиком самостоятельно и могут иметь форму круга, квадрата, многоугольника. Первый вывод многовыводных элементов, монтируемых в отверстия, обычно отличается от остальных формой контактной площадки. Например, для первых выводов микросхем часто используются квадратные контактные площадки.

Контактные площадки неметаллизированных отверстий должны иметь высокую прочность сцепления с основанием, что достигается увеличением их размеров. Рекомендуемые минимальные значения площади этих площадок (без учета отверстия):

- для плат 1-го и 2-го классов точности 2,5 мм²;
- для плат 3-го класса точности не менее 1,6 мм².

Отсюда для односторонних плат 2-го и 3-го классов точности наименьший номинальный диаметр контактной площадки соответственно составит, мм:

$$D = \sqrt{d^2 + 3,2}; \quad D = \sqrt{d^2 + 2,2},$$

где d – диаметр отверстия в мм.

В металлизированных отверстиях механическая нагрузка распределяется по всей поверхности металлизации, поэтому размер контактных площадок может быть меньше. Для таких отверстий наименьший номинальный диаметр D контактной площадки рассчитывается по формуле

$$D = d + \Delta d_{\text{во}} + 2b + \Delta t_{\text{во}} + 2\Delta d_{\text{тр}} + \sqrt{T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{\text{но}}^2},$$

где d – диаметр отверстия; $\Delta d_{\text{во}}$ – верхнее предельное отклонение диаметра отверстия; b – гарантированный поясok контактной площадки (табл. 19.3); $\Delta t_{\text{во}}$ – верхнее предельное отклонение диаметра контактной площадки; $\Delta d_{\text{тр}}$ – глубина подтравливания диэлектрика в отверстиях: для МПП; $\Delta d_{\text{тр}} = 0,3$ мм, в остальных случаях $\Delta d_{\text{тр}} = 0$; T_d и T_D – позиционные допуски расположения осей отверстий и контактных площадок; $\Delta t_{\text{но}}$ – нижнее предельное отклонение диаметра контактной площадки.

Для наиболее распространенных двусторонних плат 3-го класса точности с размером сторон до 180 мм с металлизацией отверстий без оплавления ($\Delta d_{\text{во}} = 0,1$ мм; $b = 0,1$ мм; $\Delta t_{\text{во}} = \Delta t_{\text{но}} = 0,1$ мм; $T_d = 0,1$ мм; $T_D = 0,15$ мм) наименьший номинальный диаметр контактной площадки, мм

$$D = d + 0,6.$$

Слишком малые контактные площадки легко отслаиваются при перепайке элементов в процессе наладки или ремонта, поэтому их размеры желательно выбирать больше минимального значения. Например, для штыревых выводов микросхем диаметр металлизированного отверстия часто выбирается равным $0,8^{+0,1}$ мм; диаметр контактной площадки – $1,8^{-0,1}$ мм.

Диаметры переходных отверстий выполняются аналогично монтажным, но во всех случаях их стараются сделать с минимальными размерами, допустимыми для конкретного класса точности и толщины печатной платы. В соответствии с табл. 19.2 при толщине платы 1,5 мм минимальный диаметр переходного отверстия равен: 0,5 мм для ПП 3-го класса, 0,3 мм – для ПП 5-го класса. Помимо этого, ди-

аметр переходных отверстий иногда определяется минимальным диаметром сверла или иными технологическими возможностями оборудования.

Для многослойных печатных плат, не ограниченных по слоистости и толщине (объединительных плат, кросс-плат), переходные и монтажные отверстия следует выбирать исходя из других принципов. Дело в том, что трассировочная способность МПП повышается с ростом числа слоев, а это связано с наращиванием толщины платы. Но более толстые платы требуют пропорционального увеличения диаметра отверстий, чтобы обеспечить их металлизацию, что ведет к уменьшению количества проводников, прокладываемых на каждом слое, и соответственно к снижению трассировочной способности платы. Явное противоречие разрешается нахождением некоторого оптимального варианта (экстремума функции), который обеспечивает максимальную трассировочную способность платы. Рекомендации по данному вопросу можно найти, например, на сайте <http://www.pcb.spb.ru>.

Согласно ГОСТ 10317-79 номинальные размеры диаметров металлизированных и неметаллизированных монтажных и переходных отверстий выбираются из ряда: 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2,0; 2,1; 2,2; 2,3; 2,4; 2,5; 2,6; 2,7; 2,8; 3,0 мм.

При монтаже на поверхность размеры контактных площадок выбираются в соответствии с рекомендациями производителей электронных компонентов. Наиболее распространенные типы посадочных мест SMD-элементов приведены на сайтах www.pcb.spb.ru, www.smtlab.ru и др. Для исключения перетекания припоя в процессе пайки недопустимо располагать переходные отверстия на контактных площадках SMD-элементов или в непосредственной близости от них.

Печатные платы могут иметь крепежные отверстия. В качестве элементов крепления обычно используются резьбовые изделия МЗ, что соответствует диаметру крепежных отверстий около 3,5 мм. Для двусторонних и многослойных ПП с технологической точки зрения эти отверстия проще выполнять металлизированными в общем процессе с монтажными и переходными отверстиями. Кроме того, иногда металлизация крепежных отверстий используется для электрического соединения цепей «земля» платы с токопроводящими частями несущей конструкции.

19.5.10. Установка навесных элементов

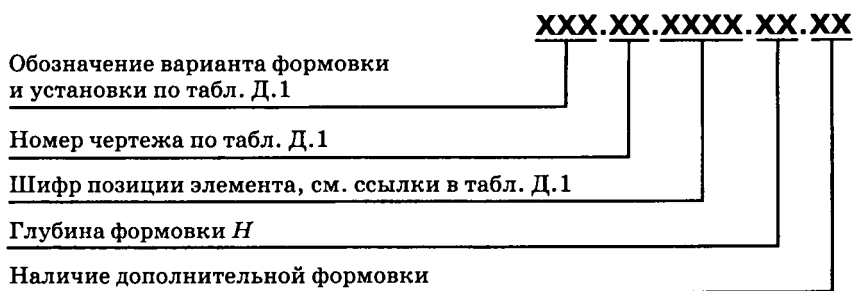
Для SMD-элементов возможен только один вариант установки на ПП, поэтому дополнительные указания на чертеже по этому поводу не требуются. Такие элементы либо не имеют выводов, либо постав-

ляются с уже отформованными выводами [9, 10]. Для элементов, монтируемых в отверстия, возможных вариантов установки может быть несколько, причем элементы с гибкими выводами могут монтироваться не только в отверстия, но и на поверхность платы.

Требования по формовке выводов и установке таких элементов на печатные платы регламентирует ГОСТ 29137-91. Наиболее распространенные варианты установки элементов указаны в табл. Д.1. Номера чертежей и таблиц приложения Д после буквы «Д» соответствуют ГОСТ 29127-91. В связи с сокращениями ряд типовых конструктивных исполнений, а также соответствующих им чертежей и таблиц опущен.

Выбор того или иного варианта установки зависит от конструкции и массогабаритных характеристик элемента, требований технических условий, предельных размеров печатного узла, интенсивности воздействующих вибраций, ударов, ускорений. При необходимости осуществляется дополнительное крепление элементов к ПП при помощи хомутов, скоб, держателей, заливки компаундом, установки на клей. Способ крепления указывается в конструкторской документации.

Для обозначения варианта формовки выводов и установки элементов применяют следующую структуру условных обозначений:



Необходимость использования дополнительного крепления обозначают третьим знаком кода обозначения варианта формовки и установки – нулем или единицей, например: 240 – крепление не используется, 241 – крепление используется.

Глубина формовки *H* – расстояние от нижней плоскости выводов элемента в месте их выхода из корпуса до нижней плоскости отформованных концов выводов. Этот параметр указывается при монтаже элементов с гибкими выводами на поверхность ПП – исполнения 7–10, 36–38.

При групповой пайке элементов, монтируемых в отверстия, используется дополнительная формовка их выводов. Данная мера обес-

печивает удержание элементов в отверстиях ПП в процессе транспортирования и пайки ПП. Для обозначения дополнительной формовки устанавливаются следующие шифры: зиг – 01, зиг-замок – 02, замок – 03.

В случае отсутствия какого-либо из показателей в структуре условных обозначений вместо цифр, определяющих этот показатель, записываются нули.

При обозначении номеров чертежей, состоящих из одной цифры, перед этой цифрой записывают нуль.

Пример условного обозначения варианта формовки выводов и установки резистора, соответствующего исполнению 14 с длиной корпуса 10,8 мм при использовании зиг-замка:

140.02.0203.00.02.

Пример условного обозначения варианта формовки выводов и установки диода, соответствующего исполнению 7 с длиной корпуса 7,5 мм, диаметром корпуса 3,0 мм, диаметром выводов 0,6 мм при использовании дополнительного крепления и глубины формовки $H = 1,2$ мм:

071.04.0602.12.00.

Примечание. При обозначении глубины формовки левая цифра обозначает единицы, а правая цифра – десятые доли миллиметра.

Пример условного обозначения варианта формовки выводов и установки микросхем в 8-выводном корпусе типа 3 по ГОСТ 17467, соответствующего исполнению 29, в квадрат $7,5 \times 7,5$ мм:

290.12.0000.00.00.

Элементы, как правило, устанавливаются параллельно линиям координатной сетки. Для элементов в токопроводящих корпусах, монтируемых вплотную к печатным проводникам, принимаются меры по локальной изоляции проводящего рисунка. Для этой цели используются лакокрасочные и другие диэлектрические покрытия либо электроизоляционные прокладки, приклеиваемые к ПП. Применяются также подставки, которые обеспечивают дополнительное крепление элемента к ПП (исполнение 24 и др.). Высота подставки выбирается с учетом регламентируемого техническими условиями минимального расстояния от места пайки до корпуса элемента.

Высота выступающих концов выводов элементов должна быть в пределах от 0,5 до 2 мм. При невозможности подрезки выводов (для некоторых элементов существует такое требование) максимально допустимая высота выступающих концов выводов указывается на чертеже печатного узла.

19.5.11. Защитные покрытия

Можно выделить следующие виды защитных покрытий, используемых на печатных платах и узлах:

- металлические, наносимые на печатный рисунок химическим или гальваническим способом, либо путем облуживания;
- маска;
- финишное лаковое покрытие печатного узла после сборки и настройки.

Металлические покрытия могут наноситься на определенные участки фольги для защиты от вытравливания либо для предохранения полученного печатного рисунка от окисления. В последнем случае часто используется сплав Розе, обладающий температурой плавления 97,3°C. Концевые контакты разъемов для повышения износоустойчивости и снижения переходного сопротивления покрывают благородными металлами – золотом, серебром, палладием и их сплавами.

Маска представляет собой диэлектрическое покрытие, наносимое поверх печатного рисунка и оставляющее открытыми только места пайки. Маска электрически изолирует токопроводящий рисунок снаружи, защищает его от окисления и влияния окружающей среды (пыли, грязи, влаги, микрофлоры и др.). Для бытовой аппаратуры такой защиты, как правило, достаточно. У промышленной и иной аппаратуры, предназначенной для жестких условий эксплуатации, печатные узлы после сборки и наладки обязательно покрывают лаком, даже при наличии защитной маски.

Маска выполняет еще одну очень важную функцию – повышает качество пайки при монтаже и снижает расход припоя. Одним из эффективных методов групповой пайки считается пайка волной, при которой монтажная сторона платы с предварительно установленными элементами пропускается над волной расплавленного припоя. Волна омывает печатные проводники и выводы элементов, при этом припой покрывает все открытые металлические поверхности на плате, а не только места пайки. Этот процесс не обеспечивает стабильного качества пайки на платах с минимальными зазорами между элементами проводящего рисунка. Всегда существует опасность образования перемычек в узких зазорах, поэтому пайка волной без применения защитных масок допустима только на платах 1-го и 2-го классов точности. Даже при ручной пайке наличие маски ощутимо упрощает процесс монтажа. Кроме того, тратить огромное количество припоя на покрытие проводников, для которых это совершенно излишне, большое расточительство.

При поверхностном монтаже маска является практически обязательным элементом ПП. Данная технология основана на использова-

нии паяльных паст, наносимых через трафарет на контактные площадки ПП до установки элементов. Расплавление припоя, входящего в мелкодисперсном состоянии в состав паяльной пасты, производится путем нагрева всего печатного узла в специальной камере. Количество припоя строго дозировано, и маска предотвращает его растекание за пределы контактной площадки.

Окна в маске повторяют форму контактных площадок. Размеры окон монтажных отверстий: для ПП до 3-го класса включительно – по размеру контактных площадок, для 4-го и 5-го классов – на 0,1 мм больше контактной площадки. При поверхностном монтаже окно должно быть в любом случае больше контактной площадки: для микросхем с шагом 0,625 мм и менее – на 0,05 мм, для прочих элементов – на 0,1 мм. Допускается, чтобы плотные группы поверхностных контактных площадок имели единое окно, но по возможности этого следует избегать, так как наличие даже узкой полоски защитной маски между площадками при пайке снижает вероятность их замыкания. Если пайка производится волной припоя, то такое объединение окон вообще недопустимо.

19.5.12. Маркировка печатных плат

Маркировка, наносимая на печатную плату, тоже является элементом конструкции и должна удовлетворять ГОСТ 2.314-68. Сведения о маркировке указываются в конструкторской документации и входят в состав электронного файла технологического проекта. Обычно маркировка содержит заводской номер платы, графические изображения мест установки элементов и их позиционные обозначения, обозначение первых выводов многовыводных элементов, допускающих неоднозначную установку при монтаже, знаки «плюс» для полярных элементов и другую информацию по усмотрению разработчика.

Отдельные части маркировки могут быть реализованы в виде фрагментов печатного рисунка. Поскольку такую маркировку можно наносить только на свободные места, возможности ее ограничены. Путем травления обязательно выполняется обозначение платы и версии фотошаблона, что вызвано требованием идентификации каждой ПП в производстве, где одновременно может изготавливаться большое количество плат и их фрагментов (внутренних слоев МПП).

Большие возможности предоставляет маркировка краской поверх проводящего рисунка или защитной маски, выполняемая методом сеткографии (она же шелкография или трафаретная печать). Метод заключается в переносе изображения на основание путем продавливания краски через сетчатый (часто шелковый) трафарет с помощью резинового ракеля. Таким путем можно нанести любую графическую информацию: линии раздела платы на зоны, места установки и изб-

ражения элементов и др. Ограничений в данном случае практически нет, основное требование – не допустить попадания маркировки на места пайки. Минимальная ширина линий графических элементов составляет 0,1 мм.

Для маркировки выбирается шрифт, близкий по начертанию к стандартному по ГОСТ 26.020-80. Высота надписей, получаемых травлением, должна быть не менее 2,5 мм, иначе шрифт нельзя будет прочесть. В надписях, выполненных краской, высота шрифта должна быть не менее 1,5 мм.

19.6. Выбор радиаторов для охлаждения полупроводниковых приборов

Для надежного функционирования мощных полупроводниковых приборов необходимо обеспечить эффективный отвод выделяемой в них теплоты. Обычно это достигается увеличением поверхности теплообмена между прибором и окружающей средой за счет применения радиатора [13].

В электронной аппаратуре при мощностях рассеивания выше 5–10 Вт широко применяются ребристые и штыревые радиаторы (рис. 19.6). Их часто используют как элемент несущей конструкции, например в качестве задней панели электронного блока. Радиаторы этих типов могут быть односторонними и двусторонними. Ребристый радиатор в условиях естественной конвекции воздуха должен располагаться ребрами вертикально, а при наличии обдува – боковой по-

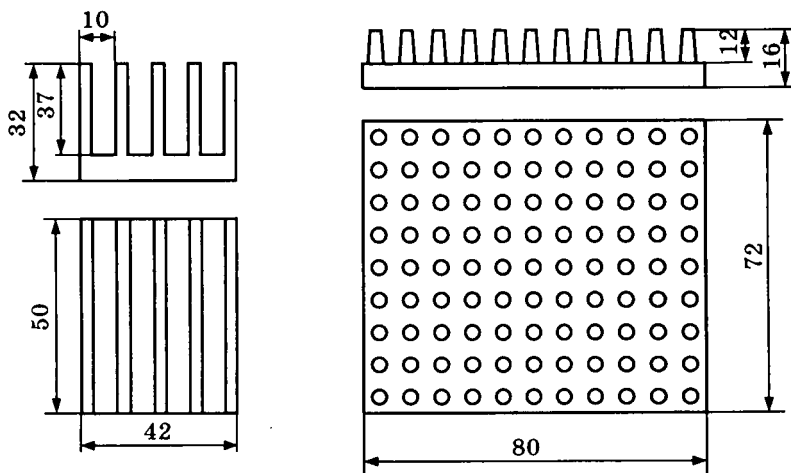


Рис. 19.6. Конструкции ребристого и штыревого радиаторов

верхностью ребер по направлению потока воздуха. Штыревой радиатор при естественной конвекции работает более эффективно при горизонтальном расположении штырей; при обдуве поток воздуха должен быть направлен в торец радиатора. Зависимость эффективности охлаждения от направления потока воздуха у штыревых радиаторов проявляется в меньшей степени, чем у ребристых.

Радиаторы, как правило, изготавливаются из алюминиевых сплавов, обладающих высокой теплопроводностью и хорошими технологическими свойствами. Для интенсификации теплового излучения на их поверхности выполняется матовое покрытие со степенью черноты не ниже 0,85 путем оксидирования или окрашивания эмалями черного цвета.

Чтобы обеспечить плотное прилегание контактирующих поверхностей, основание радиатора в зоне установки прибора должно иметь параметр шероховатости R_a не более 2,5. Для уменьшения переходного термического сопротивления контактные поверхности рекомендуются покрывать теплопроводящей пастой КПТ-8, полиметилсилоксановыми жидкостями ПМС с вязкостью 200–1000 сСт и др. Электрическая изоляция корпуса прибора от радиатора чаще всего осуществляется применением диэлектрических прокладок, например, из керамико-полимерного материала Номакон-GS или листовой слюды.

Тепловая схема охлаждения полупроводникового прибора, установленного на радиаторе, показана на рис. 19.7.

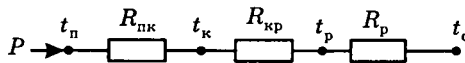


Рис. 19.7

P – мощность, рассеиваемая прибором; t_p , t_k – температуры p - n -перехода и корпуса прибора; t_c – температура окружающей среды; $R_{пк}$ – тепловое сопротивление p - n переход – корпус прибора; $R_{кр}$ – тепловое сопротивление корпус прибора – радиатор; R_p – тепловое сопротивление радиатора

Тепловое сопротивление $R_{пк}$ зависит от конструкции полупроводникового прибора и приводится в перечне его параметров.

Контактное тепловое сопротивление перехода корпус прибора – радиатор

$$R_{кр} = R_{уд} / S, \quad (19.1)$$

где $R_{уд}$ – удельное тепловое сопротивление контакта, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{см}^2/\text{Вт}$; S – площадь контакта прибора с радиатором, см^2 .

Тепловое сопротивление радиатора

$$R_p = \Delta t_p / P, \quad (19.2)$$

где $\Delta t_p = t_p - t_c$; t_p – температура радиатора в месте установки прибора.

С учетом приведенной тепловой схемы температура p - n -перехода

$$t_{\Pi} = t_{\text{C}} + P (R_{\text{ПК}} + R_{\text{КР}} + R_{\text{Р}}). \quad (19.3)$$

Температура корпуса прибора

$$t_{\text{К}} = t_{\text{C}} + P (R_{\text{КР}} + R_{\text{Р}}). \quad (19.4)$$

Температура радиатора

$$t_{\text{Р}} = t_{\text{C}} + P \cdot R_{\text{Р}}.$$

Для мощностей рассеивания порядка нескольких ватт выпускаются унифицированные радиаторы. Задача разработчика состоит в правильном выборе типоразмера такого радиатора в соответствии с приводимой ниже методикой.

1) Из выражения (19.3) рассчитывается максимально допустимое тепловое сопротивление радиатора, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$

$$R_{\text{Рmax}} = \frac{t_{\Pi \text{max}} K_{\text{Н}} - t_{\text{C}} - P(R_{\text{ПК}} + R_{\text{КР}})}{P},$$

где $t_{\Pi \text{max}}$ – предельно допустимая температура p - n -перехода, взятая из справочных данных прибора, $^{\circ}\text{C}$; t_{C} – заданная максимально возможная температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$;

$K_{\text{Н}} = 0,8$ – коэффициент тепловой нагрузки элемента.

Значения $R_{\text{КР}}$ вычисляется по формуле (19.1), причем площадь S определяется из габаритного чертежа полупроводникового прибора, $R_{\text{уд}}$ – по табл. 19.4.

Таблица 19.4

Способ установки прибора на радиатор	$R_{\text{уд}}, ^{\circ}\text{C} \cdot \text{см}^2/\text{Вт}$
Без прокладки	1,14–1,52
Без прокладки, с пастой КПТ-8	0,38–0,76
Без прокладки, со смазкой ПМС-200	1,14
Без прокладки, со смазкой ЦИАТИМ	1,14–1,33
Через прокладку из слюды толщиной 30 мкм	1,98
Через прокладку из слюды толщиной 50 мкм	2,39
Через прокладку из слюды толщиной 30 мкм с пастой КПТ-8	0,83
Через прокладку из слюды толщиной 50 мкм с пастой КПТ-8	1,14
Через прокладку из триацетатной пленки толщиной 50 мкм с пастой КПТ-8	2,85

2) В соответствии с формулой (19.2) рассчитывается

$$\Delta t_p = R_{p,\max} \cdot P.$$

С помощью характеристик $R_p = f(\Delta t_p)$, приводимых в справочных данных унифицированных радиаторов, подбирается типоразмер, у которого при полученном значении Δt_p будет выполняться условие $R_p \leq R_{p,\max}$.

3) Проверочный расчет температуры p - n -перехода прибора.

$$\text{Уточняется } \Delta t_p = R_p \cdot P,$$

где R_p – тепловое сопротивление выбранного радиатора при рассчитанном в предыдущем пункте значении Δt_p .

Для уточненного значения Δt_p по характеристике $R_p = f(\Delta t_p)$ определяется R_p , для которого по формулам (19.3) и (19.4) рассчитываются температуры p - n -перехода и корпуса прибора.

Если рассчитанные температуры не превышают допустимых значений, радиатор выбран правильно. В противном случае необходимо взять радиатор с меньшим тепловым сопротивлением R_p и повторить расчет.

Характеристики $R_p = f(\Delta t_p)$ радиаторов, изображенных на рис. 19.6, для условий естественного охлаждения приведены в табл. 19.5.

Таблица 19.5

$\Delta t_p, ^\circ\text{C}$	$R_p, ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, для радиаторов		$\Delta t_p, ^\circ\text{C}$	$R_p, ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, для радиаторов	
	ребристый	штыревой		ребристый	штыревой
0	6,60	7,50	30	3,85	2,70
2	6,28	6,86	32	3,77	2,62
4	5,96	6,22	34	3,69	2,54
6	5,56	5,42	36	3,59	2,45
8	5,32	4,94	38	3,53	2,40
10	5,25	4,70	40	3,50	2,38
12	5,07	4,40	42	3,46	2,34
14	4,89	4,10	44	3,42	2,30
16	4,64	3,73	46	3,36	2,25
18	4,48	3,51	48	3,32	2,22
20	4,40	3,40	50	3,30	2,20
22	4,28	3,24	55	3,20	2,10
24	4,16	3,08	60	3,10	2,07
26	4,02	2,88	65	3,05	2,05
28	3,94	2,76	70	3,00	2,00

Радиатор с требуемыми параметрами можно сконструировать самостоятельно, используя методику, указанную в [15]. Существенно повысить рассеиваемую мощность без увеличения размеров радиатора позволяет его обдув с помощью осевого вентилятора.

19.7. Расчет параметров теплового режима блока

Тепловой расчет электронного блока проводится в два этапа. На первом этапе рассчитывается среднеобъемный перегрев воздуха в блоке относительно температуры окружающей среды. На втором этапе, используя значение этого перегрева, вычисляют температуру корпуса элемента с наиболее напряженным тепловым режимом.

Для блоков различной конструкции с воздушным охлаждением задача первого этапа часто решается коэффициентным методом [13]. В соответствии с этим методом перегрев корпуса блока (нагретой зоны) относительно температуры окружающей среды можно представить в виде произведения коэффициентов, каждый из которых зависит только от одного фактора, влияющего на величину указанного перегрева. К числу таких факторов относятся удельная тепловая мощность, рассеиваемая корпусом блока (нагретой зоной), коэффициент перфорации корпуса, давление среды, окружающей корпус (нагретую зону), и др.

Функциональные зависимости между указанными коэффициентами и влияющими факторами представлены в виде эмпирических соотношений, полученных в результате экспериментальных исследований тепловых режимов реальных электронных устройств. Для получения правильных результатов следует использовать требуемые единицы измерения исходных данных.

При расчете теплового режима реальный электронный блок заменяют упрощенной тепловой моделью с сосредоточенными параметрами. В упрощенной модели объем аппарата, в котором расположены тепловыделяющие элементы, условно заменяют одним телом простой формы с изотермической поверхностью, так называемой нагретой зоной. В рассматриваемой ниже методике нагретая зона имеет форму параллелепипеда.

В приводимой ниже методике расчета [13, 14] приняты следующие допущения:

- коэффициенты теплообмена наружной и внутренней поверхностей корпуса блока, а также внутри нагретой зоны блока зависят от физических параметров среды, геометрических размеров и средних перепадов температур, но не зависят от координат;

- распространение тепла от элементов по печатной плате происходит аналогично процессу в бесконечном плоском ребре постоянной толщины. Данное допущение основано на том, что эквивалентные теплопроводности печатных плат в различных направлениях имеют значения одного порядка;
- отсутствуют кондуктивные (т. е. за счет явления теплопроводности) теплостоки от элементов и корпуса блока;
- область печатной платы, ограниченная проекцией корпуса элемента, считается изотермической;
- элементы на печатной плате рассматриваются в виде цилиндрических источников тепла с площадью поверхности, равной площади реального корпуса элемента.

Перечень исходных данных, необходимых для выполнения расчета, приведен в табл. 19.6.

Таблица 19.6

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения
Температура окружающей среды	t_c	°С
Допустимая температура корпуса наименее теплостойкого элемента	$t_{\text{доп}}$	°С
Суммарная мощность, рассеиваемая блоком	P_6	Вт
Давление окружающей среды	H_1	Па
Давление внутри корпуса блока	H_2	Па
Площадь основания элемента, для которого рассчитывается температура	S_{∞}	м ²
Суммарная площадь поверхности элемента, для которого рассчитывается температура	S_s	м ²
Коэффициент теплоотдачи конвекцией	α_k	Вт/(м ² ·°С)
Коэффициент теплоотдачи излучением	α_l	Вт/(м ² ·°С)
Теплопроводность печатной платы	$\lambda_{\text{п}}$	Вт/(м·°С)
Толщина печатной платы	$\delta_{\text{п}}$	м
Ширина воздушного зазора между печатной платой и установленным на нее элементом	δ_3	м
Теплопроводность воздушного зазора между печатной платой и элементом	λ_3	Вт/(м·°С)
Мощность рассеивания элемента, для которого рассчитывается температура	P_3	Вт

Порядок расчета теплового режима блока с естественным воздушным охлаждением следующий.

1) Удельная мощность, рассеиваемая корпусом блока, Вт/ м²:

$$q_k = \frac{P_{\delta}}{2(l_1 l_3 + l_2 l_3 + l_1 l_2)},$$

где l_1, l_2, l_3 – соответственно длина, ширина и высота корпуса блока.

2) Коэффициент, учитывающий перфорацию корпуса блока:

$$K_{\text{кп}} = 0,06^A \text{ при } 0 \leq A \leq 0,125;$$

$$K_{\text{кп}} = 0,82 \times 0,32^A \text{ при } 0,125 < A \leq 0,3;$$

$$K_{\text{кп}} = 0,74 \times 0,49^A \text{ при } 0,3 < A \leq 0,6;$$

$$K_{\text{кп}} = 0,6 \times 0,7^A \text{ при } 0,6 < A \leq 1,0.$$

Здесь вспомогательный параметр A рассчитывается по формуле

$$A = \frac{S_{\text{п}}}{2[l_1 l_2 + (l_1 + l_2)l_3]}, \quad (19.5)$$

где $S_{\text{п}}$ – суммарная площадь вентиляционных отверстий в корпусе блока.

Для блока с перфорированным корпусом в первом приближении рекомендуется принять $A = 0,3$.

3) Перегрев корпуса блока относительно температуры окружающей среды при $S_{\text{п}} = 0$ и нормальном атмосферном давлении, °С:

$$\Theta_{\text{ко}} = 0,1472q_k - 0,2962 \times 10^{-3}q_k^2 + 0,3127 \times 10^{-6}q_k^3,$$

где $0 < q_k < 600$ Вт/ м².

Данное выражение справедливо для блоков, корпус которых покрыт эмалевыми матовыми красками различного цвета.

4) Коэффициент, учитывающий давление окружающей среды:

$$K_{H_1} = 0,82 + \frac{1}{0,925 + 4,6 \times 10^{-5} H_1},$$

где $700 < H_1 < 1,2 \times 10^5$ Па.

5) Перегрев корпуса блока относительно температуры окружающей среды в реальных условиях, °С:

$$\Theta_k = \Theta_{\text{ко}} K_{H_1} K_{\text{кп}}.$$

6) Коэффициент заполнения K_3 объема блока

$$K_3 = \frac{\sum_i V_i}{l_1 l_2 l_3},$$

где V_i – объемы, занимаемые электронными компонентами, печатными платами и другими деталями блока, размещенными внутри корпуса.

7) Удельная мощность, рассеиваемая нагретой зоной блока, Вт/ м²:

$$q_3 = \frac{P_{\delta}}{2[l_1 l_2 + (l_1 + l_2)l_3 K_3]}.$$

8) Среднеобъемный перегрев нагретой зоны при $S_{\Pi} = 0$ и нормальном давлении внутри корпуса блока, °С:

$$\Theta_{30} = 0,139q_3 - 0,1223 \times 10^{-3} q_3^2 + 0,0698 \times 10^{-6} q_3^3,$$

где $0 < q_3 \leq 800$ Вт/м².

9) Коэффициент, учитывающий давление воздуха внутри корпуса блока:

$$K_{H_2} = 0,8 + \frac{1}{1,25 + 3,8 \times 10^{-5} H_2},$$

где $700 < H_2 < 1,2 \times 10^5$ Па.

10) Изменение давления снаружи корпуса блока влияет на перегрев корпуса относительно температуры окружающей среды, а внутри корпуса – на перегрев нагретой зоны относительно температуры корпуса блока. Исходя из этого, среднеобъемный перегрев нагретой зоны блока относительно температуры окружающей среды, °С, определяется по формуле

$$\Theta_3 = \Theta_k + (\Theta_{30} - \Theta_{\kappa_0}) K_{H_2} K_{\text{кп}}.$$

11) Среднеобъемный перегрев воздуха внутри блока Θ_b относительно температуры окружающей среды, °С:

$$\Theta_b = \frac{\Theta_3 + \Theta_k}{2}.$$

12) Эквивалентный радиус элемента, установленного на печатной плате, м:

$$R = \sqrt{\frac{S_{30}}{\pi}}.$$

13) Параметр m , м⁻¹:

$$m = \sqrt{\frac{2 \left(\alpha_{\kappa} \sqrt{\frac{H_2}{10^5}} + \alpha_{\text{л}} \right)}{\lambda_{\text{п}} \delta_{\text{п}}}},$$

где α_{κ} и $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением с поверхности печатной платы, на которой установлен тепловыделяющий элемент.

При выполнении расчетов рекомендуется при естественном воздушном охлаждении принимать $\alpha_{\text{л}}$ и α_{κ} равными 5 Вт/(м²·°С). Для платы из фольгированного стеклотекстолита можно принять $\lambda_{\text{п}} = 0,372$ Вт/(м·°С).

14) Коэффициент, учитывающий теплоотдачу с корпуса элемента, Вт/ (м² · °С):

$$K_{\alpha} = \frac{23,54}{4,317 + \lg S_{\alpha}}.$$

15) Вспомогательный коэффициент B , Вт/ °С:

– при одностороннем расположении элементов на плате

$$B = \left(\alpha_{\kappa} \sqrt{\frac{H_2}{10^5}} + \alpha_{\lambda} \right) \pi R^2,$$

– при двустороннем расположении элементов на плате $B = 0$.

16) Перегрев корпуса элемента относительно температуры воздуха внутри блока

$$\Theta_{\alpha} = \frac{P_{\alpha}}{\left[(K_{\alpha} - \alpha_{\lambda}) \sqrt{\frac{H_2}{10^5}} + \alpha_{\lambda} \right] (S_{\alpha} - S_{\alpha 0}) + \left[\frac{\delta_{\alpha}}{\lambda_{\alpha} \pi R^2} + \left(B + M \pi R \lambda_{\text{п}} \delta_{\text{п}} m \frac{K_1(mR)}{K_0(mR)} \right)^{-1} \right]^{-1}},$$

где M – обозначение, введенное для упрощения формы записи: $M = 2$ при двустороннем расположении элементов на плате; $M = 1$ при одностороннем расположении элементов;

$K_0(mR)$, $K_1(mR)$ – модифицированные функции Бесселя второго рода нулевого и первого порядка, приведенные в табл. 19.7 [16].

Ширину воздушного зазора δ_{α} между печатной платой и установленным на ней элементом для всех вариантов принять равной 1 мм. Теплопроводность этого зазора λ_{α} определяется из табл. 19.8 по рассчитанной температуре воздуха внутри блока $t_{\alpha} = \Theta_{\alpha} + t_{\text{с}}$.

17) Температура корпуса элемента

$$t_{\alpha} = \Theta_{\alpha} + \Theta_{\text{в}} + t_{\text{с}}.$$

Если рассчитанная температура элемента превышает допустимое значение, следует уточнить исходные данные (размер корпуса, коэффициент перфорации) и повторить расчет до получения удовлетворительного результата. В качестве допустимой температуры корпуса элемента можно выбрать 70 °С. Для упрощения вычислений на основе данной методики написана компьютерная программа.

После этого для блока с перфорированным корпусом необходимо найти суммарную площадь вентиляционных отверстий по формуле (19.5), определить размеры и количество отверстий. Вентиляционные отверстия можно располагать на всех поверхностях корпуса, кроме передней и задней панели.

Таблица 19.7

Модифицированные функции Бесселя

mR	$K_0(mR)$	$K_1(mR)$	mR	$K_0(mR)$	$K_1(mR)$	mR	$K_0(mR)$	$K_1(mR)$
1,20	0,31850	0,43460	1,58	0,19283	0,24750	1,96	0,11963	0,14743
1,22	0,30990	0,42130	1,60	0,18796	0,24063	1,98	0,11672	0,14360
1,24	0,30160	0,40840	1,62	0,18320	0,23397	2,00	0,11390	0,13986
1,26	0,29360	0,39600	1,64	0,17860	0,22753	2,02	0,11113	0,13623
1,28	0,28590	0,38400	1,66	0,17411	0,22128	2,04	0,10845	0,13271
1,30	0,27820	0,37260	1,68	0,16974	0,21523	2,06	0,10582	0,12931
1,32	0,27100	0,36140	1,70	0,16550	0,20935	2,08	0,10326	0,12598
1,34	0,26370	0,35070	1,72	0,16137	0,20368	2,10	0,10078	0,12274
1,36	0,25680	0,34040	1,74	0,15735	0,19817	2,12	0,09836	0,11960
1,38	0,25020	0,33050	1,76	0,15343	0,19283	2,14	0,09599	0,11655
1,40	0,24366	0,32090	1,78	0,14963	0,18765	2,16	0,09370	0,11358
1,42	0,23733	0,31150	1,80	0,14593	0,18262	2,18	0,09145	0,11071
1,44	0,23118	0,30250	1,82	0,14233	0,17775	2,20	0,08927	0,10790
1,46	0,22522	0,29390	1,84	0,13883	0,17302	2,22	0,08713	0,10516
1,48	0,21944	0,28560	1,86	0,13540	0,16844	2,24	0,08506	0,10251
1,50	0,21380	0,27740	1,88	0,13209	0,16397	2,26	0,08303	0,09993
1,52	0,20833	0,26950	1,90	0,12885	0,15965	2,28	0,08107	0,09742
1,54	0,20302	0,26200	1,92	0,12569	0,15546	2,30	0,07913	0,09498
1,56	0,19786	0,25460	1,94	0,12263	0,15139			

Таблица 19.8

Теплопроводность сухого воздуха при давлении $1,013 \times 10^5$ Па

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda_a, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda_a, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$
-50	0,0204	50	0,0283
-20	0,0228	60	0,0290
0	0,0244	70	0,0297
10	0,0251	80	0,0305
20	0,0260	90	0,0313
30	0,0268	100	0,0321
40	0,0276	120	0,0334

19.8. Проектирование системы виброизоляции электронного блока

Решение этой задачи необходимо для аппаратуры, устанавливаемой на подвижных объектах (автомобили, самолеты и др.) и стационарной промышленной аппаратуры, размещаемой в зоне воздействия вибраций, создаваемых технологическим оборудованием. Виброизоляция осуществляется путем установки между электронным блоком и вибрирующим основанием упругих опор – амортизаторов. Блок совместно с амортизаторами образует колебательную систему, обладающую свойствами демпфирования и частотной селекции механических колебаний.

Демпфирование заключается в поглощении и рассеянии энергии механических колебаний амортизатором. Частотная селекция колебаний проявляется в том, что поведение конструкции зависит от соотношения частоты вибрации и собственной резонансной частоты системы виброизоляции. В зарезонансной области система виброизоляции является фильтром нижних частот, а при совпадении собственной частоты системы f_0 и частоты внешних воздействий f переходит в резонансный режим. Условием ослабления вибрации является выполнение условия $f > \sqrt{2} f_0$.

Качество виброизоляции характеризуется коэффициентом динамичности

$$\eta = \frac{A_{\text{бл}}}{A_{\text{осн}}} = \frac{G_{\text{бл}}}{G_{\text{осн}}},$$

где $A_{\text{бл}}$ и $A_{\text{осн}}$ – амплитуды колебаний блока и основания; $G_{\text{бл}}$ и $G_{\text{осн}}$ – перегрузки блока и основания.

Перегрузка

$$G = \frac{ma}{mg} = \frac{a}{g},$$

где m – масса блока; a – ускорение блока, обусловленное внешним механическим воздействием; g – ускорение свободного падения.

Степень ослабления вибрации характеризуется также коэффициентом эффективности виброизоляции, выражаемым в процентах:

$$\mathcal{E} = (1 - \eta) \cdot 100. \quad (19.6)$$

Предполагается, что блок, установленный на амортизаторах, представляет собой колебательную систему с одной степенью свободы. Статические нагрузки P_i на амортизаторы определяются из условий статического равновесия системы. При использовании четырех амортизаторов эти условия имеют вид:

$$\sum_{i=1}^4 P_i = mg; \quad \sum_{i=1}^4 P_i a_i = 0; \quad \sum_{i=1}^4 P_i b_i = 0; \quad \sum_{i=1}^4 P_i a_i b_i = 0,$$

где a_i, b_i – координаты точек крепления амортизаторов.

Для защиты электронной аппаратуры от механических воздействий наиболее часто используются следующие амортизаторы:

- резинометаллические типов АП, АЧ, АКСС и др. с упругим элементом в виде резиновой втулки, закрепленной в металлическом фланце или корпусе;
- пружинные с воздушным демпфированием типа АД, в которых экспоненциальная пружина помещена в резиновый баллончик, сообщающийся с атмосферой через отверстие малого диаметра;
- пружинные с фрикционным демпфированием типа АПН и др., в которых для успокоения колебаний применен специальный демпфер с сухим трением.

Расчет системы виброизоляции проводится в следующей последовательности.

1) Выбирается схема установки амортизаторов под дном блока (рис. 19.8). Четыре амортизатора располагаются симметрично относительно геометрического центра блока. Определяются координаты a_1, a_2, b_1, b_2 центра тяжести блока. Если исходные данные для этого отсутствуют, можно принять $a_1 = a_2, b_1 = b_2$.

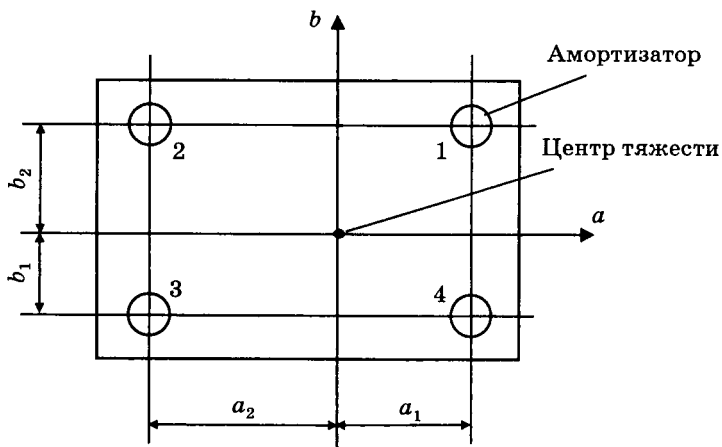


Рис. 19.8. Схема установки амортизаторов

2) Нагрузки P_i на амортизаторы определяются по формулам, полученным путем решения уравнений статического равновесия системы, Н:

$$P_1 = \frac{mga_2b_2}{(a_1 + a_2)(b_1 + b_2)}; \quad P_2 = \frac{mga_1b_2}{(a_1 + a_2)(b_1 + b_2)};$$

$$P_3 = \frac{mga_1b_1}{(a_1 + a_2)(b_1 + b_2)}; \quad P_4 = \frac{mga_2b_1}{(a_1 + a_2)(b_1 + b_2)},$$

где масса блока m должна быть выражена в килограммах, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

3) По табл. 19.9, 19.10 выбираются амортизаторы, исходя из условия $P_{нi} \geq P_i$. Номинальная нагрузка $P_{нi}$ выбранного амортизатора должна быть по возможности близка к рассчитанному значению P_i . Параметры различных типов амортизаторов приведены в работах [17, 18].

4) Суммарная жесткость амортизаторов

$$K = \sum_1^4 k_i,$$

где k_i – коэффициенты жесткости амортизаторов, Н/м.

Таблица 19.9

Параметры амортизаторов типа АП

Тип амортизатора	Номинальная нагрузка, Н	Коэффициент жесткости, Н/м
АП-I-1	4,5	2900
АП-I-2	9,0	5800
АП-I-3	13,5	8700
АП-I-4	18,0	11 900
АП-I-5	22,5	14 500
АП-II-2	9,0	5800
АП-II-4	18,0	11 900
АП-II-6	27,0	23 800
АП-II-8	36,0	28 400
АП-II-10	45,0	29 000
АП-II-12	54,0	34 000
АП-III-10	45,0	29 000
АП-III-15	67,5	42 000
АП-III-20	90,0	57 000
АП-III-25	112,5	71 000
АП-III-30	157,5	92 000

Таблица 19.10

Параметры амортизаторов типа АД и АПН

Тип амортизатора	Номинальная нагрузка, Н	Коэффициент жесткости, Н/м
АД-0,6	3,06–6,12	1200
АД-1,5	10,2–15,3	2000
АД-3	15,5–30,6	4000
АД-5	30,6–51,0	7000
АД-10	71,4–102,0	12 000
АД-15	102–153	19 000
АПН-1	5,0–10,0	6800
АПН-2	9,8–24,5	13 700
АПН-3	19,6–49,0	22 500
АПН-4	39,2–68,7	32 300
АПН-5	58,9–98,1	49 000
АПН-6	88,3–147,2	58 800

5) Собственная частота системы, Гц:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}.$$

6) Коэффициенты динамичности для граничных частот f_1 и f_2 заданного диапазона вибрации определяются по формуле

$$\eta_i = \frac{1}{\left| 1 - \left(\frac{f_i}{f_0} \right)^2 \right|}, \quad i = 1, 2.$$

Предполагается, что демпфированием можно пренебречь.

7) Амплитуды вибросмещения блока, мм:

$$A_{бли} = \eta_i A_{оси}, \quad i = 1, 2.$$

8) Амплитудные значения перегрузок, действующих на блок:

$$G_i = 0,004 A_{бли} f_i^2, \quad i = 1, 2.$$

Здесь $A_{бли}$ должны быть выражены в миллиметрах, f_i – в герцах.

Если полученные значения перегрузок превышают заданные значения, необходимо выбрать другой тип амортизаторов с более низкой жесткостью и повторить расчет. Для обеспечения требуемого ослаб-

ления вибрации на низких частотах может потребоваться применение специальных амортизаторов с собственной частотой порядка единиц герц.

В общем случае на амортизированную систему одновременно могут воздействовать вибрации в различных направлениях. Такие системы, имеющие несколько степеней свободы, рассмотрены в [19, 20].

9) Статические деформации амортизаторов под нагрузкой, мм:

$$Z_i = P_i/k_i, i = 1-4.$$

10) Толщины компенсирующих прокладок, мм:

$$h_i = Z_i - Z_{i \min},$$

где $Z_{i \min}$ – минимальное из рассчитанных значений Z_i .

В общем случае потребуются три компенсирующие прокладки, исключающие перекос блока, обусловленный различной статической деформацией амортизаторов под нагрузкой. При $h_i \leq 0,1$ мм прокладку можно не использовать.

11) По формуле (19.6) рассчитывается коэффициент эффективности виброизоляции.

19.9. Разработка инструкции по эксплуатации устройства

К эксплуатационным документам относятся руководство по эксплуатации, формуляр, паспорт и другие документы согласно ГОСТ 2.601-95. Разработка этих документов в полном объеме выходит за рамки дипломного проектирования. Однако в дипломном проекте может быть приведена инструкция по эксплуатации устройства, в которую входят материалы отдельных разделов руководства по эксплуатации.

Такая инструкция оформляется в соответствии с общими требованиями к текстовым документам и должна содержать следующие разделы:

- требования по технике безопасности (правила, которыми необходимо руководствоваться в процессе монтажа и эксплуатации устройства для исключения травматизма персонала);
- подготовка устройства к работе (внешний осмотр устройства, последовательность его монтажа на объекте, регулировка устройства на месте установки и др.);
- порядок работы с устройством (рекомендации по правильному использованию устройства по назначению);
- указания по поверке устройства (только для средств измерения);

- техническое обслуживание (периодичность и основные работы, проводимые при плано-профилактическом техническом обслуживании устройства в процессе эксплуатации);
- возможные неисправности и методы их устранения (форма представления раздела показана в табл. 19.11).

Таблица 19.11

Возможные неисправности и методы их устранения

Наименование и внешнее проявление неисправности	Вероятная причина	Метод устранения

19.10. Надежность электронных устройств и систем

19.10.1. Основные понятия теории надежности

Надежность – это свойство устройства сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Надежность является комплексным понятием и включает в себя такие составляющие как безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость.

Безотказность – свойство устройства непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки. Для количественной оценки безотказности используются такие параметры как вероятность безотказной работы и средняя наработка на отказ.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ устройства не возникнет. $P(t)$ является монотонно убывающей функцией времени t , причем $0 \leq P(t) \leq 1$, $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$.

Средняя наработка на отказ T_0 – математическое ожидание наработки на отказ. Для нервосстанавливаемых устройств применяется показатель наработка до отказа.

Ремонтпригодность – свойство устройства, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта, характеризующееся средним временем восстановления.

Среднее время восстановления T_B – математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния устройства после отказа.

Безотказность и ремонтпригодность в комплексе характеризуются коэффициентом готовности. Коэффициент готовности K_T – это вероятность того, что устройство окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение устройства по назначению не планируется.

Долговечность – свойство изделия сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при условии выполнения технического обслуживания и ремонта. Предельное состояние – это состояние, при котором дальнейшее применение изделия невозможно или нецелесообразно (физическое или моральное старение).

Сохраняемость – свойство изделия сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и транспортирования.

В дипломных проектах при расчете надежности обычно оцениваются только безотказность и ремонтпригодность устройства. При этом составляется расчетно-логическая схема, элементами которой являются части конструкции устройства, которые потенциально могут отказать в процессе работы: электронные компоненты, паяные соединения, провода, элементы крепления и др. Функциональные связи (электрические, магнитные, оптические, механические и др.) между элементами заменяются логическими, характеризующими выполнение главной функции устройства при отказах его элементов. Различают расчетно-логические схемы с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов (рис. 19.9).

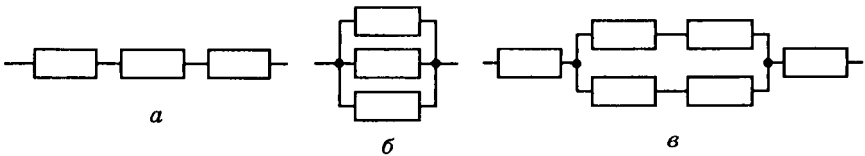


Рис. 19.9. Расчетно-логические схемы с последовательным (а), параллельным (б) и смешанным (в) соединением элементов

Наибольшее распространение получили электронные устройства и системы без структурного резервирования. Расчетно-логическая схема нерезервированного объекта представляет собой цепочку последовательно соединенных элементов, отказ любого из которых приводит к отказу устройства в целом (рис. 19.9, а). Элементы, отказ которых не приводит к нарушению функционирования, в последова-

тельную цепочку не включаются. Чем больше элементов содержит устройство, тем ниже его надежность.

В устройствах со структурным резервированием используется параллельное соединение однотипных элементов (рис. 19.9, б). При отказе элементов их функции начинают выполнять исправные элементы. Отказ устройства происходит после отказа всех элементов. Поэтому здесь увеличение числа элементов способствует повышению надежности устройства. При параллельно-последовательном соединении (рис. 19.9, в) следует найти вероятность безотказной работы для каждой группы последовательно или параллельно включенных элементов, а затем для всей схемы.

От адекватности принятой расчетно-логической схемы зависят полученные при расчете параметры надежности устройства. Поэтому при расчете надежности важно правильно определить элементы, от которых зависит выполнение главной функции устройства. Второстепенные элементы, например, индикаторы режимов работы, блоки, обеспечивающие сервисные функции и другие, в расчетно-логическую схему иногда можно не вводить.

19.10.2. Обеспечение надежности устройств и систем на этапе проектирования

Надежность электронного устройства обеспечивается на этапе проектирования, производства и эксплуатации. Этап проектирования имеет наибольшее значение, поскольку именно в этот период закладывается основа для качественного изготовления аппаратуры и минимизации влияния условий эксплуатации на ее функциональную надежность. Как правило, соответствие показателей надежности устройства требованиям технического задания подтверждается расчетным путем. Обеспечение требуемого уровня надежности может стать основополагающим при выборе структуры устройства или системы. В большинстве случаев заданные показатели надежности удается обеспечить использованием следующих приемов.

1. При выборе элементной базы следует ориентироваться на компоненты, у которых интенсивность отказов λ в заданных условиях эксплуатации минимальна. Например, интенсивность отказов интегральных микросхем в пластмассовых корпусах при прочих равных условиях в три раза выше, чем у аналогичных микросхем в корпусах из металла и керамики. Поэтому для жестких условий эксплуатации микросхемы в пластмассовых корпусах желательно не использовать.

2. Интенсивность отказов компонентов зависит от степени их сложности. Зависимость эта не слишком сильная: при увеличении числа элементов микросхемы на порядки, ее интенсивность отказов

возрастает в разы. Поэтому, как правило, замена совокупности дискретных компонентов микросхемой, выполняющей те же функции, увеличивает надежность.

3. Интенсивность отказов элементов существенно зависит от режимов их электрической нагрузки. Под коэффициентом электрической нагрузки k_H понимается отношение рабочего значения электрического параметра к его номинальному значению, установленному нормативно-технической документацией. Для каждого типа элементов при оценке интенсивности электрической нагрузки существуют свои определяющие параметры, в частности:

- для интегральных микросхем КМОП – напряжение питания;
- для диодов, стабилитронов, транзисторов, тиристоров – рассеиваемая мощность (ток) и рабочее напряжение;
- для конденсаторов – рабочее напряжение;
- для трансформаторов – мощность;
- для дросселей – ток обмоток.

Путем снижения коэффициентов электрической нагрузки элементов удастся уменьшить интенсивность их отказов в несколько раз. Например, интенсивность отказов кремниевых диодов при повышении k_H от 0,2 до 0,9 возрастает более чем в девять раз (при температуре 30°C). В любом случае значения k_H по всем параметрам, характеризующим предельно допустимые режимы эксплуатации элемента, не должны превышать 0,8.

4. Необходимо учитывать зависимость надежности элементов от напряжения питания. Например, для микросхем КМОП при расчете эксплуатационной интенсивности отказов используется следующий повышающий коэффициент K_V :

Напряжение питания, В	K_V
До 10,0	1,0
10,0–12,6	3,0
12,6–15,0	10,0

Для микросхем, изготовленных по другим технологиям, столь явного снижения надежности при высоких напряжениях питания не отмечается.

5. Еще одним важным фактором является температура корпуса элементов. Не следует заблуждаться по поводу того, что элементы одинаково надежны во всем допускаемом диапазоне температур. Приведем всего два типичных примера. Интенсивность отказов интегральных микросхем и других полупроводниковых приборов при температуре 60°C вдвое, а при 90°C почти в четыре раза превышает значение при 25°C.

Для оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторов К50-68 с допусκαемым диапазоном температур от -40 до $+85^{\circ}\text{C}$ приводятся следующие данные по надежности:

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Минимальная наработка, ч
$-40\dots+55$	15 000
$-40\dots+70$	10 000
$-40\dots+85$	1000

Необходимо помнить, что нагрев корпуса элемента определяется суммарным воздействием температуры окружающей среды и тепловой мощности, выделяющейся внутри элемента. Поэтому допускаемая мощность, рассеиваемая элементом, не является постоянной и снижается пропорционально температуре окружающей среды.

Для уменьшения температуры элементов обеспечивают эффективное охлаждение устройства. Наиболее нагревающиеся элементы при необходимости устанавливают на радиатор.

6. Следует всячески снижать интенсивность внешних механических воздействий на устройство: вибраций, ударов, ускорений. Данная задача решается на этапе разработки конструкции путем применения амортизаторов. Наряду с этим обеспечивается повышенная устойчивость устройства к механическим воздействиям путем повышения прочности и жесткости конструкции, дополнительного крепления элементов к печатным платам, заливки электронных узлов компаундами, подавлением резонансных явлений с помощью вибропоглощающих покрытий и т. д.

7. Должно быть уделено должное внимание защите аппаратуры от воды, пыли, агрессивных веществ, ионизирующих излучений и других подобных воздействий.

8. Если весь арсенал перечисленных средств уже использован, а надежность все же недостаточно высока, используют структурное резервирование, рассмотренное в следующем разделе.

9. Кроме безотказности важно обеспечить быстрое восстановление работоспособности устройства при отказе. Если не уделить должного внимания ремонтпригодности, можно оказаться в ситуации, при которой устройство с высокими значениями $P(t)$ и T_0 имеет меньший коэффициент готовности, чем устройство с худшей безотказностью, но более высокой ремонтпригодностью.

Время восстановления устройства при ремонте определяется главным образом временем поиска неисправных элементов и временем, затраченным непосредственно на устранение неисправности. К конструктивным факторам, обеспечивающим сокращение времени восстановления, относятся:

- доступность элементов для контроля, профилактики и ремонта;
- преимущественная доступность и удобство замены наименее надежных элементов;
- модульный принцип построения, взаимозаменяемость модулей;
- защищенность от ошибок и безопасность персонала при техническом обслуживании и ремонте;
- возможность независимого выполнения регулировок;
- применение быстроразъемных соединений и креплений;
- использование встроенных средств диагностики и индикации неисправностей.

19.10.3. Структурное резервирование

Под резервированием понимается способ обеспечения надежности устройства за счет использования дополнительных средств и возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций.

Структурное резервирование заключается в том, что в состав изделия вводят дополнительные устройства или отдельные узлы, предназначенные для быстрой замены (автоматически или вручную) аналогичных им элементов основного оборудования. Резервные элементы берут на себя выполнение рабочих функций при отказе соответствующих основных элементов.

Степень аппаратной избыточности характеризуется кратностью резерва. Кратность резерва – это отношение числа резервных элементов к числу резервируемых ими основных элементов, выраженное несокращенной дробью. Резервирование с кратностью резерва один к одному называется дублированием.

Резервирование может быть общим и отдельным. В первом случае резервируется устройство в целом, во втором – его отдельные элементы или их группы. По схеме включения элементов различают постоянное резервирование, мажоритарное резервирование, резервирование замещением с целой кратностью, скользящее резервирование (рис. 19.10).

Постоянное резервирование – это резервирование, при котором используется нагруженный резерв и при отказе любого элемента в резервированной группе выполнение устройством требуемых функций обеспечивается оставшимися элементами без переключений. Это позволяет исключить малейшие перебои в работе устройства. При постоянном резервировании должно быть исключено влияние отказавших элементов на функционирование устройства.

В ряде случаев возникает необходимость резервирования датчиков и других элементов, выдающих информацию. Для отделения истинной информации от ложной, поступающей от отказавших эле-

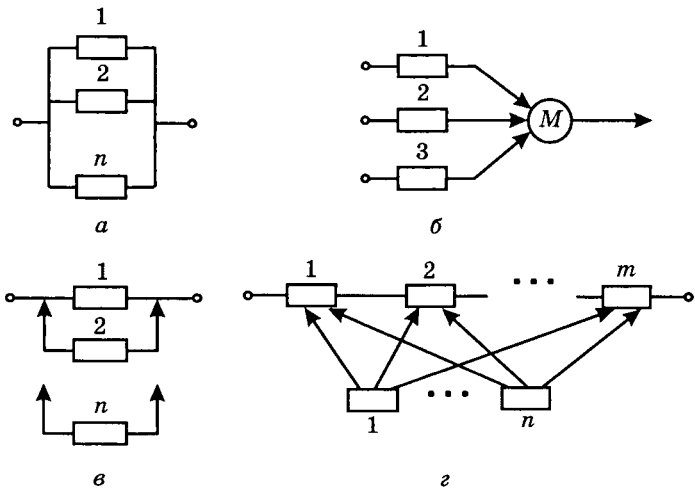


Рис. 19.10. Расчетно-логические схемы резервированного устройства: *а* – постоянное резервирование, *б* – мажоритарное резервирование, *в* – резервирование замещением с целой кратностью, *г* – скользящее резервирование

ментов, применяется мажоритарное резервирование. При этом вместо одного включаются три идентичных элемента, выходы которых подключаются к мажоритарному органу M . Сигнал на выходе M будет того же вида, что и большинство входных сигналов.

Подобное построение схемы основывается на том, что вероятность одновременного отказа двух элементов из трех пренебрежимо мала. Условием безотказной работы такого устройства является работоспособность любых двух элементов из трех и мажоритарного органа. Число элементов в резервированной группе может быть более трех, но оно обязательно должно быть нечетным. Мажоритарное резервирование дает повышение надежности только при вероятности безотказной работы одного элемента $P(t) > 0,5$.

Резервирование замещением – это резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента. Обнаружение отказа и переключение на резервный элемент могут осуществляться автоматически или оператором. Разновидностью резервирования замещением является скользящее резервирование. При скользящем резервировании (резервировании с дробной кратностью) группа одинаковых основных элементов устройства резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой из отказавших

элементов данной группы. Резервирование замещением предполагает перебой в работе устройства.

В зависимости от режима работы резервных элементов различают нагруженный, облегченный и ненагруженный резерв. Интенсивность отказов электронных устройств в выключенном состоянии примерно на два порядка меньше, чем в рабочем режиме, поэтому ненагруженный резерв наиболее эффективен.

При резервировании с восстановлением отказавшие элементы устройства ремонтируются, а потом вновь включаются в эксплуатацию. У таких систем отказы резервных элементов не накапливаются, а устраняются по мере их появления. Благодаря этому надежность устройства при той же кратности резервирования резко возрастает. Резервирование без восстановления для систем длительного пользования малоэффективно и на практике не оправданно.

В реальных устройствах и системах обычно используется смешанное резервирование, представляющее собой комбинацию рассмотренных выше видов. В качестве примера на рис. 19.11 приведена схема устройства бесперебойного электропитания судовых электронных систем, содержащее два идентичных импульсных источника питания ИП1 и ИП2. Входы источников подключены к основной и резервной сетям электропитания. ИП1 и ИП2 включены по схеме постоянного резервирования. С точки зрения нагруженности резерва возможны следующие варианты.

1) Нагруженный резерв – в нормальном состоянии каждый источник обеспечивает половину тока нагрузки. При пропадании напряжения на выходе одного из ИП, второй источник без перерыва автоматически возьмет на себя всю нагрузку.

2) Облегченный резерв – в нормальном состоянии весь ток нагрузки обеспечивает основной источник ИП1. У резервного источника ИП2 выходное напряжение сделано на 0,5 В меньше, поэтому диод VD2 будет закрыт. В этом облегченном режиме у ИП2 будет работать только схема управления, наименее надежная силовая часть будет находиться в режиме холостого хода. При пропадании напряжения на выходе ИП1 всю нагрузку без перерыва возьмет ИП2.

Благодаря постоянному резервированию потребители не почувствуют пропадания напряжения на выходе одного из источников по причине отсутствия сетевого напряжения или отказа данного ИП. При отказе одного из ИП, его заменяют резервным, взятым из комплекта запасных частей и принадлежностей (ЗИП). Встроенные средства автоматической диагностики и сигнализации неисправности, а также модульное построение устройства позволяют сократить время от возникновения неисправности до замены отказавшего блока (время восстановления) до нескольких минут. Для замены блока не требуется отключение устройства. Отказавший блок подвергается ремонту и помещается в комплект ЗИП. Здесь в отношении блока,

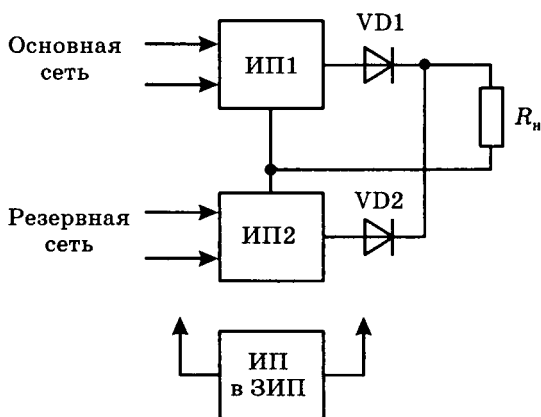


Рис. 19.11. Схема устройства бесперебойного электропитания со смешанным резервированием

находящегося в комплекте ЗИП, используется схема резервирования замещением с ненагруженным резервом.

19.10.4. Расчет надежности электронных устройств

В дипломных проектах чаще всего разрабатывается наземная стационарная аппаратура, предназначенная для работы в закрытых помещениях. Большинство промышленных электронных устройств являются нерезервированными восстанавливаемыми объектами. Поэтому ниже рассматривается методика оценки надежности устройств только этого класса. Для устройств со структурным резервированием необходимо пользоваться литературой [25–27].

При выполнении расчета считается, что время работы устройства соответствует периоду нормальной эксплуатации, интенсивности отказов элементов являются постоянными, распределение времени безотказной работы подчиняется экспоненциальному закону. Предполагается также, что отказы элементов являются внезапными, полными и независимыми, причем элементы и устройство в целом могут находиться в двух состояниях: работоспособном или неработоспособном.

Интенсивности отказов элементов зависят от их электрической нагрузки, температуры окружающей среды и других факторов, учитываемых с помощью поправочных коэффициентов. При расчете эк-

сплуатационной надежности элементов электронных устройств используются математические модели следующего вида:

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{б}} k_{\text{р}} \prod_{j=1}^n k_j,$$

где $\lambda_{\text{э}}$ – эксплуатационная интенсивность отказов элемента; $\lambda_{\text{б}}$ – исходная (базовая) интенсивность отказов элемента при номинальной электрической нагрузке ($k_{\text{н}} = 1$) и температуре окружающей среды 25°C; $k_{\text{р}}$ – коэффициент режима, учитывающий изменение $\lambda_{\text{б}}$ в зависимости от электрической нагрузки и температуры окружающей среды; k_j – коэффициенты, учитывающие изменение эксплуатационной интенсивности отказов от различных факторов (степени жесткости условий эксплуатации, интенсивности ионизирующих излучений и др.); n – число учитываемых факторов.

Для наземной стационарной аппаратуры в качестве исходных данных принимаются интенсивности отказов групп элементов в типовых усредненных условиях эксплуатации, указанные в табл. 19.12 [28]. Данные цифры рассчитаны по приведенной выше формуле для следующих условий: температура окружающей среды 30 °С, коэффициенты электрической нагрузки $k_{\text{н}} = 0,4$, механические воздействия и ионизирующие излучения практически отсутствуют.

Таблица 19.12

Интенсивность отказов и среднее время восстановления элементов в типовых усредненных условиях эксплуатации

Вид элемента	Интенсивность отказов $\lambda_{\text{э}}, \times 10^{-7}, 1/\text{ч}$
Интегральные микросхемы (ИС):	
цифровые ИС малой и средней степени интеграции	0,19
микропроцессоры, микропроцессорные комплекты, программируемые логические матрицы, микросхемы памяти	1,40
аналоговые ИС с числом элементов не более 100 (операционные усилители, стабилизаторы напряжения и др.)	0,40
аналоговые ИС с числом элементов 100–1000	0,80
Транзисторы биполярные и полевые	0,17
Тиристоры и симисторы	0,22
Оптодиристоры	0,80



Продолжение табл. 19.12

Вид элемента	Интенсивность отказов $\lambda_3, \times 10^{-7}, 1/\text{ч}$
Диоды выпрямительные	0,10
Диоды импульсные	0,04
Диодные сборки	0,016
Стабилитроны	0,0076
Оптопары (оптроны)	0,12
Светодиоды	0,08
Индикаторы вакуумные люминесцентные цифровые и буквенно-цифровые	7,00
Индикаторы жидкокристаллические	8,80
Индикаторы полупроводниковые цифровые и буквенно-цифровые	0,40
Индикаторы полупроводниковые шкальные	0,23
Фотодиоды	2,00
Фототранзисторы	1,50
Фоторезисторы	18,00
Конденсаторы:	
керамические	0,02
оксидно-электролитические алюминиевые	0,26
объемно-пористые танталовые	0,19
оксидно-полупроводниковые	0,17
полистирольные	0,06
поликарбонатные и полипропиленовые	0,014
фторопластовые	0,0036
полиэтилентерефталатные низковольтные	0,06
полиэтилентерефталатные высоковольтные	1,00
Резисторы:	
постоянные пленочные	0,19
постоянные проволочные нагрузочные	0,054
постоянные проволочные прецизионные	0,017
переменные металлоокисные и керметные	0,05
переменные композиционные пленочные	0,018
переменные проволочные	0,038
Терморезисторы	0,60
Наборы резисторов	0,044
Резонаторы кварцевые	0,20
Элементы пьезоэлектрические	0,40

Продолжение табл. 19.12

Вид элемента	Интенсивность отказов $\lambda_{\Sigma}, \times 10^{-7}, 1/\text{ч}$
Реле электромагнитные:	
средней мощности	0,13
слаботочные низкочастотные	0,083
герконовые	0,003
Реле контроля и защиты	6,10
Контакты	0,29
Автоматы защиты и выключатели автоматические	3,00
Переключатели движковые	0,70
Микропереключатели	0,17
Тумблеры	0,30
Кнопки и кнопочные переключатели	0,50
Электрические соединители:	
низкочастотные цилиндрические для объемного монтажа	0,012
низкочастотные прямоугольные для объемного монтажа	0,024
низкочастотные прямоугольные для печатного монтажа	0,026
радиочастотные	0,06
Трансформаторы:	
силовые, в том числе статических преобразователей	0,12
импульсные	0,01
согласования	0,02
Дроссели	0,01
Электродвигатели постоянного тока:	
с возбуждением от постоянных магнитов	4,00
с электромагнитным возбуждением без стабилизации частоты вращения	1,10
с электромагнитным возбуждением со стабилизацией частоты вращения	15,00
Электродвигатели бесконтактные моментные	0,40
Электродвигатели переменного тока:	
асинхронные силовые	5,00
асинхронные малоинерционные управляемые	4,20
синхронные	5,60
Электродвигатели шаговые	0,70
Электровентиляторы переменного тока	1,30

Окончание табл. 19.12

Вид элемента	Интенсивность отказов $\lambda_{э}, \times 10^{-7}, 1/\text{ч}$
Тахогенераторы	1,00
Сельсины	2,00
Провода монтажные длиной до 3 м	0,06
Вставки плавкие	0,10
Держатели вставки плавкой	0,03
Соединения пайкой на односторонней печатной плате (на одно соединение)*	0,0007
Соединение пайкой при объемном монтаже (на одно соединение)	0,0014

* П р и м е ч а н и е. Интенсивность отказов двусторонних печатных плат с металлизированными отверстиями рассчитывают по формуле

$$\lambda_{э} = 0,0004 \cdot 10^{-7} (N_1 + 14 N_2),$$

где N_1 – количество сквозных отверстий, пропаянных волной; N_2 – количество сквозных отверстий, пропаянных вручную.

Интенсивность отказов устройства в целом

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_{эi} m_i,$$

где $\lambda_{эi}$ – интенсивность отказов элементов i -й группы в соответствии с табл. 19.12; m_i – число элементов в i -й группе; n – число групп элементов.

Результаты промежуточных вычислений оформляются в табличной форме (табл. 19.13).

Таблица 19.13

Тип элемента	Число элементов, m	$\lambda_{эi}, 1/\text{ч}$	$\lambda_{эi} m_i, 1/\text{ч}$

Вероятность безотказной работы устройства рассчитывается по формуле

$$P(t) = e^{-\Lambda t},$$

где время t выбирается из ряда: 1000, 2000, 4000, 8000, 16 000 часов.

Рассчитанное значение $P(t)$ не должно быть менее 0,8.

Средняя наработка на отказ определяется из соотношения $T_0 = 1/\lambda$.

Время восстановления устройства при отказе включает в себя время поиска неисправного элемента, время его замены или ремонта и время проверки работоспособного состояния аппаратуры. Время ожидания специалиста-ремонтника, время получения запасных частей и другие подобные факторы не учитываются. Среднее время восстановления T_B конкретного устройства зависит от степени его ремонтпригодности и при выполнении дипломного проекта может быть выбрано из ряда 1; 2; 4; 6; 8; 10; 12; 18; 24; 36; 48 ч.

Меньшие цифры соответствуют аппаратуре с высокой ремонтпригодностью, большие – аппаратуре с низкой ремонтпригодностью. Признаками высокой ремонтпригодности являются модульная конструкция, быстрая сборка и разборка, доступный монтаж, встроенные средства диагностики и др.

Стационарное значение коэффициента готовности определяется по формуле

$$K_T = \frac{T_0}{T_0 + T_B}.$$

Список литературы

1. Бердичевский М. Стандартные типоразмеры корпусов электронного оборудования // Современные технологии автоматизации. 1997. № 1. С. 96–106.
2. Бердичевский М. Универсальные 19" субблоки серии Euro-RAS-PRO // Современные технологии автоматизации. 1998. № 4. С. 64–69.
3. Бердичевский М. Конструктивы Евромеханики во встраиваемых системах // Современные технологии автоматизации. 2002. № 4. С. 52–59.
4. Бердичевский М. Корпуса, шкафы, конструктивы: степени защиты // Современные технологии автоматизации. 1996. № 1. С. 121–124.
5. Уваров А. P-CAD 2000, ACCEL EDA. Конструирование печатных плат: Учебный курс. – СПб.: Питер, 2001.
6. Практическое пособие по учебному конструированию РЭА/ Под ред. К. Б. Круковского-Синевича, Ю. Л. Мазора. – Киев: Вища школа, 1992. – 494 с.
7. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов/ Под общ. ред. В. А. Шахнова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 528 с.

8. *Зинченко В., Мельниченко А.* Электрические характеристики печатных проводников // *Электронные компоненты и системы.* № 3. 2002. С. 43–46.
9. *Монтаж на поверхность: Технология. Контроль качества /* Под ред. И.О. Шурчкова. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 184 с.
10. *Монтаж на поверхность: Элементная база /* Под ред. И. О. Шурчкова. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 60 с.
11. *Медведев А. М.* Печатные платы. Конструкции и материалы. – М.: Техносфера, 2005. – 302 с.
12. *Пирогова Е. В.* Проектирование и технология печатных плат: Учеб. для вузов. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 560 с.
13. *Роткоп Л. Л., Спокойный Ю.Е.* Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1976. – 232 с.
14. *Спокойный Ю. Е., Сибиряков В. В.* Тепломассообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Лабораторный практикум. – Киев–Одесса: Вища школа, 1988. – 224 с.
15. *Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник /* Под ред. Г.С. Найвельта. – М.: Радио и связь, 1986. – 576 с.
16. *Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф.* Специальные функции: формулы, графики, таблицы. 3-е изд. – М.: Наука, 1977. – 342 с.
17. *Преснухин Л. Н., Шахнов В. А.* Конструирование электронных вычислительных машин и систем: Учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 1986. – 512 с.
18. *Маквцов Е. Н., Тартаковский А. М.* Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1993. – 200 с.
19. *Ильинский В. С.* Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий. – М.: Радио и связь, 1982. – 296 с.
20. *Поляков К. П.* Конструирование приборов и устройств радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1982. – 240 с.
21. *Ненашев А. П.* Конструирование радиоэлектронных средств: Учеб. для радиотехнич. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1990. – 432 с.
22. *Конструирование радиоэлектронных средств: Учеб. по спец. «Конструирование и технология радиоэлектронных средств» /* Под ред. В. Б. Пестрякова. – М.: Радио и связь, 1992. – 431 с.
23. *Учайкин И. Г.* Конструирование и миниатюризация электронной аппаратуры: Уч. пособие. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1990. – 198 с.

24. Микроэлектронные устройства автоматики: Уч. пособие для вузов/ Под ред. А. А. Сазонова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 384 с.
25. *Голинкевич Т. А.* Прикладная теория надежности: Учеб. для вузов. М: Высшая школа, 1985. – 270 с.
26. *Глазунов Л. П.* и др. Основы теории надежности автоматических систем управления: Уч. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 208 с.
27. *Улинич Р. Б.* Практическое обеспечение надежности РЭА при проектировании. – М.: Радио и связь, 1985. – 112 с.
28. Справочник «Надежность ЭРИ», CD-версия, 2000. – 507 с.

20

ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

20.1. Общие требования к разделу «Безопасность жизнедеятельности»

В эпоху научно-технического прогресса число и степень опасности различных факторов среды обитания и производственной деятельности человека значительно возрастает. Это связано с тем, что при создании новых систем, технологий, оборудования, устройств и материалов не всегда квалифицированно решались вопросы обеспечения безопасности жизнедеятельности. Не учитывались новые свойства, дополнительные вредности и опасности разработок, а следовательно, и не в полной мере разрабатывались превентивные мероприятия, обеспечивающие безопасность их использования. Зачастую разработки уже использовались, и только потом начинали понимать, насколько они вредны и опасны. Современная наука и законодательство требуют, чтобы вопросы обеспечения безопасности решались на стадиях разработки научного замысла, проведения научно-исследовательских работ и были воплощены в проектах.

Вот почему очень важно, чтобы каждый выпускник вуза на заключительном этапе учебы (при дипломном проектировании) получил навыки разработки систем обеспечения безопасности использования проектируемых объектов и устройств.

Автоматизация производственных процессов и производств, роботизация, компьютеризация, создание автоматизированных информационных и управляющих систем сами по себе улучшают условия труда, делают его более производительным, привлекательным и безопасным, позволяют вывести человека из зоны действия вредных и опасных факторов. Важно, чтобы при разработке таких систем были проанализированы все потенциальные вредности и опасности и разработаны превентивные мероприятия и средства защиты от них.

Студент-дипломник, выполняя дипломный проект, должен показать, что проектируемая им система, устройство, оборудование (объект проектирования) отвечает требованиям безопасности и могут быть рекомендованы для изготовления (создания) и внедрения.

Вопросы безопасности могут решаться в любых разделах проекта. Кроме того, каждый дипломный проект должен содержать раздел «Безопасность жизнедеятельности». В этом разделе делается анализ всех потенциальных вредностей и опасностей, которые могут возникнуть на всех стадиях использования (эксплуатации) проектируемого объекта, и разрабатываются мероприятия, обеспечивающие здоровые и безопасные условия труда, в том числе в чрезвычайных ситуациях, делаются ссылки на разработки по безопасности жизнедеятельности, выполненные в других разделах.

Раздел «Безопасность жизнедеятельности» (БЖД) оформляется частью (главой) пояснительной записки и размещается перед экономической частью проекта. Примерный объем раздела 10–20 с.

В перечне литературы, приводимой в конце пояснительной записки, должны быть указаны нормативные материалы и литература по БЖД, которой пользовался студент-дипломник при составлении этого раздела.

Конкретное содержание раздела БЖД определяется консультантом – преподавателем кафедры БЖД и ООС – после утверждения темы дипломного проекта и согласования с руководителем проекта плана спецчасти.

В общем случае в каждом дипломном проекте в разделе «Безопасность жизнедеятельности» должны быть выявлены (идентифицированы) потенциальные вредности и опасности спроектированного объекта, сделана оценка их соответствия требованиям нормативно-технических документов (СН, ГН, СанПиН, ГОСТ, СНиП и др.), установлены наиболее значимые из них, по которым в дальнейшем будут более детально разрабатываться конкретные защитные мероприятия и приспособления.

Во всех проектах должны решаться вопросы электробезопасности, защиты от вредных и опасных факторов, пожарной безопасности, безопасности в ЧС и охраны окружающей среды. При этом 2–3 вопроса, в зависимости от темы дипломного проекта, по согласованию с консультантом по разделу БЖД дипломник должен разработать детально с необходимыми расчетами, схемами и обоснованием.

Ниже приводится примерный перечень вопросов, которые можно рекомендовать для детальной проработки, и пояснения по содержанию отдельных параграфов раздела «Безопасность жизнедеятельности».

20.2. Рекомендуемый перечень вопросов, требующих детальной проработки

1. Детальный анализ потенциальных вредностей и опасностей. Построение дерева опасностей с использованием логических символов и вероятностной оценкой опасности (риска).
2. Оценка тяжести труда оператора (пользователя) и социально-экономической эффективности при внедрении объекта проектирования.
3. Расчет вентиляции или кондиционирования воздуха в производственном помещении (лаборатории).
4. Расчет освещения производственного помещения (лаборатории, офиса).
5. Разработка плана размещения оборудования и создания нормальных условий труда в лаборатории при работе на ПЭВМ и тренажере.
6. Выбор, обоснование, расчет параметров средств борьбы с аэрозолями, вредными газами и парами.
7. Защита работающих от электромагнитных полей и излучений (в том числе ионизирующих).
8. Защита работающих от инфракрасных и ультрафиолетовых излучений.
9. Защита работающих от шума.
10. Защита работающих от ультра- и инфразвука.
11. Проектирование средств защиты от вибрации.
12. Расчет защитного заземления.
13. Расчет защитного зануления.
14. Организационные мероприятия по безопасной эксплуатации электроустановок.
15. Защита от статического электричества.
16. Маркировки, сигнализация, блокировки.
17. Эргономические требования к системам управления.
18. Разработка инструкций по технике безопасности при работе на разработанном автоматизированном и роботизированном оборудовании.
19. Проектирование молниезащиты объекта.
20. Оценка взрывопожароопасности объекта.
21. Расчет пожарной нагрузки и оценка пожарного риска.
22. Средства предупреждения и тушения пожара.
23. Автоматические средства пожаротушения.
24. Оценка негативного воздействия проектируемого объекта на окружающую среду.
25. Выбор средств пылегазоочистки.

26. Выбор способа и средств очистки сточных вод.
27. Утилизация отходов.
28. Анализ и оценка наиболее вероятных чрезвычайных ситуаций.
29. Построение логико-вероятностной модели возникновения и развития наиболее вероятной техногенной чрезвычайной ситуации.
30. Прогнозирование очагов поражения и последствий наиболее вероятной чрезвычайной ситуации.
31. Обеспечение устойчивой безопасной работы объекта при чрезвычайной ситуации.
32. Обеспечение безопасности жизнедеятельности при чрезвычайной ситуации.

20.3. Идентификация потенциальных вредностей и опасностей на проектируемом объекте (устройстве, системе)

Идентификация потенциальных вредностей и опасностей в системе «человек–машина–среда» является основой для целенаправленного проектирования условий безопасной эксплуатации разработанных устройств, систем, объектов, жизнедеятельности человека. Проектировать условия безопасности жизнедеятельности необходимо так же, как и всякое другое. Примерная схема действий при проектировании условий безопасности представлена в табл. 20.1.

Таблица 20.1

Логико-методологическая схема анализа и проектирования безопасности жизнедеятельности

№ п/п	Последовательность	Результат действия
1	Декомпозиция проектируемых объектов на элементы	Конкретизируются: 1) предметы труда; 2) средства труда: машины, сооружения, здания; 3) продукты труда, полуфабрикаты; 4) энергия; 5) технологические процессы, операции, действия; 6) природно-климатические факторы; 7) персонал; 8) рабочие места, цехи, участки и т. д.

Окончание табл. 20.1

№ п/п	Последовательность	Результат действия
2	Идентификация опасностей, создаваемых каждым элементом, определенным в п. 1	Перечень опасностей
3	Количественная и качественная оценка опасностей, сравнение с допустимыми значениями и уровнем риска	Перечень причин и опасностей, защита от которых необходима
4	Определение целей	Количественное определение параметров условий труда, которые должны быть достигнуты
5	Комплексная оценка объектов по параметрам безопасности	Принятые интегральные и балльные показатели
6	Анализ возможных принципов, методов и средств обеспечения безопасности	Набор принципов, методов, альтернатив
7	Анализ достоинств и недостатков потерь и выход по каждой альтернативе	Выбор приемлемого варианта
8	Анализ приемлемых методов, принципов, средств	Выбор конкретных методов, средств, принципов
9	Расчеты	Конкретные решения
10	Оценка эффективности	Показатели технического, социального, экономического эффектов

Из схемы видно, что в процессе проектирования понадобится решать многочисленные задачи, вытекающие из требований безопасности. При рассмотрении декомпозиции объекта необходимо конкретизировать, с какими устройствами, предметами и средствами труда будет иметь дело человек, каковы технология (методика) выполнения работ и вид используемой энергии, в каких условиях будет проходить проектируемая деятельность.

Идентифицируя опасности, необходимо дать перечень и характеристику вредных и опасных производственных факторов, которые могут оказывать вредное влияние на человека как в процессе НИР и проектирования объекта (устройства, системы) так и при транспортировке, монтаже и эксплуатации (использовании). Такими факторами могут быть: неудовлетворительная освещенность, шум, вибра-

ция, электромагнитные, ионизирующие и другие вредные излучения, ядовитые или вредные газы, пары, пыль, поражения электрическим током и другими видами энергии, механические, биологические, природно-климатические и другие опасности.

В отдельных случаях по заданию консультанта выполняется построение дерева причин и опасностей.

Количественная и качественная оценка опасностей выполняется по опытными данным (из практики) или по результатам экспертных оценок специалистов.

По результатам анализа потенциальных опасностей и вредностей определяются главные цели проектирования – перечень причин и опасностей, защита от которых необходима. После этого выбирают принципиальные методы, средства и конкретные мероприятия по обеспечению безопасности, выполняются необходимые расчеты и обоснования.

20.4. Анализ и оценка условий труда

Для анализа и оценки условий труда на предприятиях проводится аттестация рабочих мест по условиям труда в соответствии с Федеральным законом «Об основах охраны труда в Российской Федерации». Порядок проведения и оформления результатов аттестации рабочих мест по условиям труда определяется «Положением о проведении аттестации рабочих мест по условиям труда», утвержденным постановлением Минтруда РФ от 14.03.1997 № 12.

При наличии фактических результатов аттестации рабочих мест (по данным практики) делается их анализ, заполняются карты аттестации и протоколы оценки травмобезопасности на основное рабочее место по фактическим данным на существующее положение.

В карте аттестации рабочих мест должны быть оценены вредность трудового процесса, его тяжесть и напряженность, а затем дана общая оценка условий труда и установлен класс условий труда по наиболее высокому классу и степени вредности.

Анализ условий труда рекомендуется проводить последовательно по стадиям технологического процесса и рабочим местам, указывая количественные значения вредных и опасных факторов производственной среды и показателей тяжести и напряженности трудового процесса. На основании сопоставления фактических значений каждого фактора, производственной среды и трудового процесса с гигиеническими нормативами устанавливается класс условий труда на рабочем месте для каждого фактора вредности. Оцениваются тяжесть и напряженность трудового процесса по соответствующим показателям. Далее осуществляется общая оценка условий труда в соответ-

ствии с Р.2.2.755-99 по вредным производственным факторам и факторам трудового процесса. Результаты заносятся в карту аттестации рабочих мест.

Если условия труда по вредности не соответствуют оптимальному или допустимому классу, то необходимо предусмотреть в дипломной работе (проекте) мероприятия по их улучшению, а именно, можно в соответствующем разделе разработать оздоровительные мероприятия или мероприятия по организации труда, улучшению техники и технологии производства, применению СИЗ, СКЗ и др.

Оценка травмоопасности проводится путем проверки соответствия производственного оборудования, приспособлений и инструмента, а также средств обучения и инструктажа требованиям нормативных правовых актов.

Работа дипломника заключается в подробном изучении соответствия технологических процессов, конструкции оборудования и его основных элементов, устройств, ограждающих рабочие органы, узлы и элементы привода, а также сигнализирующих, блокирующих, регулирующих и управляющих устройств требованиям безопасности.

Безопасные условия труда должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.3.002-, ГОСТ 12.2.003-, ГОСТ 12.2.026-77 и др., которые регламентируют:

- наличие средств защиты от воздействия движущихся частей оборудования;
- присутствие ограждений, предохранительных клапанов и других элементов на оборудовании;
- наличие в ограждениях блокировок, фиксаторов, сигнальной окраски и знаков безопасности;
- наличие защиты электрооборудования от токов короткого замыкания, перегрева и перегрузок, электропроводки от механических воздействий и др.

Класс оценки условий по травмоопасности устанавливается на рабочих местах и дается заключение о полноте соответствия требованиям безопасности. Если условия труда соответствуют 3-му классу (опасные), необходимо разработать мероприятия по приведению их к оптимальным или допустимым.

20.5. Организационные мероприятия по обеспечению безопасных условий труда. Система управления охраной труда на предприятии

20.5.1. Организационные мероприятия

Организационные мероприятия имеют большое значение для обеспечения безопасности труда. Они должны быть направлены на совершенствование системы обучения и инструктирования, организации и управления охраной труда, обеспечение работающих на работах с вредными или опасными условиями труда спецапитанием, спецодеждой, СИЗ, в соответствии с нормами. К таким мероприятиям относятся:

- создание службы охраны труда в соответствии с «Межотраслевыми нормативами численности» и «Рекомендациями по организации работ»;
- проектирование кабинета по охране труда и его оснащение необходимыми техническими средствами обучения, вычислительной техникой, наглядными пособиями, нормативно-технической литературой по охране труда в соответствии с «Типовым положением о кабинете охраны труда»;
- организация обучения, переподготовки и повышения квалификации по охране труда, инструктажей по технике безопасности в соответствии с постановлением Минтруда и Минобразования № 1/29 от 13.01.2003 и ГОСТ 12.0.004-90 с составлением программ обучения и инструкций по технике безопасности;
- создание системы информации об условиях и состоянии охраны труда;
- организация контроля за состоянием охраны труда, включая общественный контроль и создание совместных комитетов (комиссий) по охране труда;
- создание условий для соблюдения рациональных режимов труда и отдыха;
- санитарно-бытовые и лечебно-профилактические мероприятия.

20.5.2. Система управления охраной труда на предприятии

Система управления охраной труда на предприятии должна быть описана в соответствии со сложившейся организацией работ, штат-

ным расписанием, должностными инструкциями и существующим положением о системе управления охраны труда на предприятии. Для составления принципиальной схемы, определения функций и задач управления можно воспользоваться типовым положением о СУОТ в отрасли или приближенной схемой, приведенной в нормативной литературе.

20.5.3. Совершенствование системы управления охраной труда

Разработки по совершенствованию системы управления охраной труда должны учитывать требования новых нормативных документов (например, ГОСТ Р 12.0.006-2002), гармонизированных с международными стандартами. При этом главное внимание должно быть уделено количественной оценке риска на основе проведенного анализа опасностей, выделению опасных факторов, оказывающих наиболее существенное воздействие на условия и безопасность труда, разработке политики организации в области охраны труда, определению целей и задач системы, установлению приоритетов.

Для количественной оценки опасностей (рисков) можно воспользоваться рекомендациями ЮРГТУ (НПИ):

$$R = P \times \lambda \times Y,$$

где R – уровень риска; P – вероятность несчастного случая (берется из анализа травматизма); λ – интенсивность проявления опасных факторов (если нет фактических данных, можно воспользоваться среднестатистическими: одному смертельному случаю предшествуют 10–30 тяжелых травм, около 100–300 легких; 1–3 тыс. микротравм или 10–30 тыс. опасностей); Y – возможные последствия, ущерб.

В конечном счете должны быть разработаны организационная схема и программа для реализации политики и достижения ее целей, выполнения поставленных задач.

20.6. Инженерные мероприятия по обеспечению безопасных и безвредных условий труда на объекте проектирования

Результаты общего анализа условий труда, полученные в параграфе 20.4, позволяют предложить и разработать соответствующие общие мероприятия по защите работающих от опасностей. Характер и содержание этих мероприятий предлагается студентом-дипломником

по согласованию с руководителем и консультантами и полностью определяется конкретными условиями анализируемого объекта.

Примеры некоторых возможных мероприятий, направленных на улучшение условий труда и повышение безопасности, приведены ниже.

20.6.1. Защита от вредных факторов производственной среды

Разработка мероприятий по этому аспекту безопасности жизнедеятельности может включать следующую группу вопросов:

- а) обоснование, выбор типа вентиляции (естественная, механическая, общеобменная, местная, аварийная) и расчет необходимого количества воздуха, аэродинамический расчет воздухопроводов, подбор вентиляторов и расчет мощности электродвигателей, кондиционирование воздуха;
- б) проектирование и расчет естественного и искусственного освещения лабораторий промпомещений и площадок;
- в) расчет шумо- и виброзащитных устройств;
- г) проектирование и расчет устройств и средств обеспыливания воздуха производственных помещений;
- д) расчет устройств тепловой защиты от излучений;
- е) защита от электромагнитных (в том числе ионизирующих) излучений;
- ж) индивидуальные и коллективные средства защиты работающих;
- з) расчет санитарно-бытовых помещений;
- и) защита от эмоциональных и психологических нагрузок;
- к) решение вопросов промышленной эстетики.

При выборе системы освещения необходимо представить схему расположения оборудования в производственном помещении (лаборатории) и, исходя из нее, сделать выбор типа освещения (искусственное равномерное или неравномерное) и использовать соответствующие методы расчета.

При расчете средств обеспыливания воздуха необходимо иметь данные об интенсивности пылевыделения, дисперсном составе пыли, ее температуре, влажности, чтобы правильно выбрать те или иные средства обеспыливания; эффективность работы которых зависит от перечисленных выше и других факторов.

При разработке мероприятий по снижению шума и вибраций необходимы данные частотных характеристик и уровней шума и вибрации, создаваемых каждым источником, и по этим данным сделать расчет суммарного уровня звукового давления, создаваемого всеми источниками, а затем предложить и рассчитать звукоизолирующую и (или) звукопоглощающую способность облицовок кожухов или

экранов, обосновав при этом использование конкретных устройств или акустическую обработку помещений.

При проектировании защиты от инфракрасного излучения перечень мероприятий необходимо обосновать, исходя из особенностей технологии расположения рабочих мест, температуры нагретых поверхностей оборудования и воздуха и др. Предлагаемая защита может быть в следующем виде: теплоизоляция горячих поверхностей, охлаждение теплоизлучающих поверхностей, экранирование источников излучений, применение воздушного душирования, применение средств индивидуальной защиты, организация рационального труда и отдыха и др.

Основными мерами защиты от электромагнитных излучений являются защита временем, защита расстоянием, уменьшение излучения, экранирование рабочих мест, средства индивидуальной защиты.

Защита расстоянием применяется в случае, когда невозможно ослабить излучение другими мерами, в том числе ограничением времени работы персонала с источниками. Тогда прибегают к увеличению расстояния между излучателем и персоналом. Расстояние, на котором мощность дозы излучения не превышает установленных норм, определяется расчетом.

Уменьшение излучения непосредственно у источника возникновения достигается применением специальных устройств: поглотителей мощности коаксиального и волноводного типа, эквивалентов антенн, аттенюаторов, направленных ответвителей, делителей мощности, волноводных ослабителей и др.

Для снижения интенсивности ЭМП на рабочем месте или ограждения опасных зон излучения применяют экраны в виде камер, шкафов, кожухов, выполненных из металлических листов или сеток. Для защиты от ионизирующих излучений в зависимости от вида излучения (α , β , γ , n) применяют экраны из оргстекла, стали, свинца, бетона и др. Толщина экрана рассчитывается или берется по номограммам из справочников.

Расчет санитарно-бытовых помещений необходимо выполнять с учетом требований к объемно-планировочным решениям вспомогательных зданий и размещения количества санитарно-бытовых устройств, исходя из группы производственного процесса и количества людей в наиболее многочисленной смене.

При разработке профилактических мероприятий от неблагоприятного воздействия эмоциональных и психологических нагрузок в условиях умственного труда необходимо обозначить особенности трудовых функций, вызывающих напряжение: восприятие и переработка разнообразной информации за непродолжительный срок; дефицит времени для переработки информации и принятия решения; быстрое и частое переключение внимания; повышенная ответственность за принятые решения; одновременное наблюдение за несколькими изменяющимися во времени производственными процессами;

гипокинезия, стресс и др. Выполненный анализ особенностей психоэмоционального напряжения при умственной деятельности позволит предложить соответствующие оздоровительные и профилактические мероприятия, которые могут включать: производственную гимнастику, использование функциональной музыки, оптимизацию труда и отдыха, организацию аутогенной тренировки и комнат психологической разгрузки.

Разработка мероприятий по промышленной эстетике включает рациональное размещение производственного оборудования в цехе или на площадке, эстетическое оформление производственных помещений, зданий и территории предприятия.

20.6.2. Защита от опасных производственных факторов

Мероприятия по обеспечению электробезопасности. Разрабатывая мероприятия по снижению электроопасности, необходимо охарактеризовать тип сети и режим нейтрали, указать рабочее напряжение, а затем для обеспечения безопасности рекомендовать организационные и технические способы и средства защиты (защитное заземление, защитное зануление и отключение, выравнивание потенциалов, малое напряжение, изоляция токоведущих частей, предупредительная сигнализация, электрозащитные индивидуальные средства, знаки безопасности и др.).

Характеризуя опасность разрядов статического электричества в производственных условиях в парогазовых и пылевоздушных смесях, а также на границах соприкосновения двух других фаз, студент-дипломник должен обосновать возможность воспламенения горючих смесей искровыми разрядами статического электричества и рекомендовать средства защиты от статического электричества в соответствии с ГОСТ 12.4.124-83 (заземление, нейтрализация зарядов статического электричества, отвод зарядов путем изменения удельного объемного и поверхностного электрического сопротивления, снижение интенсивности возникновения зарядов статического электричества за счет использования слабоэлектризирующихся материалов, отвод зарядов статического электричества, накапливающихся на людях).

Защита от механических опасностей. Наибольшее применение для защиты от механического травмирования движущимися машинами, частями оборудования, механизмов, устройств, инструментом находят коллективные средства:

- оградительные (кожухи, щиты, дверцы, козырьки, планки, барьеры);
- предохранительные (блокировочные, ограничительные);
- тормозные (ручные автоматические и полуавтоматические – колодочные, дисковые, конические, клиновые);

- устройства автоматического контроля и сигнализации (информационные, предупреждающие, аварийные, ответные);
- устройства дистанционного управления (стационарные, передвижные);
- знаки безопасности (запрещающие, предупреждающие, указательные, пожарные, эвакуационные);
- средства индивидуальной защиты, которые делятся на несколько групп: средства защиты рук, средства защиты головы, средства защиты глаз и лица, одежда и обувь специального назначения, предохранительные пояса.

Студент-дипломник должен выбрать наиболее подходящие для проектируемого объекта СКЗ и СИЗ, разработать их конструкцию, определить параметры.

Особое внимание должно быть уделено опасным производственным объектам – сосудам и аппаратам, работающим под давлением, грузоподъемным машинам и механизмам.

При разработке мероприятий по повышению безопасности эксплуатации сосудов и аппаратов, работающих под давлением, а также баллонов, используемых для хранения и перевозки сжатых, сжиженных и растворенных газов и жидкостей, необходимо четко представить причины потенциальных аварий и взрывов сосудов (несоответствие конструкции максимально допустимому давлению и температуре; превышение давления сверх предельного; потеря механической прочности из-за коррозии, дефектов металла, местных перегревов; несоблюдение установленного режима работы; отсутствие технического надзора; недостаточная квалификация обслуживающего персонала) и исходя из них совершенствовать надежность безопасной эксплуатации. С этой целью такие сосуды снабжаются: приборами для измерения давления и температуры среды; предохранительными устройствами (предохранительные клапаны и мембраны); запорной арматурой, устанавливаемой на трубопроводах, подводящих и отводящих из сосудов пар, газ или жидкость; указателями уровня жидкости др. Освещая вопросы техники безопасности при эксплуатации, хранении и транспортировке баллонов с газами, необходимо указывать агрегатное состояние газа: сжатый (кислород, водород, азот, воздух и др.), сжиженный (хлор, аммиак, бутан, пропан, сероводород, диоксид углерода и др.), растворенный (ацетилен), а также требования, предъявляемые к маркировке, освидетельствованию и хранению (совместном или раздельном) в складском помещении.

Разрабатывая мероприятия, направленные на обеспечение безопасности при эксплуатации грузоподъемных машин, необходимо выделить опасные зоны, предусмотреть наличие предохранительных устройств (ограничителей высоты подъема, массы поднимаемого груза, конечных выключателей, механизмов передвижения, ограничителей скорости, аварийных выключателей и др.). При эксплуатации других машин, оборудования и технологических производств необ-

ходимо выделить основные опасности, опасные зоны и режимы работы и наметить мероприятия по предупреждению воздействия на человека опасных факторов (ограждения, блокировки, предохранительные устройства, безопасные приемы труда и пр.), а также мероприятия по предупреждению аварий, отказов (соблюдение графиков планово-предупредительных осмотров, ревизий, смазок, освидетельствований и испытаний).

Автоматические средства обеспечения безопасности. Автоматические средства играют важную роль в обеспечении безопасности. На основе общего анализа опасностей с учетом особенностей объекта проектирования необходимо выбрать и обосновать эффективность применения для проекта соответствующих автоматических средств безопасности.

Выбрав те или иные автоматические средства обеспечения безопасности, соответствующие рассматриваемым условиям, необходимо:

- описать принцип действия устройства;
- привести основные технические характеристики;
- изобразить принципиальную или конструктивную схему устройства с учетом возможных изменений.

Перечень возможных автоматических средств может содержать:

- электрические сигнализаторы и регуляторы в технологическом оборудовании;
- защитно-отключающие и сигнальные устройства;
- блокировочные устройства (механические, гидравлические, пневматические, электрические).

Если объектом проектирования являются сами средства автоматизации, необходимо сделать анализ, какое влияние они будут оказывать на безопасность труда, оценить надежность их работы, разработать инструкции по технике безопасности при их эксплуатации.

20.7. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

20.7.1. Мероприятия по прогнозированию и предупреждению возникновения наиболее вероятных чрезвычайных ситуаций (для условий объекта проектирования)

Разработка мероприятий по прогнозированию вероятных чрезвычайных ситуаций на объекте базируется на возможных для данной местности и характера объекта ЧС и природе их возникновения:

- чрезвычайные ситуации, связанные со стихийными бедствиями (обвалы, наводнения, ураганы, степные и лесные пожары, эпидемии и др.);

- чрезвычайные ситуации, связанные с возникновением пожаров и взрывов и их последствиями;
- техногенные чрезвычайные ситуации, связанные с аварийными выбросами вредных веществ в окружающую среду (от АЭС, химпредприятий опасных грузов транспорта и др.);
- чрезвычайные ситуации, связанные с выходом из строя систем жизнеобеспечения (длительные отключения электроэнергии, аварии на водоводах и др.);
- чрезвычайные ситуации конфликтного характера (социально-политические конфликты, межнациональные конфликты, теракты и др.);
- чрезвычайные ситуации экологического характера (загрязнение атмосферы, почвы и водных ресурсов вредными веществами, шумом, электромагнитными полями и др.).

Из них необходимо выбрать для дальнейшего детального анализа наиболее вероятные из возможных ЧС.

Исходными данными для прогнозирования обстановки на объекте, связанной с возникновением ЧС, являются: места (координаты) опасных объектов, запасы опасных веществ; рельеф местности; численность и плотность населения; характер построек; количество и тип защитных сооружений; характеристика объектовых звеньев РСЧС; метеорологические условия, характер местности, растительности и др.

Результатом прогнозирования обстановки от вероятных чрезвычайных ситуаций должны стать: вероятность и масштабы возможных ЧС; определение границы зоны разрушения, пожара, затопления, заражения; возможные потери населения и ущерб, наносимый производству и жителям.

К мероприятиям по предупреждению возникновения наиболее вероятных чрезвычайных ситуаций относятся:

- создание надежной системы оповещения населения об опасностях;
- всеобщее обязательное обучение населения правилам поведения и действиям в ЧС;
- выполнение строительно-монтажных работ с учетом требований строительных норм и правил по устойчивости зданий и сооружений во время аварий;
- создание защитных сооружений и обеспечение населения СИЗ;
- перепрофилирование объектов – источников повышенной опасности в объекты, неопасные для здоровья и жизни людей;
- инженерные расчеты по усовершенствованию наиболее слабых конструкций убежищ, энергетических систем, коммуникаций и технологических процессов;
- обоснование новых реагентов для локализации зоны действия радиоактивных веществ и агрессивных жидкостей, а также новых способов защиты от них и др.

20.7.2. Меры пожарной безопасности

Меры пожарной безопасности на объекте разрабатываются в зависимости от категории пожаровзрывоопасности. Поэтому студент-дипломник прежде всего должен определить категорию взрывопожарной и пожарной опасности проектируемого объекта согласно НПБ 105–03.

Кроме того, в связи с тем, что в настоящее время требования действующих норм и правил пожарной безопасности значительно превышают область реальных пожарных рисков и это приводит к неоправданным расходам на противопожарную защиту объектов, меры пожарной безопасности рекомендуется также разрабатывать на основе расчета пожарного риска, который оценивается по критическим значениям пожарной нагрузки.

Основными мерами пожарной безопасности на объекте могут быть:

- выполнение противопожарных требований СНиП, НПБ и ППБ к планировке конструкций и огнестойкости зданий и сооружений для предотвращения пожара, обеспечения безопасности людей (требования к путям эвакуации), повышения противопожарной устойчивости зданий, ограничения распространения пожара, обеспечения локализации и ликвидации пожара в начальной стадии и успешного тушения пожара подразделениями пожарной охраны;
- осуществление организационных мероприятий (обучение правилам пожарной безопасности, противопожарный инструктаж и т. д.);
- внедрение автоматических средств обнаружения и тушения пожаров, а также самосрабатывающих огнетушителей;
- обеспечение наружным и внутренним противопожарным водопроводом, а также достаточным количеством первичных средств пожаротушения (необходимо указать, где, в каком количестве, какие средства пожаротушения должны быть расположены).

20.8. Оценка социально-экономической эффективности разработанных мероприятий

Социально-экономические аспекты охраны труда находятся на стыке задач, которые могут решаться как в разделе БЖД, так и в экономической части проекта. Важно, чтобы выпускник вуза научился по-

нимать, что разрабатываемые мероприятия по улучшению условий труда, снижению травматизма и профзаболеваний, – затратные по своей сути, могут дать не только социальный, но и экономический эффект.

В соответствии с Федеральным законом РФ «Об основах охраны труда в Российской Федерации» финансирование мероприятий по улучшению условий и охраны труда в организациях независимо от организационно-правовых форм осуществляется в размере не менее 0,1% суммы затрат на производство продукции (работ, услуг), а в организациях, занимающихся эксплуатационной деятельностью – в размере не менее 0,7% суммы эксплуатационных расходов.

Кроме того, в соответствии с Федеральным законом РФ «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний» каждое предприятие ежемесячно должно отчислять в фонд социального страхования страховые взносы, размер которых (в процентах от начисленного фонда оплаты труда) определяется в зависимости от класса профессионального риска отрасли (подотрасли) данного предприятия. Эти обязательные расходы на охрану труда студент-дипломник может легко подсчитать для своих условий проектирования. Однако если есть необходимые исходные данные о затратах на предлагаемые мероприятия по охране труда и ожидаемых результатах, этим не стоит ограничиваться, а попытаться определить величину предполагаемого экономического эффекта.

Экономический эффект определяется как разность затрат и выгоды, полученной за счет:

- снижения затрат на компенсации и льготы, связанные с неблагоприятными условиями труда;
- снижения затрат на возмещение вреда от несчастных случаев;
- снижения затрат на возмещение вреда от профессиональных заболеваний;
- снижения ущерба от текучести кадров;
- получения дополнительной прибыли за счет повышения производительности труда, снижения простоев.

Следует отметить, что определение эффективности от проектируемых мероприятий является не простой задачей, так как результат любого защитного или природоохранного мероприятия включает не только экономические составляющие, подлежащие прямой денежной оценке, но и социальные, и экологические, которые напрямую в денежном выражении не могут быть представлены. Поэтому при дипломном проектировании можно использовать ориентировочные, приближенные данные из практики, литературных источников или заданные консультантом.

В любом случае в заключении по разделу БЖД должна быть показана социальная значимость (эффективность) предложенных ме-

роприятий, определены расходы на охрану труда и затраты на выполнение мероприятий по улучшению условий труда и экономическая эффективность разработок (хотя бы по приближенным данным), сделана общая оценка дипломного проекта на соответствие требованиям экологичности и производственной безопасности.

Ниже приводятся методики и примеры решения инженерных задач по защите работающих и улучшению условий труда.

20.9. Примеры некоторых инженерных расчетов по безопасности жизнедеятельности

20.9.1. Расчет освещения производственных помещений

Расчет естественного освещения.

Естественное освещение производственных помещений может быть следующих видов:

- а) верхнее – через световые фонари в перекрытии;
- б) боковое – через окна в наружных стенах;
- в) комбинированное – через световые фонари и через окна.

Естественная освещенность очень изменчива в зависимости от времени дня, сезона и атмосферных условий. Поэтому оценку естественного освещения помещений производят не по абсолютной величине создаваемой освещенности, а по относительной величине, показывающей во сколько раз освещенность внутри помещения меньше освещенности снаружи здания. Эта относительная величина, выраженная в процентах, называется коэффициентом естественной освещенности (КЕО) и определяется по формуле:

$$e = (E_{\text{в}}/E_{\text{н}}) \cdot 100\%,$$

где e – КЕО, %; $E_{\text{в}}$ – освещенность внутри помещения, лк; $E_{\text{н}}$ – освещенность снаружи здания (определяемая по горизонтальной плоскости в условиях экранирования прямых солнечных лучей), лк.

Для ориентировочных расчетов используются определения требуемой площади светопроемов, которая обеспечивает нормированную для данной работы величину коэффициента естественной освещенности. Используются следующие формулы:

- а) при боковом освещении помещения:

$$S_0 = (S_{\text{п}} \cdot e_{\text{min}} \cdot \eta \cdot k) / (100 \cdot \tau_0 \cdot r_1);$$

- б) при верхнем освещении помещения:

$$S_{\text{ф}} = (S_{\text{п}} \cdot e_{\text{ср}} \cdot \eta_{\text{ф}}) / (100 \cdot \tau_0 \cdot r_2),$$

где S_0 – площадь проемов, m^2 ; S_{ϕ} – площадь световых фонарей, m^2 ; $S_{\text{п}}$ – площадь пола помещения, m^2 ; e_{min} – нормированное минимальное значение КЕО для данного помещения при боковом освещении (табл. 20.2); $e_{\text{ср}}$ – нормированное значение КЕО для данного помещения при верхнем и комбинированном рабочем освещении (табл. 20.2); η_0 – световая характеристика окна (табл. 20.3); k – коэффициент, учитывающий затемнение окон противостоящими зданиями; τ_0 – общий коэффициент светопропускания (табл. 20.4); η_{ϕ} – световая характеристика фонаря; r_1 – коэффициент, учитывающий влияние отраженного света при боковом освещении (табл. 20.5); r_2 – коэффициент, учитывающий влияние отраженного света при верхнем освещении.

Таблица 20.2

Нормированные значения КЕО в помещениях производственных зданий, расположенных севернее 45° и южнее 60° северной широты

Разряды работ	Характер работ, выполняемых в помещении		Нормы КЕО, %	
	виды работы по степени точности	размеры объекта различения	при верхнем и комбинированном освещении, $e_{\text{ср}}$	при боковом освещении, e_{min}
1	Особо точные работы	0,1 и менее	10	3,5
2	Работы высокой точности	0,1–0,3	7	2
3	Точные работы	0,3–1,0	5	1,5
4	Работы малой точности	1–10	3	1
5	Грубые работы	более 10	2	0,5

Таблица 20.3

Значение световой характеристики окна τ_0

Отношение длины помещения A (вдоль стен с окнами, к его ширине B)	Значения световой характеристики при его отношении ширины помещения B к возвышению зонта верхнего края окна под горизонтальной рабочей поверхностью h_1 , равном							
	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6
4 и более	–		7	9,5	12	15	17	20
3	9,5	8,5	9,5	11,5	16	19	23	26
2	11,5	10	11	13	18	22	26	30
1,5	13	11,5	12,5	15	20	25	30	35
1	16	15	17	19	25	35	42	45
0,5	–	–	22	27	42	–	–	–

Таблица 20.4

Значение общего коэффициента светопропускания τ_0

Характеристика помещения по условиям загрязнения воздуха	Виды помещения	Положение остекления	Значение коэффициента t_0						При стеклож/б заполнении
			при деревянных и ж/б переплетах			при стальных переплетах			
			одинарных	двойных	сдвоенных	одинарных	двойных	сдвоенных	
Группа Б Помещения с незначительными выделениями пыли, копоти (ПДК пыли и других аэрозолей)	Цехи холодного проката, инструментальные цехи, машинные залы ГТС аппаратные залы предприятий	Вертикальное	0,5	0,35	0,4	0,6	0,4	0,4	0,35
		Наклонное	0,4	0,25	0,3	0,5	0,3	0,4	0,25

Таблица 20.5

Значение коэффициента r_1 , учитывающего отраженный свет при одном боковом освещении

Средневзвешенный коэффициент отражения стен, потолка, пола помещения, $\rho_{ср}$	Значение коэффициента r_1	
	при одностороннем освещении	при двустороннем освещении
0,5	4	2,2
0,4	3	1,7
0,3	2	1,2

Расчет искусственного освещения

Выбор источника света. Для освещения используются следующие источники света:

- лампы накаливания;
- газоразрядные лампы низкого давления (люминесцентные);
- газоразрядные лампы высокого давления (дуговые ртутные люминесцентные ДРЛ);
- металлогалогенные (лампы высокого давления с иодидами ДРИ);
- дуговые ксеноновые лампы.

Выбор источников света определяется рядом факторов: характером работы, условиями среды и размерами помещения. Лампы накаливания следует применять в помещении, где выполняются грубые работы, для которых освещенность нормируется менее 50 лк, когда предъявляются повышенные требования к определению цветовых оттенков, а также во взрыво- и пожароопасных помещениях. Люминесцентные лампы следует применять в помещениях, где требуется большая освещенность, а также при повышенных требованиях к правильности определения цветов.

Выбор типа люминесцентных ламп для освещения помещения зависит от особенностей работы и окраски помещения. Лампы ЛХБ (лампа люминесцентная, холодно-белая), ЛД (люминесцентная, дневного света) и особенно ЛДЦ (люминесцентная, дневного света, правильной цветопередачи) следует применять в тех случаях, когда это обусловлено специальными требованиями к определению цвета. Во всех остальных типах рекомендуются лампы типа ЛБ (люминесцентная, белого цвета). Лампы типа ДРЛ, ДРИ-700, натриевые и ксеноновые лампы используются для освещения открытых пространств.

В табл. 20.6, 20.7, 20.8 приведены характеристики основных типов люминесцентных ламп и ламп накаливания.

Таблица 20.6

Значение светового $F_{\text{л}}$ потока ламп накаливания

Мощность лампы, Вт	Напряжение, В	Световой поток, лм
40	220	336
60	220	540
100	220	1000
150	220	1710
200	220	2510
300	220	4100
500	220	7560
750	220	12 230
1000	220	17 200

Таблица 20.7

Значения светового потока люминесцентных ламп

Тип лампы	Мощность, Вт	Напряжение на лампе, В	Световой поток, лм
ЛДЦ-20 ЛД-20 ЛХБ-20 ЛБ-20 ЛТБ-20	20	60	620 760 900 980 900
ЛДЦ-30 ЛД-30 ЛХБ-30 ЛБ-30 ЛТБ-30	30	108	1100 1380 1500 1740 1500
ЛДЦ-40 ЛД-40 ЛХБ-40 ЛБ-40 ЛТЦ-40	40	108	1520 1960 2200 2480 2700
ЛДЦ-80 ЛД-80 ЛХБ-80 ЛБ-80 ЛТБ-80	80	108	2720 3440 3840 4320 3840

Таблица 20.8

Коэффициенты использования светового потока различных ламп η

Тип светильника	Коэффициент отражения		Коэффициент использования η при индексе помещения ϕ							
	потолка, $\rho_{\text{п}}, \%$	стен, $\rho_{\text{ст}}, \%$	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0
Универсаль без затенителя У и УПМ	70	50	22	39	49	55	60	66	70	73
	50	30	20	34	43	50	55	62	66	69
	30	10	27	30	39	46	51	58	62	64
Универсаль с затенителем	70	50	19	32	39	44	48	53	56	57
	50	30	15	28	35	40	44	49	52	53
	30	10	12	25	31	36	40	46	48	56
Глубокоизлуча- тель эмалирован- ный	70	50	28	36	45	54	59	64	67	69
	50	30	22	31	40	49	55	61	64	66
	30	10	19	28	37	46	52	58	61	63
Люцетта	70	50	22	34	44	52	56	62	66	68
	50	30	21	31	40	47	52	57	60	62
	30	10	18	27	36	43	48	53	56	58
ОД, АОД	70	50	30	38	47	57	62	67	70	72
	50	30	25	33	42	52	57	63	66	69
	30	10	20	29	38	47	54	60	64	66
ОДР и ПВЛ-6	70	50	28	35	44	52	56	62	64	65
	50	30	24	30	38	47	62	58	61	62
	30	10	21	27	34	43	49	55	58	60
ОДО	70	50	30	36	47	59	67	75	79	82
	50	30	21	29	38	47	63	59	62	65
	30	10	19	25	33	42	47	53	56	58
ШОД	70	50	23	33	43	54	60	68	73	76
	50	30	16	24	32	42	45	50	54	66
	30	10	14	21	29	37	42	48	51	53
ПЛ-1	70	50	20	27	35	43	48	54	58	60
	50	30	18	25	32	38	43	47	50	51
	30	10	15	21	28	38	40	44	47	49

Примечание: При показателе помещения $\phi > 5$ (индекс помещения) принимают $\phi = 5$.

При расчете искусственной освещенности необходимо разработать систему освещения, выбрать источник света, распределить светильники по потолку, определить мощность и количество светильников

для создания равномерной и нормируемой освещенности на рабочих местах.

Расчет по методу коэффициента использования

Расчет начинается с выбора типа светильника, типа лампы (накаливания, люминесцентная), мощности ламп, напряжения сети питания. Расчет по формуле (20.1) производится для ламп накаливания, а по формуле (20.2) для люминесцентных ламп:

$$E = (F_{\lambda} \cdot N \cdot \eta) / S \cdot k \cdot Z, \quad (20.1)$$

$$E = (F_{\lambda} \cdot N \cdot \eta \cdot n) / S \cdot k \cdot Z, \quad (20.2)$$

где $E = E_{\min}$ – освещенность (минимальная нормируемая освещенность); F_{λ} – световой поток одной лампы, лм; η – коэффициент использования осветительной установки; $Z = E_{\min} / E_{\text{ср}}$ – поправочный коэффициент (отношение минимальной освещенности к средней горизонтальной); S – площадь пола помещения, м²; k – коэффициент запаса; n – число ламп в светильнике (для люминесцентных ламп).

При определении освещенности в рабочем помещении порядок расчета следующий:

1) Световой поток лампы F определяется по табл. 20.6, 20.7. Мощность ламп указывается на чертеже, а напряжение в осветительной сети в пояснительной записке. Мощность лампы также может быть выбрана проектировщиком (дипломником).

2) Коэффициент использования осветительной установки η – отношение светового потока, падающего на поверхность, к световому потоку, испускаемому источником. Для определения коэффициента использования (см. табл. 20.8) необходимо вычислить показатель помещения ϕ , учитывающий влияние соотношения размеров конфигурации помещения и высоты подвеса светильника над рабочей поверхностью по формуле:

$$\phi = (A \cdot B) / (H_p \cdot (A + B)), \quad (20.3)$$

где ϕ – показатель помещения в условных единицах; A – ширина помещения, м; B – длина помещения, м; H_p – высота подвеса светильников общего освещения над рабочей поверхностью.

3) Число светильников общего освещения N подсчитывают по чертежу, т. е. по плану помещения (потолка) с условным размещением светильников.

4) Поправочный коэффициент Z вводят для получения минимальной освещенности. Необходимость введения этого коэффициента обусловлена тем, что при делении суммарного потока на площадь помещения получают среднюю по помещению освещенность в горизонтальной плоскости $E_{\text{ср}}$, достаточная величина которой не гарантирует отсутствия в помещении плохо освещенных мест, что особенно

возможно при неравномерном светораспределении по помещению. Ориентировочно величину поправочного коэффициента для светильников с лампами накаливания принимают за 0,8–0,9; а для светильников с люминесцентными лампами за 1,1–1,2.

5) Коэффициент запаса k вводят для компенсации снижения освещенности от запыления перекрытия помещения и светильников и от старения ламп по мере эксплуатации осветительной установки. Коэффициент запаса принимают: при содержании в воздухе рабочей зоны более 5 мг/м³ пыли, дыма, копоти – 2,0; от 1 до 5 мг/м³ – 1,8; менее 1 мг/м³ – 1,3–1,5.

6) Если после расчета получения минимальная освещенность $E = E_{\min}$ больше или равна нормируемой освещенности $E_{\text{норм}}$ (СНИП 23-05.95) для данного типа помещения, то расчет проведен правильно. Если же $E_{\text{норм}} > E_{\min}$, необходимо произвести расчет по формулам (20.1) и (20.2), изменив либо размещение и тип светильников, либо мощность ламп и их количество, либо то и другое. Таким образом методом подбора параметров светотехнической установки (мощность ламп, количество ламп, размещением светильников и т. п.) добиваются выполнения неравенства:

$$E_{\text{норм}} < E_{\min}.$$

7) При выбранной освещенности для данного типа помещения можно расчет вести и по другой методике. Из формулы (20.1) или (20.2) определяют необходимое величество светильников N для создания нормативной освещенности E_{\min} в помещении.

При использовании ламп накаливания число светильников равно:

$$N = (E \cdot S k \cdot Z) / (F_{\text{л}} \cdot \eta). \quad (20.4)$$

При использовании люминесцентных ламп:

$$N = (E_{\min} \cdot S k \cdot Z) / (F_{\text{л}} \cdot \eta \cdot n), \quad (20.5)$$

где E_{\min} , S , k , $F_{\text{л}}$, η , Z , n – то же, что и в формулах (20.1) и (20.2).

8) После определения числа светильников N составляют схему их размещения симметрично по потолку помещения. Затем определяют общую электрическую мощность установки для создания общего минимального освещения E_{\min} в помещении.

Для ламп накаливания:

$$W = W_{\text{л}} \cdot N. \quad (20.6)$$

Для люминесцентных ламп:

$$W = W_{\text{л}} \cdot N \cdot n, \quad (20.7)$$

где W – общая электрическая мощность установки, Вт; $W_{\text{л}}$ – электрическая мощность одной выбранной лампы, Вт; N – количество светильников, шт.; n – количество ламп в светильнике, шт.

20.9.2. Проектирование защитного заземления и защитного зануления

Для защиты людей от поражения электрическим током при случайном соприкосновении с нетоковедущими металлическими частями электрооборудования, оказавшимися под напряжением вследствие замыкания на корпус или по другим причинам (индуктивное влияние соседних токоведущих частей, вынос потенциалов, разряд молнии, наведение статического электричества и др.), применяются защитное заземление (в сетях с изолированной нейтралью трансформатора) и защитное зануление (в сетях с глухозаземленной нейтралью трансформатора).

Защитное заземление – преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей электрооборудования с целью снижения потенциала прикосновения и отведения тока замыкания в землю по линии наименьшего сопротивления.

Защитное зануление – преднамеренное электрическое соединение с нулевым проводом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением, в случае пробоя электрической изоляции. Оно применяется с целью превратить замыкания на корпус в однофазное короткое замыкание между фазным и нулевым защитным проводником, вызвать большой ток в цепи «фаза–ноль», способный обеспечить срабатывание защиты и тем самым отключить поврежденную электроустановку от сети. Область применения – трехфазные четырехпроводные сети напряжением до 1000 В с заземленной нейтралью. Защитное зануление также применяется в однофазных сетях переменного тока с заземленным нулевым проводом. В таких сетях, так же как и с изолированной нейтралью, требуется проектировать и выполнять заземляющие устройства для заземления нейтрали трансформатора и повторных заземлителей нулевого провода.

Студент-дипломник должен научиться проектировать и рассчитывать заземляющие устройства различного назначения.

Прежде всего, исходя из типа сети (с глухозаземленной или изолированной нейтралью) и характеристики сети (напряжение до 1 кВ или выше), необходимо определиться, какой вид защиты надо применять (защитное заземление или защитное зануление) и какие требования предъявляются к заземляющим устройствам. После чего выбираются материал заземлителей, тип заземления и схема расположения заземлителей в грунте. Производится расчет заземляющего устройства, определяется необходимое количество электродов



выбранного типа и размеров при принятой схеме и глубине их заложения в грунте.

В заземляющее устройство входят заземлитель (металлический проводник или группа проводников, находящихся в непосредственном соприкосновении с грунтом) и заземляющие проводники, соединяющие заземляемые части электроустановки с заземлителем.

В зависимости от расположения заземлителей по отношению к заземляемому оборудованию заземления бывают выносные и контурные. Заземлители выносных заземлений располагают сосредоточенно на расстоянии свыше 20 м от заземляемого оборудования, т. е. вне зоны растекания тока замыкания на землю. Заземлители контурного заземления располагают по периметру и внутри площадки, на которой установлено заземляемое оборудование. Все эти заземлители электрически соединены друг с другом.

Различают заземлители *искусственные*, предназначенные исключительно для целей заземления, и *естественные* – находящиеся в земле металлические предметы иного назначения.

Для искусственных заземлителей применяются обычно вертикальные и горизонтальные электроды.

Наименьшие размеры заземлителей и заземляющих проводников, проложенных в земле, приведены в табл. 20.9.

В качестве естественных заземлителей могут использоваться: проложенные в земле водопроводные и другие металлические трубопроводы, за исключением трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывоопасных газов, а также трубопроводов, покрытых изоляцией для защиты от коррозии; обсадные трубы артезианских колодцев, скважин, шурфов и т. п.; металлические конструкции и арматура железобетонных конструкций зданий и сооружений, имеющие соединение с землей; свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле.

Естественные заземлители обладают, как правило, малым сопротивлением растеканию тока, и поэтому использование их для целей заземления дает весьма ощутимую экономию.

Естественные заземлители могут использоваться без искусственных, если они обеспечивают требуемое Правилами сопротивление растеканию тока.

Устройство заземлений в плохо проводящих грунтах встречает серьезные трудности по условиям обеспечения определенного сопротивления растеканию тока R_3 . Поэтому Правила устройства электроустановок допускают для таких установок повышенное значение R_3 вплоть до десятикратного установленного сопротивления. Тем не менее часто приходится прибегать к специальным мерам по снижению R_3 и, в частности, применять глубинные заземлители, производить специальную обработку почвы, делать заземления выносными и т. п.

Таблица 20.9

**Наименьшие размеры заземлителей и заземляющих проводников,
проложенных в земле**

Материал	Профиль сечения	Диаметр, мм	Площадь попереч- ного сече- ния, мм ²	Толщина стенки, мм
Сталь черная	Круглый:			
	для вертикальных заземлителей	16	–	–
	для горизонтальных заземлителей	10	–	–
	Прямоугольный	–	100	4
	Угловой	–	100	4
	Трубный	32	–	3,5
Сталь оцинко- ванная	Круглый:			
	для вертикальных заземлителей	12	–	–
	для горизонтальных заземлителей	10	–	–
	Прямоугольный	–	75	3
	Трубный	25	–	2
Медь	Круглый	12	–	–
	Прямоугольный	–	50	2
	Трубный	20	–	2
	Канат многопроволочный	1,8*	35	

* Диаметр каждой проволоки.

Глубинные заземлители – стальные стержни длиной 10–12 м позволяют в ряде случаев достигнуть слоев грунта с хорошей проводимостью. Они успешно применяются в частности в песчаных грунтах.

Обработка почвы производится обычно вокруг электродов, поскольку, как известно, основное сопротивление току оказывают ближайшие к электроду слои грунта.

Материалами для обработки служат поваренная соль, предварительно растворенная в воде, шлак, смоченный водой, раствор глины. Эти вещества значительно снижают сопротивление грунта растеканию тока, в особенности соль. Так, при добавлении 0,1% поваренной соли к весу влаги, содержащейся в суглинке, удельное сопротивление снижается на 60–80%.

Прокладка заземляющих проводников производится открыто по конструкциям зданий, в том числе по стенам на специальных опорах. Заземляющие проводники в помещениях должны быть доступны для осмотра. Присоединение заземляемого оборудования к магистрали заземления осуществляется с помощью отдельных проводников. При этом последовательное включение заземляемого оборудования не допускается.

Соединения заземляющих проводников между собой, а также с заземлителями и заземляемыми конструкциями выполняются, как правило, сваркой, а с корпусами аппаратов, машин и другого оборудования – сваркой или с помощью болтов. При этом присоединение заземляющей магистрали к заземлителю – искусственному или естественному – выполняется в двух местах.

Отличительной окраской заземляющей сети является черный цвет, которым должны быть окрашены все открыто расположенные заземляющие проводники, конструкции и полосы сети заземления. При необходимости допускаются и другие цвета окраски.

Расчет заземлителя имеет целью определить основные параметры заземления – число, размеры и схему размещения одиночных заземлителей и заземляющих проводников, при которых напряжения прикосновения и шага в период замыкания фазы на заземленный корпус не превышают допустимых значений.

Заземляющее устройство электроустановок напряжением выше 1 кВ в сетях с эффективно заземленной нейтралью, которое выполняется с соблюдением требований к его сопротивлению, должно иметь в любое время года сопротивление не более 0,5 Ом с учетом сопротивления естественных и искусственных заземлителей.

В электроустановках напряжением выше 1 кВ сети с изолированной нейтралью сопротивление заземляющего устройства при прохождении расчетного тока замыкания на землю в любое время года с учетом сопротивления естественных заземлителей должно быть

$$R \leq 250/I,$$

но не более 10 Ом, где I – расчетный ток замыкания на землю, А.

Расчетный ток замыкания на землю должен быть определен для той из возможных в эксплуатации схем сети, при которой этот ток имеет наибольшее значение.

Сопротивление заземляющего устройства электроустановок напряжением до 1 кВ, к которому присоединены нейтрали генератора или трансформатора или выводы источника однофазного тока, в любое время года должно быть не более 2, 4 и 8 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В источника трехфазного тока или 380, 220 и 127 В источника однофазного тока.

При удельном сопротивлении земли $\rho > 100$ Ом·м допускается увеличивать указанные нормы в 0,01 раз, но не более десятикратного.

Общее сопротивление растеканию заземлителей (в том числе естественных) всех повторных заземлений PEN-проводника каждой ВЛ в любое время года должно быть не более 5, 10 и 20 Ом соответственно при линейных напряжениях 660, 380 и 220 В источника трехфазного тока или 380, 220 и 127 В источника однофазного тока. При этом сопротивление растеканию заземлителя каждого из повторных заземлений должно быть не более 15, 30 и 60 Ом соответственно при тех же напряжениях.

Сопротивление заземляющего устройства, используемого для защитного заземления открытых проводящих частей, электроустановок напряжением до 1 кВ в сетях с изолированной нейтралью должно соответствовать условию:

$$R \leq U_{\text{пр}}/I,$$

где R – сопротивление заземляющего устройства, Ом; $U_{\text{пр}}$ – напряжение прикосновения, значение которого принимается равным 50 В; I – полный ток замыкания на землю, А.

Как правило, не требуется принимать значение сопротивления заземляющего устройства менее 4 Ом. Допускается сопротивление заземляющего устройства до 10 Ом, если соблюдено приведенное выше условие, а мощность генераторов или трансформаторов не превышает 100 кВ·А, в том числе суммарная мощность генераторов или трансформаторов, работающих параллельно.

Расчет заземляющего устройства производится в следующей последовательности:

1. Определяется допустимое сопротивление заземляющего устройства $R_{\text{доп}}$.
2. Определяется расчетное удельное сопротивление грунта, в котором предполагается размещать электроды. Удельное сопротивление грунта ρ растеканию тока следует определять путем измерений на месте или пользоваться приближенными значениями из табл. 20.10.

Таблица 20.10

Грунт	Удельное сопротивление ρ , Ом · м	
	Средняя величина	Пределы колебаний
Песок	700*	400–700
Супесок	300*	150–400
Суглинок	100*	40–150
Глина	40*	8–70
Чернозем	200*	9,6–53
Вода пресная	10*	10–80
Садовая земля	50*	
Торф	20*	
Вода морская	–	0,2–1
Скала, гравий	–	2000–4000

* При влажности грунта 10–12%.

К расчету принимается удельное сопротивление грунта с учетом климатического коэффициента ψ (табл. 20.11), учитывающего увеличение удельного сопротивления грунта в период наибольшего просыхания или промерзания почвы

$$\rho'_{\text{расч.}} = \rho \cdot \psi.$$

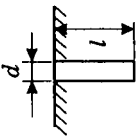
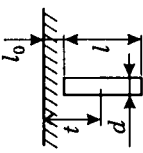
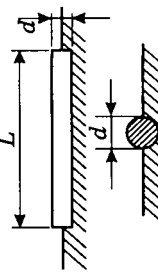
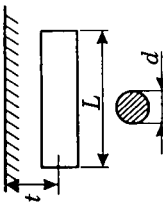
Таблица 20.11

Грунт	ψ_1	ψ_2	ψ_3
Суглинок	2,0	1,5	1,4
Садовая земля до глубины 0,6 м, ниже слой глины	1,7	1,32	1,2
Гравий с примесью глины, ниже глина	1,3	1,2	1,1
Известняк	2,5	1,51	1,2
Гравий с примесью песка	1,5	1,3	1,2
Торф	1,4	1,1	1,0
Песок	2,4	1,56	1,2
Глина	2,4	1,36	1,2

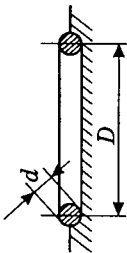
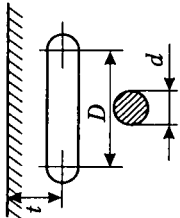
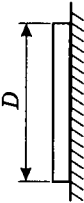
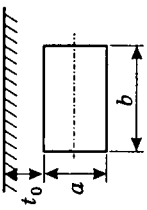
Примечание. Расчетные сопротивления грунта определяются по значениям: ψ_1 – если измерения сопротивления грунта производили при большой влажности грунта; ψ_2 – при средней влажности; ψ_3 – при сухом грунте.

3. Выбираются тип и размеры заземлителей и схема их расположения в грунте (вертикальные электроды, расположенные в ряд или по контуру, соединительные полосы или протяжные заземлители, глубина их заложения и пр.).
4. Определяется сопротивление растекания тока с одного заземлителя по соответствующей формуле из табл. 20.12.

Таблица 20.12

Тип заземлителя	Схема	Формула	Условия применения
Стержневой круглого сечения (трубчатый) или уголкового у поверхности земли		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln(4l/d) \quad (1)$	$l \gg d$; для уголка с шириной полки b $d = 0,95b$
То же в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right) \quad (2)$ $t = t_0 + l/2$	$l \gg d$; $t_0 \geq 0,5 \text{ м}$; для уголка с шириной полки b $d = 0,95b$
Протяженный на поверхности земли (стержень, труба, полоса, кабель и т. п.)		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln(2L/d) \quad (3)$	$L \gg d$; для полосы шириной b $d = 0,5b$
То же в земле		$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln(L^2/d) \quad (4)$	$L \gg d$; $L \gg 4t$; для полосы шириной b $d = 0,5b$

Окончание табл. 20.12

Тип заземлителя	Схема	Формула	Условия применения
Кольцевой на поверхности земли		$R = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln(8D/d) \quad (5)$	$D \gg d;$ для полосы шириной b $d = 0,5b$
То же в земле		$R = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln(4\pi D^2/dt) \quad (6)$	$D \gg d; D \gg 2t;$ для полосы шириной b $d = 0,5b$
Круглая пластина на поверхности земли		$R = \rho/2D \quad (7)$	-
Пластинчатый в земле (пластина поставлена на ребра)		$R = \frac{\rho}{2\pi a} \left(\ln \frac{4a}{b} + \frac{a}{4t_0} \right) \quad (8)$	$2t_0 \geq a$

5. Определяется предварительно необходимое количество вертикальных заземлителей n без учета проводимости соединительной полосы по формуле

$$n = R/\eta_{\text{эт}} \cdot R_{\text{доп}},$$

где $\eta_{\text{эт}}$ – коэффициент использования труб, учитывающий их экранирующие взаимодействия, определяется из табл. 20.13 по более близкому произведению $n \cdot \eta_{\text{эт}} = R/R_{\text{доп}}$ для соответствующих отношений расстояний между трубами к их длине a/l .

Таблица 20.13

Коэффициент использования вертикальных заземлителей

Отношение расстояния между электродами к их длине, a/l	Число труб, n , расположенных в ряд	Коэффициент экранирования труб, $\eta_{\text{эт}}$	Отношение расстояния между электродами к их длине, a/l	Число труб, n , расположенных в ряд	Коэффициент экранирования труб, $\eta_{\text{эт}}$
1	2	0,84–0,87	1	4	0,66–0,72
2	2	0,90–0,92	2	4	0,76–0,80
3	2	0,93–0,95	3	4	0,84–0,86
1	3	0,76–0,80	1	6	0,58–0,65
2	3	0,85–0,88	2	6	0,71–0,75
3	3	0,90–0,92	3	6	0,78–0,82
1	5	0,67–0,72	1	10	0,52–0,58
2	5	0,79–0,88	2	10	0,66–0,71
3	5	0,85–0,88	3	10	0,74–0,78
1	10	0,56–0,62	1	20	0,44–0,50
2	10	0,71–0,77	2	20	0,61–0,66
3	10	0,79–0,83	3	20	0,68–0,78
1	15	0,51–0,56	1	40	0,33–0,44
2	15	0,76–0,80	2	40	0,64–0,63
3	15	0,66–0,78	3	40	0,55–0,61
1	20	0,47–0,50	1	60	0,36–0,42
2	20	0,65–0,70	2	60	0,52–0,58
3	20	0,74–0,79	3	60	0,62–0,67

Округлив число одиночных заземлителей до целого, определяют сопротивление ЗУ без учета проводимости соединительной полосы

$$R_3 = R/n \cdot \eta_{\text{эт}}.$$

Однако одиночные заземлители обычно объединяются посредством соединительной полосы, которая, особенно если находится в грунте, влияет на общую проводимость ЗУ. Поэтому в целях учета проводимости соединительной полосы производят расчет ее сопротивления R_n растеканию тока по формулам, приведенным в табл. 20.12.

Длину полосы l_n рассчитывают по следующим формулам:

$$l_n = 1,05 \cdot n \cdot a \text{ — при расположении заземлителей по контуру;}$$

$l_n = 1,05 \cdot (n-1) \cdot a$ — при расположении заземлителей в ряд, где a — расстояние между трубами, м; n — число труб.

Общее сопротивление искусственного заземления с учетом проводимости соединительной полосы определяют по формуле

$$R_3 = \frac{R \cdot R_n}{R \cdot \eta_{\text{сп}} + R_n \cdot n \cdot \eta_{\text{от}}},$$

где $\eta_{\text{сп}}$ — коэффициент использования полосы связи (табл. 20.14).

Полученное сопротивление растеканию тока искусственного заземления не должно превышать допустимого, т. е. $R_3 < R_{\text{доп}}$.

Таблица 20.14

Коэффициент использования полосы связи, $\eta_{\text{сп}}$

Отношение расстояния между трубами к длине труб a/l	Число труб						
	4	6	8	1,0	20	30	40
При расположении труб по контуру							
1	0,45	0,40	0,36	0,34	0,27	0,24	0,21
2	0,55	0,48	0,43	0,40	0,32	0,30	0,28
3	0,70	0,64	0,60	0,56	0,45	0,41	0,37
При расположении труб в ряд							
1	0,77	0,70	0,67	0,62	0,42	0,31	0,21
2	0,85	0,84	0,79	0,75	0,56	0,46	0,36
3	0,92	0,89	0,85	0,82	0,68	0,58	0,49

При использовании естественных заземлителей, сопротивление которых выше допустимого, необходимо дополнительно устанавливать искусственные. При этом требуемое сопротивление искусственного заземления можно определить по формуле

$$R_{\text{и.гр}} = R_e \cdot R_3 / (R_e - R_3).$$

Сопротивление естественных заземлителей можно определить по формулам, приведенным в табл. 20.12 для искусственных заземлителей.

Расчет защитного зануления

Расчет производится на отключающую способность защитного зануления.

При замыкании фазы на зануленный корпус электроустановка автоматически отключается, если значение тока однофазного короткого замыкания удовлетворяет условию:

$$I_{кз0} > kI_{ном},$$

где $I_{ном}$ – номинальный ток плавкой вставки предохранителя или ток срабатывания автоматического выключателя, А; k – коэффициент кратности тока, определяется по табл. 20.15.

Таблица 20.15

Значение коэффициента k

№ п/п	Тип защиты электроустановки	k
1	Автоматический выключатель, имеющий только электромагнитный расцепитель, т. е. который срабатывает без выдержки времени	1,25–1,4
2	Плавкий предохранитель	> 3
3	Плавкий предохранитель (во взрывоопасных помещениях)	> 4
4	Автоматический выключатель с обратно зависимой от тока характеристикой (как предохранитель)	> 3
5	Автоматический выключатель с обратно зависимой от тока характеристикой (во взрывоопасных помещениях)	> 6

Номинальный ток плавкой вставки $I_{ном} = I_{пл.вст}^B$ должен соответствовать условию

$$I_{пл.вст}^B < I_{ном} = I_{ном.тр},$$

где $I_{ном.тр}$ – номинальный ток трансформатора, определяемый по формуле

$$I_{ном.тр} = \frac{P_{ном}}{3U_{\phi}},$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА; U_{ϕ} – фазное напряжение, В.

Значение тока короткого замыкания $I_{кз}$ зависит от U_{ϕ} и сопротивления цепи и определяется по формуле



$$k \cdot I_{\text{ном}} = U_{\text{ф}} / \left(Z_{\gamma} / 3 + \sqrt{(R_{\text{ф}} + R_{\text{н.п.}})^2 + (X_{\text{ф}} + X_{\text{н.п.}} + X_{\text{п}})^2} \right),$$

где $R_{\text{ф}}$, $R_{\text{н.п.}}$ – активное сопротивление фазного и нулевого защитного проводников соответственно, Ом; $X_{\text{ф}}$ и $X_{\text{н.п.}}$ – внутренние индуктивные сопротивления фазного и нулевого проводников, соответственно, Ом; $X_{\text{п}}$ – внешнее индуктивное сопротивление петли фаза-нуль, Ом; Z_{γ} – приближенные полные сопротивления масляных трансформаторов, Ом.

Сечение нулевого защитного проводника и его материал принимаются заранее из условия: $Z_{\text{н.п.}} < 2Z_{\text{ф}}$.

Это условие установлено ПУЭ в предположении, что будет выполняться условие $I_{\text{кз}} > k \cdot I_{\text{ном}}$.

В качестве нулевых защитных проводников ПУЭ рекомендуют применять голые или изолированные проводники, металлические конструкции зданий, сооружений, трубы электропроводок, трубопроводы.

Таким образом, расчет зануления на отключающую способность является поверочным расчетом достаточности проводимости петли фаза-нуль.

20.9.3. Определение устойчивости работы электронной аппаратуры под воздействием электромагнитного импульса (ЭМИ)

Устойчивость работы электронной аппаратуры без сбоев зависит от типа электроники и величины ЭМИ.

Максимальная энергия ЭМИ, не вызывающая функциональные повреждения элементов электронной аппаратуры и сбои в работе электронных схем, приведена ниже:

№ п/п	Наименование	Энергия, Дж
1	Маломощные германиевые транзисторы	$5 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-3}$
2	Мощные германиевые транзисторы	10^{-3}
3	Низкочастотные германиевые транзисторы	$4 \cdot 10^{-2}$
4	Интегральные схемы	$10^{-5} \dots 10^{-3}$
5	Туннельные диоды	$5 \cdot 10^{-4}$
6	Высокочастотные кремниевые диоды	10^{-7}

Окончание табл.

№ п/п	Наименование	Энергия, Дж
7	Тиристоры	$10^{-3} \dots 10^{-2}$
8	Переключающие диоды	$7 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-4}$
9	Выпрямительные диоды	$5 \cdot 10^{-4}$
10	Точечные диоды	$(0,7 \dots 12) \cdot 10^{-6}$
11	Германиевые варисторы	10^{-4}
12	Электронные лампы	$10^{-2} \dots 1$
13	Малоточные реле	$2 \cdot 10^{-3}$
14	Углеродистые резисторы 0,25 Вт	10^{-2}
15	Танталовые конденсаторы	$5 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-3}$
16	Металлопленочные конденсаторы	10^{-3}
17	Микроамперметры	$3 \cdot 10^{-3}$
18	Платы с логическими элементами ТТЛ	$3 \cdot 10^{-9}$
19	Интегральные аналоговые схемы	$4 \cdot 10^{-10}$
20	Устройства оперативной памяти на магнитных сердечниках	$(2 \dots 5) \cdot 10^{-9}$
21	Усилители постоянного тока	$4 \cdot 10^{-12}$
22	Конденсаторы керамические	$10^{-9} \dots 10^{-6}$

Расчет толщины защитных электромагнитных экранов на заданное ослабление электромагнитного импульса δ (м)

$$\delta = \frac{|L|}{15,4 \sqrt{f \cdot \mu_a \cdot \sigma}},$$

где L – заданное ослабление электромагнитного импульса, дБ; f – частота электромагнитного импульса, Гц; σ – удельная проводимость материала экрана, См/м; μ_a – магнитная проницаемость экрана, Гн/м,

$$\mu_a = \mu \cdot \mu_r,$$

где μ_r – относительная проницаемость экрана.

Электрические и магнитные характеристики некоторых металлов даны в табл. 20.16:

Таблица 20.16

Металл	Удельная проницаемость σ , См/м	Относительная магнитная проницаемость, μ_r
Медь	$5,7 \cdot 10^7$	1
Латунь	$1,7 \cdot 10^7$	1
Алюминий	$3,3 \cdot 10^7$	1
Сталь	10^7	100
Сталь	10^7	200
Пермаллой	$1,5 \cdot 10^6$	12 000

20.9.4. Определение экономического предотвращенного ущерба при внедрении мероприятий на улучшение условий труда

Экономический предотвращенный ущерб от внедрения мероприятий по улучшению условий труда определяется на основании межотраслевых методических указаний «Определение эффективности мероприятий по улучшению условий труда».

Для оптимизации решения проблемы охраны труда на производстве необходимо учитывать соотношение между ущербом в области охраны труда, затратами на охрану труда и экономическим эффектом от реализации средств на охрану труда.

Годовой экономический предотвращенный ущерб при внедрении мероприятий по улучшению условий труда определяется по формуле

$$Y_{\text{пр}} = Y_1 - Y_2 + Y_{\text{пт}},$$

где Y_1 и Y_2 – общий годовой экономический ущерб предприятия, связанный с неудовлетворительными условиями труда, до и после внедрения мероприятий, руб.; $Y_{\text{пт}}$ – годовой экономический предотвращенный ущерб от повышения производительности труда, руб.

Годовой ущерб, связанный с неудовлетворительными условиями труда, определяется по выражению

$$Y = Y_{\text{инв}} + Y_{\text{тек}} + Y_{\text{ком}} + Y_6 + Y_{\text{нс}},$$

где $Y_{\text{инв}}$ – ущерб от инвалидности, руб., $Y_{\text{тек}}$ – ущерб от текучести кадров, руб.; $Y_{\text{ком}}$ – ущерб от компенсаций, руб.; Y_6 – ущерб от заболеваемости, руб.; $Y_{\text{нс}}$ – ущерб от травматизма, руб.

В свою очередь

$$Y_{инв} = (h \cdot \Phi + S + W + z) \cdot N_{инв},$$

где h – среднегодовая выработка одного работника в день, руб.; Φ – годовой фонд рабочего времени, дни; S – среднегодовые расходы на подготовку одного работника взамен вышедшего из производства, руб.; W – среднегодовой размер пенсии инвалидам труда, руб.; z – среднегодовой размер прочих доплат и затрат в связи со стойкой нетрудоспособностью, руб.; $N_{инв}$ – количество инвалидов труда на предприятии, чел.

$$Y_{тек} = S \cdot N_{ув} \cdot \alpha,$$

где $N_{ув}$ – число уволившихся, чел.; α – коэффициент, учитывающий долю уволившихся по причине неудовлетворительных условий труда (при отсутствии данных на предприятии принимается среднестатистическое значение $\alpha = 0,2$).

$$Y_{ком} = N_{ком} \cdot Z_{доп} + Y_{доп},$$

где $N_{ком}$ – количество работающих в тяжелых и вредных условиях труда, чел.; $Z_{доп}$ – доплата к тарифной ставке за тяжелые и вредные условия труда одного рабочего в год, руб.; $Y_{доп}$ – дополнительные годовые выплаты, связанные с тяжелыми и вредными условиями труда (затраты на лечебно-профилактическое питание, индивидуальные средства защиты и т. п. в расчете на 1 рабочего в год), руб.

$$Y_6 = D_6 \cdot (h + \text{БП}),$$

где D_6 – годовые потери рабочего времени из-за заболеваний, чел.-дни; h – выработка одного работника в день, руб.; БП – среднедневной размер больничных пособий (в расчете можно принять равным среднегодовой заработной плате одного рабочего в день), руб.

$$Y_{нс} = Y_{нс}^1 + Y_{нс}^2 + Y_{нс}^3,$$

где $Y_{нс}^1$ – потери от производственных несчастных случаев, руб.;

$Y_{нс}^2$ – потери от несчастных случаев, связанных с работой, руб.;

$Y_{нс}^3$ – потери от бытовых несчастных случаев, руб.

$$Y_{нс}^1 = D_{нс}^1 \cdot (h + Z),$$

где $D_{нс}^1$ – потери от несчастных случаев, связанных с производством, чел.-дни.

$$Y_{нс}^2 = D_{нс}^2 \cdot (h + Z),$$

где $D_{нс}^2$ – потери от несчастных случаев, связанных с работой, чел.-дни.

$$Y_{\text{нс}}^3 = (D_{\text{нс}}^1 - 5 \cdot N_3) \cdot (h + 3) + 5 \cdot N_3 \cdot h,$$

где $D_{\text{нс}}^1$ – потери от бытовых несчастных случаев, чел.-дни.; N_3 – количество бытовых несчастных случаев.

$$Y_{\text{пт}} = h \cdot \frac{\Delta\Pi}{100} \cdot N \cdot \Phi,$$

где $\Delta\Pi$ – возможный прирост производительности труда при улучшении условий труда.

Если в результате улучшения условий труда возможно изменение индивидуальной производительности труда, то $\Delta\Pi$ определяется по формуле:

$$\Delta\Pi = \left(\frac{K_2}{K_1} - 1 \right) \cdot 100 \cdot k,$$

где K_1, K_2 – показатели работоспособности до и после улучшения условий труда, относительные единицы; k – коэффициент, учитывающий возможный прирост производительности труда в результате увеличения работоспособности.

Среднее значение коэффициента k , полученного эмпирическим путем на основании фактических данных НИИ труда, составляет 0,2. Он может быть скорректирован с учетом специфики производства.

Прирост производительности труда за счет экономии фонда рабочего времени можно определить по формуле

$$\Delta\Pi = \frac{\Theta_{\text{ч}} \cdot 100}{N - \Theta_{\text{ч}}},$$

где $\Theta_{\text{ч}}$ – условная экономия численности рабочих, чел.

Условная экономия численности работающих за счет увеличения фонда рабочего времени в связи с сокращением целодневных потерь по временной нетрудоспособности в результате улучшения условий работы труда определяется по формуле

$$\Theta_{\text{ч}} = \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_1} - 1 \right) \cdot N,$$

где Φ_1, Φ_2 – эффективный фонд рабочего времени в среднем на одного работающего до и после внедрения мероприятий по улучшению условий труда, определяемый следующим образом:

$$\Phi_1 = \Phi - \frac{D_{1\Sigma}}{N} \quad \text{и} \quad \Phi_2 = \Phi - \frac{D_{2\Sigma}}{N},$$

где $D_{1\Sigma}, D_{2\Sigma}$ – условные потери фонда рабочего времени до и после улучшения условий труда, чел.-дни:

$$D_{\Sigma} = D_6 + D_{\text{нс}}^1 + D_{\text{нс}}^2 + D_{\text{нс}}^3.$$

Пример расчетного задания. При улучшении условий труда ожидается уменьшение целодневных потерь от заболеваний на 25% и от травматизма, связанного с производством, на 30%. Определить экономический предотвращенный ущерб от внедрения мероприятий по улучшению условий труда. Необходимые исходные данные для расчета представлены в табл. 20.17.

Таблица 20.17

Сводная таблица для определения годового экономического ущерба, связанного с неудовлетворительными условиями труда

№ п/п	Наименование показателя	Размерность	Обозначение	Значения
1	Численность рабочих	чел.	N	1128
2	Число уволившихся	чел.	$N_{\text{ув}}$	254
3	Потери из-за болезни	чел.-дни	D_6	5453
4	Потери из-за НС, связанных с производством	чел.-дни	$D_{\text{нс}}^1$	388
5	Потери из-за НС, связанных с работой	чел.-дни	$D_{\text{нс}}^2$	390
6	Потери из-за бытовых НС	чел.-дни	$D_{\text{нс}}^3$	695
7	Выработка одного рабочего в год	руб.	H	211 806
8	Выработка одного рабочего в день	руб.	h	671
9	Годовой фонд рабочего времени	дни	Φ	251
10	Зарботная плата одного рабочего в год	руб.	A	96 000
11	Зарботная плата одного рабочего в день	руб.	$з$	312,7
12	Среднегодовые расходы на подготовку одного работника	руб.	S	15 000
13	Коэффициент, учитывающей долю уволившихся по причине неудовлетворительных условий труда		α	0,2
14	Размер компенсаций, связанных с лечебно-профилактическим питанием и средствами индивидуальной защиты	руб.	$У_{\text{ком}}$	105 000
15	Число бытовых несчастных случаев	чел.	N_3	28

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок (Минтопэнерго РФ). 7-е изд. Ростов, 2002. – 146 с.
2. Гигиенические критерии оценки и классификация условий труда по показателям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса. Руководство Р.2.2.755-99. – М., 1999.
3. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий: Санитарные нормы. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 30 с.
4. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение: Строительные нормы и правила. – М.: Минстрой России, 1995. – 35 с.
5. СНиП 2.04.05-91. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: Строительные нормы и правила. – М.: Стройиздат, 1991.
6. СНиП II-12-77. Нормы проектирования. Защита от шума: Строительные нормы и правила. – М.: Стройиздат, 1977.
7. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений: Санитарные правила и нормы. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 20 с.
8. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях: Санитарные нормы и правила. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2003. – 32 с.
9. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200.03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов.
10. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов.
11. НПБ 105-95. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности.
12. СНиП 21-01-97*. Пожарная безопасность зданий и сооружений.
13. НПБ-101-95. Нормы проектирования объектов пожарной безопасности.
14. НПБ 88-2001. Установки пожаротушения и сигнализации. Нормы и правила проектирования.
15. ГОСТ 12.1.002-84 (1999). ССБТ. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах.
16. ГОСТ 12.1.006-84 (1999). ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.

17. ГОСТ 12.1.018-93. ССБТ. Пожаровзрывобезопасность статического электричества. Общие требования.
18. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях.
19. ГОСТ 12.2.032-78 (2001). ССБТ. Общие эргономические требования к рабочему месту при выполнении работ сидя.
20. ГОСТ 12.2.033-78 (2001). ССБТ. Общие эргономические требования к рабочему месту при выполнении работ стоя.
21. *Кнорринг Г. Н.* Светотехнические расчеты в установках искусственного освещения. – Л.: Энергия, 1973.
22. *Фролов А. В., Резник Л. А., Чибинев Н. Н.* Методическое пособие к выполнению дипломных проектов и выпускных квалификационных работ по специальности «Безопасность технологических процессов и производств» / Юж.-рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2004. – 89 с.
23. *Фролов А. В., Чибинев Н. Н.* Пожарная безопасность на производстве: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А. В. Фролова; Юж.-рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: УПЦ «Набла» ЮРГТУ (НПИ), 2003. – 152 с.
24. *Фролов А. В., Бакаева Т. Н.* Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда: Учеб. пособие для вузов / Под общ. ред. А. В. Фролова. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 730 с.
25. *Фролов А. В.* Методические указания по разработке вопросов охраны труда и окружающей среды в дипломных проектах студентов геологических специальностей. – Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1998. – 36 с.
26. *Иванов Е. Н.* Автоматическая пожарная защита. – М.: Стройиздат, 1980.
27. *Комкин А. И.* Вибрация. Воздействие, нормирование, защита (школа БЖД) // Приложение к журналу «Безопасность жизнедеятельности». 2004. № 5.
28. *Кошарский Б. Д.* Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины. – М.: Машиностроение, 1980. – 242 с.
29. *Белов С. В., Козьяков А. Ф.* Средства защиты в машиностроении. Расчет и проектирование. – М.: Машиностроение, 1989. – 320 с.
30. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха: Справ. проектировщика. – М.: Стройиздат, 1992. – 311 с.
31. *Пахомова Н. В., Рихтер К. К.* Экономика природопользования и охраны окружающей среды: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбУ, 2001. – 224 с.
32. *Гикитин Л. И., Цуканова М. А., Лычагин Н. В.* Расчет материальных потерь от травматизма и заболеваний: Метод. указания. – М.: МГУЛ, 2000. – 16 с.

33. Денисов А. Оценка экономической эффективности мероприятий по улучшению условий охраны труда // Охрана труда и социальное страхование. 2001. № 3.
34. Величко К. Ф., Есаян И. Г., Лаптев В. О., Шелухин А. Д. Оценка устойчивости объектов и систем народного хозяйства / Под ред. К. Ф. Величко. – М.: МИФИ, 1984. – 84 с.
35. Рикетс Л.У., Бриджес Д.Э., Майлетта Д. Электромагнитный импульс и методы защиты / Пер. с англ. Под ред. Н. А. Ухина. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с.
36. Инженерные расчеты систем безопасности труда и промышленной экологии / Под общ. ред. проф. А. Ф. Борисова. – Нижний Новгород: Вента-2, 2000. – 256 с.
37. Шупляк Н. Г. Методические указания по разработке вопросов гражданской обороны в дипломных проектах студентов факультетов электромеханического, системотехники и робототехники. – Новочеркасск: Изд-во НПИ, 1986. – 28 с.

21

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

21.1. Общие требования к разработке экономической части дипломного проекта

Экономическая часть дипломного проекта студента любой специальности является важнейшей составной частью технического проекта, причем актуальность ее в последние годы резко возросла.

В условиях рыночной экономики успех как проектной организации, так и коммерческого предприятия определяется конкурентоспособностью, т. е. способностью не только спроектировать и произвести, но и реализовать продукцию. Поэтому создаваемая техника по своим эксплуатационным параметрам должна быть на уровне мировых стандартов или превышать их, быть экономичной в производстве и удовлетворять социальным требованиям.

Студент-дипломник, выполняя дипломный проект, должен его обосновать, доказать, что спроектированное им устройство, систему и т. п. целесообразно проектировать, производить, эксплуатировать, что можно добиться успеха на рынке и получить планируемые доходы, прежде всего прибыль. В соответствии с этим организационно-экономическая часть дипломного проекта (ОЭЧП) должна содержать: обоснование темы проекта (во введении ко всему проекту); экономическое обоснование частных решений (в технических главах); собственно экономическую главу, название которой должно отражать содержание пунктов, включенных в данную главу. Общий объем ОЭЧП обычно не превышает 15% объема пояснительной записки. Кроме текстовой части пояснительной записки с экономическими анализом, расчетами и т. п. целесообразно на демонстрационных листах представить либо сетевой (или ленточный) план-график НИОКР по созданию системы, устройства; либо таблицу технико-экономических показателей спроектированного устройства в сравнении с лучшими из существующих (карту технического уровня); либо графические зависимости экономических показателей от изменения качественных параметров микропроцессорной системы, устройства и т. п.

Конкретное содержание ОЭЧП определяется консультантом – преподавателем экономики – после возвращения студента с преддиплом-

ной практики. Условием выдачи задания по ОЭЧП являются утвержденная на выпускающей кафедре тема проекта и наличие согласованного с руководителем проекта плана спецчасти.

Заметим, что изложенное далее может быть использовано студентами различных специальностей, поскольку многие расчеты универсальны и отвечают современным требованиям.

21.2. Содержание экономической части проекта

В большинстве случаев в этой главе даются общая оценка конечных результатов проекта, его технико-экономическое обоснование, однако содержание главы определяется консультантом в зависимости от специфики проекта. Глава должна включать 2–3 вопроса (пункта) из следующего перечня:

1. Маркетинговые исследования.
2. Бизнес-план инвестиционного (дипломного) проекта.
3. Расчет показателей, используемых при сравнении различных инвестиционных проектов.
4. Экономические преимущества от эксплуатации спроектированного изделия (устройства и т. п.).
5. Планирование конструкторской подготовки изделия: сетевой или ленточный график проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР).
6. Расчет себестоимости (сметы затрат) и цены НИОКР.
7. Разработка графиков производства изделия (решение вопросов, связанных с организацией производства спроектированного изделия).
8. Техничко-экономическая оценка качества спроектированного изделия (в сравнении с базовым).
9. Расчет себестоимости и цены спроектированного изделия.
10. Вопросы менеджмента.
11. Оценка затрат труда на разработку программного обеспечения.
12. Иные экономические вопросы, согласованные с преподавателем – консультантом по ОЭЧП.

21.2.1. Маркетинговые исследования

Эти исследования являются исходным моментом экономической главы, поскольку студент должен доказать, что его разработка будет пользоваться спросом в условиях рыночной экономики. Дипломнику необходимо сделать прогноз рынка по покупателям (произвести сегментацию), объемам продаж и ценам. Прогноз выбранного сегмента рынка является важной задачей, поэтому студенту надо опреде-

лить потребителей спроектированного изделия по трем основным направлениям:

- а) госзаказ на изделия, которые могут использоваться на государственных унитарных предприятиях;
- б) заказчики, являющиеся постоянными покупателями аналогичной продукции;
- в) потенциальные покупатели спроектированной продукции, которые ранее не были удовлетворены уровнем выпускаемых изделий и теперь могут отдать предпочтение новой продукции.

Следовательно, дипломнику рекомендуется оценить объем продаж изделий для удовлетворения спроса на спроектированное изделие. Объемы продаж следует устанавливать по статистическим данным, экспертным оценкам и другим методам, причем целесообразно использовать одновременно несколько методов прогнозирования и сравнить результаты. Общий объем продаж складывается из отдельных объемов, определенных по каждой группе покупателей.

Помимо сегментации рынка и прогноза объема продаж рекомендуется спрогнозировать цену изделия. Объектом рыночных исследований является и цена аналогов, выпускаемых разными коммерческими организациями. Статистическая информация о цене аналогов может быть собрана дипломником самостоятельно или путем анализа публикаций. Желательно построить модель цены, которая связывает потребительские свойства изделия и цену. Если студент решит построить такую модель, то необходимо собрать статистические данные по 3–5 аналогам, так как чем больше информации будет собрано, тем ближе модель цены опишет реальные предпочтения покупателя и его оценку отдельных свойств исследуемой продукции. Результат раздела – рекомендуемые объем производства и цена изделия.

Обратим внимание, что предлагаемые студенту исследования рынка являются упрощенными, поэтому если имеется возможность воспользоваться информацией маркетинговой службы предприятия или организации по месту прохождения преддипломной практики, то при прогнозировании объема продаж и цены необходимо учесть следующее:

- объемы производства, импорта и экспорта изделий;
- структуру и емкость отдельных сегментов рынка;
- сведения о поставщиках;
- сведения о различных группах покупателей и их предпочтениях;
- вид спроса и его прогноз на предстоящий период;
- планы развития предприятия и его конкурентов;
- уровень доходов потенциальных покупателей;
- политику цен на рынке;
- издержки производства (себестоимость);
- планы расширения продаж конкурентов;
- сведения о НИОКР и модернизации продукции;



- технологию производства изделий, уровень их качества и технологичности (технологичность – основная экономическая характеристика спроектированного изделия как объекта производства);
- патенты и их нарушения;
- рекламу изделий и ее успех;
- финансовые возможности данного предприятия и его конкурентов;
- проникновение на зарубежные рынки.

Далее дипломнику необходимо разработать маркетинговую стратегию и указать рекомендуемый тип маркетинга.

21.2.2. Бизнес-план инвестиционного (дипломного) проекта

Бизнес-план – это сложный по структуре документ, который включает описание организации (фирмы), ее потенциальные возможности, оценку внутренней и внешней среды в бизнесе, конкретные данные о развитии бизнеса. Бизнес-план – это не только внутренний документ фирмы, он может быть использован для получения внешних инвестиций. В этом случае план является инвестиционным, и в бизнес-плане следует указать цель инвестиций. Ниже приведена примерная структура бизнес-плана, которая на практике (исходя из реальной ситуации и финансовых возможностей) может быть изменена:

- оглавление бизнес-плана;
- введение (резюме);
- описание фирмы, компании;
- продукция и услуги;
- план маркетинга (оценка внешней среды; оценка потенциальных покупателей и потенциальных услуг; оценка конкурентов; комплексное исследование рынка; стратегия маркетинга);
- производственный план;
- управление фирмой (проектом);
- финансовые ресурсы (источники и направления финансирования);
- финансовый план (планы прибыли, движения денежных потоков, анализ безубыточности, сравнительный анализ эффективности производства);
- оценка степени риска;
- приложения.

В инвестиционном бизнес-плане следует не только определить срок окупаемости инвестиций и рентабельность, но и проанализировать, как изменяются выручка и доход предприятия, издержки производства, прибыль, фондоотдача, производительность труда, материалоемкость и др.

Бизнес-план инвестиционного проекта, в котором разрабатывается научно-технический продукт (НТПр), имеет некоторые особенности. Студент, проходящий преддипломную практику в Донском филиале центра тренажеростроения и подготовки персонала (ДФЦТиПП), имеет возможность на практике ознакомиться со структурой составления такого бизнес-плана, поскольку в ДФЦТиПП накоплен опыт их разработки. Этот опыт также накоплен в ФГУП ПКП «ИРИС» и многих других организациях.

Ниже приведена примерная структура бизнес-плана инвестиционного проекта по разработке НТПр:

- общие сведения о заявителе;
- резюме (реферат бизнес-плана, ключевые слова, научно-технический задел по проекту);
- описание продукции (описание НТПр: указывается назначение НТПр; приводятся определяющие технико-экономические показатели, номенклатура которых рассмотрена после структуры бизнес-плана; основные технические параметры; дается оценка научно-технического уровня проектируемого изделия; указываются области применения, а также перспективы совершенствования продукта);
- план маркетинга (в этом разделе указывается форма реализации НТПр, проводится анализ рынка НТПр, определяется стратегия реализации НТПр, планируется организация рекламы, а также сервис и гарантии);
- организационный план производства (отмечается состояние работ по проекту; планируется организация производства НТПр, в том числе технология создания продукта);
- правовая охрана НТПр;
- финансовая часть (информация этой части проекта в бизнес-плане зачастую носит иллюстративный характер, дающий представление о типовом соотношении статей затрат, возможных источниках финансирования и вероятных финансовых результатах);
- приложения.

Номенклатура технико-экономических показателей представлена ниже. Целесообразно сделать прогноз по следующим показателям:

- улучшение экологии;
- ресурсосбережение;
- повышение безопасности населения;
- создание рабочих мест;
- новизна НТПр (международный патент, патент РФ, «Ноу-хау»);
- уровень НТПр (наличие прямых аналогов, выше мирового уровня, мировой уровень);
- устойчивость существования НТПр на рынке;
- относительная эффективность затрат потребителя на приобретение НТПр;

- показатели рентабельности создания первого опытного образца при базовом значении 20% (для повышения конкурентоспособности возможно снижение рентабельности до 6%);
- показатель рентабельности тиражирования;
- срок возврата инвестиций (при базовом значении 3,5 года);
- финансовая обоснованность срока возврата инвестиций;
- ценовая рыночная перспективность НТПр (с указанием цен зарубежного и отечественного аналогов).

Такова примерная номенклатура технико-экономических показателей, которые должен привести дипломник в бизнес-плане. Напомним, что исходные данные студенту рекомендуется получить в ходе преддипломной практики.

21.2.3. Показатели, используемые при сравнении различных инвестиционных проектов: чистый дисконтированный доход (ЧДД); индекс доходности (ИД); внутренняя норма доходности (ВНД); срок окупаемости

Методика определения сравнительной эффективности капитальных вложений, используемая до сих пор рядом предприятий, НИИ, КБ, основана на сравнении приведенных затрат по вариантам. Согласно этой методике экономически целесообразным вариантом считается тот, который обеспечивает минимум приведенных затрат, т. е.

$$Z_i = C_i + E_n \cdot K_i \rightarrow \min,$$

где C_i – себестоимость продукции по вариантам; K_i – капитальные вложения по вариантам.

При этом годовой экономический эффект от реализации лучшего варианта определяется по формуле

$$\Theta = (Z_1 - Z_2) = (C_1 + E_n K_1) - (C_2 + E_n K_2),$$

где Z_1, Z_2 – приведенные затраты по вариантам; C_1, C_2 – себестоимость продукции по вариантам; K_1, K_2 – капитальные вложения по вариантам.

Сравнительный коэффициент эффективности капитальных вложений определяется по формулам:

$$E_{\text{ср}} = \frac{C_1 - C_2}{K_2 - K_1}; \quad T_{\text{ок}} = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2}.$$

Если $E_{\text{СР}} \geq E_{\text{Н}}$, то из этого следует, что капитальные вложения в экономическом плане обоснованы, а при $E_{\text{СР}} > E_{\text{Н}}$ вариант эффективен ($E_{\text{Н}} = 0,15$).

Недостатком данной методики является то, что критерием для определения лучшего варианта являются приведенные затраты, а не прибыль, которая в наибольшей степени отвечает требованиям рыночной экономики. Кроме того, данная методика не может быть использована при обосновании капитальных вложений, направляемых на улучшение качества спроектированного изделия, так как улучшение качества продукции на предприятии, как правило, ведет к увеличению издержек производства.

Поэтому большой теоретический и практический интерес как для организаций, так и для студентов-дипломников, представляет методика определения выгодности вложения инвестиций в развитых странах с рыночной экономикой, которая глубоко и научно обоснована и подтверждена практикой.

Основные методические подходы подробно описаны в экономической литературе западных стран, а в последнее десятилетие и в российской литературе. Известны два метода решения данной проблемы, хотя они имеют и много общего. Студенту-дипломнику следует знать эти методы и использовать в проекте один из них.

Первый метод связан со сравнением величины инвестиций с величиной получаемого дохода от их использования путем сопоставления цены спроса с ценой предложения. Предприниматель заинтересован во вложении инвестиций только в том случае, если ожидаемый доход от его использования за определенный период составит не менее величины вложения инвестиций.

Так как предприниматель за товар сразу платит определенную сумму, а доход будет получать частями в течение ряда лет, то следует определить, сколько стоит тот доход, который предприниматель может получить в будущем, в момент вложения инвестиции. В мировой практике подобные расчеты называют дисконтированными, а полученную в результате этих расчетов величину называют **дисконтированной стоимостью**.

Дисконтированная стоимость (PV) любого дохода (Π) через определенный период (T) при процентной ставке (r) будет равна:

$$PV = \frac{\Pi_1}{(1+r)} + \frac{\Pi_2}{(1+r)^2} + \frac{\Pi_3}{(1+r)^3} + \dots + \frac{\Pi_n}{(1+r)^n} = \sum_{i=1}^n \frac{\Pi_i}{(1+r)^i},$$

где 1, 2, 3, ..., n – годы, в течение которых ожидаются ежегодные доходы в размерах $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n$.

Из этой формулы следует, что дисконтированная стоимость какой-то суммы будет тем ниже, чем больше срок, через который вкладчик намерен получить искомую сумму Π , и чем выше процентная ставка r .



Выгодность вложения инвестиций, как было уже отмечено, определяется путем сопоставления цены спроса с ценой предложения.

Если все это перевести на более понятные дипломнику термины, то это означает:

если $D > K$ – выгодно вкладывать инвестиции;

если $D < K$ – невыгодно;

если $D = K$ – достигаются равновыгодные условия,

где D – доход (прибыль), который может быть получен за счет реализации дипломного проекта. Он определяется на основе дисконтирования;

K – капитальные вложения, необходимые для реализации дипломного проекта.

В нашем случае D является ценой спроса, K – ценой предложения.

Второй метод определения экономической целесообразности вложения инвестиций связан со сравнением нормы отдачи от инвестиций с процентной ставкой или другими аналогичными критериями.

Норма отдачи инвестиций определяется по формуле

$$\text{ROR} = \frac{\text{Чистый доход} - \text{Цена предложения}}{\text{Цена предложения}} \cdot 100\%.$$

Если $\text{ROR} > r$, то фирме выгодно вкладывать инвестиции, если $\text{ROR} < r$ – невыгодно. При $\text{ROR} = r$ достигаются равновыгодные условия.

Эффективность проекта характеризуется системой показателей, отражающих соотношение затрат и результатов применительно к интересам его участников.

Различаются следующие показатели эффективности инвестиционного проекта:

- показатели коммерческой (финансовой) эффективности, учитывающие финансовые последствия реализации проекта для его непосредственных участников;
- показатели бюджетной эффективности, отражающие финансовые последствия осуществления проекта для федерального, регионального или местного бюджета;
- показатели экономической эффективности, учитывающие затраты и результаты, связанные с реализацией проекта, выходящие за пределы прямых финансовых интересов участников инвестиционного проекта и допускающие стоимостное измерение. Для крупномасштабных (существенно затрагивающих интересы города, региона или всей России) дипломных проектов рекомендуется обязательно оценивать экономическую эффективность.

В процессе разработки проекта проводится оценка его социальных и экологических последствий, а также затрат, связанных с социальными мероприятиями и охраной окружающей среды.

При оценке эффективности инвестиционного проекта соизмерение одновременных показателей осуществляется путем приведения (дисконтирования) их к ценности в начальном периоде. Для приведения одновременных затрат, результатов и эффектов используется норма дисконта (E), равная приемлемой для инвестора норме дохода на капитал.

Приведение к базисному моменту времени затрат, результатов и эффектов, имеющих на t -м шаге расчета реализации проекта, удобно производить путем их умножения на коэффициент дисконтирования (a_t), определяемый для постоянной нормы дисконта (E) как

$$a_t = \frac{1}{(1 + E)^t},$$

где t – номер шага расчета ($t = 0, 1, 2, \dots, T$), а T – горизонт расчета.

Если же норма дисконта меняется во времени и на t -м шаге расчета равна E , то коэффициент дисконтирования равен:

$$a_0 = 1 \text{ и } a_t = \frac{1}{\prod_{k=1}^t (1 + E_k)} \text{ при } t > 0.$$

Сравнение различных инвестиционных проектов (или вариантов одного проекта) и выбор лучшего из них рекомендуется производить с использованием различных показателей, к которым относятся:

- 1) чистый дисконтированный доход (ЧДД), или интегральный доход;
- 2) индекс доходности (ИД);
- 3) внутренняя норма доходности (ВНД);
- 4) срок окупаемости.

1. **Чистый дисконтированный доход (ЧДД)**, или чистая приведенная стоимость (NPV), представляет собой оценку сегодняшней стоимости потока будущего дохода. Он определяется как сумма текущих эффектов за весь расчетный период, приведенная к начальному шагу, или как превышение интегральных результатов над интегральными затратами.

Если в течение расчетного периода не происходит инфляционного изменения цен или расчет производится в базисных ценах, то величина ЧДД для постоянной нормы дисконта ($\mathcal{E}_{\text{инт}}$) вычисляется по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{инт}} = \text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (R_t - \mathcal{Z}_t) \cdot \frac{1}{(1 + E)^t},$$



где R_t – результаты, достигаемые на t -м шаге расчета; Z_t – затраты, осуществляемые на том же шаге; T – горизонт расчета (равный номеру шага расчета, на котором производится ликвидация объекта).

$(R_t - Z_t) = \mathcal{E}_t$ – эффект, достигаемый на t -м шаге.

На практике (что следует учесть дипломику) часто пользуются модифицированной формулой для определения ЧДД. Для этого из состава Z_t исключают капитальные вложения и обозначают через:

K_t – капвложения на t -м шаге;

K – сумма дисконтированных капвложений, т. е.:

$$K = \sum_{t=0}^T K_t \cdot \frac{1}{(1+E)^t}.$$

Тогда вышеприведенная формула ЧДД примет вид:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (R_t - Z'_t) \cdot \frac{1}{(1+E)^t} - K,$$

где Z'_t – затраты на t -м шаге без учета капитальных вложений.

Обратим внимание, что если ЧДД инвестиционного проекта положителен, проект является эффективным (при данной норме дисконта), и может рассматриваться вопрос о его принятии. Если ЧДД отрицательный, то проект считается неэффективным, т. е. убыточным для инвестора.

Величину ЧДД можно представить еще следующей формулой:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (\Pi_t + A_t N_n) \cdot \frac{1}{(1+E)^t} - K,$$

где Π_t – чистая прибыль, полученная на t -м шаге; A_t – амортизационные отчисления на t -м шаге; N_n – налог на прибыль на t -м шаге, в долях ед.

Таким образом, ЧДД – это сумма приведенных величин чистой прибыли и амортизационных отчислений за минусом приведенных капитальных вложений.

В зарубежной литературе величину «ЧДД» обозначают «NPV»;

величину « $\sum_{t=0}^T (R_t - Z'_t) \cdot \frac{1}{(1+E)^t}$ » обозначают «PV»; капитальные вложения « K » обозначают «CI»;

эффект, достигаемый на t -м шаге, $\mathcal{E}_t = (R_t - Z_t)$ обозначают « R_t ».

2. Индекс доходности (ИД) представляет собой отношение суммы приведенных эффектов к величине капиталовложений:

$$\text{ИД} = PI = \frac{1}{K} \cdot \sum_{t=0}^T (R_t - Z'_t) \cdot \frac{1}{(1+E)^t}, \quad \text{или} \quad \text{ИД} = PI = \frac{\sum_{t=0}^T \Theta_t}{K},$$

где $\sum_{t=0}^T \Theta_t$ – сумма приведенных эффектов; K – приведенные капитальные вложения.

С достаточной степенью точности индекс рентабельности можно определить как отношение дисконтированных прибылей и амортизационных отчислений к капитальным вложениям.

Индекс доходности тесно связан с ЧДД. Он строится из тех же элементов, и его значение связано со значением ЧДД: если ЧДД положителен, то $\text{ИД} > 1$, и наоборот.

Правило для вывода по дипломному проекту: если $\text{ИД} > 1$, проект эффективен, если $\text{ИД} < 1$ – неэффективен.

3. Внутренняя норма доходности (ВНД) представляет собой ту норму дисконта ($E_{\text{вн}}$), при которой величина приведенных эффектов равна приведенным капиталовложениям. Иными словами, $E_{\text{вн}}$ (ВНД) является решением уравнения:

$$\sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z'_t}{(1 + E_{\text{вн}})^t} = \sum_{t=0}^T \frac{K}{(1 + E_{\text{вн}})^t}.$$

Если расчет ЧДД инвестиционного проекта дает ответ на вопрос, является он эффективным или нет при некоторой заданной норме дисконта (E), то ВНД проекта определяется в процессе расчета и затем сравнивается с требуемой инвестором нормой дохода на вкладываемый капитал.

Если ВНД равна или больше требуемой инвестором нормы дохода на капитал, то инвестиции в данный проект оправданны и может рассматриваться вопрос о его принятии. В противном случае инвестиции в данный проект нецелесообразны.

Если сравнение альтернативных (взаимоисключающих) инвестиционных проектов (вариантов проекта) по ЧДД и ВНД приводит к противоположным результатам, предпочтение следует отдать ЧДД.

4. Срок окупаемости проекта – время, за которое поступления от производственной деятельности предприятия покроют затраты на инвестиции. Измеряется он в годах или месяцах.

Результаты и затраты, связанные с осуществлением проекта, можно вычислять с дисконтированием или без него. Соответственно по-

лучатся два различных срока окупаемости. Срок окупаемости рекомендуется определять с использованием дисконтирования.

Наряду с перечисленными критериями в дипломном проекте возможно использование и ряда других: точки безубыточности, простой нормы прибыли, капиталлоотдачи и т. д. Но ни один из перечисленных критериев сам по себе не является достаточным для принятия проекта. Решение об инвестировании средств в проект должно приниматься с учетом значений всех перечисленных критериев и интересов всех участников инвестиционного проекта.

В условиях рыночной экономики резко возросла значимость определения эффекта от реализации инноваций. Прежде чем отобрать инновационный проект, необходимо оценить эффективность инноваций, причем в зависимости от учитываемых результатов и затрат различают следующие виды эффекта от реализации инноваций: экономический, научно-технический, социальный, экологический.

Общим принципом оценки эффективности является сопоставление эффекта (результата) и затрат. Отношение результат/затраты может быть выражено не только в денежных, но и в натуральных величинах. Конечно же, показатель эффективности при разных способах выражения может оказаться разным для одной и той же ситуации, но, главное, следует помнить, что эффективность – это всегда отношение. Метод исчисления эффекта (дохода) инноваций, основанный на сопоставлении результатов с затратами, позволяет принимать решения о целесообразности использования новых разработок.

Для оценки общей экономической эффективности инноваций используется система показателей, аналогичная изложенным выше. Например, норма рентабельности при оценке экономической эффективности инноваций имеет и другие названия – ВНД, внутренняя норма прибыли, норма возврата инвестиций. За рубежом расчет ВНД часто применяют в качестве первого шага количественного анализа инвестиций. Для дальнейшего анализа отбирают те инновационные проекты, ВНД которых не ниже 15–20%. ВНД определяется аналитически как такое пороговое значение рентабельности, которое обеспечивает равенство нулю ЧДД, рассчитанного за экономический срок жизни инноваций. Дипломникам следует знать, что вопрос о принятии инновационного решения может рассматриваться, если значения ВНД не меньше требуемой инвестором величины. В данном случае предпочтение следует отдать не ЧДД, а ВНД. Однако дополнительно надо рассчитать еще показатель, который является одним из наиболее распространенных показателей оценки инвестиций – это *срок окупаемости инвестиций*. В отличие от используемого показателя «срок окупаемости капитальных вложений» он базируется не на прибыли, а на денежном потоке с приведением инвестируемых средств в инновации и суммы денежного потока к настоящей стоимости. Инвестирование в условиях рынка всегда связано с риском, и этот

риск тем значительнее, чем длиннее срок окупаемости, так как за это время кардинально могут измениться не только цены, но и конъюнктура рынка. Такой подход особо актуален для тех отраслей экономики, в которых наиболее высоки темпы научно-технического прогресса и где появление новых микропроцессорных систем и других подобных изделий, новых информационных и обычных технологий может очень быстро обесценить прежние инвестиции.

Формула для расчета срока окупаемости инвестиций в инновации выглядит следующим образом:

$$T = K/D,$$

где K – первоначальные инвестиции в инновации; D – ежегодные денежные доходы.

На показатель «срок окупаемости инвестиций» часто ориентируются еще и потому, что в тех случаях, когда нет уверенности, что инновационное мероприятие будет реализовано, владелец средств не рискнет доверить инвестиции на длительный срок.

Метод исчисления эффекта (дохода) инноваций, основанный на сопоставлении результатов их освоения с затратами, а также анализ рассчитанного срока окупаемости инвестиций позволяют принимать решение о целесообразности использования новых разработок [14].

Обратим внимание, что исходные данные для расчета приведенных выше показателей студент должен найти во время преддипломной практики (в экономических отделах тех организаций, где студент проходил практику).

21.2.4. Экономические преимущества от эксплуатации спроектированного изделия

В ряде случаев не представляется возможным на этапе дипломного проектирования рассчитать конкретные экономические показатели, доказывающие экономическую эффективность проекта. В качестве одного из 2–3 вопросов ОЭЧП в этом случае возможно текстовое описание экономических преимуществ, которые могут быть получены от эксплуатации изделия, спроектированного студентом. Следует прогнозировать улучшение экономических показателей в результате внедрения студенческой разработки, например, сокращение эксплуатационных расходов в результате повышения показателей надежности конструкции, экономию фонда заработной платы в результате улучшения условий труда, а также рост производительности труда обслуживающего персонала. При использовании результатов, полученных в главе по БЖД, можно спланировать указанные выше экономические показатели. В любом случае при внедрении разработки должен

быть получен не только научно-технический и социальный, но и экономический эффект.

Однако, в виде исключения, дипломные проекты некоторых студентов не дают экономического эффекта, причем это не зависит ни от самих студентов, ни от качества выполненных проектов. Главное здесь – в специфике темы проекта, например, если это учебные стенды для проведения лабораторных работ (с целью повышения качества обучения студентов на профилирующей кафедре), отдельные микропроцессорные блоки, программные продукты и т. п. В этих случаях студент-дипломник должен спланировать работы и рассчитать затраты на их выполнение, например, экономическая глава может быть названа «Планирование работ и затрат на разработку микропроцессорной системы контроля магнитных параметров» (следует указать точное название темы дипломного проекта по приказу, например, выше указано название стенда для учебного процесса, выполненого по заданию выпускающей кафедры «Автоматика и телемеханика» ГОУ ВПО «ЮРГТУ (НПИ)»). ОЭЧП в данном случае может содержать следующие параграфы:

1. Сетевое планирование и управление НИОКР по разработке ... (указать название темы проекта) – см. п. 21.2.5. Планирование конструкторской подготовки производства изделий и методические указания [24].
2. Расчет себестоимости НИОКР по разработке ... (указать название темы проекта) – см. п. 21.2.6. Расчет себестоимости (сметы затрат) и цены НИОКР и методические указания [3, 20, 25].
3. Расчет затрат труда на разработку программного обеспечения – необходимые формулы для расчета приведены в методических указаниях [26].

Обратим внимание, что ОЭЧП должна содержать обычно 2–3 пункта, а конкретно это зависит от темы проекта и объема выполненных 2 пунктов, поэтому можно выполнить лишь 2 пункта из 3.

В этом случае дипломник демонстрирует умение спланировать свою работу и определить затраты на разработку, не дающую экономического эффект, а также при невозможности выявить этот эффект на данном этапе дипломного проектирования.

21.2.5. Планирование конструкторской подготовки производства изделий

Для управления НИОКР могут быть использованы либо линейные (графики Ганта), либо сетевые графики, позволяющие оптимизировать процесс создания новой техники.

Наиболее прогрессивны сетевые графики. Для их построения и последующего функционирования системы СПУ необходимо:

- 1) установить содержание работ, их последовательность и взаимосвязь;
- 2) определить продолжительность каждой работы и построить график;
- 3) рассчитать временные параметры событий (непосредственно на графике) и работ (в таблице);
- 4) составить карту проекта с оптимизацией использования ресурсов во времени;
- 5) обеспечить управление разработкой с помощью сетевого графика.

Взаимосвязь работ и наименование событий целесообразно определять непосредственно по графику в процессе его составления. Параллельно с этим следует заполнить табл. 21.1.

Таблица 21.1

Перечень событий и работ

События		Работы					
Номер	Наименование	Шифр i, j	Содержание	Оценки, дней		$t_{ож}$, дней	Количество исполнителей K_p , чел.
				t_{min}	t_{max}		

Продолжительность работ определяется либо нормативным, либо вероятностным методами. Здесь можно использовать вероятностные методы.

Методом «двух оценок» ожидаемое время выполнения данной (i, j) работ определяется по формуле

$$t_{ож}(i, j) = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5},$$

где t_{min} , t_{max} – соответственно оптимистическая и пессимистическая оценки продолжительности работ, установленные ответственным исполнителем.

Параметры событий: ранние сроки $t_p(i)$, поздние сроки $t_n(i)$, резерв времени $R_n(i)$ и номера событий указать на графике (в кружках, рис. 21.1), а расчет параметров работ представить в табл. 21.2.

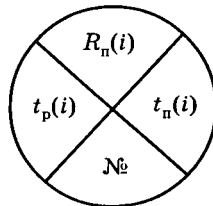


Рис. 21.1

Таблица 21.2

Расчет временных параметров сетевого графика

События	$t(i, j)$, дней	Ранние сроки		Поздние сроки		$R_{п}(i, j)$
		$t_{рн}(i, j)$	$t_{ро}(i, j)$	$t_{пн}(i, j)$	$t_{по}(i, j)$	

В табл. 21.2

i и j – шифры соответственно i – начального и j – конечного событий работы; $t(i, j)$ – продолжительность работы;

$t_{рн}(i, j) = t_{р}(i)$ – наиболее ранний (из возможных) срок начала работы (раннее начало);

$t_{ро}(i, j) = t_{рн}(i, j) + t(i, j)$ – раннее окончание работы;

$t_{пн}(i, j) = t_{по}(j) - t(i, j)$ – наиболее поздний (из допустимых) срок начала работы (позднее начало);

$t_{по}(i, j) = t_{п}(j)$ – позднее окончание;

$R_{п}(i, j) = t_{по}(i, j) - t_{ро}(i, j) = t_{пн}(i, j) - t_{рн}(i, j)$ – полный резерв времени работы.

На демонстрационном листе формата А1 можно представить сетевой график с указанием работ и параметров событий, таблицу с рассчитанными параметрами работ и карту проекта с оптимизацией использования ресурсов.

В пояснительной записке следует указать, как будет осуществляться оперативное руководство работами с помощью составленного сетевого графика.

21.2.6. Расчет себестоимости (сметы затрат) и цены НИОКР

Целью планирования себестоимости проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских (НИОКР) является экономически обоснованное определение величины затрат на их выполнение. Расчет себестоимости НИОКР по разработке устройства, системы, электронного прибора и т. п. рекомендуем провести на основе метода сметных калькуляций – путем составления сметы затрат, которая определяет общую сумму предпроизводственных затрат, т. е. стоимость всех ресурсов, необходимых для реализации комплекса работ. В плановую себестоимость НИОКР включаются все затраты, связанные с их выполнением, независимо от источника их финансирования.

Калькуляцию себестоимости НИОКР следует составить по следующим статьям затрат:

1) материалы и покупные изделия;

- 2) спецоборудование для научных (экспериментальных) работ;
- 3) основная заработная плата научно-производственного персонала (НПП);
- 4) дополнительная заработная плата НПП;
- 5) единый социальный налог (ЕСН);
- 6) расходы на научные и производственные командировки;
- 7) затраты по работам, выполняемым сторонними организациями и предприятиями;
- 8) прочие прямые расходы;
- 9) накладные расходы.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат следует составить калькуляцию плановой себестоимости в целом по НИОКР по приведенной ниже форме (табл. 21.3).

Таблица 21.3

Калькуляция плановой себестоимости в целом по НИОКР

Наименование статей затрат	Условное обозначение	Затраты		Обоснование
		сумма, руб.	в % к итогу	
1. Материалы и покупные изделия	М			Расчет
2. Спецоборудование для научных (экспериментальных) работ	О _с			Расчет
3. Основная заработная плата НПП	L _о			Расчет
4. Дополнительная заработная плата НПП	L _д			...% от L _о
5. Единый социальный налог	ЕСН			26% от (L _о + L _д)
6. Расходы на научные и производственные командировки	Р _к			Расчет
7. Работы и услуги сторонних организаций	Р _у			Расчет
8. Прочие прямые расходы	П _{пр}			По данным предприятия
9. Накладные расходы	Р _н			в % от (L _о + L _д)
Итого себестоимость НИОКР	С _{ниокр}		100%	Сумма всех статей
Прибыль плановая	П			...% от С _{ниокр}

Окончание табл. 21.3

Наименование статей затрат	Условное обозначение	Затраты		Обоснование
		сумма, руб.	в % к итогу	
Цена НИОКР (без учета НДС)	$C_{\text{ниокр}}$			$C_{\text{ниокр}} + \Pi$
Налог на добавленную стоимость	НДС			18% от $C_{\text{ниокр}}$
Цена НИОКР (включая НДС)	$C_{\text{ниокр}} \cdot S$			$C_{\text{ниокр}} \cdot S =$ $= C_{\text{ниокр}} + \text{НДС}$

В случае, когда не представляется возможным получение информации для определения затрат методом сметных калькуляций, можно использовать метод расчета по удельным показателям или другие методы укрупненного расчета, описанные в литературе.

В научных организациях, работающих ныне в условиях рыночных отношений, определяется не только плановая себестоимость НИОКР, но и величина плановой прибыли.

Плановая прибыль по каждой конкретной теме НИОКР рассчитывается по формуле

$$\Pi = C_{\text{НИОКР}} - C_{\text{НИОКР}}$$

где Π – плановая прибыль по теме, руб.; $C_{\text{НИОКР}}$ – цена НИОКР (без НДС) по теме, руб.; $C_{\text{НИОКР}}$ – плановая себестоимость темы, руб.

Цена НИОКР должна обеспечивать получение прибыли, достаточной для уплаты налога на прибыль, а также для финансирования научно-технического, материально-технического и социального развития самой научной организации.

В дипломном проекте плановую прибыль следует определить по нормативу рентабельности, установленному в процентах к себестоимости НИОКР, по данным организации – места преддипломной практики, а затем сложить величину полученной прибыли с ранее рассчитанной себестоимостью НИОКР. Затем необходимо определить налог на добавленную стоимость (НДС). Окончательно плановая цена НИОКР рассчитывается по формуле

$$C_{\text{НИОКР}} \cdot S = C_{\text{НИОКР}} + \text{НДС}.$$

Обращаем внимание на тот факт, что этот расчет является упрощенным, но вполне допустим на этапе дипломного проектирования.

Методику определения отдельных статей затрат, а также методические указания по выполнению некоторых других экономических

расчетов дипломник может выяснить у преподавателя–консультанта по ОЭЧП, посещая регулярно проводимые преподавателем консультации по написанию ОЭЧП. Подчеркнем, что главной в дипломном проекте является спецчасть проекта, поэтому ОЭЧП выполняется в основном после написания специальной части и в полном соответствии с ее результатами. Выводы и основные результаты расчета, полученные в ОЭЧП, целесообразно письменно изложить в заключении ко всему проекту, а также кратко перечислить в докладе студента в конце его выступления во время публичной защиты дипломного проекта (до вопросов членов ГАК).

Список литературы

1. *Котлер Ф.* Маркетинг. Менеджмент/ Пер. с англ. Под ред. О. А. Третьяк, Л. А. Волковой, Ю. Н. Каптуревского (9-е международное издание). – СПб.: Питер, 2000. – 896 с.: ил.
2. *Котлер Ф.* Основы маркетинга. – М.: Прогресс, 1992. – 736 с.
3. *Сербиновский Б. Ю., Зинченко Е. В.* Техничко-экономическое обоснование дипломных проектов студентов приборостроительных специальностей: Методические указания/ Новочерк. гос. тех. ун-т. – Новочеркасск: НГТУ, 1996. – 31 с.
4. *Эванс Дж. Р., Берман Б.* Маркетинг / Сокр. пер. с англ. Авт. предисл. и науч. ред. А. А. Горячев. – М.: Экономика, 1993. – 335 с.
5. *Алексунин В. А.* Маркетинг: Краткий курс: Учебное пособие. 2-е изд. – М.: Издательский дом «Дашков и К°», 2001. – 191 с.
6. *Пивоваров К. В.* Бизнес-планирование. 2-е изд.– М.: Издательско-книготорговый «Маркетинг», 2002. – 164 с.
7. *Джозеф А. Ковелло, Бриан Дж. Хейзел-грэн.* Бизнес-планы. Полное справочное руководство / Пер. с англ. – М.: БИНОМ, 1998. – 352 с.: ил.
8. *Липсиц И. В.* Бизнес-план – основа успеха: Практическое пособие. – М., 1992. 178 с.
9. Бизнес-план: Методические материалы/ Под ред. проф. Р.Г. Маниловского. – М.: Финансы и статистика, 1994. – 80 с.
10. *Пелих А. С.* Бизнес-план, или Как организовать собственный бизнес. – М.: Ось-89, 1999. – 96 с.
11. *Уткин Э. А.* Бизнес-план. – М.: Акалис, 1996. – 125 с.

12. *Фатхутдинов Р.А.* Инновационный менеджмент (3-е изд.) – СПб.: Питер, 2002. – 400 с.: ил.
13. *Кокурин Д. И.* Инновационная деятельность – М.: Экзамен, 2001. – 576 с.
14. *Ильенкова С. Д.* и др. Инновационный менеджмент/ Учебник для вузов. Под ред. проф. С. Д. Ильенковой. – М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1997. – 327 с.
15. Экономика предприятия и отрасли промышленности. 4-е изд., перераб. и доп./ Под ред. проф. А.С. Пелиха. – Ростов н/Д: Феникс, 2001. – 544 с.
16. Экономика предприятия: 100 экзаменационных ответов/ Экспресс-справочник для студентов вузов. – М.: ИКЦ «МарТ», Ростов н/Д: Издательский центр «МарТ», 2003. – 352 с.
17. *Аврашков Л. Я., Адамчук В. В., Антонова О. В.* и др. Экономика предприятия: Учебник для вузов/ Под ред. проф. В. Я. Горфинкеля, проф. В. А. Швандера. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 2000. – 742 с.
18. Экономика для технических вузов/ Под ред А. П. Ковалева, М. П. Павлова. – Ростов н/Д: Феникс, 2001. – 512 с.
19. *Сергеев И. В.* Экономика предприятия: Учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 304 с.
20. Экономика машиностроительного производства. Методические указания к самостоятельной работе студентов/ Е. В. Зинченко, Б. Ю. Сербиновский. – Ростов н/Д: Пегас, 1998. – 21 с.
21. *Лебедев В. Г., Дроздова Т. Г., Кустарев В. П.* и др. Управление затратами на предприятии: Учебник / Под общ. ред. Г. А. Краюхина. – СПб.: Бизнес-пресса, 2000. – 277 с.: ил.
22. *Фатхутдинов Р. А.* Организация производства: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2002. – 672 с.
23. Организация производства на предприятии: Учебник для технических и экономических специальностей / Под ред. О. Г. Туровца и Б. Ю. Сербиновского. – Ростов н/Д: Изд. центр «МарТ», 2002. – 464 с.
24. *Зинченко Е. В., Никитенко А. В.* Сетевое планирование и управление: Методические указания к практическим занятиям по курсу «Организация и планирование производства»/ Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005. – 18 с.

25. *Никитенко А. В., Зинченко Е. В., Сербиновский Б. Ю., Гарькуша В. Н.* Организация и планирование поточного производства изделий: Учебное пособие/ Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005. – 48 с.
26. *Зайцева И. В., Никитенко А. В.* Организационно-экономическое обоснование технических решений с программным обеспечением: Методические указания к дипломному и курсовому проектированию/ Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005. – 32 с.

Часть 3

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА

22

ОФОРМЛЕНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

22.1. Оформление текста

Пояснительную записку дипломного проекта печатают на листах бумаги формата А4. Допускается использовать листы без рамки, основной надписи и дополнительных граф. Повреждение листов, пометки текста или графики не допускаются. Пояснительная записка должна быть сброшюрована типографским способом в твердом переплете.

Текст располагают с одной стороны листа, высота букв и цифр не менее 2,5 мм. Рекомендуемый шрифт основного текста Times New Roman № 14. Размер поля на подшивку 30 мм, противоположного не менее 10 мм, верхнего и нижнего полей – не менее 20 мм. Расстояние между строками должно быть равным 8–10 мм.

Абзацы в тексте начинают отступом от края левого поля, равным 15–17 мм. Цифры, указывающие номера разделов, подразделов, пунктов, подпунктов, также проставляют с отступом.

Нумерация страниц пояснительной записки должна быть сквозной, первой страницей является титульный лист. На листах без основной надписи номер страницы проставляют в нижнем наружном углу. На титульном листе и на листе задания номер не ставят.

Текст делится на разделы и подразделы. Разделы должны иметь порядковые номера в пределах всего документа, обозначенные арабскими цифрами без точки. Номер подраздела состоит из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой. Разделы, как и подразделы, могут состоять из одного или нескольких пунктов. Пункты, при необходимости, делят на подпункты. После последней цифры номера подраздела, пункта, подпункта точка не ставится, например: 4.2, 4.2.1, 4.2.1.3 и т. д. Четырехзначная нумерация является предельной.

Внутри пунктов или подпунктов могут быть приведены перечисления, которые отделяют друг от друга точкой с запятой. Перед каждой позицией перечисления следует ставить дефис. Такое оформление перечислений наиболее удобно, поскольку позволяет избежать ограничений, возникающих при использовании нумерации. При необходимости ссылки на перечисления для их обозначения используют строчные буквы со скобкой. Для дальнейшей детализации перечислений необходимо использовать арабские цифры со скобкой, а запись производить с абзацного отступа, как показано в примере.

Пример:

- а) _____
 1) _____
 2) _____
- б) _____

Каждый пункт, подпункт и перечисления записывают с абзацного отступа.

Разделы, подразделы должны иметь заголовки. Пункты, как правило, заголовков не имеют. Заголовки следует писать с прописной буквы без точки в конце. Переносы слов в заголовках не допускаются. Расстояние между заголовком и текстом должно быть около 15 мм, расстояние между заголовками раздела и подраздела – 8–10 мм.

Каждый раздел пояснительной записки рекомендуется начинать с новой страницы (к разделам приравниваются: введение, заключение, список литературы, приложения).

При оформлении содержания пояснительной записки, слово «Содержание» записывают в виде заголовка (симметрично тексту) с прописной буквы. Наименования, включенные в содержание, записывают строчными буквами, начиная с прописной.



Полное наименование изделия на титульном листе и при первом упоминании в тексте должно быть одинаковым, на первом месте должно стоять существительное, например: блок управления микропроцессорный. В последующем тексте порядок слов в наименовании должен быть прямой, т. е. на первом месте должно быть определение (имя прилагательное), а затем – название изделия (имя существительное), например: микропроцессорный блок управления. Допускается употреблять сокращенное наименование изделия.

Числовые значения величин с обозначением единиц физических величин и единиц счета следует писать цифрами, а числа без обозначения от единицы до девяти – словами.

Если приводится ряд или диапазон числовых значений, выраженных в одной и той же единице физической величины, то ее указывают только после последнего числового значения, например: 1,50; 1,75; 2,00 В; от 10 до 100 Ом. Недопустимо отделять единицу физической величины от числового значения (переносить их на разные строки или страницы).

22.2. Оформление формул

В формулах в качестве символов следует применять обозначения, установленные соответствующими стандартами. Пояснения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, если они не пояснены ранее, должны быть приведены непосредственно под формулой. Пояснения каждого символа следует давать с новой строки в той последовательности, в которой они приведены в формуле. Первая строка пояснения должна начинаться со слова «где», без двоеточия после него.

Пример: плотность каждого образца ρ , кг/м³, вычисляют по формуле

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (22.1)$$

где m – масса образца, кг;

V – объем образца, м³.

Формулы, следующие одна за другой и не разделенные текстом, разделяют запятой.

Переносить формулы на следующую строку допускается только на знаках выполняемых операций, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке умножения применяют знак « \times ». Высота цифр должна быть не менее 2,5 мм.

Формулы, за исключением формул, помещенных в приложении, должны нумероваться сквозной нумерацией арабскими цифрами, которые записываются на уровне формулы справа в круглых скобках. Одну формулу обозначают – (1). Допускается нумерация формул в пределах раздела, например, (3.1) – первая формула третьего раздела.

Формулы в приложениях нумеруются арабскими цифрами в пределах каждого приложения с добавлением перед каждой цифрой обозначения приложения, например, формула (В.1).

Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в скобках, например, ... в формуле (2).

22.3. Оформление иллюстраций и приложений

Количество рисунков в пояснительной записке должно быть достаточным для того, чтобы ее текст можно было читать с минимальным обращением к документам графической части проекта. Обязательно приводятся схемы отдельных узлов устройства, параметры которых рассчитываются или анализируются.

Иллюстрации могут быть расположены как по тексту документа (возможно ближе к соответствующим частям текста), так и в конце его. Иллюстрации, за исключением иллюстраций приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Если рисунок один, то он обозначается «Рисунок 1». Допускается нумеровать иллюстрации в пределах раздела, например – Рисунок 2.1 (первый рисунок второго раздела). При ссылках на иллюстрации следует писать «... в соответствии с рисунком 2».

Иллюстрации каждого приложения обозначают отдельной нумерацией арабскими цифрами с добавлением перед цифрой обозначения приложения. Например: Рисунок А.3.

Для схем алгоритмов и программ, располагаемых на нескольких листах пояснительной записки, на первом листе указывается «Рисунок...», на последующих листах – «Продолжение рисунка...».

Иллюстрации при необходимости могут иметь наименование и поясняющие данные (подрисуночный текст). Слово «Рисунок» и наименование помещают после пояснительных данных и располагают следующим образом: Рисунок 1 – Детали прибора.

При изображении диаграмм оси координат шкал следует выполнять сплошной толстой линией, а координатную сетку сплошной тонкой линией. Допускается линии сетки выполнять в местах, соответствующих кратным графическим интервалам, или делать засечки



вместо линий. Функциональные зависимости предпочтительно выполнять сплошной линией. При изображении двух и более функциональных зависимостей на одной диаграмме допускается использовать линии различных типов (сплошную, штриховую и т. д.). При этом для каждой функциональной зависимости может быть использована своя шкала.

Единицы измерения на диаграммах наносятся следующим образом:

- в конце шкалы между последним и предпоследним значениями;
- вместе с обозначением переменной величины, после запятой;
- в конце шкалы после последнего числа в виде дроби: числитель – обозначение переменной величины, знаменатель – обозначение единицы измерения.

Пересечения надписей и линий на диаграмме не допускаются. При недостатке места следует прерывать линию.

Материал, дополняющий текст пояснительной записки, допускается помещать в приложениях. Как приложения оформляют отчет о патентных исследованиях, перечни элементов, спецификации, тексты программ, таблицы большого формата и т. п. В тексте документа на все приложения должны быть даны ссылки. Приложения располагают в порядке ссылок на них. Приложение, как правило, выполняют на листах формата А4. Допускается использовать формат А3.

Каждое приложение следует начинать с новой страницы с указанием наверху посередине страницы слова «Приложение» и его обозначения, а под ним в скобках для обязательного приложения пишут слово «обязательное», а для информационного – «рекомендуемое» или «справочное». Приложение должно иметь заголовок, который записывают симметрично относительно текста с прописной буквы отдельной строкой.

Приложение обозначают заглавными буквами русского алфавита, начиная с А, за исключением букв Ё, З, Й, О, Ч, Ь, Ы, Ть. После слова «Приложение» следует буква, обозначающая его последовательность. Допускается обозначение приложений буквами латинского алфавита, за исключением букв I и O.

Для перечней элементов и спецификаций обозначение и название приложения делают в центральной части отдельного чистого листа, который вкладывают перед приложением.

Все приложения должны быть перечислены в содержании с указанием их обозначений и заголовков.

22.4. Построение таблиц

Цифровой материал, как правило, оформляют в виде таблиц. Таблица может иметь название, которое располагают над таблицей в соответствии с рис. 22.1. При переносе части таблицы на ту же или другие страницы название помещают только над первой частью таблицы. Слово «Таблица» указывают один раз слева над первой частью таблицы, над другими частями слева пишут слова «Продолжение таблицы» с указанием номера (обозначения) таблицы.

Таблица _____ – _____

номер		название таблицы		

Рис. 22.1

Таблицы, за исключением таблиц приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать таблицы в пределах раздела, например «Таблица 2.2» – вторая таблица второго раздела.

Таблицы каждого приложения обозначают отдельной нумерацией арабскими цифрами с добавлением перед цифрой обозначения приложения. Если в документе одна таблица, она должна быть обозначена «Таблица 1» или «Таблица В.1», если она приведена в приложении В.

На все таблицы должны быть приведены ссылки в тексте, при ссылке следует писать слово «таблица» с указанием номера. Таблицу, в зависимости от ее размера, помещают под текстом, в котором впервые дана ссылка на нее, или на следующей странице, а при необходимости – в приложении. Допускается располагать таблицу вдоль длинной стороны листа.

Таблицы слева, справа и снизу, как правило, ограничивают линиями. Если в конце страницы таблица прерывается, то линию, ограничивающую таблицу снизу, не проводят. Высота строк таблицы должна быть не менее 8 мм.

Заголовки граф и строк таблицы следует писать с прописной буквы, а подзаголовки граф – со строчной буквы, если они составляют одно предложение с заголовком, или с прописной буквы, если они имеют самостоятельное значение. В конце заголовков и подзаголов-

ков таблиц точки не ставят. Заголовки и подзаголовки граф указывают в единственном числе.

Графу «Номер по порядку» в таблицу включать не допускается. При необходимости нумерации показателей, параметров или других данных порядковые номера следует указывать в первой графе таблицы непосредственно перед их наименованием.

В одной графе должно быть соблюдено, как правило, одинаковое количество десятичных знаков для всех значений величин. При отсутствии отдельных данных в таблице следует ставить прочерк (тире).

22.5. Список литературы

В список литературы включают все источники в порядке появления ссылок в тексте. Выполнение списка и ссылки на него в тексте – по ГОСТ 7.1-84 и ГОСТ 7.32-2001.

Сведения о книгах (монографии, учебники, справочники и т. д.) должны включать: фамилию и инициалы автора, заглавие книги, место издания, издательство, год издания, количество страниц в книге. Допускается сокращение названий городов – М. (Москва), Л. (Ленинград), К. (Киев), Мн. (Минск), СПб. (Санкт-Петербург). *Например:*

Шляндин В.М. Цифровые измерительные устройства. – М.: Высшая школа, 1991. – 335 с.

Сведения о статье из периодического издания должны включать фамилию и инициалы автора, заглавие статьи, наименование серии (если есть), год выпуска, том (при необходимости), номер издания (журнала), страницы, на которых помещается статья. *Например:*

Пестов Е. Н., Мокренко П. В. Прецизионный квантовый преобразователь тока в частоту с использованием оптической ориентации атомов // Приборы и системы управления. – 1988. – № 9. – С. 25–28.

Сведения о патентных документах должны включать: характер документа, его номер, страну, выдавшую документ, название, инициалы и фамилию автора, страну, из которой данный автор, когда и где опубликован документ. *Например:* А. с. 436350 СССР. Двоичный сумматор / К.Н. Корнеев (СССР). – Заявл. 12.01.82; Опубли. 30.03.84, Бюл. № 26.

Сведения о статье из иностранного журнала оформляют следующим образом: Ganagisowa T., Kawashima I. *Aktive gurutor* // *Electronic letters*. – 1988. – Vol.3, № 3. – P. 5–8.

Сведения о стандартах и технических условиях выполняются по примеру: ГОСТ 2.105-95. ЕСКД. Общие требования к текстовым документам. – Введ. 01.07.96.

При ссылке в тексте на источник информации следует приводить порядковый номер по списку литературы, заключенный в квадратные скобки, *например* [1].

Более подробная информация по правилам оформления текстовых документов ЕСКД приводится в ГОСТ 2.105-95.

23

ОФОРМЛЕНИЕ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА

23.1. Форматы и основные надписи

Графические документы дипломного проекта оформляются на листах стандартных форматов, размеры которых приведены ниже.

Формат	Размеры сторон, мм
A0	841 × 1189
A1	594 × 841
A2	420 × 594
A3	297 × 420
A4	210 × 297

Листы чертежной бумаги, поступающие в продажу, обычно имеют размеры больше стандартных. Основные надписи располагают в правом нижнем углу конструкторских документов (рис. 23.1). На

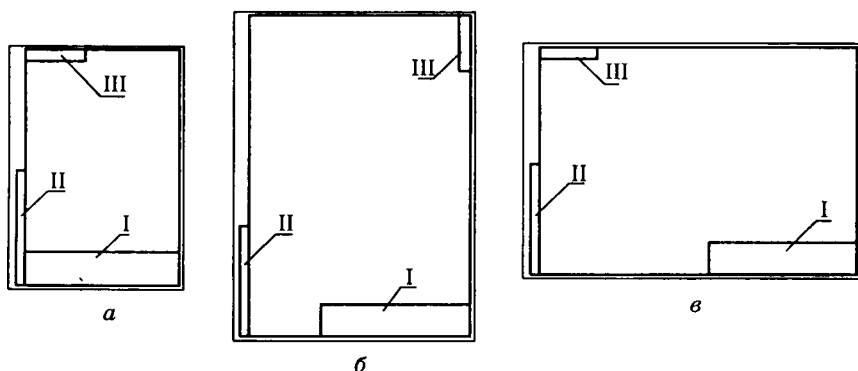


Рис. 23.1. Расположение основной надписи и дополнительных граф на стандартных форматах:

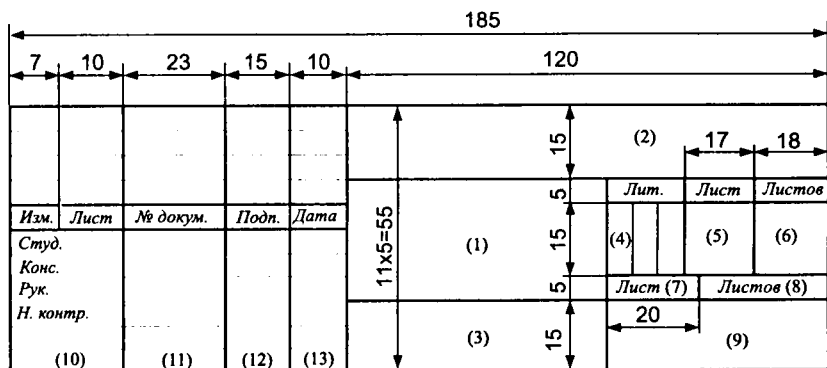
a – формат A4; *б* – формат больше A4 с основной надписью вдоль короткой стороны листа; *в* – формат больше A4 с основной надписью вдоль длинной стороны листа; I – основная надпись; II и III – дополнительные графы

листах формата А4 основные надписи размещают только вдоль короткой стороны листа, т. е. формат А4 всегда имеет вертикальное расположение.

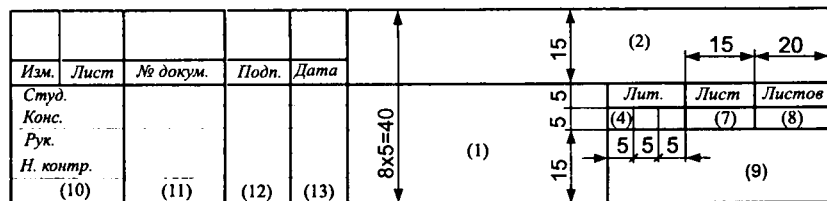
Содержание и размеры граф основной надписи на чертежах и схемах должны соответствовать формам 1, 2а, а в спецификации, перечне элементов и ведомости дипломного проекта – формам 2 и 2а по ГОСТ 2.104-68 (рис. 23.2). Форма 2а используется для последующих листов документов.

Цифрами в скобках показаны номера граф, заполняемых в дипломном проекте. В графах основной надписи указывают:

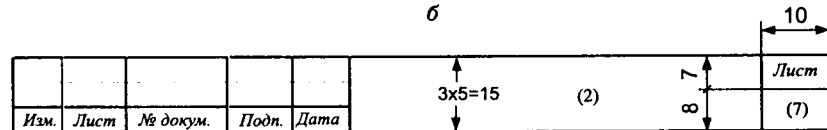
в графе 1 – наименование изделия в соответствии с ГОСТ 2.109-73, а также наименование документа, если этому документу присвоен код, например: «Модуль процессора. Схема электрическая прин-



а



б



в

Рис. 23.2. Формы основной надписи:
а – форма 1, б – форма 2, в – форма 2а

ципиальная», «Блок управления дозатором. Чертеж общего вида». Наименование должно быть кратким и записываться в именительном падеже единственного числа. На первом месте должно быть существительное;

в графе 2 – обозначение документа по ГОСТ 2.201-80. Это же обозначение, повернутое на 180°, указывается в дополнительной графе III, имеющей размеры 70 × 14 мм (см. рис. 23.1). Для студенческих работ обозначение документа может строиться в следующей последовательности:

- первые четыре цифры – шифр специальности;
- буква «Д» – дипломный проект;
- две последующие цифры – текущий год;
- последние три цифры номера зачетной книжки студента;
- номер сборочной единицы (две цифры);
- номер чертежа детали (две цифры);
- код документа.

Перечисленные буквенно-цифровые комбинации разделяются точками, перед кодом чертежа вместо точки оставляется пробел, например: 2004.Д06.063.04.00 Э1,

где 2004 – шифр специальности;

Д06 – дипломный проект 2006 г.;

063 – последние цифры номера зачетной книжки студента;

04 – номер сборочной единицы;

00 – номер чертежа детали в данной сборочной единице;

Э1 – код схемы электрической структурной.

Код документа (кроме схем) присваивается по ГОСТ 2.102-68:

- СБ – сборочный чертеж;
- ВО – чертеж общего вида;
- ПЗ – пояснительная записка;
- ТВ – таблицы;
- Д – прочие документы;
- ПФ – патентный формуляр;
- И – инструкции.

Код схемы согласно ГОСТ 2.701-84 состоит из буквы, определяющей вид схемы, и цифры, обозначающей тип схемы. Для электрических схем используется буква «Э».

Типы схем обозначаются следующими цифрами:

- 1 – структурная;
- 2 – функциональная;
- 3 – принципиальная;
- 4 – соединений (монтажная);
- 5 – подключения;
- 6 – общая;
- 7 – расположения;
- 0 – объединенная.

Например, схема электрическая функциональная имеет код Э2.

Обозначения всех документов, описывающих одно и то же изделие, должны отличаться только кодом, например:

2004.Д06.063.00.00 Э1 Блок управления. Схема электрическая структурная;

2004.Д06.063.00.00 Э3 Блок управления. Схема электрическая принципиальная;

2004.Д06.063.00.00 ПЭ3 Блок управления. Перечень элементов;

2004.Д06.063.00.00 ВО Блок управления. Чертеж общего вида.

Обозначения документов, относящихся к различным изделиям (устройствам, узлам, деталям), должны отличаться друг от друга. Например, для узлов и деталей, входящих в упомянутый блок управления, могут быть выбраны такие номера:

2004.Д06.063.01.00 СБ Модуль источника питания. Сборочный чертеж;

2004.Д06.063.01.01 Плата источника питания (для чертежа печатной платы источника питания);

2004.Д06.063.01.02 Радиатор (для чертежа радиатора, входящего в состав модуля источника питания);

2004.Д06.063.02.00 Э3 Модуль усилителей. Схема электрическая принципиальная.

Для схем программ (схем алгоритмов), графиков процессов, схем автоматизации объекта, функциональных схем систем автоматического управления, сетевых графиков и других чертежей, для которых в ЕСКД не предусматривается собственный код, используется код «Д» (прочие документы).

В остальных графах основной надписи указывают:

- в графе 3 – обозначение материала (только для чертежей деталей);
- в графе 4 – литеру, присвоенную данному документу по ГОСТ 2.103-68. Для студенческих работ в крайней левой клетке ставится литера «О» (опытный образец);
- в графе 5 – массу изделия по ГОСТ 2.109-73;
- в графе 6 – масштаб в соответствии с ГОСТ 2.302-68 и ГОСТ 2.109-73. Стандартные масштабы уменьшения: 1:2, 1:2,5, 1:4, 1:5, 1:10 и т. д.; масштабы увеличения: 2:1, 2,5:1, 4:1, 5:1, 10:1 и т. д.;
- в графе 7 – порядковый номер листа (на документах, состоящих из одного листа, графа не заполняется);
- в графе 8 – общее количество листов данного документа (графа заполняется только на первом листе);
- в графе 9 – наименование или различительный индекс предприятия, выпускающего документ; графа заполняется в две строки, например: первая строка – ЮРГТУ, кафедра АиТ; вторая строка – факультет, курс, группа;

- в графе 10 – характер работы, выполняемой лицом, подписывающим документ; для студенческих работ строки этой графы заполняются сверху вниз в следующем порядке: студент, консультант, руководитель, нормоконтролер;
- в графах 11 – 13 соответственно фамилии, подписи лиц и даты подписания документа.

23.2. Чертеж общего вида электронного блока

При оформлении графической части дипломного проекта необходимо руководствоваться действующими государственными стандартами, перечень которых приведен в приложении А, а также литературой [1, 2].

Как показывает практика, самостоятельное правильное оформление сборочного чертежа электронного блока часто оказывается для студентов сложной задачей. Поэтому рекомендуется для блока ограничиться чертежом общего вида, не требующим подробного изображения способов соединения деталей с помощью дополнительных видов, точного учета всех деталей и крепежных изделий, составления спецификации.

Согласно ГОСТ 2.119-73 чертеж общего вида должен содержать следующую информацию:

- изображения изделия (виды, разрезы, сечения), текстовую часть и надписи, необходимые для понимания конструктивного устройства изделия, взаимодействия его составных частей и принципа работы;
- наименование, а также обозначения тех составных частей изделия, для которых необходимо указать данные (технические характеристики, количество, указание о материале и др.) или запись которых необходима для пояснения изображений, описания принципа работы изделия, указания о составе и др.;
- схему, если она требуется, но оформлять ее отдельным документом нецелесообразно;
- технические характеристики изделия, если это необходимо для удобства сопоставления вариантов по чертежу общего вида.

Изображение изделия и составных частей допускается выполнять с упрощениями (иногда в виде контурных очертаний), если при этом обеспечено понимание конструкции изделия, взаимодействия его составных частей и принципа работы.

Наименования и обозначения составных частей изделия указывают одним из следующих способов:

- на полках линий-выносок;

- в таблице, размещаемой на том же чертеже, что и изображение изделия;
- в таблице, выполненной на отдельных листах формата А4 в качестве последующих листов чертежа общего вида.

Таблица в общем случае состоит из граф: «Поз.», «Обозначение», «Наименование», «Кол.», «Дополнительные указания».

Номера позиций наносят на полках линий-выносок, проводимых от изображений составных частей. Номера позиций располагают параллельно основной надписи вне контура изображения и группируют в колонку или строчку по возможности на одной линии. Размер шрифта цифр должен быть на один-два номера больше, чем размер шрифта, принятого для размерных чисел на том же чертеже.

Примеры оформления чертежей общего вида приведены в литературе [1].

23.3. Чертеж печатной платы

Правила оформления чертежей ПП регламентируются ГОСТ 2.417-91. Чертеж ПП должен содержать основные проекции платы с печатными проводниками и отверстиями, необходимые дополнительные виды, таблицы, технические требования. На чертеже указывается вся информация, необходимая для изготовления ПП: способ изготовления, габаритные и установочные размеры, ширина печатных проводников и расстояния между ними, размеры всех отверстий и контактных площадок, координаты отверстий, маркировка обозначений элементов со стороны их установки, чистота обработки поверхностей ПП, допуски. Чертеж должен иметь наименование «Плата печатная ...».

Размеры печатного монтажа указываются с помощью координатной сетки в прямоугольной системе координат. Линии координатной сетки должны нумероваться. Шаг нумерации определяется с учетом насыщенности и масштаба изображения и может быть выражен в миллиметрах или количестве линий сетки. Координатная сетка наносится на всю поверхность печатной платы либо рисками по периметру контура ПП или на некотором расстоянии от него. Последний вариант предпочтительнее. Габаритные и другие размеры ПП, не связанные с печатным монтажом, указываются с помощью размерных и выносных линий. За ноль в прямоугольной системе координат рекомендуется принимать левый нижний угол ПП на ее главном виде.

Элементы проводящего рисунка изображаются так, как они реально выглядят. Широкие печатные проводники, экраны, концевые контакты (ламели) штрихуются под углом 45° либо зачерняются.

На поле чертежа ПП приводится таблица, содержащая данные об отверстиях, которая должна иметь следующие графы: условное обозначение, диаметр отверстия, диаметр контактной площадки, количество, наличие металлизации (для двусторонних ПП).

Технические требования на чертеже ПП излагают, группируя однородные и близкие по характеру требования в следующей последовательности:

- а) способ изготовления платы (при необходимости);
- б) шаг координатной сетки;
- в) допускаемые отклонения очертаний проводников, контактных площадок и других печатных элементов от заданных чертежом;
- г) ширина печатных проводников;
- д) наименьшее расстояние между элементами проводящего рисунка;
- е) требования к смещению контактных площадок;
- ж) указания о покрытиях (защитных, декоративных и др.);
- з) указания о маркировании и клеймении (маркировка в виде проводящего рисунка не указывается);
- и) *размеры для справок.

Справочными являются размеры, без знания которых можно выполнить все необходимые операции по данному чертежу. Тем не менее эти размеры указывают, так как они способствуют более быстрому и полному уяснению представленной на чертеже информации. На чертеже ПП справочным размером является толщина платы, так как она определяется толщиной используемого листового материала заготовки. Справочные размеры отмечаются знаком «звездочка», о чем делается запись в технических требованиях.

Пример оформления чертежа двусторонней ПП приведен в приложении К.

23.4. Сборочный чертеж печатного узла

Сборочный чертеж является документом, на котором приводятся сведения, необходимые для изготовления (сборки) изделия. Согласно ГОСТ 2.109-73 сборочный чертеж должен в общем случае содержать следующую информацию:

- изображение сборочной единицы, дающее представление о расположении и взаимной связи составных частей, соединяемых по данному чертежу, и обеспечивающее возможность сборки и контроля сборочной единицы;
- размеры, предельные отклонения и другие параметры и требования, которые должны быть выполнены или проконтролированы по данному чертежу;
- указания о характере сопряжений и методах их осуществления;

- номера позиций составных частей, входящих в изделие, в точном соответствии со спецификацией на данное изделие;
- габаритные, присоединительные и другие необходимые справочные размеры;
- при необходимости техническую характеристику.

Сборочный чертеж имеет наименование и обозначение, аналогичное спецификации, но с кодом СБ. Сборочный чертеж печатного узла при минимальном числе видов должен давать полное представление о расположении и способах крепления навесных элементов. Варианты формовки выводов и установки элементов на печатную плату выбираются в соответствии с ГОСТ 29137-91. Изображения навесных элементов берутся из библиотеки САПР или создаются самостоятельно. Элементы, если это не мешает правильному пониманию чертежа, показываются упрощенно. На видах печатного узла сверху или слева допускается условное обозначение объема, занимаемого элементами, сплошной тонкой линией.

На сборочном чертеже указываются обозначения навесных элементов согласно схеме электрической принципиальной. Линии-выноски с номерами позиций по спецификации для электронных компонентов обычно не изображаются. Исключение делается для элементов, способ монтажа которых нуждается в дополнительных пояснениях. При этом в технических требованиях делается запись «Позиционные обозначения элементов соответствуют ...ЭЗ» (указывается обозначение схемы электрической принципиальной узла).

Технические требования на чертеже печатного узла должны излагаться в следующей последовательности:

1. Установку навесных элементов производить по ГОСТ 29137-91:
поз. ... – вариант ...,
поз. ... – вариант ...,
поз. ... – вариант
2. Позиционные обозначения элементов соответствуют ... ЭЗ.
3. Паять припоем ПОС61 ГОСТ 21931-76.
4. Плату после монтажа покрыть лаком УР-231 ТУ 6-10-863-76.3.9.
5. Поверхность элементов. поз. ... от покрытия предохранить.
6. * Размеры для справок.

При необходимости вводятся дополнительные требования в отношении приклеивания элементов, применения теплопроводящих паст, объемного проводного монтажа на плате и т. п.

Пример оформления сборочного чертежа печатного узла приведен в приложении И.



23.5. Спецификация печатного узла

Основным конструкторским документом, определяющим состав изделия (сборочной единицы, комплекса, комплекта), является спецификация. В спецификацию вносят составные части, входящие в изделие, а также конструкторские документы, относящиеся к изделию в целом и его составным частям.

Спецификация оформляется по ГОСТ 2.106-96 и в общем случае состоит из разделов, которые располагаются в следующей последовательности: документация, комплексы, сборочные единицы, детали, стандартные изделия, прочие изделия, материалы, комплекты. В зависимости от состава изделия, некоторые разделы спецификации могут отсутствовать. Наименование каждого раздела записывают в виде заголовка в графе «Наименование» и подчеркивают.

В графе «Формат» указывают форматы документов, обозначения которых записывают в графе «Обозначение». Если документ выполнен на нескольких листах различных форматов, то в графе «Формат» представляют знак «звездочки» со скобкой *), а в графе «Примечание» перечисляют все форматы в порядке их увеличения. Для деталей, на которые не выпущены чертежи, в графе «Формат» указывают БЧ.

В графе «Поз.» указывают порядковые номера составных частей, непосредственно входящих в специфицируемое изделие, в последовательности записи их в спецификации. Для раздела «Документация» графу «Поз.» не заполняют.

В графе «Обозначение» указывают:

- в разделе «Документация» – обозначения записываемых документов;
- в разделе «Сборочные единицы» – обозначения спецификаций на записываемые в этот раздел изделия в порядке возрастания номеров;
- в разделе «Детали» – обозначения чертежей деталей в порядке возрастания номеров.

В разделах «Стандартные изделия», «Прочие изделия» и «Материалы» графу «Обозначение» не заполняют.

В графе «Наименование» указывают:

- в разделе «Документация» – в данном случае только наименования документов: «Сборочный чертеж», «Схема электрическая принципиальная», «Перечень элементов»;
- в разделах «Сборочные единицы», «Детали» – наименования изделий в соответствии с основной надписью на основных конструкторских документах этих изделий. Для деталей, на которые не выпущены чертежи, указывают наименование, материал и другие данные, необходимые для изготовления;

- в разделе «Стандартные изделия» – наименования и обозначения изделий и номера стандартов (винты, гайки, шайбы и другие изделия, выпускаемые по межгосударственным, государственным и иным стандартам). Запись выполняется в алфавитном порядке наименований изделий, в пределах каждого наименования – в порядке возрастания обозначений стандартов, а в пределах каждого обозначения стандарта – в порядке возрастания основных параметров или размеров изделия;
- в разделе «Прочие изделия» – наименования и условные обозначения электронных компонентов и других изделий, выпускаемых по техническим условиям (практически все электронные компоненты). Обозначения ТУ в студенческих работах допускается не указывать. Запись изделий производится по группам (микросхемы, конденсаторы, резисторы и т. п.), в пределах каждой группы – в алфавитном порядке наименований изделий, а в пределах каждого наименования – в порядке возрастания основных параметров или размеров изделия;
- в разделе «Материалы» – обозначения материалов и номера стандартов или ТУ на эти материалы.

Для записи ряда однотипных изделий, отличающихся параметрами или размерами, допускается общую часть наименования этих изделий с обозначением документа на поставку записывать на каждом листе спецификации один раз в виде заголовка. Под заголовком для каждого из элементов указывают только их параметры и размеры.

В графе «Кол.» указывают:

- для составных частей изделия – их количество на одно специфицируемое изделие;
- в разделе «Материалы» – общее количество материалов на одно специфицируемое изделие с указанием единиц измерения. Допускается единицы измерения записывать в графе «Примечание» в непосредственной близости от графы «Кол.».

В разделе «Документация» графу не заполняют.

В графе «Примечание» указывают дополнительные сведения, относящиеся к записанным в спецификацию изделиям, материалам и документам. Для электронных компонентов записываются их обозначения по схеме электрической принципиальной. Для документов, выпущенных на двух и более листах различных форматов, указывают обозначение форматов, перед перечислением которых проставляют знак «звездочки», например, *А4, А3.

После каждого раздела спецификации допускается оставлять несколько свободных строк для дополнительных записей. Допускается резервировать и номера позиций, которые проставляют в спецификацию при заполнении резервных строк.

Пример оформления спецификации электронного узла приведен в приложении Ж.



23.6. Типы электрических схем

Для описания электронной аппаратуры установлены следующие термины и типы электрических схем.

Элемент схемы – составная часть схемы, которая выполняет определенную функцию и не может быть разделена на части, имеющие самостоятельное назначение и собственные УГО (резистор, микросхема и т. п.).

Устройство – совокупность элементов, представляющая единую конструкцию (плата, блок, шкаф и т. п.).

Функциональная группа – совокупность элементов, выполняющих в изделии определенную функцию и не объединенных в единую конструкцию.

Функциональная часть – элемент, устройство, функциональная группа.

Функциональная цепь – линия, канал, тракт определенного назначения (канал звука, видеоканал, тракт СВЧ и т. п.).

Схема структурная – схема, определяющая основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи. Схемы структурные разрабатывают при проектировании изделий на стадиях, предшествующих разработке схем других типов, и пользуются ими для общего ознакомления с изделием.

Схема функциональная – схема, разъясняющая определенные процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях изделия или в изделии в целом. Схемами функциональными пользуются для изучения принципов работы изделий, а также при их наладке, контроле и ремонте.

Схема принципиальная (полная) – схема, определяющая полный состав элементов и связей между ними и, как правило, дающая детальное представление о принципах работы изделия. Схемами принципиальными пользуются для изучения принципов работы изделий, а также при их наладке, контроле и ремонте. Они служат основанием для разработки других конструкторских документов, например, схем соединений (монтажных) и чертежей.

Схема соединений (монтажная) – схема, показывающая соединения составных частей изделия и определяющая провода, жгуты, кабели, которыми осуществляются эти соединения, а также места их присоединений и ввода (разъемы, платы, зажимы и т. п.). Схемами соединений пользуются при разработке других конструкторских документов (чертежей, определяющих прокладку и способы крепления в изделии проводов, жгутов, кабелей), для осуществления присоединений, а также при контроле, эксплуатации и ремонте изделий.

Схема подключения – схема, показывающая внешние подключения изделия. Схематическими подключениями пользуются при разработке других конструкторских документов, а также для осуществления подключений изделий и при их эксплуатации.

Схема общая – схема, определяющая составные части комплекса и соединения их между собой на месте эксплуатации. Схематическими пользуются при ознакомлении с комплексами, а также при их контроле и эксплуатации. Схема общая на сборочную единицу разрабатывается при необходимости.

Схема расположения – схема, определяющая относительное расположение составных частей изделия, а при необходимости, также жгутов, проводов, кабелей и т. п. Схематическими расположениями пользуются при разработке других конструкторских документов, а также при эксплуатации и ремонте изделий.

Схема объединенная – схема, когда на одном конструкторском документе выполняют схемы двух или нескольких типов, выпущенных на одно изделие.

Далее рассматриваются правила оформления наиболее часто встречающихся в дипломных проектах типах электрических схем. Более подробная информация по этому вопросу приведена в ГОСТ 2.701-75, ГОСТ 2.702-75.

23.7. Общие правила оформления электрических схем

23.7.1. Построение схемы

Схемы выполняют без соблюдения масштаба, действительное пространственное расположение составных частей изделия не учитывают или учитывают приближенно.

Графические обозначения элементов (устройств, функциональных групп) и соединяющие их линии связи следует располагать на схеме таким образом, чтобы обеспечивать наилучшее представление о структуре изделия и взаимодействии его составных частей.

Расстояние (просвет) между двумя соседними линиями графического обозначения должно быть не менее 1 мм. Расстояние между соседними параллельными линиями связи должно быть не менее 3 мм. Расстояние между отдельными условными графическими обозначениями должно быть не менее 2 мм.

При наличии в изделии нескольких одинаковых элементов (устройств, функциональных групп), соединенных параллельно, допус-

кается вместо изображения всех ветвей параллельного соединения изображать только одну ветвь, указав количество ветвей при помощи обозначения ответвления. Около графических обозначений, изображенных в одной ветви, проставляют их обозначения. При этом должны быть учтены все элементы, устройства или функциональные группы, входящие в это параллельное соединение (рис. 23.3). Элементы в этом случае записывают в перечень элементов в одну строку.

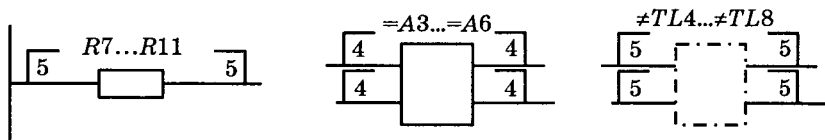


Рис. 23.3

При наличии в изделии трех и более одинаковых элементов (устройств, функциональных групп), соединенных последовательно, допускается изображать только первый и последний элементы (устройства, функциональные группы), показывая связи между ними штриховыми линиями. При присвоении позиционных обозначений должны быть учтены элементы (устройства, функциональные группы), не изображенные на схеме (рис. 23.4). Над штриховой линией при этом указывают общее количество одинаковых элементов. Элементы в этом случае записывают в перечень элементов в одну строку.

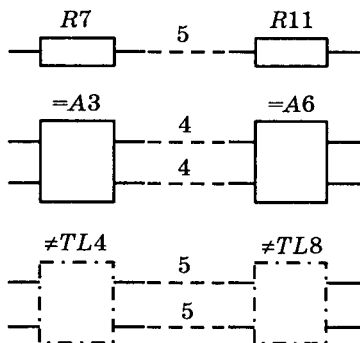


Рис. 23.4

При выполнении схемы на нескольких листах ее деление на части следует осуществлять по границам устройств, функциональных групп или цепей, соблюдая следующие требования:

- для позиционных обозначений элементов используют сквозную нумерацию в пределах изделия;
- перечень элементов должен быть общим;
- отдельные элементы допускается повторно изображать на других листах схемы, сохраняя позиционные обозначения, присвоенные им на одном из листов схемы.

Функциональную группу или устройство, не имеющее самостоятельной принципиальной схемы, выполняют на схемах в виде фигуры из контурных штрих-пунктирных линий, равных по толщине линиям связи. Фигура, очерченная контурной линией, как правило, должна быть прямоугольником. Допускается выделять части схемы фигурами непрямоугольной формы.

Если в изделие входят несколько одинаковых устройств, не имеющих самостоятельных принципиальных схем, или функциональных групп, то на схеме изделия допускается не повторять схемы этих устройств или функциональных групп. При этом устройство или функциональную группу изображают в виде прямоугольника, а схеме такого устройства или функциональной группы изображают внутри одного из прямоугольников (большого размера) или помещают на поле схемы с соответствующей надписью, например: «Схема блока АБВГ.ХХХХХХ.ХХХ».

Устройства, имеющие самостоятельную принципиальную схему, выполняют на схемах в виде фигуры сплошной линией, равной по толщине линиям связи (допускается в два раза толще линии связи).

При оформлении схем изделия, в состав которых входят устройства, имеющие самостоятельные принципиальные схемы, каждое такое устройство рассматривают как элемент схемы изделия и изображают его в виде прямоугольника или условного графического обозначения, ему присваивают позиционное обозначение и записывают в перечень элементов одной позицией.

При проектировании изделия, в которое входят несколько разных устройств, на каждое устройство рекомендуется выполнять самостоятельную принципиальную схему.

На устройства, которые могут быть применены в других изделиях или самостоятельно, следует выполнять самостоятельные принципиальные схемы.

23.7.2. Графические обозначения

При выполнении схем применяют следующие графические обозначения:

- условные графические обозначения (УГО), установленные в стандартах ЕСКД, а также построенные на их основе;

- прямоугольники;
- упрощенные внешние очертания (в том числе аксонометрические).

При необходимости используют нестандартизованные УГО. При применении нестандартизованных УГО и упрощенных внешних очертаний на схеме приводят соответствующие пояснения.

УГО, для которых установлено несколько допустимых (альтернативных) вариантов выполнения, различающихся геометрической формой или степенью детализации, следует применять, исходя из вида и типа разрабатываемой схемы в зависимости от информации, которую необходимо передать на схеме графическими средствами. При этом на всех схемах одного типа, входящих в комплект документации, должен быть применен один выбранный вариант обозначения.

УГО элементов изображают в размерах, установленных в стандартах на условные графические обозначения. УГО, соотношения размеров которых приведены в соответствующих стандартах на модульной сетке, должны изображаться на схемах в размерах, определяемых по вертикали и горизонтали количеством шагов модульной сетки. Шаг модульной сетки для каждой схемы может быть любым, но одинаковым для всех элементов и устройств данной схемы.

УГО элементов, размеры которых в указанных стандартах не установлены, должны изображаться на схеме в размерах, в которых они выполнены в соответствующих стандартах на условные графические обозначения. Размеры УГО, а также толщины их линий должны быть одинаковыми на всех схемах для данного изделия. Все размеры графических обозначений допускается пропорционально изменять. УГО элементов, используемых как составные части обозначений других элементов (устройств), допускается изображать уменьшенными по сравнению с остальными элементами. Квалифицирующие символы (световой поток и т. д.) при поворотах УГО не должны менять своей ориентации (рис. 23.5).



Рис. 23.5

Графические обозначения на схемах следует выполнять линиями той же толщины, что и линии связи.

УГО элементов изображают на схеме в положении, в котором они приведены в соответствующих стандартах, или повернутыми на угол, кратный 90° , если в соответствующих стандартах отсутствуют специальные указания. Допускается поворачивать УГО на угол, кратный 45° , или изображать зеркально повернутыми.

Если при повороте или зеркальном изображении УГО может нарушиться смысл или удобочитаемость обозначения, то такие обозначения должны быть изображены в положении, в котором они приведены в соответствующих стандартах. УГО, содержащие цифровые или буквенно-цифровые обозначения, допускается поворачивать против часовой стрелки только на угол 90 или 45° .

23.7.3. Графические обозначения элементов цифровой и аналоговой техники

Элемент цифровой техники – цифровая или микропроцессорная микросхема, ее элемент или компонент; цифровая микросборка, ее элемент или компонент. УГО такого элемента в соответствии с ГОСТ 2.743-91 имеет форму прямоугольника, к которому подводят линии выводов. УГО может содержать три поля: основное и два дополнительных, которые располагают слева и справа от основного (рис. 23.6). УГО может состоять только из основного поля или из основного поля и одного дополнительного.

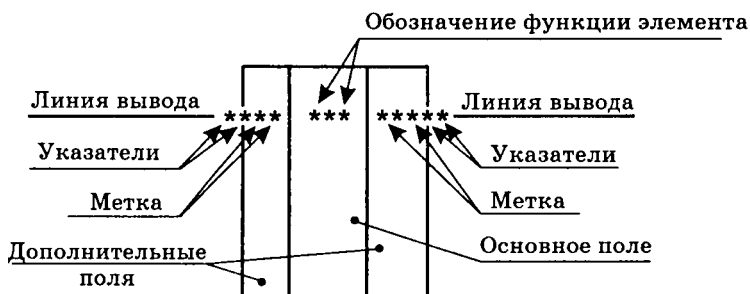


Рис. 23.6. Построение УГО элементов цифровой и аналоговой техники

В первой строке основного поля помещают обозначение функции, выполняемой элементом. В дополнительных полях помещают информацию о назначениях выводов (метки выводов, указатели). Допуска-

ются дополнительные поля разделять горизонтальной чертой на зоны. Основное и дополнительные поля могут быть не отделены линией.

Входы элемента изображают с левой стороны УГО, выходы с правой стороны УГО. Двухнаправленные выходы и входы, не несущие логической информации, изображают с правой или с левой стороны УГО. При подведении линий выводов к контуру УГО не допускается: проводить их на уровне сторон прямоугольника; проставлять на них у контура УГО стрелки, указывающие направление информации.

Допускается другая ориентация УГО, при которой входы располагаются сверху, выходы – снизу (рис. 23.7).

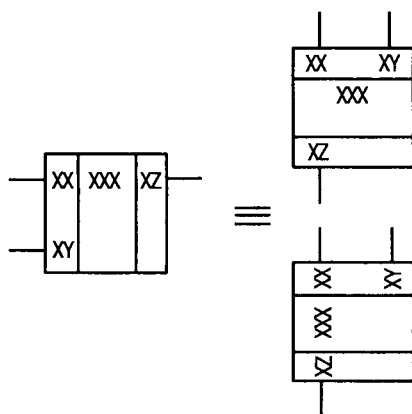


Рис. 23.7. Ориентация УГО элементов цифровой и аналоговой техники

Размеры УГО должны быть кратны шагу модульной сетки и зависят от числа линий выводов, числа строк информации в основном и дополнительном полях, наличия дополнительных полей, числа знаков, помещаемых в одной строке внутри УГО, размера шрифта.

Обозначение функций, выполняемых элементом, образуют из прописных букв латинского алфавита, арабских цифр и специальных знаков, записанных без пробелов (табл. 23.1).

При использовании обозначений функций, не установленных ГОСТ 2.743, их необходимо пояснять на поле схемы. Количество знаков в обозначении функции не ограничено, однако надо стремиться к их минимальному числу при сохранении однозначности понимания каждого обозначения.

Таблица 23.1



Обозначение функций элементов цифровой техники

Наименование	Обозначение
1. Буфер	BUF
2. Вычислитель:	CP
секция вычислителя	CPS
вычислительное устройство	CPU
3. Вычитатель	P-Q или SUB
4. Делитель	DIV
5. Демодулятор	DM
6. Демультимплексор	DX
7. Дешифратор	DC
8. Дискриминатор	DIC
9. Дисплей	DPY
10. Интерфейс периферийный программируемый	PPI
11. Инвертор, повторитель	1
12. Компаратор	COMP
13. Микропроцессор	MPU
14. Модулятор	MD
15. Модификатор	MOD
16. Память	M
17. Главная память	MM
18. Основная память	GM
19. Быстродействующая память	FM
20. Память типа «first-in», «first out»	FIFO
21. Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ):	ROM
программируемое ПЗУ (ППЗУ)	PROM
ППЗУ с возможностью многократного программирования (РЭПЗУ)	RPROM
репрограммируемое ППЗУ с ультрафиолетовым стиранием (РФПЗУ)	OVPROM
22. Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) с произвольной выборкой:	RAM
ОЗУ с произвольной выборкой статическое (СОЗУ)	SRAM
ОЗУ с произвольной выборкой динамическое (ДОЗУ)	DRAM
энергонезависимое ОЗУ (ЭНОЗУ)	NVRAM
23. Ассоциативное запоминающее устройство	CAM

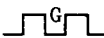




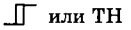
Продолжение табл. 23.1

Наименование	Обозначение
24. Программируемая логическая матрица (ПЛИМ)	PLM
25. Преобразователь	X/Y
Примечания:	
1. Буквы X и Y могут быть заменены обозначениями представляемой информации на входах и выходах преобразователя, например:	
аналоговый	Λ или ○ или A
цифровой	# или D
двоичный	BIN
десятичный	DEC
двоично-десятичный	BCD
восьмеричный	OCT
шестнадцатеричный	HEX
код Грея	GRAY
семисегментный	7SEG
уровень ТТЛ	TTL
уровень МОП	MOS
уровень ЭСЛ	ECL
2. Допускаются обозначения:	
цифро-аналоговый преобразователь	DAC
аналого-цифровой преобразователь	ADC
26. Приемопередатчик шинный	RTX
27. Процессор	P
Секция процессора	PS
28. Регистр	RG
Сдвиговый регистр n -разрядный	SRG $_n$
29. Сумматор	Σ или SM
30. Счетчик:	CTR
счетчик n -разрядный	CTR $_n$
счетчик по модулю n	CTRDIV $_n$
31. Триггер	T
Двухступенчатый триггер	TT
Примечание. Допускается не указывать обозначение функции при выполнении УГО триггера	

Продолжение табл. 23.1

Наименование	Обозначение
32. Умножитель	р или MPL
33. Усилитель	> или ▷
34. Устройство	DEV
35. Устройство арифметическо-логическое	ALU
36. Устройство приоритета кодирующее	HPRI
37. Коммутирующее устройство, электронный ключ	SW
38. Шина	BUS, B
39. Шифратор	CD
40. Элемент задержки	DEL или 
41. Элемент логический •большинство• •исключающее ИЛИ• •логическое И• •логическое ИЛИ• •n и только n• •нечетность• •четность•	$\geq n$ или $\geq n$ $\geq n/2$ EXOR или =1 & ≥ 1 или 1 $= n$ $2k + 1$ или $2K + 1$ $2k$ или $2K$
42. Элемент монтажной логики: •монтажное ИЛИ• •монтажное И•	$1 \diamond$ или $1 \square$ $\& \diamond$ или $\& \square$
43. Элемент моностабильный, мультивибратор с перезапуском без перезапуска	
44. Элемент нелогический стабилизатор, общее обозначение стабилизатор напряжения стабилизатор тока	* *ST *STU *STI
45. Наборы нелогических элементов: резисторов конденсаторов индуктивностей диодов	*R *C *L *D

Окончание табл. 23.1

Наименование	Обозначение
транзисторов	*Т
трансформаторов	*TR
индикаторов	по ГОСТ 2.764
предохранителей	*FU
комбинированных, например диодно-резисторных	*DR
46. Элемент нестабильный, генератор:	
общее обозначение	
<i>Примечание.</i> Если форма сигнала очевидна, допускается обозначение «G» без 	
с синхронизацией пуска	
с синхронизацией останова по окончанию импульса	
с синхронизацией пуска и останова	
генератор серии из прямоугольных импульсов	Gn
генератор с непрерывной последовательностью импульсов	GN
генератор линейно-изменяющихся сигналов	G/
генератор синусоидального сигнала	GSIN
47. Элемент пороговый, гистерезисный	 или TH

Выводы элементов подразделяют на несущие и не несущие логическую информацию. Выводы, несущие логическую информацию, подразделяют на статические и динамические, а также на прямые и инверсные. Свойства выводов обозначают указателями (табл. 23.2).

Функциональное назначение выводов элементов обозначают при помощи меток выводов. Метку вывода образуют из прописных букв латинского алфавита, арабских цифр и специальных знаков, записанных в одной строке без пробелов. Количество знаков в метке не ограничено, однако по возможности должно быть минимально при сохранении однозначности понимания каждого обозначения. Обозначения основных меток выводов элементов приведены в ГОСТ 2.743.

Нумерацию выводов элементов приводят над их линией выводов слева для входов или справа для выходов от контура УГО или указателя вывода. Допускается проводить нумерацию выводов элементов в разрыве линии вывода.

Таблица 23.2

Указатели выводов элементов

Наименование	Обозначение	
	Форма 1	Форма 2
Прямой статический вход		
Прямой статический выход		
Инверсный статический вход		
Инверсный статический выход		
Прямой динамический вход		
Инверсный динамический вход		
Статический вход с указателем полярности		
Статический выход с указателем полярности		
Динамический вход с указателем полярности		
Вывод, не несущий логической информации		

Примечание. Форма 1 является предпочтительной.

Примеры УГО элементов приведены в табл. 23.3.

Условные графические обозначения аналоговых элементов строятся по тем же правилам, что и у элементов цифровой техники. УГО аналогового элемента должно иметь форму прямоугольника (см. рис. 23.6).

Обозначения основных функций, выполняемых аналоговыми элементами, приведены в табл. 23.4.

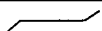




Таблица 23.3

Примеры УГО элементов цифровой техники

Наименование	Обозначение
Элемент «НЕТ»	
Элемент ЗИ-НЕ	
Элемент 2И-НЕ с открытым коллекторным выходом и повышенной нагрузочной способностью	
Элемент ЗИЛИ-НЕТ	
Элемент проверки четности или нечетности	
Четыре шинных усилителя с двухпороговым входом и выходом на три состояния с общим входом разрешения третьего состояния	
Двунаправленный шинный приемопередатчик восьмиканальный	

Таблица 23.4

Обозначение функций аналоговых элементов (ГОСТ 2.759-82)

Наименование	Обозначение
1. Общее обозначение функции	$F(X_1, X_2, \dots, X_n)$ или $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
2. Выбор максимальной переменной	MAX или max
3. Выбор минимальной переменной	MIN или min
4. Генерирование	G
5. Детектирование	DK
6. Деление	$X : Y$ или $x : y$
7. Деление частоты	:FR или :fr
8. Дифференцирование	D/DT или d/dt
9. Зона нечувствительности	
10. Извлечение корня	$X \uparrow 0.5$ или \sqrt{x}
11. Интегрирование	INT или \int
12. Насыщение	
13. Логарифмирование	LOG или log
14. Образование модуля	X или x
15. Переключение, коммутирование (ключ, коммутатор):	SW
замыкание	SWM или 
размыкание	SWB или 
переключение	SWT или 
16. Показательная функция	$X \uparrow Y$ или x^y
17. Пороговый элемент	\square или TH
18. Преобразование	см. табл.
19. Сравнение (компаратор, схемы сравнения)	= =
20. Суммирование	SM или S
21. Тригонометрические функции, например, синус	SIN или sin
22. Умножение	XY или xy

Окончание табл. 23.4

Наименование	Обозначение
23. Умножение-деление	$XY:Z$ или $xу:z$
24. Экспонента	EXP или e^x
25. Блок постоянного запаздывания	DL или ---
26. Блок переменного запаздывания	DVL или $\text{--- } \nearrow$
27. Воспроизведение коэффициентов	K
28. Многофункциональное преобразование	MF
29. Фильтрация	FF
30. Формирование	F
31. Усиление	$>$ или \triangleright
32. Преобразование цифро-аналоговое	$\#/\Lambda$
33. Преобразование аналого-цифровое	$\Lambda/\#$
34. Запоминание аналоговой величины (элемент слежения и хранения)	$M \cap$ или $M \Lambda$

Выводы элементов могут быть обозначены указателями и метками. Указатели изображают в соответствии с табл. 23.2. Метки образуют из прописных букв латинского алфавита, арабских цифр и специальных знаков и помещают в дополнительных полях (табл. 23.5).

Таблица 23.5

Основные метки выводов аналоговых элементов

Наименование	Обозначение
1. Начальное значение интегрирования	I
2. Установка начального значения	S
3. Установка в состояние «0»	R
4. Установка в исходное состояние (сброс)	SR
5. Поддержание текущей величины сигнала	H
6. Строб, такт	C
7. Пуск	ST
8. Балансировка (коррекция «0»)	NC
9. Коррекция частотная	FC

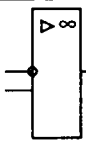
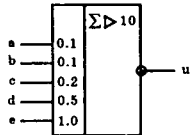
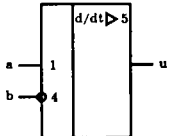
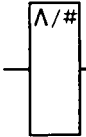
Окончание табл. 23.5

Наименование	Обозначение
<p>10. Питание от источника напряжения</p> <p>Допускается: перед буквой U (или V) проставлять номинал напряжения;</p> <p>после буквы U (или V) проставлять поясняющую информацию, например:</p> <p>указатель питания цифровой части элемента</p> <p>признак информационного питания</p>	<p>U или V</p> <p>U#</p> <p>UD</p>
<p>11. Общий вывод (общее обозначение)</p> <p>для аналоговой части элемента</p> <p>для цифровой части элемента</p>	<p>OV</p> <p>OV∩ или OVA</p> <p>OV#</p>

Примеры обозначений аналоговых элементов приведены в табл. 23.6.

Таблица 23.6

Примеры обозначений аналоговых элементов

Наименование	Обозначение
Операционный усилитель	
<p>Суммирующий усилитель</p> <p>$U = -10(0,1a + 0,1b + 0,2c + 0,5d + 1,0e)$</p>	
<p>Дифференцирующий усилитель</p> <p>$U = 5 \frac{d}{dt}(a + 4b)$</p>	
Аналого-цифровой преобразователь	

23.7.4. Линии связи

Линии связи выполняют толщиной от 0,2 до 1,0 мм в зависимости от форматов схемы и размеров графических обозначений. Рекомендуемая толщина линий от 0,3 до 0,4 мм.

Линии связи должны состоять из горизонтальных и вертикальных отрезков и иметь наименьшее количество изломов и взаимных пересечений. В отдельных случаях допускается применять наклонные отрезки линий связи, длину которых следует по возможности ограничивать.

Линии связи, переходящие с одного листа на другой, следует обрывать за пределами изображения схемы без стрелок. Рядом с обрывом линии связи должно быть указано обозначение или наименование, присвоенное этой линии (номер провода, обозначение сигнала и т. п.), и далее в круглых скобках номер листа схемы.

Линии связи должны быть показаны, как правило, полностью. Линии связи в пределах одного листа, если они затрудняют чтение схемы, допускается обрывать. Обрывы линий связи заканчивают стрелками. Около стрелок указывают обозначение или характеристики прерванных линий, например: +15 В и т. д.

23.7.5. Перечень элементов

Перечень элементов оформляют в виде таблицы (рис. 23.8), заполняемой сверху вниз, которую помещают на первом листе схемы или выполняют в виде самостоятельного документа.

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание

Dimensions: Row height 15, Column widths 20, 110, 10, Total width 185, Minimum row height 8 min.

Рис. 23.8

В графах таблицы указывают следующие данные:

- в графе «Поз. обозначение» – позиционные обозначения элементов, устройств и функциональных групп;

- в графе «Наименование» для элемента или устройства приводятся наименование и обозначение документа, на основании которого этот элемент или устройство применены (основной конструкторский документ, государственный стандарт, отраслевой стандарт, технические условия); для функциональной группы – наименование;
- в графе «Примечание» – технические данные элемента, не содержащиеся в его наименовании, значения параметров, подбиаемые при регулировании, и др.

При выполнении перечня элементов на первом листе схемы его располагают, как правило, над основной надписью. Расстояние между перечнем элементов и основной надписью должно быть не менее 12 мм. Продолжение перечня элементов помещают слева от основной надписи, повторяя головку таблицы.

При выпуске перечня элементов в виде самостоятельного документа его код должен состоять из буквы П и кода схемы, например, ПЭЗ. При этом в основной надписи (графа 1) указывают наименование изделия, а также наименование документа «Перечень элементов». Перечень элементов записывают в спецификации после схемы, к которой он выпущен.

Перечень элементов в виде самостоятельного документа выполняют на формате А4. Основную надпись и дополнительные графы к ней выполняют по ГОСТ 2.104-68 (форма 2 и 2а).

Элементы в перечень записывают группами в алфавитном порядке буквенных позиционных обозначений (конденсаторы, микросхемы, дроссели и т. д.). Например, конденсаторы (С) записываются раньше микросхем (D, DA, DD), так как буква С в латинском алфавите стоит до буквы D. В пределах каждой группы, имеющей одинаковые буквенные позиционные обозначения, элементы располагают по возрастанию порядковых номеров.

Для облегчения внесения изменений допускается оставлять несколько незаполненных строк между отдельными группами элементов, а при большом количестве элементов внутри групп – и между элементами.

При записи элементов одинакового наименования, отличающихся техническими характеристиками и другими данными и имеющих одинаковое буквенное позиционное обозначение, допускается в графе «Наименование» записывать: наименование этих элементов в виде общего наименования; в общем наименовании – наименование, тип и обозначение документа, на основании которого эти элементы применены.

При присвоении позиционных обозначений элементам в пределах групп устройств или при вхождении в изделие одинаковых функци-

ональных групп в перечень элементов, элементы, относящиеся к устройствам и функциональным группам, записывают отдельно. Запись элементов, входящих в каждое устройство (функциональную группу), начинают с наименования устройства или функциональной группы, которое записывают в графе «Наименование» и подчеркивают. Ниже наименования устройства (функциональной группы) должна быть оставлена одна свободная строка, выше – не менее одной свободной строки.

Если в изделии имеется несколько одинаковых устройств или функциональных групп, то в перечне указывают количество элементов, входящих в одно устройство (функциональную группу). Общее количество одинаковых устройств (функциональных групп) указывают в графе «Кол.» на одной строке с заголовком.

Если на схеме изделия имеются элементы, не входящие в устройства (функциональные группы), то при заполнении перечня элементов вначале записывают эти элементы без заголовка, а затем устройства, не имеющие самостоятельных принципиальных схем, и функциональные группы с элементами, входящими в них.

Если в изделии имеются элементы, не являющиеся самостоятельными конструкциями, то при записи их в перечень графу «Наименование» не заполняют, а в графе «Примечание» помещают поясняющую надпись или ссылку на поясняющую надпись на поле схемы (рис. 23.9).

Поз. обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
С5		1	Емкость монтажа
ДР1		1	См. п.5

Рис. 23.9

Пример оформления перечня элементов приведен в приложении Е.

23.7.6. Текстовая информация

На схемах допускается помещать различные технические данные, характер которых определяется назначением схемы. Такие сведения указывают либо около графических обозначений (по возможности справа или сверху), либо на свободном поле схемы. Около графических обозначений элементов и устройств помещают, например, номи-

нальные значения их параметров, а на свободном поле схемы – диаграммы, таблицы, текстовые указания (диаграммы последовательности временных процессов, циклограммы, таблицы замыкания контактов коммутирующих устройств, указания о специфических требованиях к монтажу и т. п.).

Текстовые данные приводят на схеме в тех случаях, когда содержащиеся в них сведения нецелесообразно или невозможно выразить графически или условными обозначениями.

Содержание текста должно быть кратким и точным. В надписях на схемах не должны применяться сокращения слов, за исключением общепринятых или установленных в стандартах.

Текстовые данные в зависимости от их содержания и назначения могут быть расположены:

- рядом с графическими обозначениями;
- внутри графических обозначений;
- над линиями связи;
- в разрыве линий связи;
- рядом с концами линий связи;
- на свободном поле схемы.

Текстовые данные, относящиеся к линиям, ориентируют параллельно горизонтальным участкам соответствующих линий. При большой плотности схемы допускается вертикальная ориентация данных.

На схеме около условных графических обозначений элементов, требующих пояснения в условиях эксплуатации (например, переключатели, потенциометры, регуляторы и т. п.), помещают соответствующие надписи, знаки или графические обозначения. Надписи, знаки или графические обозначения, предназначенные для нанесения на изделие, на схеме заключают в кавычки. Если на изделие должна быть нанесена надпись в кавычках, то на поле схемы приводят соответствующие указания.

На поле схемы над основной надписью допускается помещать необходимые технические указания, например, требования о недопустимости совместной прокладки некоторых проводов, жгутов, кабелей, величины минимально допустимых расстояний между проводами, жгутами, жгутами и кабелями, данные о специфичности прокладки и защиты проводов, жгутов, кабелей и т. п. При выполнении схемы на нескольких листах технические указания, являющиеся общими для всей схемы, следует располагать на свободном поле (по возможности над основной надписью) первого листа схемы, а технические указания, относящиеся к отдельным элементам, располагают или в непосредственной близости от изображения элемента или на свободном поле того листа, где они являются наиболее необходимыми для удобства чтения схемы.

23.8. Структурные схемы

На структурной схеме изображают в виде прямоугольников произвольных размеров или УГО все основные функциональные части изделия (элементы, устройства и функциональные группы) и основные взаимосвязи между ними. Графическое построение схемы должно давать наиболее наглядное представление о последовательности взаимодействия функциональных частей. На линиях взаимосвязи рекомендуется стрелками обозначать направление хода процессов, происходящих в изделии. На схеме указывают наименования функциональных частей изделия, которые, как правило, вписывают внутрь прямоугольников.

Допускается помещать на схеме поясняющие надписи, диаграммы или таблицы, определяющие последовательность процессов во времени, а также указывать параметры в характерных точках (значения токов, напряжений, формы импульсов, математические зависимости и т. п.).

23.9. Функциональные схемы

На функциональной схеме изображают функциональные части изделия (элементы, устройства и функциональные группы), участвующие в процессе, иллюстрируемом схемой, и связи между этими частями. Функциональные части и связи изображают в виде условных графических обозначений, установленных в стандартах ЕСКД. Отдельные функциональные части допускается изображать в виде прямоугольников. Графическое построение схемы должно давать наиболее наглядное представление о последовательности процессов, происходящих в изделии.

Функциональным частям изделия должны быть присвоены те же позиционные обозначения, что и на принципиальной схеме. Для частей, изображенных в виде прямоугольника, дополнительно указывается наименование. Обозначение документа, на основании которого применено устройство, и тип элемента допускается не указывать. Наименования, типы и обозначения функциональных частей рекомендуется вписывать в прямоугольники.

На схеме рекомендуется приводить технические характеристики функциональных частей (рядом с графическими обозначениями или на свободном поле схемы), а также поясняющие надписи, диаграммы или таблицы, определяющие последовательность процессов во времени. Указываются также параметры в характерных точках (ве-

личины токов, напряжений, параметры импульсов, математические зависимости и т. д.).

23.10. Принципиальные схемы

На принципиальной схеме изображают все электрические элементы и устройства, необходимые для осуществления и контроля в изделии заданных электрических процессов, все электрические связи между ними, а также электрические элементы (соединители, зажимы и т. п.), которыми заканчиваются входные и выходные цепи. Элементы или устройства, используемые в изделии частично, допускается изображать на схеме неполностью, ограничиваясь изображением только используемых частей или элементов.

Элементы и устройства, условные графические обозначения (УГО) которых установлены в стандартах ЕСКД, изображают на схеме в виде этих УГО.

Схемы выполняют для изделий, находящихся в отключенном состоянии. В обоснованных случаях допускается отдельные элементы схемы изображать в выбранном рабочем положении с указанием на поле схемы режима, для которого изображены эти элементы.

Элементы и устройства изображают на схеме совмещенным или разнесенным способом. При совмещенном способе составные части элементов или устройств изображают в непосредственной близости друг к другу, а при разнесенном способе – в разных местах таким образом, чтобы отдельные цепи изделия были изображены наиболее наглядно.

Схемы выполняют в многолинейном или однолинейном изображении. При многолинейном изображении каждую цепь изображают отдельной линией, а элементы, содержащиеся в этих цепях, – отдельными условными графическими обозначениями (рис. 23.10, *а*). При однолинейном изображении цепи, выполняющие идентичные функции, изображают одной линией, а одинаковые элементы этих цепей – одним условным графическим обозначением (рис. 23.10, *б*).

Для упрощения схемы допускается несколько электрически не связанных линий связи сливать в линию групповой связи, но при подходе к контактам (элементам) каждую линию связи изображают отдельной линией. Каждую линию помечают в месте слияния, а при необходимости, и на обоих концах условными обозначениями (цифрами, буквами или сочетанием букв и цифр) или обозначениями, принятыми для электрических цепей. Обозначения линий проставляют в соответствии с требованиями, приведенными в ГОСТ 2.721.

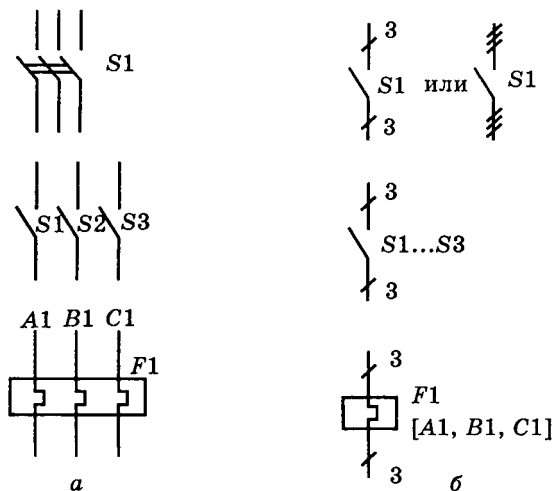


Рис. 23.10. Примеры многолинейного (а) и однолинейного (б) изображений цепей

Линии электрической связи, сливаемые в линию групповой связи, как правило, не должны иметь разветвлений, т. е. всякий условный номер должен встречаться на линии групповой связи два раза. При необходимости разветвлений их количество указывают после порядкового номера линии через дробную черту (рис. 23.11).

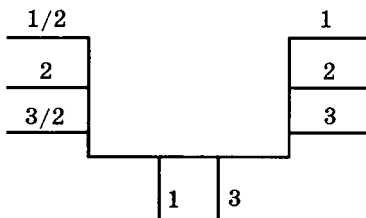


Рис. 23.11

Каждый элемент и устройство, имеющее самостоятельную принципиальную схему и рассматриваемое как элемент, входящие в изделие и изображенные на схеме, должны иметь позиционное обозначение в соответствии с ГОСТ 2.721.

Устройствам, не имеющим самостоятельных принципиальных схем, и функциональным группам рекомендуется присваивать обозначения в соответствии с ГОСТ 2.710.

Буквенные обозначения в электрических схемах регламентируются ГОСТ 2.710-81. Для построения позиционных обозначений элементов применяются прописные буквы латинского алфавита, арабские цифры, а также знаки (квалифицирующие символы) – табл. 23.7.

Таблица 23.7

Тип условного обозначения	Квалифицирующий символ
Обозначение высшего уровня – устройство	=
Обозначение высшего уровня – функциональная группа	≠ или #
Конструктивное обозначение	+
Обозначение элемента (позиционное обозначение)	–
Обозначение электрического контакта	:
Адресное обозначение	()*

* Обозначение заключают в круглые скобки

Порядок записи составного обозначения определяется порядком вхождения, например: $\neq T1 = A2 - R5$ означает, что резистор R5 входит в устройство A2, входящее в функциональную группу T2.

Элемент может быть обозначен одной буквой – общим кодом элементов данного вида или двумя буквами – кодом данного конкретного элемента. Однобуквенные коды видов элементов и некоторые примеры двухбуквенных кодов приведены в табл. 23.8.

Таблица 23.8

Буквенно-цифровые обозначения в электрических схемах по ГОСТ 2.710–81

Группа видов и примеры видов элементов	Буквенный код
Устройство (общее обозначение)	A
Преобразователи неэлектрических величин в электрические и наоборот	B
Громкоговоритель	BA
Магнитострикционный элемент	BB



Продолжение табл. 23.8

Группа видов и примеры видов элементов	Буквенный код
Сельсин-датчик	BC
Детектор ионизирующего излучения	BD
Сельсин-приемник	BE
Телефон (капсюль)	BF
Тепловой датчик	BK
Фотоэлемент	BL
Микрофон	BM
Датчик давления	BP
Пьезоэлемент	BQ
Датчик частоты вращения (тахогенератор)	BR
Датчик скорости	BV
Конденсаторы	C
Схемы интегральные, микросборки	D
Схема интегральная аналоговая	DA
Схема интегральная цифровая, логический элемент	DD
Устройство хранения информации	DS
Устройство задержки	DT
Элементы разные	E
Нагревательный элемент	EK
Лампа осветительная	EL
Разрядники, предохранители, устройства защитные	F
Предохранитель плавкий	FU
Дискретный элемент защиты по напряжению, разрядник	FV
Генераторы, источники питания	G
Батарея	GB
Устройства индикационные и сигнальные	H
Прибор звуковой сигнализации	HA
Индикатор символьный	HG
Прибор световой сигнализации	HL
Реле, контакторы, пускатели	K
Катушки индуктивности, дроссели	L
Двигатели	M
Приборы, измерительное оборудование	P
Амперметр	PA

Продолжение табл. 23.8

Группа видов и примеры видов элементов	Буквенный код
Частотомер	PF
Счетчик активной энергии	PI
Счетчик реактивной энергии	PK
Омметр	PR
Регистрирующий прибор	PS
Часы, измеритель времени действия	PT
Вольтметр	PV
Ваттметр	PW
Выключатели и разъединители в силовых цепях	Q
Резисторы	R
Терморезистор	RK
Потенциометр	RP
Шунт измерительный	RS
Варистор	RU
Устройства коммутационные	S
Выключатель, переключатель	SA
Выключатель кнопочный	SB
Выключатель автоматический	SF
Выключатель, срабатывающий от различных воздействий:	
уровня	SL
давления	SP
положения (путевой)	SQ
частоты вращения	SR
температуры	SK
Трансформаторы, автотрансформаторы	T
Трансформатор тока	TA
Трансформатор напряжения	TV
Устройства связи. Преобразователи электрических величин в электрические	U
Модулятор	UV
Дискриминатор	UI
Демодулятор	UR
Преобразователь, частотный инвертор, генератор частоты, выпрямитель	UZ



Окончание табл. 23.8

Группа видов и примеры видов элементов	Буквенный код
Приборы электровакуумные и полупроводниковые	V
Диод, стабилитрон	VD
Прибор электровакуумный	VL
Тиристор	VS
Транзистор	VT
Линии и элементы СВЧ, антенны	W
Соединения контактные	X
Токосъемник, контакт скользящий	XA
Штырь	XP
Гнездо	XS
Соединение разборное	XT
Устройства механические с электромагнитным приводом	Y
Электромагнит	YA
Тормоз с электромагнитным приводом	YB
Муфта с электромагнитным приводом	YC
Устройства оконечные, фильтры, ограничители	Z
Ограничитель	ZL
Фильтр кварцевый	ZQ

Позиционные обозначения элементам (устройствам) следует присваивать в пределах изделия. Порядковые номера элементам (устройствам) должны присваиваться, начиная с единицы, в пределах группы элементов (устройств), которые на схеме имеют одинаковое буквенное позиционное обозначение, например, R_1, R_2, R_3 и т. д., C_1, C_2, C_3 и т. д.

Порядковые номера должны быть присвоены в соответствии с последовательностью расположения элементов или устройств на схеме сверху вниз в направлении слева направо. При необходимости допускается изменять последовательность присвоения порядковых номеров в зависимости от размещения элементов в изделии, направления прохождения сигналов или функциональной последовательности процесса.

Позиционные обозначения проставляют на схеме рядом с условными графическими обозначениями элементов и устройств с правой

стороны или над ними. При изображении разнесенным способом позиционное обозначение элемента или устройства проставляют около каждой составной части.

На схеме изделия, в состав которого входят устройства, не имеющие самостоятельных принципиальных схем, допускается позиционные обозначения элементам присваивать в пределах каждого устройства. Если в состав изделия входит несколько одинаковых устройств, то позиционные обозначения элементам следует присваивать в пределах этих устройств. Элементам, не входящим в устройства, позиционные обозначения присваивают начиная с единицы, по изложенным выше правилам.

На схеме изделия, в состав которого входят функциональные группы, вначале присваивают позиционные обозначения элементам, не входящим в функциональные группы, и затем элементам, входящим в функциональные группы. При наличии в изделии нескольких одинаковых функциональных групп позиционные обозначения элементов, присвоенные в одной из этих групп, следует повторять во всех последующих группах. Обозначение функциональной группы, присвоенное в соответствии с ГОСТ 2.710, указывают около изображения функциональной группы (сверху или справа).

При изображении на схеме элемента или устройства разнесенным способом позиционное обозначение элемента или устройства проставляют около каждой составной части (рис. 23.12).

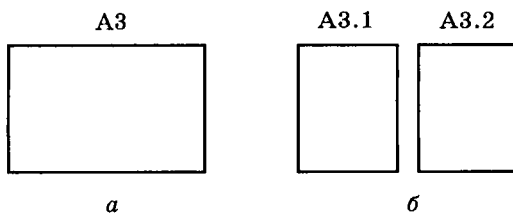


Рис. 23.12. Совмещенный (а) и разнесенный (б) способы изображения устройства

Допускается, если это не усложняет схему, отдельно изображенные части элементов соединять линией механической связи, указывающей на принадлежность их к одному элементу. В этом случае позиционные обозначения элементов проставляют у одного или у обоих концов линии механической связи.

При изображении отдельных элементов устройств в разных местах в состав позиционных обозначений этих элементов должно быть включено позиционное обозначение устройства, в которое они входят, например, = А3 – С5 – конденсатор С5, входящий в устройство А3.

При разнесенном способе изображения функциональной группы (при необходимости и при совмещенном способе) в состав позиционных обозначений элементов, входящих в эту группу, должно быть включено обозначение функциональной группы, например, $\neq T1 - C5$ – конденсатор $C5$, входящий в функциональную группу $T1$.

При однолинейном изображении около одного УГО, заменяющего несколько условных графических обозначений одинаковых элементов или устройств, указывают позиционные обозначения всех этих элементов или устройств. Если одинаковые элементы или устройства находятся не во всех цепях, изображенных однолинейно, то справа от позиционного обозначения или под ним в квадратных скобках указывают обозначения цепей, в которых находятся эти элементы или устройства (см. рис. 23.10, б).

На принципиальной схеме должны быть однозначно определены все элементы и устройства, входящие в состав изделия и изображенные на схеме. Данные об элементах должны быть записаны в перечень элементов. При этом связь перечня с условными графическими обозначениями элементов должна осуществляться через позиционные обозначения. Допускается в отдельных случаях, установленных в государственных или отраслевых стандартах, все сведения об элементах помещать около условных графических обозначений.

На схеме рекомендуется указывать характеристики входных и выходных цепей изделия (частоту, напряжение, силу тока, сопротивление, индуктивность и т. п.), а также параметры, подлежащие измерению на контрольных контактах, гнездах и т. п. Если невозможно указать характеристики или параметры входных и выходных цепей изделия, то рекомендуется указывать наименование цепей или контролируемых величин.

На схеме могут указываться адреса внешних соединений входных и выходных цепей изделия. Адрес должен обеспечивать однозначность присоединения, например, если выходной контакт изделия должен быть соединен с пятым контактом третьего соединителя устройства A , то адрес должен быть записан следующим образом: $=A - X3:5$. Допускается указывать адрес в общем виде, если будет обеспечена однозначность присоединения, например, «Прибор A ».

Характеристики входных и выходных цепей изделия, а также адреса их внешних подключений рекомендуется записывать в таблицы, помещаемые взамен УГО входных и выходных элементов – соединителей, плат и т. п. (рис. 23.13). Каждой таблице присваивается позиционное обозначение элемента, взамен УГО которого она помещена. Над таблицей допускается указывать УГО контакта – гнезда или штыря. Размеры граф произвольные. Таблицы допускается выполнять разнесенным способом. Порядок расположения контактов в таблице определяется удобством построения схемы.

X1	Конт.	Цепь	Адрес
—	1	$\Delta f = 0,3...3$ кГц; $R = 600$ Ом	=A1-X1:1
—	2	$u_{\text{вых}} = 0,5$ В; $R = 600$ Ом	=A1-X1:2
—	3	$u_{\text{вых}} = +60$ В; $R_{\text{H}} = 300$ Ом	=A1-X1:3
—	4	$u_{\text{вых}} = +20$ В; $R_{\text{H}} = 1$ кОм	=A1-X1:4

Рис. 23.13

Аналогичные таблицы рекомендуется помещать на линиях, изображающих входные и выходные цепи и не заканчивающихся на схеме соединителями, платами и т. д. В этом случае позиционные обозначения таблицам не присваивают.

Допускается исключать графы «Цепь» и «Адрес», а также вводить дополнительные графы. В графе «Конт.» можно проставлять через запятую несколько последовательных номеров контактов, если они соединены между собой.

При изображении на схеме многоконтактных соединителей допускается применять условные графические обозначения, не показывающие отдельные контакты (ГОСТ 2.755). Сведения о подключении контактов соединителей указывают в таблицах (рис. 23.14). При необходимости в таблице указывают характеристики цепей и адреса внешних соединений. Если таблицы помещены на поле схемы или на последующих листах, то им присваивают позиционные обозначения соединителей, к которым они составлены.

X2

Конт.	Адрес	Цепь	Адрес внешний
1	5	+27 В	=A1 - X1:1
2	20	-27 В	=A1 - X1:2

a

Конт.	Адрес
1	-K1:3
2	-K1:5

a

Рис. 23.14. Указание сведений о подключении соединителей:

a – таблица, помещаемая на свободном поле схемы или на последующих листах схемы; б – таблица, помещаемая около изображения соединителя

При изображении на схеме элементов, параметры которых подбирают при регулировании, около позиционных обозначений этих элементов на схеме и в перечне элементов проставляют звездочки (на-

пример, $R1^*$), а на поле схемы помещают сноску: «* Подбирают при регулировании». В перечень должны быть записаны элементы, параметры которых наиболее близки к расчетным. Допускаемые при подборе предельные значения параметров элементов указывают в перечне в графе «Примечание».

При изображении устройства (или устройств) в виде прямоугольника допускается в прямоугольнике взамен УГО входных и выходных элементов помещать таблицы с характеристиками входных и выходных цепей (рис. 23.15), а вне прямоугольника допускается помещать таблицы с указанием адресов внешних присоединений (рис. 23.16). При необходимости допускается вводить в таблицы дополнительные графы. Каждой таблице присваивают позиционное обозначение элемента, взамен УГО которого она помещена. В таблице взамен слова «Конт.» допускается помещать УГО контакта соединителя.

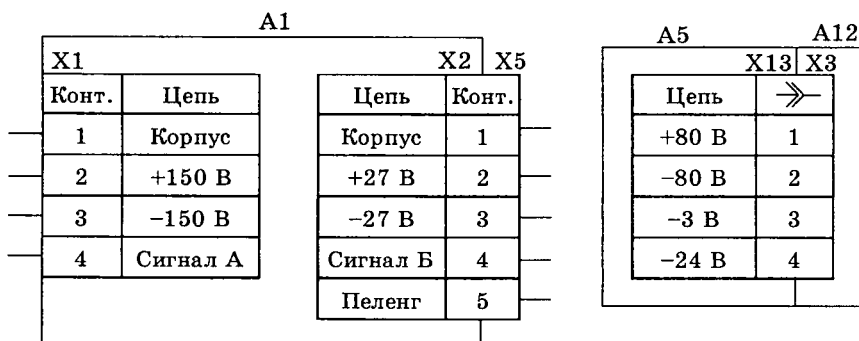


Рис. 23.15

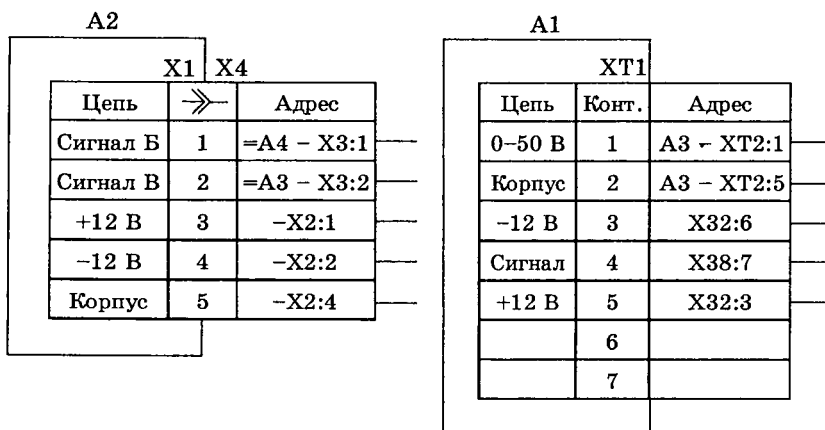


Рис. 23.16

На схеме изделия в прямоугольники, изображающие устройства, допускается помещать структурные или функциональные схемы устройств, либо полностью или частично повторять их принципиальные схемы. Элементы этих устройств в перечень элементов не записывают. Если в изделие входит несколько одинаковых устройств, то схему устройства рекомендуется помещать на свободном поле схемы изделия (а не в прямоугольнике) с соответствующей надписью, например: «Схема блоков А1 – А4».

На поле схемы допускается помещать указания о марках, сечениях и расцветках проводов и кабелей (многожильных проводов, электрических шнуров), которыми должны быть выполнены соединения элементов, а также указания о специфических требованиях к электрическому монтажу данного изделия.

23.11. Схемы подключения

На схеме подключения должны быть изображены изделие, его входные и выходные элементы (соединители, зажимы и т. п.) и подводимые к ним концы проводов и кабелей (многожильных проводов, электрических шнуров) внешнего монтажа, около которых помещают данные о подключении изделия (характеристики внешних цепей, а при необходимости и адреса).

Изделие на схеме изображают в виде прямоугольника, а его входные и выходные элементы – в виде условных графических обозначений. Допускается изображать изделие в виде упрощенных внешних очертаний. Входные и выходные элементы изображают в этом случае в виде упрощенных внешних очертаний.

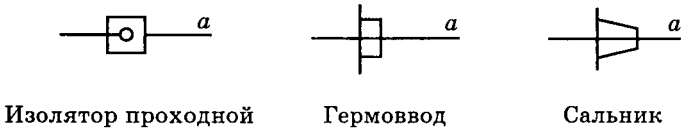
Размещение изображений входных и выходных элементов внутри графического обозначения изделия должно примерно соответствовать их действительному размещению в изделии.

На схеме должны быть указаны позиционные обозначения входных и выходных элементов, присвоенные им на принципиальной схеме изделия.

Вводные элементы (например, сальники, гермовводы, проходные изоляторы), через которые проходят провода или кабели (многожильные провода, электрические шнуры), изображают в виде условных графических обозначений, установленных в стандартах ЕСКД (рис. 23.17).

На схеме следует указывать обозначения входных, выходных или выводных элементов, нанесенные на изделие.

На схеме около условных графических обозначений соединителей, к которым присоединены провода и кабели (многожильные провода, электрические шнуры), допускается указывать наименования этих



Изолятор проходной

Гермоввод

Сальник

Рис. 23.17. УГО вводных элементов:
a – линия, изображающая провод
 (группу проводов, жгут, кабель, электрический шнур)

соединителей и (или) обозначения документов, на основании которых они применены.

Провода и кабели (многожильные провода, электрические шнуры) должны быть показаны на схеме отдельными линиями.

При необходимости на схеме указывают марки, сечения, расцветку проводов, а также марки кабелей (многожильных проводов, электрических шнуров), количество, сечение и занятость жил.

При указании марок, сечений и расцветки проводов в виде условных обозначений на поле схемы расшифровывают эти обозначения.

23.12. Схемы расположения

На схеме расположения изображают составные части изделия, а при необходимости связи между ними, конструкцию, помещение или местность, на которых эти составные части будут расположены.

Составные части изделия изображают в виде упрощенных внешних очертаний или условных графических обозначений.

Провода, группы проводов, жгуты и кабели (многожильные провода, электрические шнуры) изображают в виде отдельных линий или упрощенных внешних очертаний.

Расположение графических обозначений составных частей изделия на схеме должно обеспечивать правильное представление об их действительном размещении в конструкции, помещении, на местности.

При выполнении схемы расположения допускается применять различные способы построения (аксонометрия, план, условная развертка, разрез конструкции и т. п.).

На схеме должны быть указаны:

- для каждого устройства или элемента, изображенных в виде упрощенного внешнего очертания, – их наименование и тип и (или) обозначение документа, на основании которого они применены;

- для каждого элемента, изображенного в виде условного графического обозначения, его тип и (или) обозначение документа.

При большом количестве устройств и элементов рекомендуется эти сведения записывать в перечень элементов. В этом случае около графических обозначений устройств и элементов проставляют позиционные обозначения.

23.13. Схемы алгоритмов

При выполнении схем алгоритмов, программ, данных и систем следует руководствоваться ГОСТ 19.701-90. В соответствии с этим стандартом предусматриваются следующие виды схем:

- схемы данных;
- схемы программ;
- схемы работы систем;
- схемы взаимодействия программ;
- схемы ресурсов системы.

Указанные схемы состоят из имеющих заданное значение символов, краткого пояснительного текста и соединяющих линий. Различают основные и специфические символы. Основные символы могут использоваться во всех случаях. Специфические символы применяются в случае необходимости конкретизировать фактический тип процесса или носителя данных.

При разработке микропроцессорных систем промышленной автоматики обычно приходится разрабатывать схемы программ и схемы работы системы.

Схемы программ отображают последовательность операций в программе и состоят из:

- символов процесса, указывающих фактические операции обработки данных (включая символы, определяющие путь, которого следует придерживаться с учетом логических условий);
- линейных символов, указывающих поток управления;
- специальных символов, используемых для облегчения написания и чтения схемы.

Схемы работы системы отображают управление операциями и поток данных в системе и состоят из:

- символов данных, указывающих на наличие данных (символы данных могут также указывать вид носителя данных);
- символов процесса, указывающих операции, которые следует выполнить над данными, а также определяющих логический путь, которого следует придерживаться;

- линейных символов, указывающих потоки данных между процессами и (или) носителями данных, а также поток управления между процессами;
- специальных символов, используемых для облегчения написания и чтения блок-схемы.

Перечень символов схем приведен ниже.

Основные символы данных



Данные – отображает данные, носитель которых не определен.



Запоминаемые данные – отображает хранимые данные в виде, пригодном для обработки, носитель данных не определен.

Специфические символы данных



Оперативное запоминающее устройство – отображает данные, хранящиеся в оперативном запоминающем устройстве.



Запоминающее устройство с последовательным доступом – отображает данные, хранящиеся в устройстве с последовательным доступом (магнитная лента).



Запоминающее устройство с прямым доступом – отображает данные, хранящиеся в устройстве с прямым доступом (магнитный диск и др.).



Документ – отображает данные, представленные на носителе в удобочитаемой форме (печатный текст и др.).



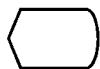
Ручной ввод – отображает данные, вводимые вручную с устройств любого типа (клавиатура, переключатели, световое перо и др.).



Карта – отображает данные, представленные на носителе в виде карты (перфокарты, магнитные карты, карты со считываемыми метками, карты со сканируемыми метками и др.).



Бумажная лента – отображает данные, представленные на носителе в виде бумажной ленты.



Дисплей – отображает данные, представленные в человекочитаемой форме на носителе в виде отображающего устройства (экран для визуального наблюдения, индикаторы ввода информации).

Основные символы процесса



Процесс – отображает функцию обработки данных любого вида.

Специфические символы процесса



Предопределенный процесс – отображает процесс, состоящий из одной или нескольких операций или шагов программы, которые определены в другом месте (в подпрограмме, модуле).



Ручная операция – отображает любой процесс, выполняемый человеком.



Подготовка – отображает модификацию команды или группы команд с целью воздействия на некоторую последующую функцию (установка переключателя, модификация индексного регистра или инициализация программы).



Решение – отображает решение или функцию переключательного типа, имеющую один вход и ряд альтернативных выходов, только один из которых может быть активизирован после вычисления условий, определенных внутри символа. Соответствующие результаты вычисления могут быть записаны по соседству с линиями, отображающими эти пути.



Параллельные действия – отображает синхронизацию двух и более параллельных операций.



Граница цикла (состоит из двух частей) – отображает начало и конец цикла. Обе части символа имеют один и тот же идентификатор. Условия для инициализации, приращения, завершения и т. д. помещаются внутри символа в начале или в конце в зависимости от расположения операции, проверяющей условие.

Основные символы линий



Линия – отображает поток данных или управления.

Специфические символы линий



Передача управления (используется только в схемах взаимодействия программ) – отображает непосредственную передачу управления от одного процесса к другому, иногда с возможностью возвращения к иницилирующему процессу, после того как иницируемый процесс завершит свои функции. Тип передачи управления должен быть назван внутри символа (например, запрос, вызов, событие).



Канал связи – отображает передачу данных по каналу связи.

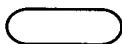


Пунктирная линия – отображает альтернативную связь между двумя и более символами. Кроме того, используют для обведения аннотированного участка.

Специальные символы



Соединитель – отображает выход в часть схемы и вход из другой части этой схемы и используется для обрыва линии и продолжения ее в другом месте. Соответствующие символы соединителя должны содержать одно и то же уникальное обозначение.



Терминатор – отображает выход во внешнюю среду и вход из внешней среды (начало или конец схемы программы, внешнее использование и источник или пункт назначения данных).



Комментарий – используется для добавления описательных комментариев или пояснительных записей в целях объяснения или примечаний. Пунктирные линии в символе комментария связаны с соответствующим символом или могут обводить группу символов. Текст комментариев или примечаний должен быть помещен около ограничивающей фигуры.

—...—
|...|

Пропуск (три точки) – используют для отображения пропуска символа или группы символов, в которых не определены ни тип, ни число символов. Применяется, главным образом, в схемах, изображающих общие решения с известным числом повторений.

Примеры использования некоторых символов приведены на рис. 23.18, 23.19.

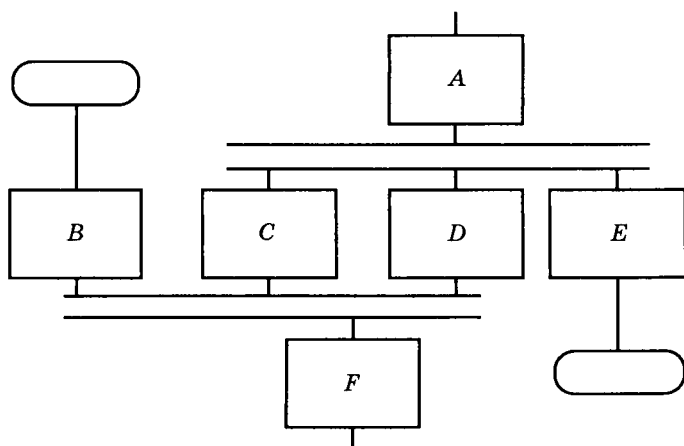


Рис. 23.18. Использование символа «параллельные действия»: процессы C, D, E не могут начаться до тех пор, пока не завершится процесс A; аналогично процесс F должен ожидать завершения процессов B, C и D, однако процесс C может начаться и (или) завершиться прежде, чем соответственно начнется и (или) завершится процесс D

Символы в схеме должны быть расположены равномерно. Следует придерживаться разумной длины линий и минимального числа длинных линий. Символы могут быть вычерчены в любой ориентации, но предпочтительно горизонтальное расположение. Зеркальное отображение символов допускается, но не является предпочтительным. При изображении символов должны быть соблюдены соотношения их размеров, показанные в стандарте. По возможности все символы должны быть одного размера.

Внутри символов или рядом с ними в форме комментария помещают текст, служащий для уточнения выполняемых функций. Если объем текста, помещаемого внутри символа, превышает его размеры, следует использовать символ комментария. Если использование сим-

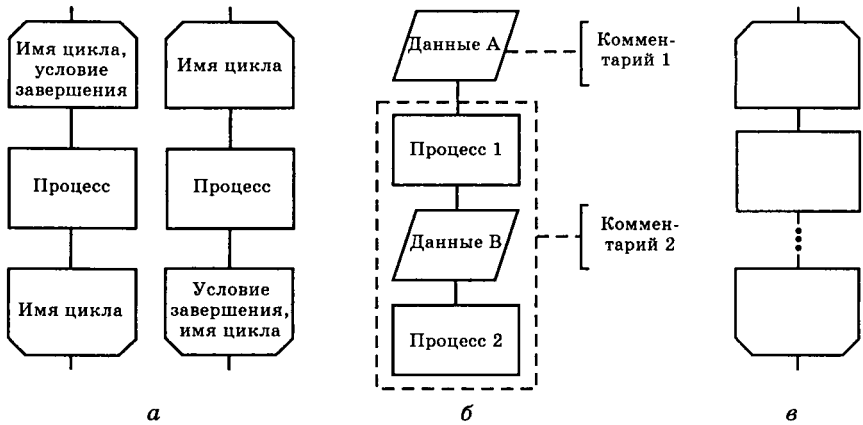


Рис. 23.19. Использование символов:

а – «граница цикла»; *б* – «комментарий»; *в* – «пропуск»

волов комментария может запутать или разрушить ход схемы, текст следует помещать на отдельном листе и давать перекрестную ссылку на символ.

В схемах может использоваться идентификатор символов. Это связанный с данным символом идентификатор, который определяет символ для описания в пояснительной записке или иных целях. Идентификатор символа должен располагаться слева над символом (рис. 23.20, *а*).

В схемах может использоваться подробное представление отдельных фрагментов, которое отображается с помощью символа с полосой для процесса или данных. Символ с полосой указывает, что в этом же комплекте документации в другом месте имеется более подробное представление данного фрагмента.

Символ с полосой – это любой символ, внутри которого в верхней части проведена горизонтальная линия. Между этой линией и верхней линией символа помещена ссылка, указывающая на подробное представление данного символа. В качестве первого и последнего символов подробного представления должен быть использован терминатор, содержащий такую же ссылку, как и в символе с полосой (рис. 23.20, *б*).

Потоки данных или управления изображаются в виде сплошных линий. Для изображения альтернативной связи между символами используются пунктирные линии. Направление потока слева направо и сверху вниз считается стандартным. В случаях, когда необходимо внести большую ясность в схему (например, при соединениях), на

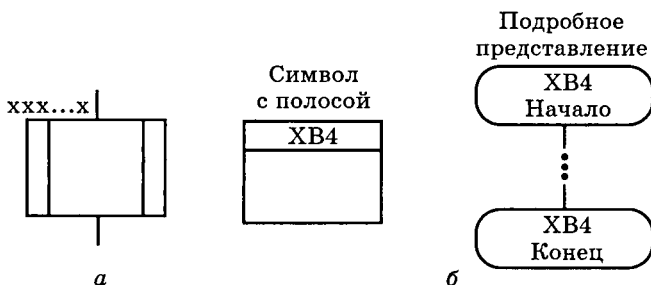


Рис. 23.20. Использование идентификатора (а) и символа с полосой (б)

линиях используются стрелки. Если поток имеет направление, отличное от стандартного, то наличие стрелок обязательно.

Следует избегать пересечения линий. Пересекающиеся линии не имеют логической связи между собой, поэтому изменения направления в точках пересечения не допускаются.

Две или более входящие линии могут объединяться в одну исходящую линию. Если две или более линии объединяются в одну линию, места объединения должны быть смещены друг относительно друга (рис. 23.21).

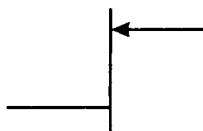


Рис. 23.21. Объединение двух входящих линий схемы в одну исходящую

Линии связи должны быть направлены к центру символа и ориентированы параллельно сторонам рамки чертежа. Линии должны подходить к символу либо слева, либо сверху, а исходить либо справа, либо снизу.

При необходимости линии в схемах следует разрывать во избежание излишних пересечений, а также, если схема состоит из нескольких страниц. Соединитель в начале разрыва называется внешним, а в конце разрыва – внутренним. Ссылки к страницам схемы могут быть приведены совместно с символом комментария для их соединителей (рис. 23.22).

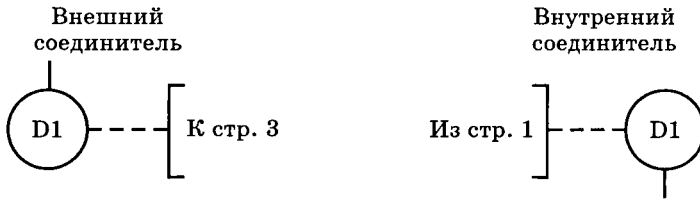


Рис. 23.22. Оформление ссылок к страницам схемы

Несколько выходов из символа следует показывать (рис. 23.23, а):

- несколькими линиями от данного символа к другим символам;
- одной линией от данного символа, которая затем разветвляется в соответствующее число линий.

Каждый выход из символа должен сопровождаться соответствующими значениями условий, чтобы показать логический путь (рис. 23.23, б).

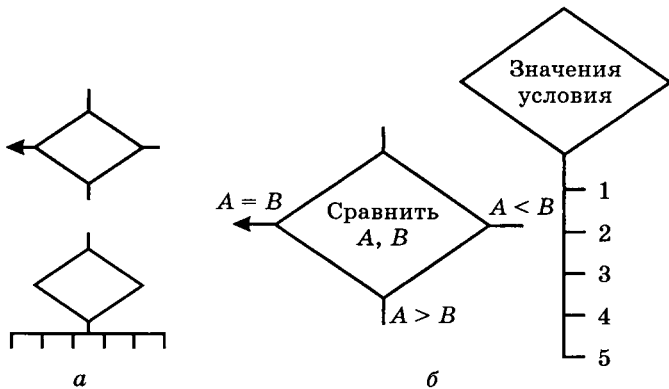


Рис. 23.23. Изображение нескольких выходов из символа

Вместо одного символа с соответствующим текстом могут быть использованы несколько символов с перекрытием изображения, каждый из которых содержит описательный текст (рис. 23.24). Когда несколько символов представляют упорядоченное множество, это упорядочение должно располагаться от переднего (первого) к заднему (последнему).



Рис. 23.24. Символы с перекрытием изображения

Список литературы

1. Александров К. К., Кузьмина Е. Г. Электротехнические чертежи и схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
2. Бабич Н. П., Жуков А. И. Компьютерная схемотехника. Методы построения и проектирования: Учебное пособие. – Киев: МК-Пресс, 2004. – 576 с.

Приложение А
(справочное)

**ПЕРЕЧЕНЬ НЕКОТОРЫХ
ГОСУДАРСТВЕННЫХ СТАНДАРТОВ**

Государственные стандарты ЕСКД

- 2.004-88 Общие требования к выполнению конструкторских и технологических документов на печатающих и графических устройствах вывода ЭВМ
- 2.102-68 Виды и комплектность конструкторских документов
- 2.104-68 Основные надписи
- 2.105-95 Общие требования к текстовым документам
- 2.106-68 Текстовые документы
- 2.109-73 Основные требования к чертежам
- 2.123-93 Комплектность конструкторских документов на печатные платы при автоматизированном проектировании
- 2.301-68 Форматы
- 2.302-68 Масштабы
- 2.303-68 Линии
- 2.304-81 Шрифты чертежные
- 2.316-68 Правила нанесения на чертежах надписей, технических требований и таблиц
- 2.321-84 Обозначения буквенные
- 2.413-72 Правила выполнения конструкторской документации изделий, изготавливаемых с применением электрического монтажа
- 2.414-75 Правила выполнения чертежей жгутов, кабелей и проводов
- 2.601-95 Эксплуатационные документы
- 2.417-91 Платы печатные. Правила выполнения чертежей

- 2.701-84 Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению
- 2.702-75 Правила выполнения электрических схем
- 2.705-70 Правила выполнения электрических схем обмоток и изделий с обмотками
- 2.708-81 Правила выполнения электрических схем цифровой вычислительной техники
- 2.709-89 Обозначения условные проводов и контактных соединений электрических элементов, оборудования и участков цепей в электрических схемах
- 2.710-81 Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах
- 2.721-74 Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения
- 2.722-68 Обозначения условные графические в схемах. Машины электрические
- 2.723-68 Обозначения условные графические в схемах. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители
- 2.726-68 Обозначения условные графические в схемах. Токосъёмники
- 2.727-68 Обозначения условные графические в схемах. Разрядники, предохранители
- 2.728-74 Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы
- 2.729-68 Обозначения условные графические в схемах. Приборы электроизмерительные
- 2.730-73 Обозначения условные графические в схемах. Приборы полупроводниковые
- 2.731-81 Обозначения условные графические в схемах. Приборы электровакуумные
- 2.732-68 Обозначения условные графические в схемах. Источники света
- 2.736-68 Обозначения условные графические в схемах. Элементы пьезоэлектрические и магнитострикционные; линии задержки

- 2.737-68 Обозначения условные графические в схемах. Устройства связи
- 2.741-68 Обозначения условные графические в схемах. Приборы акустические
- 2.743-91 Обозначения условные графические в схемах. Элементы цифровой техники
- 2.752-71 Обозначения условные графические в схемах. Устройства телемеханики
- 2.755-87 Обозначения условные графические в схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения
- 2.756-76 Обозначения условные графические в схемах. Воспринимающая часть электромеханических устройств
- 2.759-82 Обозначения условные графические в схемах. Элементы аналоговой техники
- 2.761-84 Обозначения условные графические в схемах. Компоненты волоконно-оптических систем передачи
- 2.763-85 Обозначения условные графические в схемах. Устройства с импульсно-кодовой модуляцией
- 2.764-86 Обозначения условные графические в схемах. Интегральные оптоэлектронные элементы индикации
- 2.765-87 Обозначения условные графические в схемах. Запоминающие устройства
- 2.766-88 Обозначения условные графические в схемах. Системы передачи информации с временным разделением канала
- 2.768-90 Обозначения условные графические в схемах. Источники электрохимические, электротермические и тепловые

Прочие государственные стандарты

- 7.32-2001 Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления
- 8.401-80 ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования
- 10317-79 Платы печатные. Основные размеры

- 13607-68 Приборы и преобразователи электроизмерительные цифровые. Основные термины и определения
- 20406-75 Платы печатные. Термины и определения
- 20504-81 Система унифицированных типовых конструкций агрегатных комплексов ГСП. Типы и основные размеры
- 22315-77 Средства агрегатные информационно-измерительных систем. Общие положения
- 23751-86 Платы печатные. Основные параметры конструкции
- 23752-79 Платы печатные. Общие технические условия
- 25874-83 Аппаратура радиоэлектронная, электронная и электротехническая. Условные функциональные обозначения
- 26164-84 Платы печатные для изделий, поставляемых на экспорт. Шаги сетки
- 26284-84 Преобразователи электроэнергии полупроводниковые
- P51623-2000 Конструкции базовые несущие радиоэлектронных средств. Система построения и координатные размеры
- 26793-85 Компоненты волоконно-оптических систем передачи. Система условных обозначений
- 28601.1-90 Система несущих конструкций серии 482,6 мм.
- 28601.2-90 Панели и стойки. Основные размеры
- 28601.3-90
- 29137-91 Формовка выводов и установка изделий электронной техники на печатные платы. Общие требования и нормы конструирования
- P 50621-93 Платы печатные одно- и двусторонние с неметаллизированными отверстиями. Общие технические требования
- P 50622-93 Платы печатные двусторонние с металлизированными отверстиями. Общие технические требования
- P 51040-97 Платы печатные. Шаги координатной сетки
- 19.701-90 ЕСПД. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения
- 24.302-80 Система технической документации на АСУ. Общие требования к выполнению схем



- 24.303-80 Система технической документации на АСУ. Обозначения условные графические технических средств
- 26.005-82 Телемеханика. Термины и определения
- 34.003-90 Автоматизированные системы. Термины и определения

Приложение Б (справочное)

СТЕПЕНИ ЗАЩИТЫ КОРПУСОВ

Согласно ГОСТ 14254-96 и МЭК 529, степень защиты корпуса обозначается латинскими буквами IP и следующими за ними двумя цифрами, например, IP54. При этом первая цифра означает степень защиты персонала от находящихся под напряжением или движущихся частей внутри корпуса, а также степень защиты изделия от попадания внутрь твердых посторонних тел, в частности пыли. Вторая цифра означает степень защиты изделия от попадания внутрь воды. В табл. Б.1 описаны основные характеристики корпусов, соответствующие тем или иным степеням защиты.

Таблица Б.1

Степени защиты по ГОСТ 14254-96 и МЭК 529

Степень защиты	Защита от твердых тел	Защита от воды
0	Защита отсутствует	Защита отсутствует
1	Защита от проникновения внутрь оболочки большого участка поверхности человеческого тела, например рук, и от проникновения твердых тел диаметром более 50 мм	Капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного воздействия на изделие
2	Защита от проникновения внутрь корпуса пальцев или предметов длиной более 80 мм и от проникновения твердых тел диаметром более 12 мм	Капли воды, падающие на оболочку под углом до 15° от вертикали, не должны оказывать вредного воздействия на изделие
3	Защита от проникновения внутрь оболочки инструментов, проволоки, твердых тел и т. п. диаметром или толщиной более 2,5 мм	Дождь, падающий на оболочку под углом 60° от вертикали, не должен оказывать вредного воздействия на изделие

Окончание табл. Б.1

Степень защиты	Защита от твердых тел	Защита от воды
4	Защита от проникновения внутрь оболочки проволоки и твердых тел диаметром более 1,0 мм	Вода, разбрызгиваемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного воздействия на изделие
5	Проникновение внутрь корпуса пыли не предотвращено полностью, однако количество проникающей пыли не может нарушить работу изделия	Струя воды, выбрасываемая в любом направлении на оболочку, не должна оказывать вредного воздействия на изделие
6	Проникновение пыли предотвращено полностью	Сильная струя воды (100 л/мин при давлении 100 кПа) или волны воды не должны вызывать попадание в оболочку воды в количестве, достаточном для повреждения изделия
7	Не предусмотрено	Вода не должна проникать в оболочку, погруженную в воду на глубину примерно 15 см, при примерном равенстве температуры оболочки и воды, в количестве, достаточном для повреждения изделия
8	Не предусмотрено	Изделие пригодно для длительного погружения в воду при условиях, устанавливаемых изготовителем

Приложение В (справочное)

КОРПУСА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Приборные корпуса Ratiopac PRO

Сложные электронные системы, скомпонованные в шкафу, стойке и т. д., строятся на основе базовых несущих конструкций (БНК). В составе БНК, как правило, предусматриваются также и корпуса для единичных автономных приборов, построенных по модульному принципу.

Различные системы БНК принципиально похожи. Различия заключаются в типоразмерных рядах, конструктивных деталях, технологии изготовления. Одними из наиболее популярных БНК являются так называемые конструктивы Евромеханики, в частности приборные корпуса Ratiopac PRO (рис. В.1).

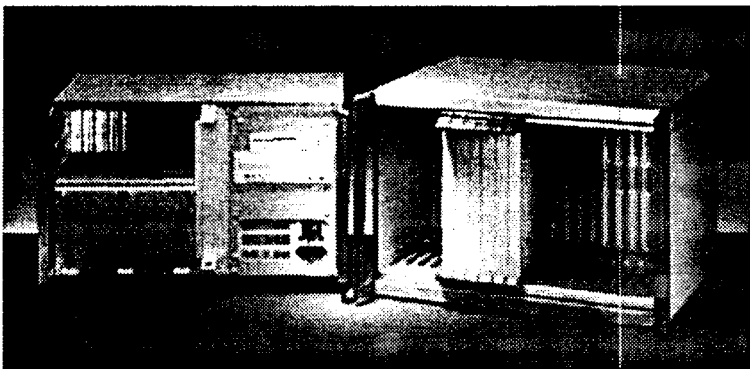


Рис. В.1. Два варианта корпусов Ratiopac PRO фирмы Schroff

Основные части корпуса Ratiopac PRO показаны на рис. В.2. На поперечные рельсы крепятся направляющие, по которым вдвигаются модули, состоящие из печатной платы, передней панели и соединителя. Крепление модулей внутри корпуса обеспечивается невыпадающими винтами. Для установки тяжелых элементов (трансформатора и т. п.) к нижним рельсам прикручивается металлическое основание (шасси). Задняя часть корпуса закрывается панелью. Верхняя и нижняя крышки корпуса могут иметь вентиляционные отверстия. Элек-

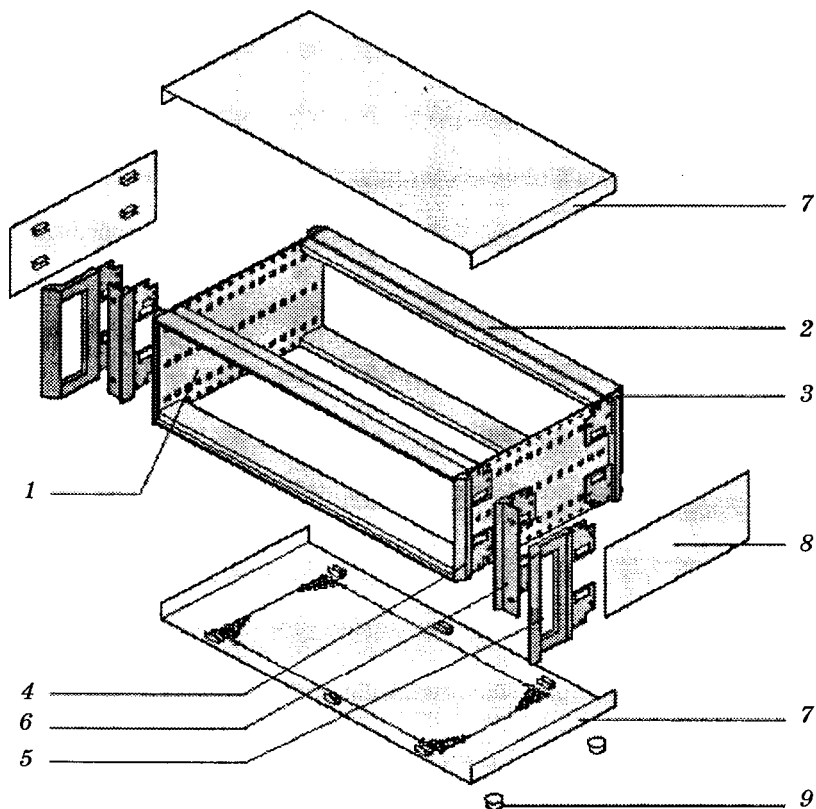


Рис. В.2. Основные составные части корпуса Ratiopac PRO:

1 – боковина; 2 – поперечный рельс; 3, 4 – накладки; 5 – ручка; 6 – фланец для монтажа на щите; 7 – нижняя крышка; 8 – боковая крышка; 9 – ножка

трические соединения между модулями осуществляются с помощью кросс-платы (печатной платы, в которую впаяны ответные части соединителей). Кросс-плата крепится к специальной полке задних рельсов.

Конструктивы Евромеханики содержат большое число разновидностей аналогичных элементов (рельсов, направляющих, кросс-плат и т. д.), что позволяет собрать на их основе корпус, наилучшим образом приспособленный к конкретным техническим требованиям.

Размеры конструктивов Евромеханики нормированы на основе «дюймового» стандарта МЭК 297, который в настоящее время доми-

нирует во всем мире. Базовой единицей в МЭК 297 является дюйм, равный 25,4 мм. Вертикальные посадочные размеры корпусов кратны условной единице 1U = 44,45 мм (1,75 дюйма). Для горизонтальных размеров используется другая условная единица 1HP = 5,08 мм (0,2 дюйма).

Размеры подвижных модулей и корпусов Ratiopac РКО указаны на рис. В.3, В.4 и в табл. В.1. При выборе типоразмера печатной платы элементы располагаются в пределах зоны, ограниченной тонкой линией.

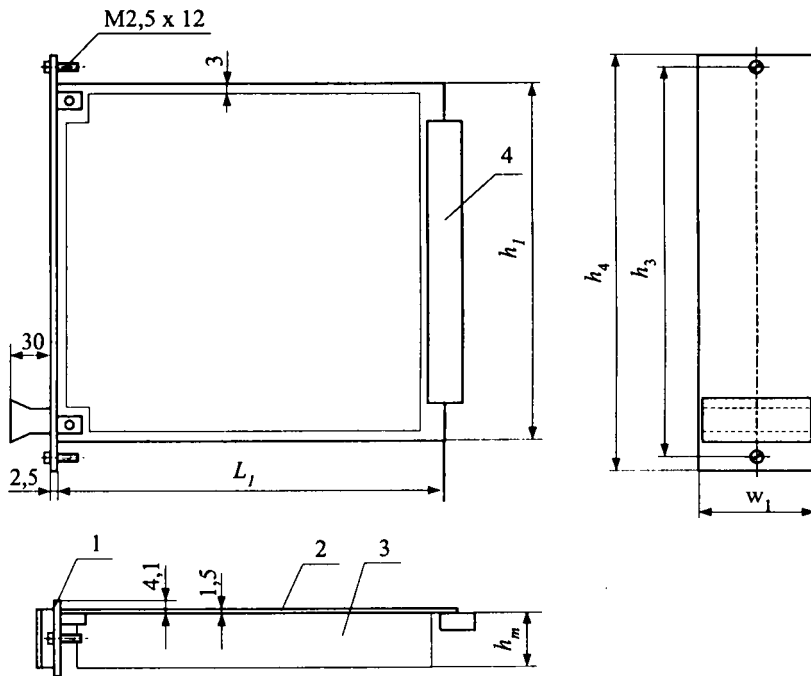


Рис. В.3. Конструкция модуля:

1 – передняя панель; 2 – печатная плата; 3 – элементы; 4 – соединитель

Шаг установки модулей определяется, исходя из максимальной высоты навесных элементов, и должен быть кратен 5,08 мм. Зазор между максимально выступающими элементами соседних модулей должен быть не менее 4 мм. Ширина передней панели модуля w_1 , мм, определяется по формуле

$$w_1 = n \times 5,08 - 1.$$

Таблица В.1

Размеры корпусов Ratiopac PRO

В миллиметрах

h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	w_2	w_3	L_1	L_2	L_3
100	112,4	122,5	128,7	132,5	142,8	164,2	160	235,5	255,5
					213,9	235,5			
					320,6	342,0			
					427,3	448,7			
144,4	156,8	166,9	173,1	177,0	213,9	235,5	280	355,5	375,5
					320,6	342,0	340	415,5	435,5
					427,3	448,7	400	475,5	495,5
					213,9	235,5			
233,3	245,7	255,8	262,0	265,9	320,6	342,0			
					427,3	448,7			

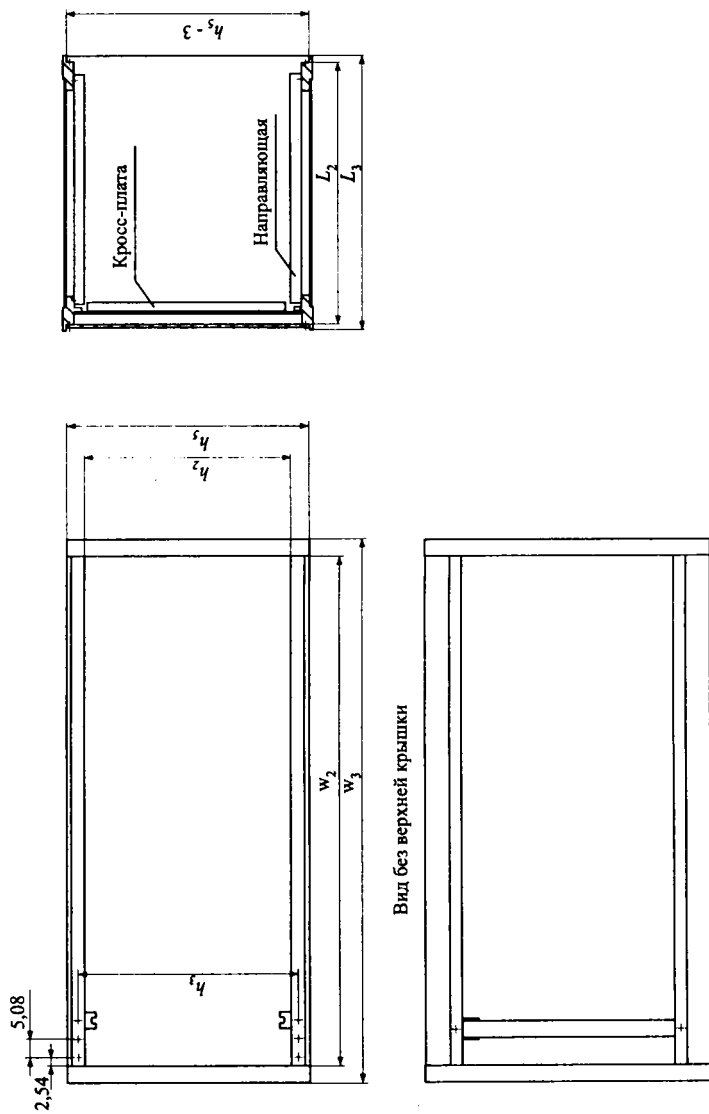


Рис. В.4. Конструкция корпуса Ratioras PRO



Унифицированные герметичные корпуса

Герметичные корпуса из алюминиевого сплава, нержавеющей стали или пластмассы (рис. В.5) обеспечивают высокую защищенность от проникновения внутрь пыли и влаги (IP65). Крышка имеет резиновую уплотнительную прокладку и соединяется с корпусом невыпадающими винтами. Для кабельных вводов в корпусе сверлят отверстия. Некоторые типы корпусов аттестованы на взрывозащищенность и имеют маркировку EX (рис. В.6, табл. В.2).

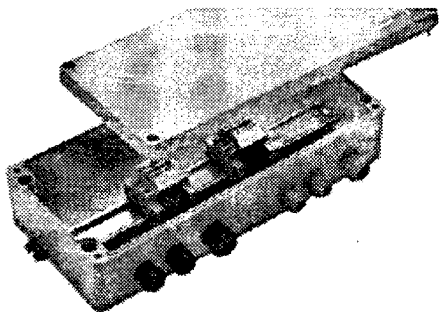


Рис. В.5. Герметичный корпус с установленными кабельными вводами

Таблица В.2

Типоразмерный ряд корпусов фирмы Rolec

Тип	L, мм	W, мм	H, мм	D, мм	E, мм
AK-Exe 063	150	64	34	138	36
AK-Exe 082	125	80	57	113	52
AK-Exe 083	175	80	57	163	52
AK-Exe 084	250	80	57	238	52
AK-Exe 120	122	120	81	106	82
AK-Exe 121	122	120	91	106	82
AK-Exe 122	220	120	81	204	82
AK-Exe 123	220	120	91	204	82
AK-Exe 124	360	122	81	344	82
AK-Exe 161	160	160	90	140	110
AK-Exe 162	260	160	90	240	110
AK-Exe 163	360	160	90	340	110
AK-Exe 164	560	160	90	540	110
AK-Exe 231	200	230	110	180	180
AK-Exe 232	280	230	110	260	180
AK-Exe 233	330	230	110	310	180
AK-Exe 234	400	230	110	380	180
AK-Exe 235	600	230	110	580	180
AK-Exe 311	402,5	310	110	382	261
AK-Exe 312	600	310	110	580	261

Вид корпуса со снятой крышкой

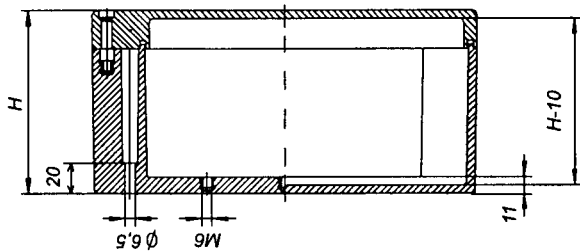
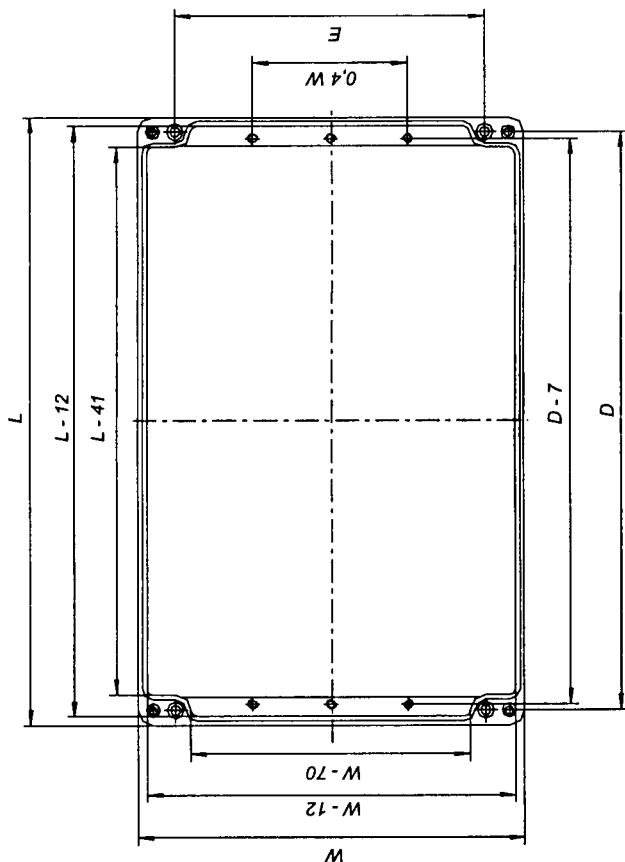


Рис. В.6. Чертеж корпуса фирмы Roltec

Корпуса индивидуального изготовления

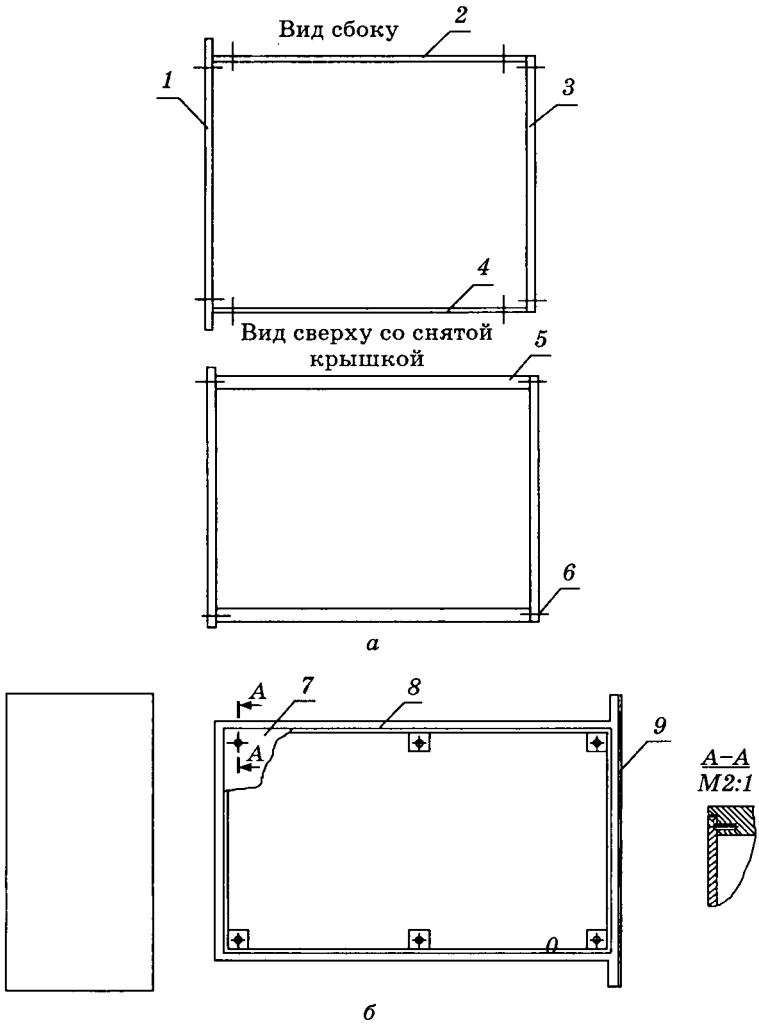


Рис. В.7. Сборный (а) и литой (б) корпуса:

1 – передняя панель; 2 – верхняя крышка; 3 – задняя панель; 4 – нижняя крышка; 5 – боковина; 6 – винт; 7 – боковая крышка; 8 – литой корпус в виде рамки; 9 – фальшпанель

Корпуса Polysafe фирмы Vorla

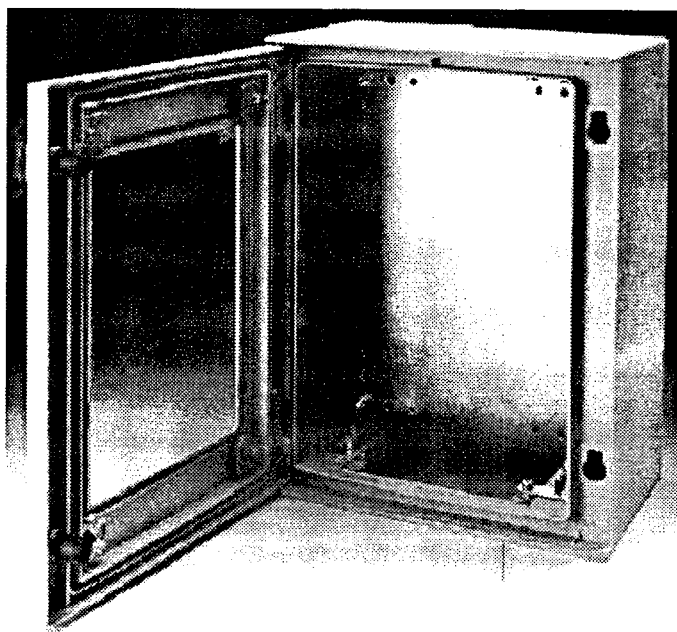


Рис. В.8. Внешний вид корпусов Polysafe (исполнение IP65)

Таблица В.3

Размеры корпусов Polysafe

Тип	Внутренние			Наружные		
	Высота	Ширина	Глубина	Высота	Ширина	Глубина
PS 32	270	170	144	310	215	160
PS 43	380	260	181	430	330	200
PS 54	480	360	181	530	430	200
PS 64	580	360	228	647	436	250
PS 75	680	460	278	747	536	300

Приложение Г
(справочное)

КАБЕЛЬНЫЕ ВВОДЫ

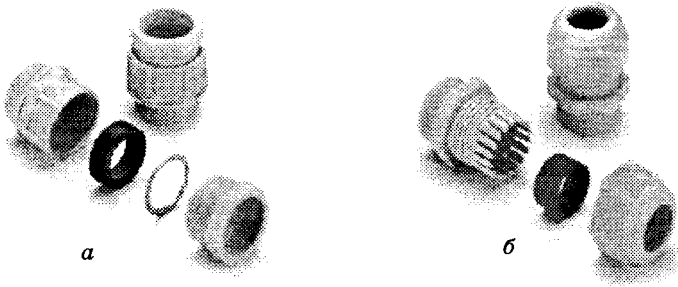


Рис. Г.1. Внешний вид пластиковых кабельных вводов VG со степенью защиты IP54 (а) и IP68 (б)

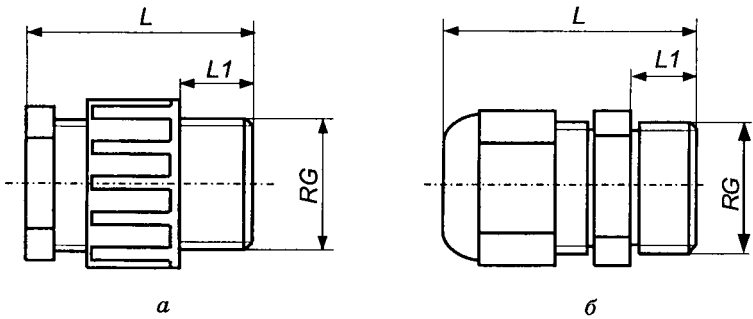


Рис. Г.2. Чертежи кабельных вводов VG со степенью защиты IP54 (а) и IP68 (б)

Таблица Г.1


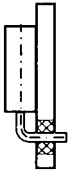

Типоразмерный ряд кабельных вводов VG

Тип	Резьба PG, мм	Диаметр кабеля, мм	L, мм	L1, мм
VG7-K54	7	3,5-6	28	8
VG9-K54	9	4,5-7	29	8
VG11-K54	11	6-9	32	8
VG13,5-K54	13,5	9-12	34	9
VG16-K54	16	11-14	38	10
VG21-K54	21	14-18	43,5	11
VG29-K54	29	18,25	44,5	11
VG36-K54	36	25-32	55	13
VG42-K54	42	30-38	60	13
VG48-K54	48	34-42	61	14
VG7-K68	7	3-6,5	30,5	8
VG9-K68	9	4-8	34	8
VG11-K68	11	5-10	37	8
VG13,5-K68	13,5	6-12	39	9
VG16-K68	16	10-14	42,5	9
VG21-K68	21	13-18	48	11
VG29-K68	29	18-25	53	11
VG36-K68	36	22-32	65	13
VG42-K68	42	30-38	68	13
VG48-K68	48	34-44	69	14

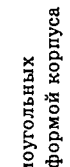
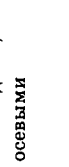
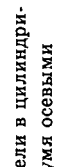
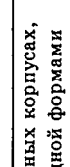
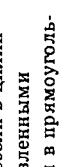
Приложение Д (справочное)

ВАРИАНТЫ ФОРМОВКИ ВЫВОДОВ И УСТАНОВКИ НАВЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ГОСТ 29137-91

Таблица Д.1

Типовое конструктивное исполнение	Обозначение варианта формовки и установки	Номер чертежа	Шифр позиции элемента	Характеристики элемента
1	2	3	4	5
	010 011	2	0201-0221 по табл. Д.2	Резисторы, конденсаторы, диоды, дроссели в цилиндрических и прямоугольных корпусах с двумя осевыми выводами
	020 021	7	0401-0407 по табл. Д.4	Конденсаторы, резисторы в прямоугольных корпусах, окукленные с дискообразной и каплевидной формами корпуса; резисторы, конденсаторы, дроссели в цилиндрических корпусах с двумя однонаправленными выводами; полупроводниковые приборы в прямоугольных и цилиндрических корпусах с двумя-тремя однонаправленными выводами
	030 031			Конденсаторы в прямоугольных и дискообразных корпусах с двумя несимметрично расположенными однонаправленными выводами

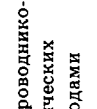
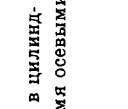



Продолжение табл. Д.1

1	2	3	4	5
4 	040 041	2	0201-0221 по табл. Д.2	Конденсаторы и терморезисторы в прямоугольных корпусах, окруженные с дискообразной формой корпуса с двумя несимметрично расположенными выводами; диоды в каплевидных корпусах с двумя осевыми выводами
7 	070 071	4	0601-0610 по табл. Д.6	Резисторы, конденсаторы, диоды, дроссели в цилиндрических и прямоугольных корпусах с двумя осевыми выводами
8 	080 081	8	0901-0903 по табл. Д.9	Конденсаторы, резисторы в прямоугольных корпусах, окруженные с дискообразной и каплевидной формами корпуса; резисторы, конденсаторы, дроссели в цилиндрических корпусах с двумя однонаправленными выводами; полупроводниковые приборы в прямоугольных и цилиндрических корпусах с двумя-тремя однонаправленными выводами
9 	090 091	8	0901-0903 по табл. Д.9	Конденсаторы в прямоугольных и дискообразных корпусах с двумя несимметрично расположенными однонаправленными выводами
10 	100 101	4	0601-0610 по табл. Д.6	Конденсаторы и терморезисторы в прямоугольных корпусах, окруженные с дискообразной формой корпуса с двумя несимметрично расположенными выводами; диоды в каплевидных корпусах с двумя осевыми выводами


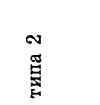
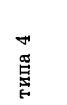


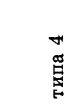
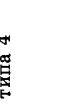

Продолжение табл. Д.1

1	2	3	4	5
14	140	2	0201-0221 по табл. Д.2	Резисторы, конденсаторы, диоды, дроссели в цилиндрических и прямоугольных корпусах с двумя осевыми выводами
15	150	2	0201-0221 по табл. Д.2	Конденсаторы и терморезисторы в прямоугольных корпусах, окупленные с дискообразной формой корпуса с двумя несимметрично расположенными выводами; диоды в каплевидных корпусах с двумя осевыми выводами
18	180	-	-	Конденсаторы, резисторы в прямоугольных корпусах, окупленные с дискообразной и каплевидной формами корпуса; резисторы, конденсаторы, дроссели в цилиндрических корпусах; полупроводниковые приборы в прямоугольных и цилиндрических корпусах с двумя однонаправленными выводами
19	190	-	-	Транзисторы в прямоугольных и цилиндрических корпусах с тремя однонаправленными выводами
20	200	-	-	Конденсаторы в прямоугольных корпусах, имеющих опорные выступы, с двумя однонаправленными выводами

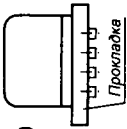
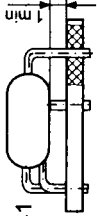
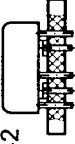
Продолжение табл. Д.1

1	2	3	4	5
21 	211	-	-	Конденсаторы, резисторы, дроссели, полупроводниковые приборы в прямоугольных и цилиндрических корпусах с двумя однонаправленными выводами
22 	220	3	0401-0407 по табл. Д.4	Резисторы, конденсаторы, диоды, дроссели в цилиндрических и прямоугольных корпусах с двумя осевыми выводами
23 	230	9	1001-1004 по табл. Д.10	Транзисторы в цилиндрических корпусах с однонаправленными выводами
24 	240			
29 	241	12-15	-	Микросхемы в корпусах типа 3 по ГОСТ 17467

Продолжение табл. Д.1

1	2	3	4	5
32 	320	-	-	Микросхемы и другие ИЭТ в корпусах типа 1 по ГОСТ 17467
33 	330	-	-	Микросхемы и другие ИЭТ в корпусах типа 2 по ГОСТ 17467
36 	360	18	1101-1113 по табл. Д.11	Микросхемы и другие ИЭТ в корпусах типа 4 по ГОСТ 17467
37 	361			
38 	370	18	1101-1113 по табл. Д.11	Микросхемы и другие ИЭТ в корпусах типа 4 по ГОСТ 17467
39 	380			
39 	381	-	-	Трансформаторы, резисторы, конденсаторы, фильтры в прямоугольных, цилиндрических и дискообразных корпусах с тремя и более однонаправленными выводами
39 	390	-	-	-

Окончание табл. Д.1

1	2	3	4	5
40  Прокладка	400	-	-	Реле, трансформаторы, резисторы, конденсаторы, фильтры в прямоугольных, цилиндрических и дискообразных корпусах с тремя и более однонаправленными выводами
41  410	401	-	-	Реле
42  420	410	-	-	Трансформаторы, фильтры в прямоугольных корпусах с тремя и более однонаправленными выводами



1. Минимальный установочный размер l_y для типовых конструктивных исполнений 1, 4, 14, 15 (черт. 2) рассчитывается по формуле

$$l = L + 2l_0 + 2R + d,$$

где L – минимальная длина корпуса;

l_0 – минимальный размер до места изгиба вывода;

R – радиус изгиба выводов;

d – номинальный диаметр вывода элемента.

Установочные размеры для исполнений 1, 4, 14, 15 в зависимости от длины корпуса элемента приведены в табл. Д.2.

Таблица Д.2

Размеры формовки и установки для исполнений 1, 4, 14, 15

В миллиметрах

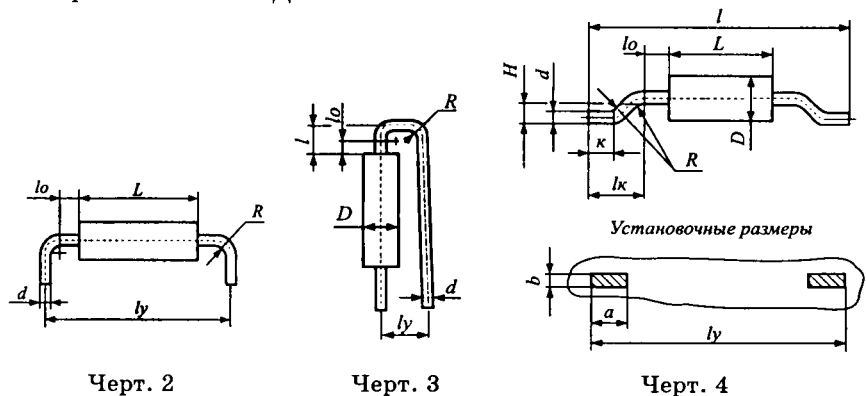
Шифр позиции элемента	Длина корпуса L			Установоч- ный размер l_y при шаге сетки 2,5 мм
	резистора, конденсатора	полупроводнико- вого прибора	дресселя	
0201	До 6,0 включ.	До 3,0 включ.	–	10,0
0202	Св. 6,0 до 8,5 *	Св. 3,0 до 4,0 *	–	12,5
0203	* 8,5 * 11,0 *	* 4,0 * 6,5 *	–	15,0
0204	* 11,0 * 13,5 *	* 6,5 * 9,0 *	–	17,5
0205	* 13,5 * 16,0 *	* 9,0 * 11,5 *	До 10,0 включ.	20,0
0206	* 16,0 * 18,5 *	* 11,5 * 14,0 *	Св. 10,0 до 12,5 *	22,5
0207	* 18,5 * 21,0 *	* 14,0 * 16,5 *	* 12,5 * 15,0 *	25,0
0208	* 21,0 * 23,5 *	* 16,5 * 19,0 *	* 15,0 * 17,5 *	27,5
0209	* 23,5 * 26,0 *	* 19,0 * 21,5 *	* 17,5 * 20,0 *	30,0
0210	* 26,0 * 28,5 *	* 21,5 * 24,0 *	* 20,0 * 22,5 *	32,5
0211	* 28,5 * 31,0 *	* 24,0 * 26,5 *	* 22,5 * 25,0 *	35,0
0212	* 31,0 * 33,5 *	* 26,5 * 29,0 *	* 25,0 * 27,5 *	37,5
0213	* 33,5 * 36,0 *	* 29,0 * 31,5 *	* 27,5 * 30,0 *	40,0
0214	* 36,0 * 38,5 *	* 31,5 * 34,0 *	* 30,0 * 32,5 *	42,5
0215	* 38,5 * 41,0 *	* 34,0 * 36,5 *	* 32,5 * 35,0 *	45,0
0216	* 41,0 * 43,5 *	* 36,5 * 39,0 *	* 35,0 * 37,5 *	47,5
0217	* 43,5 * 46,0 *	* 39,0 * 41,5 *	* 37,5 * 40,0 *	50,0
0218	* 46,0 * 48,5 *	* 41,5 * 44,0 *	* 40,0 * 42,5 *	52,5
0219	* 48,5 * 51,0 *	* 44,0 * 46,5 *	* 42,5 * 45,0 *	55,0
0220	* 51,0 * 53,5 *	* 46,5 * 49,0 *	* 45,0 * 47,5 *	57,5
0221	* 53,5 * 56,0 *	* 49,0 * 51,5 *	* 47,5 * 50,0 *	60,0

2. Минимальные установочные l_y и формовочные l размеры для исполнения 22 (черт. 3) рассчитываются по формулам:

$$l_y = \frac{D+d}{2} + 0,5; \quad l = l_0 + R + \frac{d}{2}, \quad (\text{Д.1})$$

где D – максимальный диаметр (толщина) корпуса;
 d – максимальный диаметр вывода.

Размеры формовочных и установочных размеров исполнения 22 выбираются по табл. Д.4.



Черт. 2

Черт. 3

Черт. 4

Таблица Д.4
 Размеры формовки и установки для исполнения 2, 3, 22
 В миллиметрах

Шифр позиции элемента	Диаметр (толщина) корпуса D	Установочный размер l_y	Формовочный размер l_y		
			резистора, конденсатора	полупроводникового прибора	дресселя
0401	До 3,0 включ.	2,50	2,0	4,0	5,0
0402	Св. 3,0 до 5,5 »	3,75			
0403	» 5,5 » 8,0 »	5,00			
0404	» 8,0 » 10,5 »	6,25			
0405	» 10,5 » 13,0 »	7,50			
0406	» 13,0 » 15,5 »	8,75			
0407	» 15,5 » 18,0 »	10,00			

3. Минимальные размеры формовки l для исполнений 7, 10 (черт. 4) рассчитываются по формуле

$$l = L + 2l_0 + 2l_k,$$

где l_k – постоянная унифицированная длина отформованной части вывода.

Постоянная унифицированная длина отформованной части вывода l_k рассчитывается по формуле

$$l_k = 2R + d + K + 0,1,$$

где K – горизонтальная часть отформованного вывода, прилегающая к монтажной площадке ($K_{min} = 1$);

0,1 – гарантированный зазор в штампе.

Размеры формовки и установки для исполнений 7, 10 в зависимости от длины корпуса элемента приведены в табл. Д.5.

Таблица Д.5

**Размеры формовки и установки для исполнений 7, 10
при диаметре выводов свыше 0,5 до 1 мм**

В миллиметрах

Шифр позиции элемента	Длина корпуса L			Размеры формовки		Устано- вочный размер l_y
	резистора, конденсатора	полупроводни- кового прибора	дросселя	l_k	l	
0601	До 9,0 включ.	До 7,0 включ.	–	4,2	20,5	20,8
0602	Св. 9,0 до 12,8 *	Св. 7,0 до 10,8 *	–		24,3	24,6
0603	* 12,8 * 16,5 *	* 10,8 * 14,5 *	До 11,2 включ.		28,0	28,3
0604	* 16,5 * 20,3 *	* 14,5 * 18,3 *	Св. 11,0 до 15,0 *		31,8	32,1
0605	* 20,3 * 24,0 *	* 18,3 * 22,0 *	* 15,0 * 18,7 *		35,5	35,8
0606	* 27,8 * 31,5 *	* 22,0 * 25,8 *	* 18,7 * 22,5 *		39,3	39,6
0207	* 35,3 * 39,0 *	* 25,8 * 29,5 *	* 22,5 * 26,2 *		43,0	43,3
0608	* 39,0 * 42,8 *	* 29,5 * 33,3 *	* 26,2 * 30,0 *		46,8	47,1
0609	* 23,5 * 26,0 *	* 33,3 * 37,0 *	* 30,0 * 33,7 *		50,5	50,8
0610	* 26,0 * 28,5 *	* 37,0 * 40,8 *	* 33,7 * 37,5 *		54,3	54,6

Глубина формовки выводов H для исполнений 7, 8, 10 рассчитывается по формуле

$$H = 0,5(D - d),$$

а для исполнения 9 определяется в зависимости от толщины корпуса элемента. Значение H выбирается из следующего ряда: 0,4; 0,6 и так далее до 8,0 мм включительно с шагом 0,2 мм. Рекомендуемые размеры контактных площадок под планарную установку элементов для исполнений 7–10 приведены в табл. Д.6.

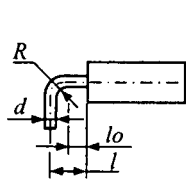
Таблица Д.6

Размеры контактных площадок для исполнений 7–10
В миллиметрах

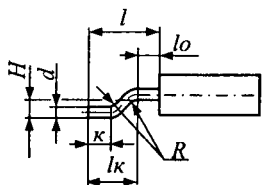
Диаметр (ширина) вывода d	Размеры контактных площадок, не менее	
	a	b
До 0,5 включ.	2,1	0,8
Св. 0,5 до 1,0 »	2,5	1,5
» 1,0	3,0	2,0

4. Формовка выводов для исполнений 2, 3 производится в соответствии с черт. 7. Формовочные размеры l для исполнений 2, 3 рассчитываются по формуле (Д.1) и выбираются по табл. Д.4.

5. Формовка выводов для исполнений 8, 9 производится в соответствии с черт. 8 и табл. Д.7, размеры контактных площадок под планарную установку элементов выбираются по табл. Д.6.



Черт. 7



Черт. 8

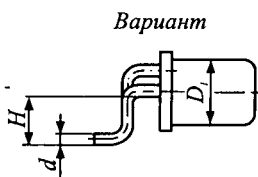
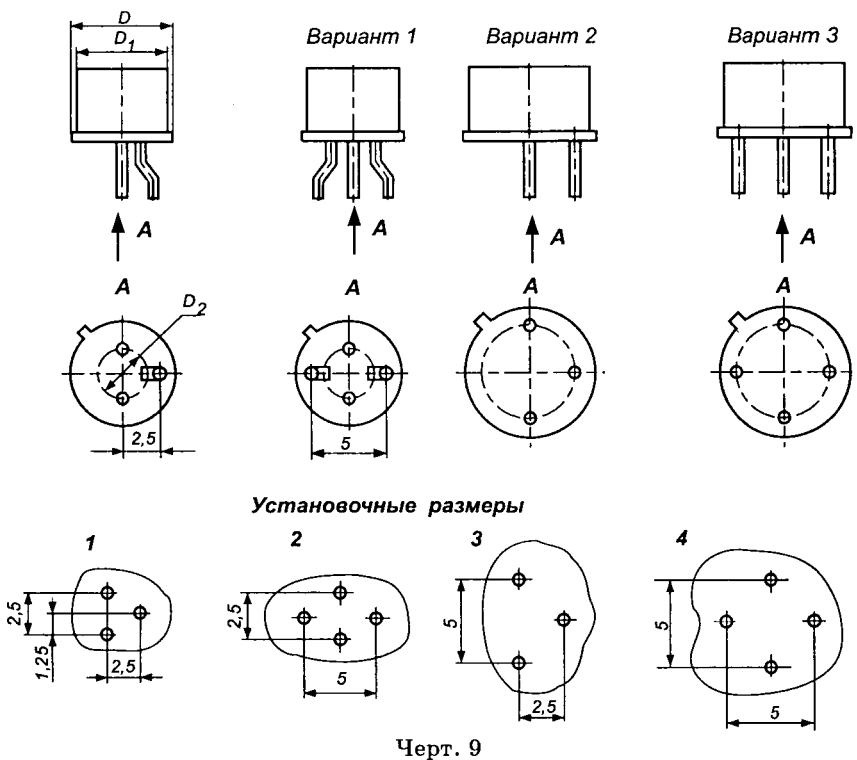


Таблица Д.7

Размеры формовки для исполнений 8, 9
В миллиметрах

Шифр позиции элемента	Диаметр вывода d	Размеры формовки			
		l_k	l		
			конденсатора, резистора	полупроводникового прибора	дресселя
0901	До 0,5 включ.	2,7	4,0	5,0	6,7
0902	Св. 0,5 до 1,0 »	4,2	5,5	6,5	8,2
0903	» 1,0	5,7	7,0	8,0	9,7

6. Формовка и установочные размеры для исполнений 23, 24 должны соответствовать черт. 9 и табл. Д.8.



Черт. 9

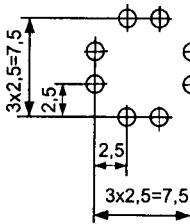
Таблица Д.8

Установочные размеры для исполнений 23, 24

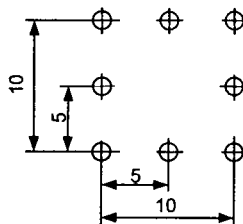
В миллиметрах

Шифр позиции элемента	Габаритные размеры			Число выводов	Вариант установочных размеров
	D	D_1	D_2		
1001	От 5,3 до 5,84 включ.	От 4,53 до 4,95 включ.	2,5	3	1
1002				4	2
1003	От 4,64 до 9,4 включ.	От 8,0 до 8,5 включ.	5,0	3	3
1004				4	4

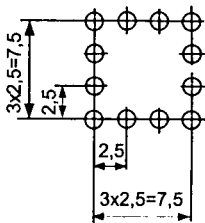
7. Для исполнения 29 установка элемента производится в квадрат $7,5 \times 7,5$ мм или 10×10 мм (черт. 12–15).



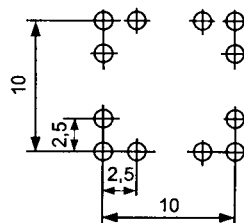
Черт. 12



Черт. 13

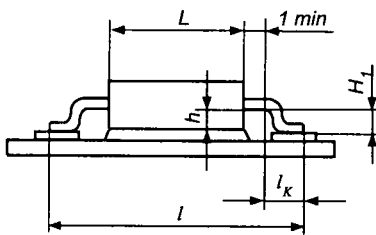


Черт. 14

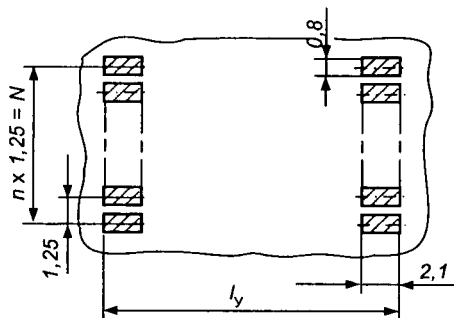


Черт. 15

8. Формовка выводов и установочные размеры для исполнений 36–38 должны соответствовать черт. 18, 19 и табл. Д.9.



Черт. 18



Черт. 19

Установка элементов по вариантам 36–38 проводится следующими способами:

- вплотную на ПП без приклейки, при этом допускается наличие зазора до 0,3 мм, вариант 360; глубина формовки $H = h + 0,1$;
- вплотную на ПП с приклейкой, вариант 361; глубина формовки $H = h + 0,1$;
- с зазором 0,5 мм, вариант 370; глубина формовки $H = h + 0,5$;
- вплотную на металлическое основание или шину, в случае необходимости отвода тепла от корпуса элемента, при этом шина (основание) приклеивается как к корпусу элемента, так и к ПП, вариант 381; глубина формовки $H = h + 0,1$;
- вплотную на электроизоляционную прокладку, при этом прокладка приклеивается к ПП, варианты 380, 381; глубина формовки $H = h + 0,5$.

Значение глубины формовки H выбирается из ряда: 0,7; 0,8 и т. д. до 5,0 мм включительно через 0,1 мм.

Таблица Д.9

Размеры формовки и установки для исполнений 36–38

В миллиметрах

Шифр позиции элемента	Габаритный размер L	Номинальные размеры формовки		Установочный размер l_y	Радиус изгиба R
		l_x	l		
1101	От 3,6 до 4,0 включ.	1,6	10,5	10,8	0,4
1102	Св. 4,0 » 6,7 »		13,0	13,3	
1103	» 6,7 » 7,7 »	2,1	15,5	15,8	0,5
1104	» 7,7 » 10,2 »		18,0	18,3	
1105	» 10,2 » 12,7 »		20,5	20,8	
1106	» 12,7 » 15,2 »		23,0	23,3	
1107	» 15,2 » 17,7 »		25,5	25,8	
1108	» 17,7 » 20,2 »		28,0	28,3	
1109	» 20,2 » 22,7 »		30,5	30,8	
1110	» 22,7 » 25,2 »		33,0	33,3	
1111	» 25,2 » 27,7 »		35,5	35,8	
1112	» 27,7 » 30,2 »		38,0	38,3	
1113	» 37,7 » 40,2 »		48,0	48,3	



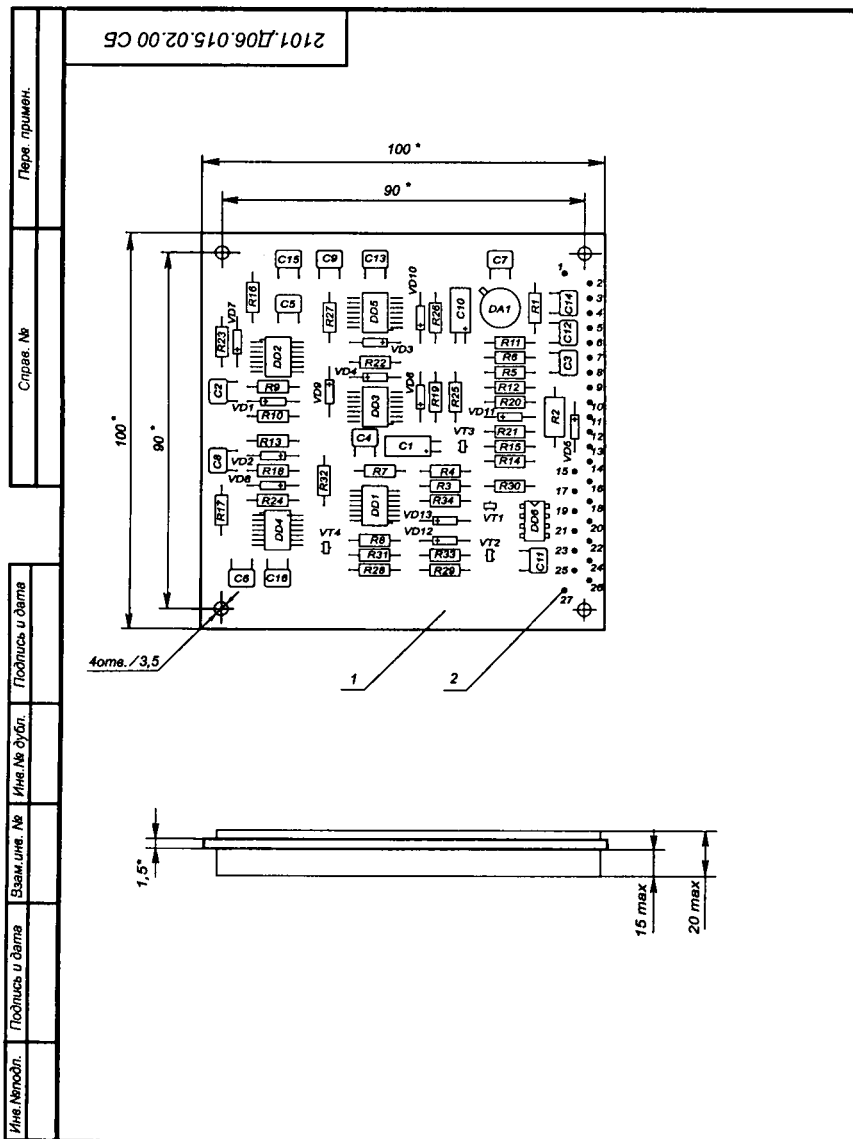
Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примечание
	<i>Резисторы С2-33 ОЖ0.461.093 ТУ</i>		
	<i>С2-29В ОЖ0.467.099 ТУ</i>		
R1	C2-33 - 0,25 - 100 Ом ± 5%	1	
R2	C2-33 - 0,5 - 150 кОм ± 5%	1	
R3, R4	C2-33 - 0,25 - 100 Ом ± 5%	2	
R5, R6	C2-29В - 0,125 - 1 кОм ± 1%	2	
R7, R8	C2-33 - 0,25 - 10 кОм ± 5%	2	
R9	C2-33 - 0,25 - 3 кОм ± 5%	1	
R10	C2-33 - 0,25 - 130 кОм ± 5%	1	
R11...R13	C2-29В - 0,125 - 56,2 кОм ± 1%	3	
R14	C2-33 - 0,25 - 620 кОм ± 5%	1	
R15...R19	C2-33 - 0,25 - 10 кОм ± 5%	5	
R20	C2-33 - 0,25 - 240 кОм ± 5%	1	
R21	C2-33 - 0,25 - 3 кОм ± 5%	1	
R22	C2-33 - 0,25 - 130 кОм ± 5%	1	
R23, R24	C2-33 - 0,25 - 62 кОм ± 5%	2	
R25	C2-33 - 0,25 - 3 кОм ± 5%	1	
R26	C2-33 - 0,25 - 620 кОм ± 5%	1	
R27...R29	C2-33 - 0,25 - 3 кОм ± 5%	3	
R30, R31	C2-33 - 0,25 - 1 кОм ± 5%	2	
R32	C2-33 - 0,25 - 240 кОм ± 5%	1	
R33, R34	C2-33 - 0,25 - 75 Ом ± 5%	2	
VD1...VD13	Диод 2Д522В ДР3.362.029-01 ТУ	13	
	<i>Транзисторы</i>		
VT1, VT2	2Т3129А9 аАО.339.569 ТУ	2	
VT3, VT4	2Т665А9 аАО.339.559 ТУ	2	
			<i>Лист</i>
			2101Д06.015.02.00 ПЭЗ
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
			Дата
			2

Приложение Ж
(справочное)

ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ СПЕЦИФИКАЦИИ

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				<i>Документация</i>		
A3			2101.Д06.015.02.00 СБ	Сборочный чертеж		
A2			2101.Д06.015.02.00 ЭЗ	Схема электрическая принципиальная		
A4			2101.Д06.015.02.00 ПЭЗ	Перечень элементов		
				<i>Детали</i>		
A3		1	2101.Д06.015.02.01	Плата печатная П-015	1	
				<i>Стандартные изделия</i>		
		2		Лепесток Н7.750.961		
				НО.775.014	27	
				<i>Прочие изделия</i>		
				<i>Конденсаторы</i>		
				К10-176 ОЖ0.460.107 ТУ		
				К50-68 АЖЯР.673541.005 ТУ		
		4		К10-176 -М750 -2200 пФ±10%	1	С7
		5		К10-176 - Н90 - 0,1 мкФ	2	С3,С4
			2101.Д06.015.02.00 ПЭЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
Студ.		Худяков				
Конс.		Григорьян			Лит.	Лист
Рук.		Григорьян				Листов
Н. контр		Тронова				1 2
Плата управления Перечень элементов					ЮРГТУ каф. АиТ ФИТУ, гр. 5-1	

ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ СБОРОЧНОГО



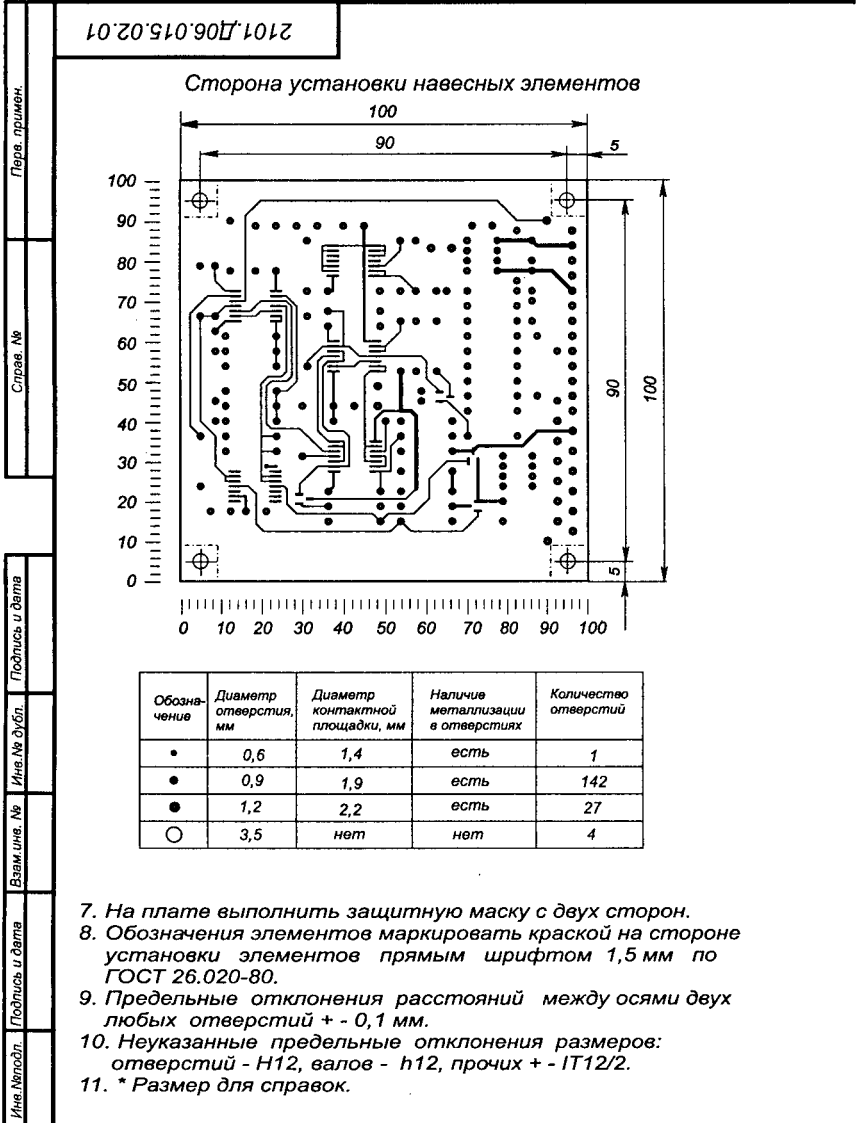
Приложение И (справочное)

ЧЕРТЕЖА ПЕЧАТНОГО УЗЛА

1. Установку навесных элементов производить по ГОСТ 29137-91:
 поз. 4...6 – вариант 020.07.0402.00.00;
 поз. 7, 8 – вариант 020.07.0402.00.00;
 поз. 10...12 – вариант 380.18.1104.11.00;
 поз. 13 – вариант 330.00.0000.00.00;
 поз. 14 – вариант 290.00.0000.00.00;
 поз. 16...27, 30 – вариант 140.02.0202.00.00;
 поз. 28 – вариант 140.02.0203.00.00.
2. Под элементы, расположенные на печатных проводниках, клеить лакоткань поз. 36 клеем БФ-2 ГОСТ 12172-74.
3. Позиционные обозначения элементов соответствуют 2101.Д06.015.02.00 ЭЗ.
4. Паять припоем ПОС 61 ГОСТ 21931-76.
5. Плату после проверки покрыть лаком УР-231 ТУ6-10-863-76 III9. Контактные площадки 1–27 от покрытия предохранить.
6. * Размеры для справок.

				2101.Д06.015.02.00 СБ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Плата управления Сборочный чертеж	Лит.	Месса	Месцитаб
Студ.		Худяков						1:1
Конс.		Григорьян						
Рук.		Григорьян				Лист	Листов 1	
И.Контр.		Тронова				ЮРГТУ(НПИ), каф. АиТ ФИТУ, гр.5-1		

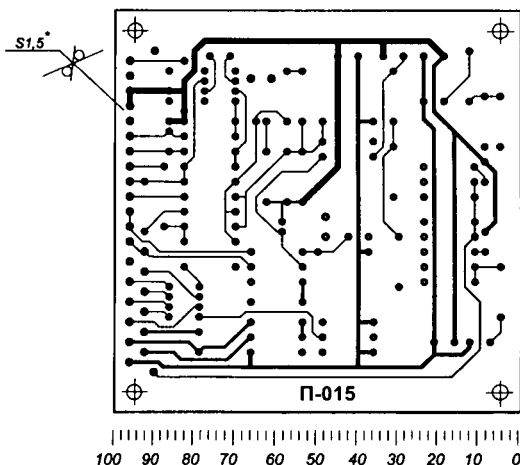
ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ



Приложение К (справочное)

ЧЕРТЕЖА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Rz 40/ (✓)



1. Плата должна соответствовать общим техническим условиям ГОСТ 23752-79.
2. Шаг координатной сетки 1,25 мм. Линии сетки нанесены через одну.
3. Минимальная ширина печатных проводников 0,25 мм.
4. Минимальная ширина зазоров между элементами проводящего рисунка 0,25 мм.
5. Места, обведенные штрих-пунктирной линией, проводниками не занимать с двух сторон.
6. Покрытие элементов печатного монтажа сплав Розе МРТУ 6-09-6708-70.

				2101.Д06.015.02.01				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Плата печатная П-015	Лит.	Масса	Масштаб
Студ.	Худяков							1:1
Конс.	Григорьян					Листов 1		
Рук.	Григорьян				СФ-2-35 Г - 1,5 кл. ГОСТ 10316 - 78			
Н.контр.	Тронова				ЮРГТУ(НПИ), каф. АиТ ФИТУ, гр. 5-1			

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Часть 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССА ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ	6
1. Цели и задачи дипломного проектирования	6
2. Преддипломная практика и тематика дипломного проектирования	10
3. Требования к структуре дипломного проекта	15
3.1. Структура пояснительной записки и графической части дипломного проекта	15
3.2. Рубрикация пояснительной записки	16
4. Основные обязанности руководителя дипломного проекта и дипломника	18
4.1. Руководитель проекта и его обязанности	18
4.2. Обязанности дипломника	19
5. Работа над дипломным проектом, предварительная защита и рецензирование	21
6. Публичная защита дипломных проектов	23
Часть 2. СОДЕРЖАНИЕ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА	26
7. Математическое моделирование, анализ и структурно-параметрический синтез систем управления с сосредоточенными параметрами	26
7.1. Типовое содержание специальной части дипломного проекта	26

7.2. Составление и обоснование технического задания на разработку САУ	27
7.3. Составление функциональной схемы САУ и выбор элементов ее неизменяемой части	28
7.4. Математическое описание САУ и выбор автоматического управляющего устройства	28
7.5. Структурно-параметрический синтез систем управления с сосредоточенными параметрами и запаздыванием	30
8. Математическое моделирование и структурно-параметрический синтез систем автоматического управления и регулирования с распределенными параметрами	52
8.1. Общая характеристика задач управления системами с распределенными параметрами [3, 6, 10, 18, 23]	52
8.2. Базовые уравнения объектов с распределенными параметрами [3–6, 10, 13–15, 18, 19, 22, 23]	53
8.3. Стандартные формы, стандартизирующие функции, функции Грина и вход-выходные соотношения ОРП [4, 5, 10, 15, 18, 23]	56
8.4. Типовые распределенные блоки [4, 5, 10, 18]	59
8.5. Передаточные функции ОРП [4, 5, 10, 18]	61
8.6. Соединения распределенных блоков [4, 5, 10, 18]	62
8.7. Точные методы фактического определения основных характеристик ОРП [3, 4, 10, 13–15, 18, 19]	65
8.8. Приближенное моделирование ОРП [1, 3, 6, 7, 11, 14, 18, 19, 22, 24]	77
8.9. Анализ и синтез систем автоматического управления ОРП	85
9. Нейросетевые системы управления	91
9.1. Классы искусственных нейронных сетей	93
9.2. Базовый процессорный элемент (искусственный нейрон)	95

9.3. Статические линейные однослойные сети	96
9.4. Статические многослойные нейронные сети	97
9.5. Общая характеристика алгоритмов обучения искусственных нейросетей	100
9.6. Метод и алгоритм обратного распространения ошибки	102
9.7. Алгоритмы обучения нейронной сети в реальном времени	106
9.8. Синтез нейрорегуляторов с использованием макропеременных	117
9.9. Заключение	131
10. Методы синтеза робастных и адаптивных систем	132
10.1. Синтез робастных систем во временной и частотной областях	132
10.2. Идентификация линейных по параметрам статических и динамических объектов и систем	145
10.3. Синтез адаптивных систем методом рекуррентных целевых неравенств	151
10.4. Анализ грубости методами функционального анализа	153
10.5. Анализ развития методов синтеза адаптивных систем	155
11. Применение средств вычислительной техники при проектировании САУ	159
11.1. Нахождение математической модели ОУ по его эмпирически полученной кривой разгона	160
11.2. Построение амплитудно-частотной характеристики математической модели объекта управления	163
11.3. Синтез регулятора автоматической системы стабилизации	164
11.4. Исследование качества переходных процессов математической модели САУ	165
11.5. Моделирование САУ на АВМ	166

11.6. Моделирование САУ на персональном компьютере с помощью пакета расширения Simulink	171
11.7. Особенности моделирования импульсных и микропроцессорных САУ	177
12. Микропроцессорные средства автоматизации и управления	180
12.1. Общие сведения об использовании микропроцессорной техники в дипломном проектировании	180
12.2. Характер использования микропроцессорной техники в проектируемых устройствах	180
12.3. Классификация микропроцессорных систем и особенности проектирования	182
12.4. Типовое содержание специальной части дипломных проектов, посвященных разработке и модернизации микропроцессорных систем	187
12.5. Основные этапы разработки и модернизации микропроцессорных систем	191
12.6. Системный анализ объекта контроля проектируемой микропроцессорной системы	191
12.7. Выбор типов используемых микропроцессоров, однокристалльных контроллеров и определение структуры микропроцессорных контроллеров	195
12.8. Разработка аппаратных средств микропроцессорной системы	207
12.9. Разработка программного обеспечения микропроцессорной системы	210
12.10. Совместная отладка программного обеспечения и аппаратных средств; оценка характеристик построенной системы	212
13. Программное обеспечение проектируемых устройств и систем управления	217
13.1. Особенности разработки программного обеспечения в дипломном проекте	217

13.2. Классификация программного обеспечения, разрабатываемого в дипломном проекте	218
13.3. Основные методологии разработки программного обеспечения в дипломном проекте	220
13.4. Выбор операционной системы и языка программирования для разрабатываемого программного обеспечения	224
13.5. Особенности разработки программного обеспечения для проектирования и моделирования автоматических и электронных систем	227
13.6. Реализация информационных баз данных в разрабатываемом программном обеспечении	229
13.7. Основные алгоритмы, реализуемые программным обеспечением микропроцессорных систем	232
13.8. Детализация главы дипломного проекта по разработке алгоритмического и программного обеспечения	239
14. Схемотехническая реализация проектируемых устройств и систем	243
14.1. Обзорно-постановочный раздел	246
14.2. Расчетная часть	247
15. Средства схемотехнического моделирования устройств и систем	272
15.1. Схемотехническое моделирование в дипломном проектировании	272
15.2. Основные возможности программных систем схемотехнического моделирования и рекомендации по их выбору	273
15.3. Рекомендации по выбору объектов схемотехнического моделирования	277
15.4. Рекомендации по выполнению схемотехнического моделирования	279
15.5. Рекомендации по оформлению результатов схемотехнического моделирования	282

16. Проектирование электромагнитных приводов для устройств и систем мехатроники	285
16.1. Общие вопросы проектирования электромагнитных приводов	285
16.2. Выбор типа, исполнения и конструкции электромагнитного привода	291
16.3. Полевые методы анализа процессов в электромагнитных приводах	296
16.4. Проектирование быстродействующих электромагнитных интегрированных приводов	299
17. Обработка результатов экспериментальных исследований	305
17.1. Основные положения	305
17.2. Интервальная оценка погрешности результатов измерений	306
17.3. Определение минимального количества измерений	310
17.4. Исключение грубых ошибок ряда	312
18. Применение устройств силовой электроники	316
18.1. Характеристика возможностей силовой электроники	316
18.2. Общие рекомендации по использованию силовых электронных устройств	318
18.3. Бесконтактные переключающие устройства (прерыватели)	321
18.4. Управляемые выпрямители	322
18.5. Инверторы	324
18.6. Преобразователи частоты	325
18.7. Преобразователи постоянного напряжения (импульсные преобразователи напряжения)	326



19. Конструкторско-технологическая реализация проектируемых устройств и систем	329
19.1. Содержание конструкторско-технологической части дипломного проекта	329
19.2. Выбор типов комплектующих изделий	330
19.3. Компоновка электронного блока	332
19.4. Компоновка модульных систем	335
19.5. Конструирование печатных узлов	338
19.6. Выбор радиаторов для охлаждения полупроводниковых приборов	363
19.7. Расчет параметров теплового режима блока	367
19.8. Проектирование системы виброизоляции электронного блока	373
19.9. Разработка инструкции по эксплуатации устройства	377
19.10. Надежность электронных устройств и систем	378
20. Основы безопасности жизнедеятельности при проектировании информационных, измерительных и управляющих устройств	394
20.1. Общие требования к разделу «Безопасность жизнедеятельности»	394
20.2. Рекомендуемый перечень вопросов, требующих детальной проработки	396
20.3. Идентификация потенциальных вредностей и опасностей на проектируемом объекте (устройстве, системе)	397
20.4. Анализ и оценка условий труда	399
20.5. Организационные мероприятия по обеспечению безопасных условий труда. Система управления охраной труда на предприятии	401
20.6. Инженерные мероприятия по обеспечению безопасных и безвредных условий труда на объекте проектирования	402

20.7. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	407
20.8. Оценка социально-экономической эффективности разработанных мероприятий	409
20.9. Примеры некоторых инженерных расчетов по безопасности жизнедеятельности	411
21. Техничко-экономическое обоснование проектируемых устройств и систем	439
21.1. Общие требования к разработке экономической части дипломного проекта	439
21.2. Содержание экономической части проекта	440
Часть 3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА	460
22. Оформление пояснительной записки	460
22.1. Оформление текста	460
22.2. Оформление формул	462
22.3. Оформление иллюстраций и приложений	463
22.4. Построение таблиц	465
22.5. Список литературы	466
23. Оформление графической части дипломного проекта	468
23.1. Форматы и основные надписи	468
23.2. Чертеж общего вида электронного блока	472
23.3. Чертеж печатной платы	473
23.4. Сборочный чертеж печатного узла	474
23.5. Спецификация печатного узла	476
23.6. Типы электрических схем	478
23.7. Общие правила оформления электрических схем	479
23.8. Структурные схемы	498
23.9. Функциональные схемы	498
23.10. Принципиальные схемы	499

23.11. Схемы подключения	509	
23.12. Схемы расположения	510	
23.13. Схемы алгоритмов	511	
<i>Приложение А (справочное).</i>		
Перечень некоторых государственных стандартов	520	
<i>Приложение Б (справочное).</i>		
Степени защиты корпусов	525	
<i>Приложение В (справочное).</i>		
Корпуса электронной аппаратуры	527	
<i>Приложение Г (справочное).</i>		
Кабельные вводы	536	
<i>Приложение Д (справочное).</i>		
Варианты формовки выводов и установки навесных элементов по ГОСТ 29137-91	538	
<i>Приложение Е (справочное).</i>		
Пример оформления перечня элементов	551	
<i>Приложение Ж (справочное).</i>		
Пример оформления Спецификации	553	
<i>Приложение И (справочное).</i>		
Пример оформления сборочного чертежа печатного узла	557	
<i>Приложение К (справочное). Пример оформления чертежа печатной платы</i>		559

Серия «Высшее образование»

Авторский коллектив:

Григорьян Сергей Георгиевич,
Елсуков Владимир Сергеевич,
Зинченко Елена Валентиновна,
Козлов Владимир Николаевич,
Кононенко Татьяна Петровна,
Кузьмин Николай Николаевич,
Лачин Вячеслав Иванович,
Павленко Александр Валентинович,
Пятин Ольга Николаевна,
Рапопорт Эдгар Яковлевич,
Савёлов Николай Семенович,
Савин Михаил Михайлович,
Седов Андрей Владимирович,
Терехов Валерий Александрович,
Фролов Анатолий Васильевич

ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА

*Дипломное проектирование систем
автоматизации и управления*

Ответственный редактор Э. Юсупяни
Технический редактор Л. Багрянцева
Обложка В. Кириченко
Корректоры: Т. Краснолуцкая, Т. Лазарева

Сдано в набор 10.05.2006. Подписано в печать 20.10.2006.
Формат 60×84 1/16. Бумага тип № 2.
Гарнитура NewtonС. Печать высокая.
Усл. печ. л. 32,78. Тираж 4000 экз.
Заказ № 3997

Издательство «Феникс»
344082, г. Ростов-на-Дону, пер. Халтуринский, 80.

Отпечатано с готовых диапозитивов в ЗАОр «НПП «Джангар»
358000, Республика Калмыкия, г. Элиста, ул. Ленина, 245

Торговый Дом



Для оптовых покупателей

Региональное представительство
198096, г. Санкт-Петербург, ул. Кронштадтская, д. 11,
оф. 17. Тел.: (812) 335-34-84.

Директор: **Стрельникова Оксана Борисовна**
E-mail: fnx.spb@mail.ru

Региональный менеджер: **Завьялов Антон**
Представительство осуществляет доставку грузов
автотранспортом и почтово-багажными вагонами,
транспортные расходы делятся 50/50.

В Санкт-Петербурге
книги издательства «Феникс» можно купить:
«Дом книги»

Невский проспект, 28
Тел.: 318-65-04, факс: 311-98-95
E-mail: noskova@hbook.spb.ru

Книги издательства «Феникс» в Украине:

ООО ИКЦ «Кредо»
г. Донецк, ул. Университетская, 96
Тел.: +38 (062) 345-63-08, 339-60-85
E-mail: moiseenko@skif.net.

г. Запорожье, ул. Глиссерная, 22, комната 19
Тел.: +380612-134951, 145819
E-mail: vega@comint.net

г. Киев, ул. Вербовая, 17 (СПД Шкаран)
Тел.: +38044-4644946, 0509084576
E-mail: kredok@i.com.ua

**Книги издательства «Феникс»
в фирменных магазинах г. Ростова-на-Дону:**

1. пер. Соборный, 17, тел. 8(863)2-624-707
2. ул. Большая Садовая, 70, тел. 8(863)2-620673
3. ул. Немировича-Данченко, 78, тел. 8(863)2-446-934

Торговый Дом  еникс

В Москве книги издательства «Феникс»
можно купить:

**Для книготорговых организаций
в региональном представительстве,
расположенном по адресу:**

1. Ул. Космонавта Волкова, д. 25/2, 1 этаж. М. «Войковское».
Тел. (095) 156-0568, 450-0835, 8-916-523-4376
E-mail: fenix-m@yandex.ru
Контактное лицо: Моисеенко Сергей Николаевич
*Для оптовых покупателей – оптовые издательские цены,
гибкая система скидок, бесплатная доставка по Москве.*
2. Шоссе Фрезер, д. 17. М. «Авиамоторная»
Тел. (095) 107-44-98, 517-32-95, 711-79-81
Тел./факс 8-501-413-75-78
E-mail: mosfen@rochta.ru; mosfen@bk.ru
Директор Мячин Виталий Васильевич
3. *В издательском Торговом Доме «КноРус»*
Ул. Б. Переяславская, 46. М. «Рижская», «Проспект мира»
Тел. (095) 680-02-07, 680-72-54, 680-91-06, 680-92-13
E-mail: phoenix@knorus.ru. Лебедев Андрей

В крупнейших магазинах:

- ТД «Библио-Глобус»*
Ул. Мясницкая, 6 (тел. 925-24-57)
- ТД «Москва»*
Ул. Тверская, 8 (тел. 229-66-43)
- «Московский Дом книги»*
Ул. Новый Арбат, 8 (тел. 290-45-07)
- «Молодая гвардия»*
Ул. Большая Полянка, 28 (тел. 238-11-44)
- «Дом педагогической книги»*
Ул. Пушкинская, 7/5 (тел. 299-68-32)
- «Медицинская книга»*
Комсомольский проспект, 25 (тел. 245-39-27)

Торговый Дом **Феникс**

ПРЕДЛАГАЕТ:

- ✓ Около 100 новых книг каждый месяц
- ✓ Более 3000 наименований книжной продукции собственного производства
- ✓ Более 1500 наименований обменной книжной продукции от лучших издательств России

ОСУЩЕСТВЛЯЕТ:

- ✓ Оптовую и розничную торговлю книжной продукцией

ГАРАНТИРУЕТ:

- ✓ Своевременную доставку книг в любую точку страны, *за счет издательства*, автотранспортом и ж/д контейнерами
- ✓ *Многоуровневую* систему скидок
- ✓ *Реальные цены*
- ✓ *Надежный доход* от реализации книг нашего издательства.

Наш адрес: 344082, г. Ростов-на-Дону, пер. Халтуринский, 80

Наш сайт: <http://www.Phoenixrostov.ru>

Торговый отдел:

Контактные телефоны:

8(863) 261-89-53, 261-89-54, 261-89-55, 261-89-56, 261-89-57

Факс: 8 (863) 261-89-58

По вопросам оптовых продаж

г. Ростов-на-Дону, пер. Халтуринский, 80

Тел.: 8(863) 261-89-53

E-mail: torg@phoenixrostov.ru

Представительство в г. Владивосток

г. Владивосток, ул. Фадеева, 45 А.

Директор: Калинин Олег Владимирович

Тел. (4232) 23-73-18. E-mail: oleg38@mail.primorye.ru

Уральское региональное представительство

620085, г. Екатеринбург, ул. Ферганская, д 16, оф. 408.

Тел. 8(343) 261-54-03. E-mail: bookva@isnet.ru

Директор: Подунова Наталья Александровна

г. Челябинск, ООО «Интер-сервис ЛТД»

454036, г. Челябинск, Свердловский тракт, 14

E-mail: slava@intser.ru

Менеджер: Зосим Вячеслав

г. Новосибирск, ООО «ТОП-Книга»

г. Новосибирск, ул. Арбузова, 1/1

Тел. (3832) 36-10-28 доб. 1438. E-mail: phoenix@top-kniga.ru

Менеджер: Михайлова Наталья

Издательство



Приглашает к сотрудничеству
АВТОРОВ для издания:

- ✓ учебников для ПТУ, ссузов и вузов
- ✓ научной и научно-популярной литературы по МЕДИЦИНЕ и ВЕТЕРИНАРИИ, ЮРИСПРУДЕНЦИИ и ЭКОНОМИКЕ, СОЦИАЛЬНЫМ и ЕСТЕСТВЕННЫМ НАУКАМ
- ✓ литературы по ПРОГРАММИРОВАНИЮ и ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ
- ✓ ПРИКЛАДНОЙ и ТЕХНИЧЕСКОЙ литературы
- ✓ литературы по СПОРТУ и БОЕВЫМ ИСКУССТВАМ
- ✓ ДЕТСКОЙ и ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ литературы
- ✓ литературы по КУЛИНАРИИ и РУКОДЕЛИЮ

Высокие гонорары!!!

Все финансовые затраты берем на себя!!!

При принятии рукописи в производство
выплачиваем гонорар на 10 % выше
любого российского издательства!!!

Рукописи не рецензируются и не возвращаются!

По вопросам издания книг:

Тел. 8 (863) 2618950 E-mail: office@phoenixrostov.ru

Наш адрес:

344082, г. Ростов-на-Дону, пер. Халтуринский, 80

Факс: (863) 261-89-50

<http://www.Phoenixrostov.ru> E-mail: reclamabook@jeo.ru

Редакционно-издательский отдел

Осташов Сергей Александрович (руководитель отдела)

Тел.: (863) 261-89-75 e-mail: ostashov@phoenixrostov.ru

Юсупянц Эдуард Арамович (редактор)

Тел.: (863) 261-89-75 e-mail: eduard@phoenixrostov.ru

Жиляков Илья Юрьевич (редактор)

Тел.: (863) 261-89-75 e-mail: publish@phoenixrostov.ru

Багрянцева Людмила Андреевна

(технический редактор)

Тел.: (863) 261-89-75

Сайт издательства Феникс: <http://www.Phoenixrostov.ru>

Вышли в свет

**ЭЛЕКТРОНИКА
И МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ТЕХНИКА**

*Дипломное проектирование систем
автоматизации и управления: учебник*

Под ред. д.т.н., проф. В.И. Лачина

В учебнике описываются цели, задачи и тематика дипломного проектирования, раскрывается содержание дипломного проектирования, приводятся требования к оформлению пояснительной записки и графической части дипломного проекта, основные обязанности руководителя проекта и дипломника, график работы над проектом, допуск к защите и описание публичной защиты дипломного проекта. Особое внимание уделяется содержанию специальной части дипломного проекта, а также технико-экономическому обоснованию проектируемых устройств и систем и основам безопасности жизнедеятельности при проектировании устройств и систем.

Может быть использован студентами специальностей, входящих в направления подготовки: «Автоматизация и управление», «Электроника и микроэлектроника», «Электротехника и электротехнология», «Приборостроение», «Информатика и вычислительная техника». Отдельные разделы учебника могут быть использованы студентами практически всех инженерных специальностей, в том числе и при изучении соответствующих курсов.

Вышли в свет

Кононенко В.В.

**ПРАКТИКУМ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ
И ЭЛЕКТРОНИКЕ**

Учебное пособие для вузов

Настоящий практикум содержит учебные задачи и упражнения по всем разделам курса «Электротехника и электроника» для ряда неэлектрических специальностей высших учебных заведений.

В нем приводятся элементы теории, примеры решения задач, а также в ряде случаев задания для самостоятельного решения.

Сборник предназначен для студентов неэлектрических специальностей вузов, работающих по дневной и заочной форме обучения и может быть полезен преподавателям, читающим этот курс.