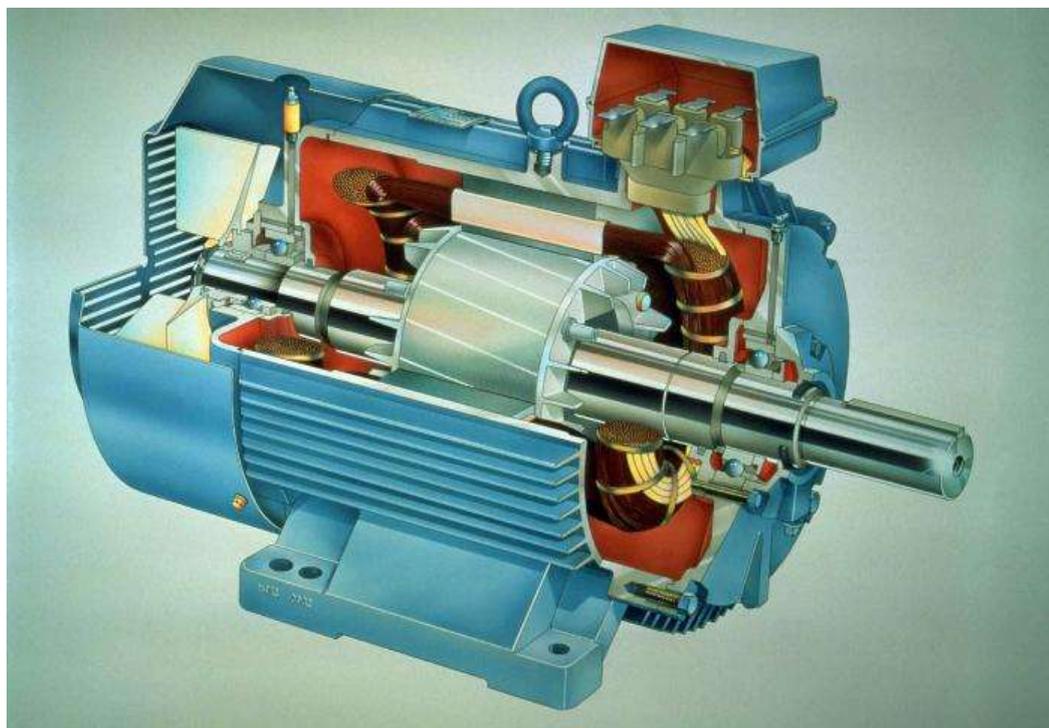


**Қостанай облысы әкімдігі білім басқармасының  
«Қостанай жоғары политехникалық колледжі» КМҚК  
КГКП «Костанайский политехнический высший колледж»  
Управления образования акимата Костанайской области**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ПРОФЕССИОНАЛЬНОМУ  
МОДУЛЮ**

«ПМ 03 Выбор количественных и качественных характеристик режимов работы электрических машин и трансформаторов для производственных условий»  
Специальности 0911000 «Техническая эксплуатация, обслуживание и ремонт электрического и электромеханического оборудования» (по видам)»



Костанай, 2021 г

**Курьерова М.П.**

«Выбор количественных и качественных характеристик режимов работы электрических машин и трансформаторов для производственных условий»: Учебно-методический комплекс / Курьерова М.П. – Костанай. – КГКП Костанайский политехнический высший колледж -Костанай,2021 г-233 с.

## Введение

Настоящий учебно-методический комплекс по профессиональному модулю «Выбор количественных и качественных характеристик режимов работы электрических машин и трансформаторов для производственных условий» предназначен для аудиторной и самостоятельной работы обучающихся с русским языком обучения по специальности 0902000 «Электроснабжение» (по отраслям). Основная цель учебно-методического комплекса – получить навыки и знания, необходимые для выполнения работ по техническому обслуживанию электрических машин и трансформаторов.

В процессе изучения данного модуля студент должен:

знать:

- режимы работы электрических машин;
- классификация электрических машин. История развития электрических машин;
- перспективы развития энергетики и задачи электромашиностроения на современном этапе;
- принцип действия генератора, двигателя постоянного тока;
- причины, вызывающие искрение на коллекторе;
- уравнения ЭДС и моментов для генератора;
- генераторы постоянного тока независимого, параллельного и смешанного возбуждения;
- уравнения электродвижущих сил (ЭДС) и моментов для двигателя постоянного тока;
- потери и коэффициент полезного действия машины постоянного тока;
- принцип действия синхронного генератора;
- принцип действия асинхронного двигателя;
- устройство статора синхронной и асинхронной машин;
- принцип выполнения обмотай статора (якоря);
- понятие о катушке (секции), полюсном делении, шаге обмотки по пазам;
- ЭДС проводника обмотки;
- график распределения магнитной индукции в воздушном зазоре машины;
- коэффициент укорочения шага обмотки;
- число пазов на полюс и фазу;
- уравнения электродвижущих (ЭДС), магнитодвижущих (МДС) сил, токов;
- приведение параметров вторичной обмотки трансформатора к первичной;
- группы соединения (основные производственные);
- параллельную работу трансформаторов;
- устройство и особенности рабочего процесса автотрансформаторов;
- достоинства и недостатки автотрансформаторов по сравнению с двухобмоточными трансформаторами.

уметь:

- улучшать коммутацию;
- устранять помехи радиоприему;
- классифицировать генераторы постоянного тока по способу возбуждения;
- регулировать свойства коллекторных двигателей;
- рассчитывать параметры и выполнять развернутые схемы обмотки статора (якоря) машины переменного тока;
- подсчитывать потери КПД асинхронного двигателя;
- определять максимальный момент и критическое скольжение;
- находить начальный пусковой момент;
- рассчитать и построить рабочую характеристику асинхронного двигателя;
- выполнить опыт холостого хода и короткого замыкания асинхронного двигателя;
- уравнения электродвижущих (ЭДС), магнитодвижущих (МДС) сил, токов;
- приведение параметров вторичной обмотки трансформатора к первичной;
- группы соединения (основные производственные);
- параллельную работу трансформаторов;
- устройство и особенности рабочего процесса автотрансформаторов;

- достоинства и недостатки автотрансформаторов по сравнению с двухобмоточными трансформаторами;
- регулировать напряжение трансформаторов;
- исследовать двухобмоточный силовой трансформатор методом холостого хода и короткого замыкания;
- рассчитывать параметры трансформатора;
- определять группы соединения трехфазного двухобмоточного силового трансформатора.

Учебно-методический комплекс включает в себя теоретический материал, лабораторные и практические работы, что способствует формированию коммуникативной компетенции студентов в учебном процессе.

Кроме теоретического материала в учебно-методический комплекс, включены тестовые и контрольные задания.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Теоретическая часть

<b>Раздел 1. Машины постоянного тока</b> .....	7
1.Машины постоянного тока. Принцип действия машин постоянного тока.....	7
2.Магнитная цепь машины постоянного тока при холостом ходе и в режиме нагрузки.....	13
3. Обмотки якоря машин постоянного тока.....	18
4. Коммутация в машинах постоянного тока.....	26
5. Машины постоянного тока специального назначения.....	34
<b>Раздел 2 Трансформаторы</b> .....	39
6. Основные сведения о трансформаторах. Устройство и рабочий процесс трансформаторов.....	39
7. Работа трансформатора под нагрузкой и несимметричной нагрузкой.....	47
8. Автотрансформаторы и трехобмоточные трансформаторы.....	52
9. Трансформаторы специального назначения.....	56
<b>Раздел 3 Общие вопросы теории бесколлекторных машин переменного тока</b> .....	61
10. Введение. Бесколлекторные машины переменного тока.....	61
11. Принцип действия бесколлекторных машин переменного тока.....	62
<b>Раздел 4 Асинхронные машины</b> .....	64
12.Принцип действия асинхронных машин переменного тока. Режимы работы и устройство асинхронной машины.....	64
13. Рабочий процесс трехфазного асинхронного двигателя.....	73
14. Электромагнитный момент и рабочие характеристики трехфазных асинхронных двигателей.....	80
15. Пуск и регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей.....	86
16. Асинхронные машины специального назначения.....	96
<b>Раздел 5 Синхронные машины</b> .....	99
17. Устройство синхронных машин.....	99
18. Магнитное поле и характеристики синхронных генераторов.....	104
19. Основные параметры синхронных двигателей и синхронных компенсаторов.....	111
20. Синхронные машины специального назначения.....	115
<b>Практикум(система учебных материалов, обеспечивающих проведение практических занятий-ЛР,ПР)</b>	
<b>Практические работы</b> .....	128
Практическая работа №1 Расчет магнитных параметров машины постоянного тока.....	128
Практическая работа №2 Расчет магнитных параметров машины постоянного тока в режиме нагрузки.....	134
Практическая работа №3 Расчет параметров и выполнение развернутой схемы обмотки якоря..	136
Практическая работа №4 Расчет параметров трансформатора.....	137
Практическая работа №5 Расчет параметров схемы замещения трансформатора.....	142
Практическая работа №6 Расчет параметров обмотки статора машины переменного тока.....	148
Практическая работа №7 Выполнение развернутой схемы обмотки статора машины переменного тока.....	150
Практическая работа №8 Расчет режимов работы трехфазного асинхронного двигателя.....	153
Практическая работа №9 Расчет рабочего процесса трехфазного асинхронного двигателя.....	156
<b>Лабораторные работы</b> .....	158
Лабораторная работа №1 Исследование генератора постоянного тока параллельного возбуждения.....	158
Лабораторная работа №2 Исследование двигателей постоянного тока параллельного и последовательного возбуждения.....	160
Лабораторная работа №3 Исследование двухобмоточного силового трансформатора методом холостого хода.....	165
Лабораторная работа №4 Исследование параллельной работы трехфазных двухобмоточных силовых трансформаторов.....	170

Лабораторная работа №5 Опытное определение групп соединения трехфазного двухобмоточного силового трансформатора .....	172
Лабораторная работа №6 Исследование работы автотрансформаторов .....	175
Лабораторная работа №7 Исследование работы трансформаторов с регулированием напряжения .....	178
Лабораторная работа №8 Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором .....	182
Лабораторная работа №9 Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором .....	185
Лабораторная работа №10 Исследование трехфазного асинхронного двигателя методом холостого хода и методом короткого замыкания .....	189
Лабораторная работа №11 Определение начал и концов обмоток статора асинхронного двигателя .....	194
Лабораторная работа №12 Исследование параллельной работы синхронных генераторов .....	196
<b>Диагностико-контролирующий блок</b> .....	200
Описание проверочных испытаний в соответствии с результатами обучения (по разделам) .....	198
Контрольный лист .....	203
Контрольно – измерительные материалы .....	207
Тестовые задания .....	207
Тематика рефератов и докладов .....	229
Вопросы для итогового контроля .....	230
<b>Заключение</b> .....	232
<b>Литература</b> .....	233

## Раздел 1 Машины постоянного тока.

### Тема 1. Машины постоянного тока. Принцип действия машин постоянного тока.

Простейшим генератором постоянного тока может служить виток из проводника в виде рамки, вращающийся в магнитном поле между двумя постоянными магнитами  $N$  и  $S$  (рисунок 1.1).

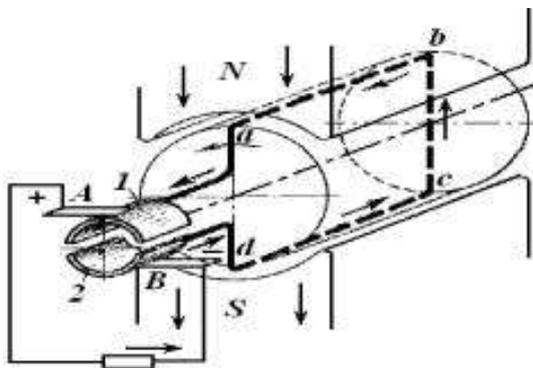


Рисунок 1.1 – Схема работы машины постоянного тока

Концы витка  $abcd$  присоединяются к двум медным пластинам коллектора, изолированным друг от друга и от вала, на котором они помещены. На пластинах помещены неподвижные щетки  $A$  и  $B$ , к которым присоединена внешняя цепь, состоящая из каких-либо приемников электроэнергии. При вращении витка с постоянной частотой проводники  $ab$  и  $cd$  пересекают магнитные линии, при этом в проводниках индуцируется э.д.с. При равномерном распределении магнитного поля в пространстве э.д.с. проводника

$$e = E \sin \omega t, \quad (1.1)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота;

$f$  – частота э.д.с.

Таким образом, при условии равномерного распределения магнитного поля в витке индуцируется переменная синусоидальная э.д.с. (рисунок 1.2,а) Направление индуцируемой в проводнике э.д.с. определяется правилом правой руки, т.е. при перемещении проводника  $ab$  под северным полюсом в нем наводится э.д.с., направленная из-за плоскости чертежа, а когда он проходит под южным полюсом, – за плоскость чертежа. Таким образом, в проводнике  $ab$  наводится переменная во времени э.д.с., изменяющая свое направление 2 раза за один оборот витка.

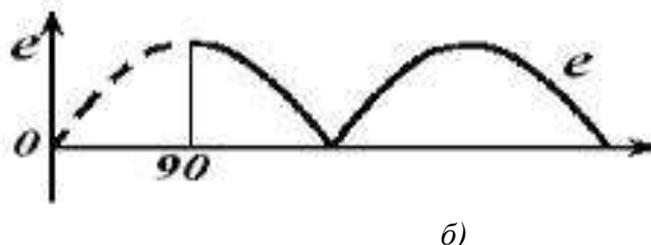
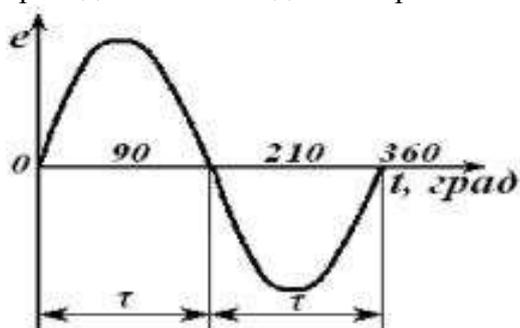


Рисунок 1.2 – Э.д.с., индуцируемая в витке (а) и на внешнем участке цепи (б)

Время  $T$ , за которое изменяется э.д.с., называют периодом. Число периодов в одну секунду называют частотой. В общем случае, когда машина имеет  $p$  пар полюсов, частота наводимой э.д.с. увеличивается пропорционально  $p$ , т.е.  $f = pn$ , где  $n$  – частота вращения витка в секунду.

Для нормальной работы генератора нужно установить щетки так, чтобы наводимая в витке э.д.с. была равна нулю в момент перехода щетки с одной пластины на другую. Каждая из щеток будет соприкасаться только с той коллекторной пластиной и соответственно только с тем из проводников, которые находятся под полюсом данной полярности. Например, в момент времени, показанный на рисунке 1.1, щетка  $A$  соприкасается с пластиной 1 и имеет положительный

потенциал, так как к ней подводится э.д.с. от проводника  $ab$ , находящегося под северным полюсом. При повороте якоря на  $90^\circ$  виток будет расположен так, что его проводники перемещаются вдоль магнитных линий поля, не пересекая их. Поэтому э.д.с., наведенная в витке, равна нулю. Щетки соединяют коллекторные пластины между собой и тем самым замыкают виток накоротко. При повороте витка на  $180^\circ$  щетка  $A$  соприкасается с пластиной 2, но по-прежнему она имеет положительный потенциал, так как к ней подводится э.д.с. от проводника  $cd$ , заменившего проводник  $ab$  под северным полюсом. Аналогично можно видеть, что щетка  $B$  имеет всегда только отрицательный потенциал. Таким образом, по витку  $abcd$  по-прежнему протекает переменный ток; при этом по внешнему участку цепи ток проходит только в одном направлении, а именно от положительной щетки  $A$  к отрицательной щетке  $B$ , т. е. происходит выпрямление переменной э.д.с., наведенной в витке, в пульсирующую на внешнем участке цепи (рисунок 1.2, б). Как видно из рисунка, кривая э.д.с. помимо постоянной содержит большую переменную составляющую, называемую пульсацией э.д.с. Для ее уменьшения следует увеличить число коллекторных пластин. Если, например, в магнитном поле полюсов поместить два витка, оси которых сдвинуты на  $90^\circ$  в пространстве, и концы этих витков соединить с четырьмя коллекторными пластинами, то при вращении витков индуцируемые в них э.д.с. окажутся сдвинутыми по фазе на угол  $\pi/2$ . Щетки в такой машине надо поместить так, чтобы они соприкасались с пластинами того витка, в котором в данный момент э.д.с. имеет наибольшее значение и на щетках будет э.д.с., пульсация которой много меньше, чем при двух коллекторных пластинах. При дальнейшем увеличении числа коллекторных пластин пульсация уменьшается и при 16 пластинах на пару полюсов становится менее 1%.

В действительности распределение магнитного поля в пространстве неравномерно (рисунок 1.3).

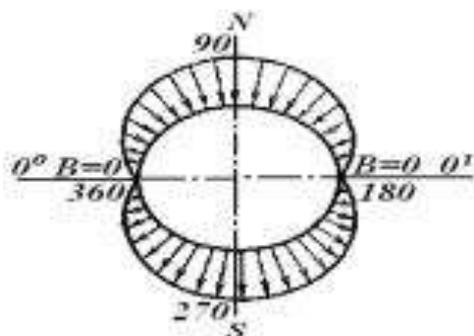


Рисунок 1.3 – Диаграмма распределения магнитной индукции под полюсом

Для увеличения э.д.с. (напряжения) на щетках электрические машины выполняют с многовитковыми обмотками якоря. На рисунке 1.4, а показаны схема двухполюсного генератора постоянного тока, обмотка якоря которого состоит из четырех витков, и схема токопрохождения в проводах обмотки. Коллектор генератора имеет четыре пластины и на нем располагаются две неподвижные щетки, с помощью которых обмотка якоря соединяется с внешней цепью. К этим щеткам параллельно приложены две суммарные э.д.с.: одна от проводов 7, 8, 1, 2 и другая от проводов 6, 5, 4, 3. Причем э.д.с. проводов 7, 8 и проводов 1, 2 сдвинуты относительно друг друга на угол  $90^\circ$ . Также сдвинуты на  $90^\circ$  э.д.с. проводов 6, 5 и э.д.с. проводов 4, 3. На рисунке 1.4, б и в представлены графики изменения э.д.с. в параллельных цепях обмотки якоря в зависимости от времени.

Если увеличить число коллекторных пластин и число проводов (витков) обмотки якоря, то результирующая кривая э.д.с. становится близкой к прямой линии с незначительной по величине пульсацией. Таким образом, коллектор в генераторах постоянного тока выполняет роль преобразователя переменной э.д.с., индуцируемой в обмотке якоря, в постоянную на щетках, т.е. осуществляет выпрямление э.д.с.

Электрические машины чаще изготавливают многополюсными. На рисунке 1.5 изображена схема четырехполюсного генератора постоянного тока. Линию, перпендикулярную оси полюсов и проходящую между разноименными полюсами, называют геометрической нейтралью, а часть окружности якоря, соответствующую одному полюсу – полюсным делением. Рассматриваемая

простейшая машина может работать двигателем, если к обмотке ее якоря подвести постоянный ток от внешнего источника.

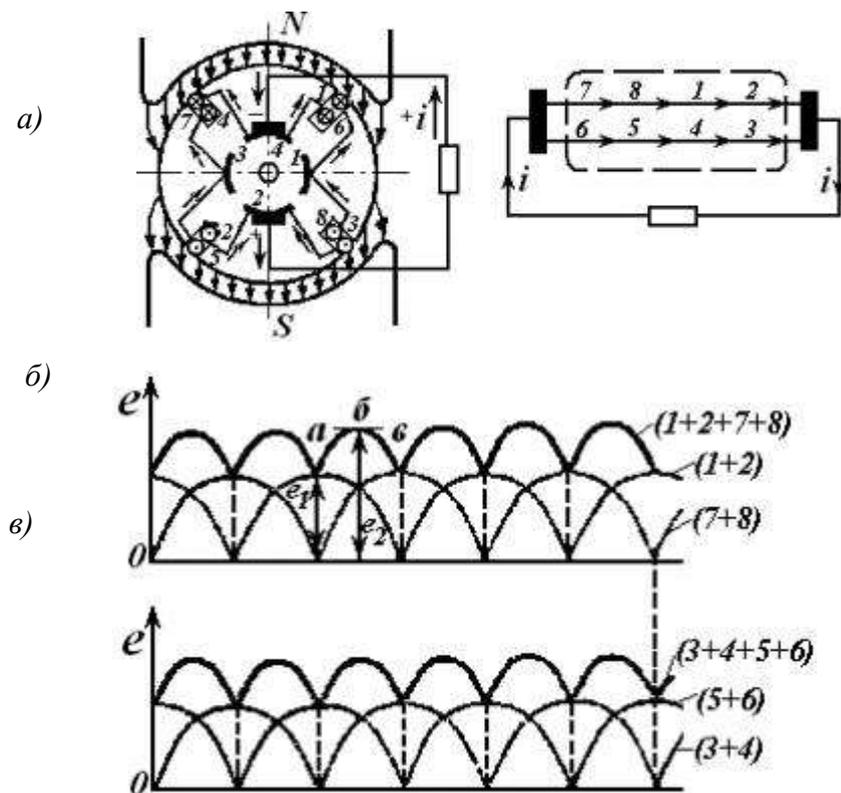


Рисунок 1.4 – Генератор постоянного тока с обмоткой якоря из четырех витков

Машина постоянного тока состоит из неподвижной части – статора и вращающейся части – якоря, в котором происходит процесс преобразования механической энергии в электрическую (генератор) или обратно – электрической энергии в механическую (электродвигатель).

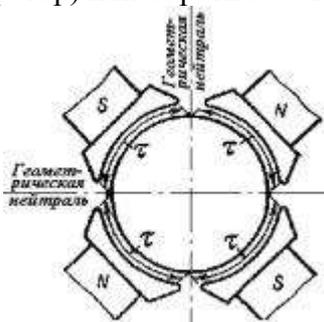


Рисунок 1.5 – Схема четырехполюсного генератора

Устройство и основные элементы конструкции машины постоянного тока

Между неподвижной и вращающейся частями имеется зазор. Неподвижная часть (рисунок 1.6) состоит из станины 3, главных полюсов, предназначенных для создания основного магнитного потока, добавочных полюсов 2, служащих для достижения безыскровой работы щеток на коллекторе (улучшения коммутации). К станине крепят болтами подшипниковые щиты, главные и дополнительные полюсы.

Основной (главный) полюс (рисунок 1.7, а) имеет сердечник 4, набранный из листов электротехнической стали толщиной 0,5 – 1 мм, стянутых шпильками. На сердечник насажены две катушки обмоток возбуждения 2. Нижнюю часть сердечника – полюсный наконечник выполняют так, чтобы воздушный зазор увеличивался от центра полюса к его концам.

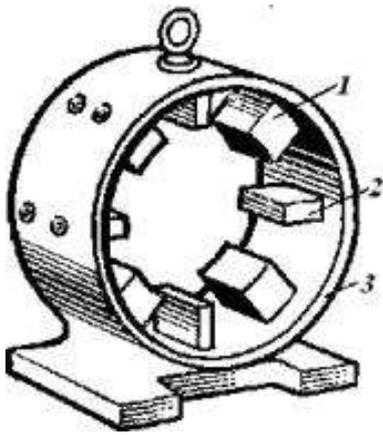
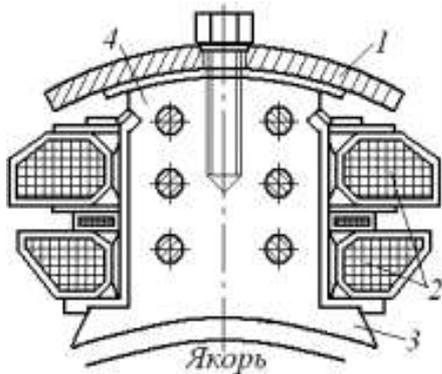
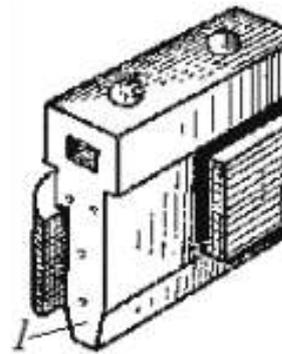


Рисунок 1.6 – Неподвижная часть машины постоянного тока

Это делается для того, чтобы уменьшить искажение поля под действием реакции якоря и рассеяние главного поля в зоне коммутации. У компенсированных машин постоянного тока в полюсных наконечниках выштамповывают пазы для размещения компенсационной обмотки. Число главных полюсов всегда четное, причем северные и южные полюсы чередуются, что достигается соответствующим соединением катушек обмотки возбуждения полюсов. Катушки всех полюсов соединяют последовательно. Полюсы крепятся к станине 1 болтами или шпильками.



а)



б)

Рисунок 1.7 – Основной (а) и добавочный (б) полюсы

Добавочный полюс (рисунок 1.7, б) состоит из сердечника 1, изготовляемого из стали, и обмотки 2, изготовляемой из медных шин прямоугольного сечения. Обмотки добавочных полюсов соединяют последовательно с обмоткой якоря, а полюсы устанавливают между главными полюсами и крепят к станине болтами. Воздушный зазор под добавочными полюсами значительно больше, чем под главными. Поперечное сечение добавочных полюсов расширяется в сторону корпуса. Это увеличивает поверхность прилегания добавочного полюса к корпусу, что дает большую устойчивость и предупреждает насыщение от большого потока рассеяния добавочных полюсов.

Для создания электрического контакта с поверхностью коллектора в машине устанавливают щетки, которые прикрепляют к щеткодержателю. Щеткодержатель (рисунок 1.8) состоит из нажимных пластин 1; пружины 2, передающей давление на щетку 3; из обоймы 4.

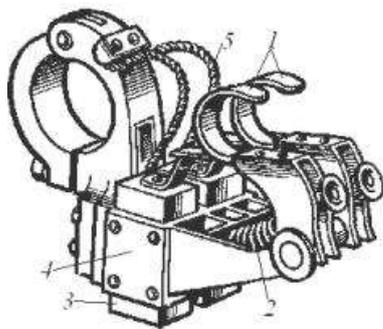


Рисунок 1.8 – Щеткодержатель

Для присоединения элементов электрической цепи машины к щетке последняя снабжается гибким медным тросиком 5. Все щеткодержатели одной полярности соединяются между собой сборными шинами, присоединенными к выводам машины. Щеткодержатели крепят на траверсе.

Якорь машины постоянного тока состоит из сердечника якоря с обмоткой, коллектора, вентилятора и вала с шарикоподшипником или роликоподшипником.

Сердечник якоря (рисунок 1.9, а) машины представляет собой пакет из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, которые для уменьшения потерь от вихревых токов изолируют друг от друга лаком. Пакет запрессован на валу якоря и удерживается в сжатом состоянии нажимными шайбами 1. Для лучшего охлаждения машины в сердечниках якоря устраивают вентиляционные каналы. Каждый лист пакета (рисунок 1.9, б) имеет зубцы 1, пазы 2 и вентиляционные отверстия 3. В пазы сердечника укладывают проводники обмотки якоря (рисунок 1.9, в).

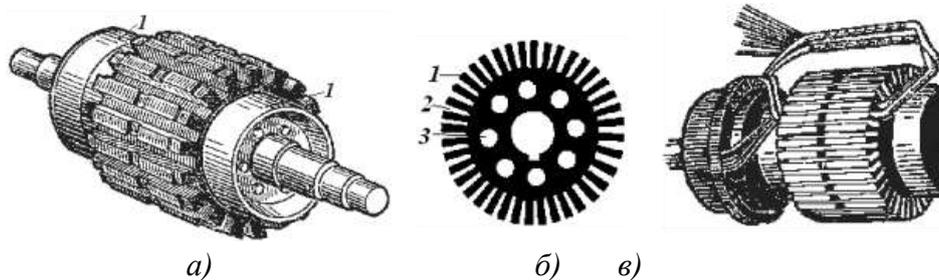


Рисунок 1.9 – Сердечник якоря: а – якорь без обмотки; б – стальной лист сердечника якоря; в – необмотанный якорь машины постоянного тока

Обмотку якоря присоединяют к пластинам коллектора. На рисунке 1.10 показан коллектор, собранный из пластин 7 твердотянутой меди, изолированных друг от друга и от вала якоря миканитовыми прокладками 4 и манжетами. Коллектор состоит из корпуса 1, болтов 2, нажимного кольца 3, микалитовых прокладок 4. Для удобства монтажа и обеспечения прочности крепления коллекторные пластины 7 выполняют в форме «ласточкина хвоста» б. Соединяют коллекторные пластины с проводами обмотки якоря с помощью «петушков» 5, которые имеют прорези для укладки и запайки в них концов секций обмотки якоря.

На рисунке 1.11 показано устройство машины постоянного тока.

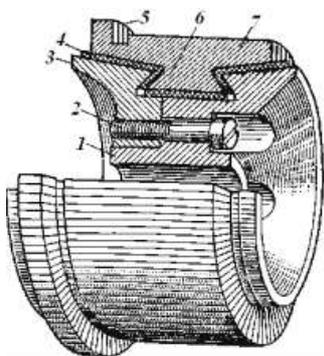


Рисунок 1.10 – Устройство коллектора

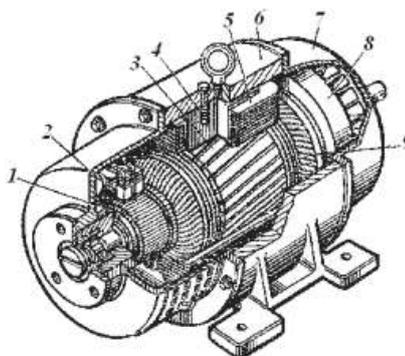


Рисунок 1.11 – Устройство машины постоянного тока

### Системы вентиляции электрических машин

К станине 6 болтами крепят главные полюсы, состоящие из сердечника 4 и катушки обмотки возбуждения 5. С торцовых сторон к станине крепят боковые щиты 7 с подшипниками, удерживающими вал машины. Якорь машины состоит из сердечника 3, обмотки 9 и коллектора 1. На валу якоря укреплен вентилятор 8, на коллекторе помещены неподвижные щетки 2.

Электрические машины подразделяют в зависимости от способа охлаждения на машины с естественным охлаждением и машины с самовентиляцией.

У машин с естественным охлаждением нет специальных устройств для усиления эффективности охлаждения. Естественную вентиляцию применяют в машинах малой мощности, так как условия их охлаждения сравнительно легкие.

У машин с самовентиляцией охлаждение достигается с помощью вентилятора (крылатки). Самовентиляция может быть внутренняя, когда воздух проходит внутри машины, и наружная, когда вентилятор выносят наружу и он обдувает внешнюю ребристую поверхность станины. Внутренняя самовентиляция в зависимости от расположения вентилятора по отношению к потоку охлаждающего воздуха может быть вытяжной или нагнетательной. При аксиальной вытяжной вентиляции (рисунок 1.12, а) вентилятор А создает в машине разрежение: воздух под давлением атмосферы поступает в машину и затем выбрасывается из нее наружу. При аксиальной нагнетательной вентиляции (рисунок 1.12, б) вентилятор А забирает воздух, нагнетает в машину и затем выталкивает его наружу.

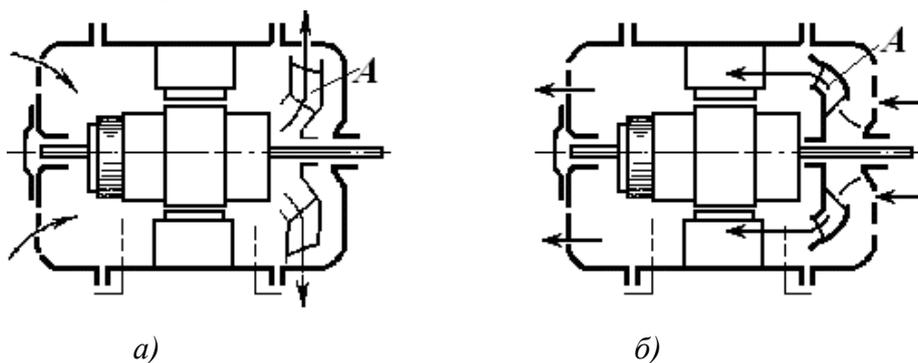


Рисунок 1.12 – Аксиальные системы самовентиляции машины постоянного тока

При аксиальной вентиляции охлаждающий воздух проходит по внутренним вентиляционным каналам параллельно оси вала, а при радиальной вентиляции – перпендикулярно (рисунок 1.13, а). Недостаток самовентиляции состоит в том, что при снижении частоты вращения машины резко падает производительность вентилятора, в результате чего ухудшается интенсивность охлаждения машины. На рисунке 1.13, б изображена схема вентиляции с внешним обдувом корпуса машины.

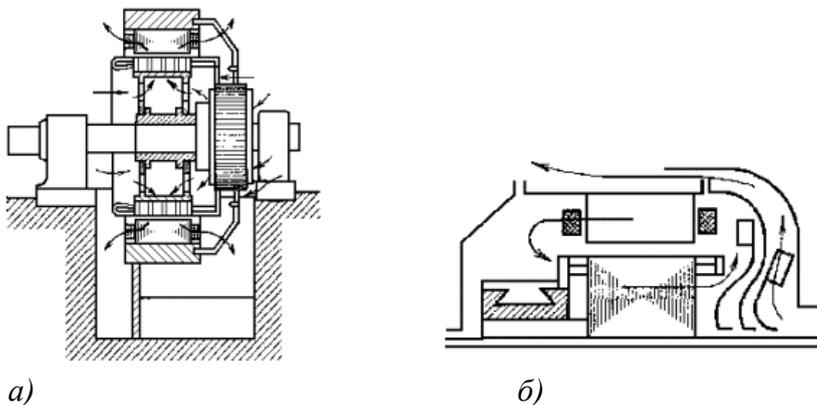


Рисунок 1.13 – Машины с радиальной системой охлаждения (а) и схема вентиляции с внешним обдувом корпуса (б)

Машины с независимым охлаждением. В таких машинах воздух поступает от вентилятора, работающего независимо от машины. Вентиляция может быть протяжной или замкнутой. При протяжной системе вентиляции холодные массы воздуха подводятся извне, проходят через машину и выбрасываются в окружающую атмосферу. Недостаток такой системы заключается в том, что на внутренних поверхностях машины накапливаются пыль и грязь, которые всегда содержатся в воздухе, вызывая ухудшение условий охлаждения машины. Это может быть причиной аварии.

Применение фильтров на входе воздуха в машину нерационально, так как их нужно часто очищать, и они увеличивают сопротивление движению воздуха.

При замкнутой системе вентиляции (рисунок 1.14) охлаждающий воздух проходит по замкнутому контуру через воздухоохладители *ВО*. При такой вентиляции машина предохраняется от попадания в нее пыли. В качестве охлаждающей среды допускается применение не только воздуха, но и водорода. При водородном охлаждении вентиляционные потери снижаются почти в десять раз, а срок службы изоляции увеличивается, так как исключаются окислительные процессы. Для устранения взрыва, в случае образования внутри машины гремучего газа, через нее предварительно пропускают углекислый газ. Затем машину заполняют водородом под давлением выше атмосферного, что предупреждает попадание воздуха внутрь машины.

#### Вопросы для самоконтроля

1. Устройство машины постоянного тока.
2. Конструкция и основные элементы машины постоянного тока
3. Принцип действия машины постоянного тока.
4. Системы вентиляции электрических машин

#### Тема 2. Магнитная цепь машины постоянного тока при холостом ходе и в режиме нагрузки.

Намагничивающая сила н.с. обмотки возбуждения машины постоянного тока создает магнитное поле, магнитные линии которого замыкаются через участки машины, образующие ее магнитную систему. На поперечном разрезе машины (рисунок 2.1) показан путь магнитного потока. Весь магнитный поток  $\Phi_n$  полюса делится на две неравные части. Большая часть – основной магнитный поток  $\Phi_\delta$  проникает через воздушный зазор в якорь и разветвляется в его сердечнике, подходит к соседним полюсам и замыкается через ярмо.

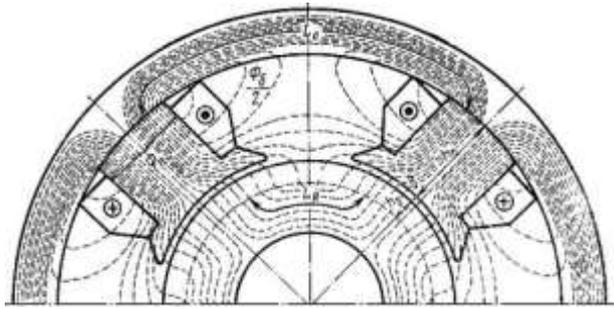


Рисунок 2.1 – Магнитная цепь машины постоянного тока.

Под основным магнитным потоком машины постоянного тока понимают поток в зазоре  $\Phi_{\delta}$  на площади, соответствующей одному полюсному делению  $\tau$ , при холостом ходе машины. Меньшая часть потока рассеяния  $\Phi_{\sigma}$  замыкается между полюсами, минуя якорь. Тогда магнитный поток полюса

$$\Phi_{\Pi} = \Phi_{\delta} + \Phi_{\sigma} = \left(1 + \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi_{\delta}}\right) \Phi_{\delta} = k_{\sigma} \Phi_{\delta}, \quad (2.1)$$

$$k_{\sigma} = \left(1 + \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi_{\delta}}\right) \Phi_{\delta} = k_{\sigma} \Phi_{\delta} \quad (2.1)$$

Для машин постоянного тока  $k_{\sigma} = 1,12 \div 1,25$ . Путь основного магнитного потока в машине состоит из замкнутых магнитных цепей, каждая из которых охватывает пару полюсов. Вследствие магнитной симметрии отдельные магнитные цепи многополюсной машины одинаковы и магнитные потоки (а также их составляющие  $\Phi_{\delta}$  и  $\Phi_{\sigma}$ ) равны между собой; поэтому рассматривается магнитная цепь одной пары полюсов. Участки магнитной цепи отличаются друг от друга как своими геометрическими размерами, так и физическими свойствами. По закону полного тока для замкнутого контура н.с. одной пары полюсов

$$F = I_B \omega_B = \sum Hl = \sum I, \quad (2.2)$$

где  $I_B$  – ток возбуждения;

$\omega_B$  – число витков обмотки возбуждения;

$H$  – напряженность магнитного поля, зависящая от магнитной индукции и определяемая по кривым намагничивания (рисунок 2.2);

$l$  – средняя длина данного участка магнитной цепи.

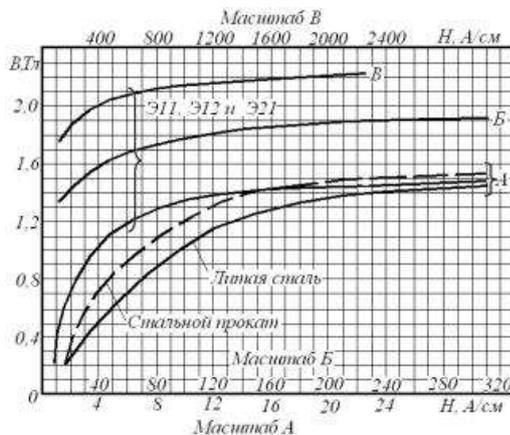


Рисунок 2.2 – Характеристики намагничивания электротехнической и литой сталей и стального проката

В магнитной цепи электрической машины напряженность магнитного поля изменяется на границе участков из различных материалов. По этому признаку магнитную цепь машины постоянного тока можно разделить на пять участков, характерные величины магнитной цепи которых приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Наименование участка	Поток участка	Индукция на участке	Площадь поперечного сечения	Напряженность магнитного поля	Длина пути на пару полюсов	Н.с. на пару полюсов
Зазор	$\Phi_0$	$B_\delta$	$S_\delta$	$H_\delta$	$2\delta$	$F_\delta$
Зубцовый слой (зубцы)	$\Phi_0$	$B_з$	$S_з$	$H_з$	$2h_з$	$F_з$
Сердечник якоря	$\Phi_я=0,5\Phi_0$	$B_я$	$S_я$	$H_я$	$L_я$	$F_я$
Сердечник полюса с наконечником	$\Phi_п=k_\sigma\Phi_0$	$B_п$	$S_п$	$H_п$	$2h_п$	$F_п$
Ярмо (станина)	$\Phi_с=0,5\Phi_п$	$B_с$	$S_с$	$H_с$	$L_с$	$F_с$

Здесь  $F_\delta$  – для двойного зазора;  $F_з$  – для двойной зубцовой зоны якоря;  $F_я$  – для сердечника якоря;  $F_п$  – для двух полюсов;  $F_с$  – для ярма (станины).

Рассчитанная на пару полюсов основная н. с. машины равна

$$F_0 = F_\delta + F_з + F_я + F_п + F_с. \quad (2.3)$$

Это уравнение показывает, что для определения н.с. нужно для каждого из пяти участков найти соответствующую ему напряженность магнитного поля  $H$  и умножить ее на длину пути потока на этом участке. Размеры участков магнитной цепи или известны (в выполненной машине), или устанавливаются по рекомендуемым магнитным индукциям (при проектировании машины), поэтому для необходимого магнитного потока на всех участках магнитной цепи может быть определена индукция  $B = \Phi/S$ , где  $\Phi$  – магнитный поток на участке;  $S$  – площадь сечения участка. В соответствии с рисунком 2.1 основная н.с. машины

$$F_0 = H_\delta 2\delta + H_з 2h_з + H_я L_я + H_п 2h_п + H_с L_с, \quad (2.3)$$

где  $\delta$  – длина воздушного зазора, м;

$h_з$  – высота зубцов якоря, м;

$h_п$  – высота главных полюсов, м;

$L_я$  – длина участка по сердечнику якоря, м;

$L_с$  – длина участка по станине (ярмо), м;

$H$  – соответственно напряженность магнитного поля участка цепи, А/м.

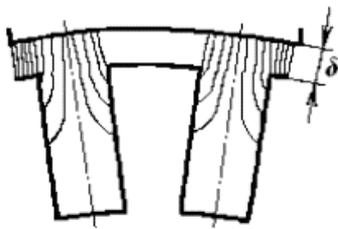
Будем считать, что номинальному значению напряжения и номинальной частоте вращения машины соответствует номинальное значение основного потока  $\Phi_0 = I$ . Задавшись рядом значений основного потока:  $0,5\Phi_0$ ;  $0,8\Phi_0$ ;  $1\Phi_0$ ;  $1,2\Phi_0$ , можем для каждого из них рассчитать  $F_0$

Н.с. воздушного зазора. Наибольшее сопротивление магнитному потоку оказывает воздушный зазор. В зубчатом якоре магнитное поле в зазоре распределяется неравномерно: у поверхности зубцов плотность магнитных линий больше, а в пазах меньше (рисунок 2.3), так как магнитное сопротивление на участке с зубцом меньше, чем с пазом. На рисунке 2.4 показано

распределение магнитной индукции в воздушном зазоре в поперечном и продольном разрезах машины. Так как магнитная индукция в зазоре изменяется как по окружности якоря, так и по его длине, то вводят понятие о расчетной индукции в зазоре, используя для этого метод приведения. Сущность этого метода заключается в следующем. Заменяют сложную кривую распределения магнитной индукции в зазоре равновеликим прямоугольником с высотой  $B_\delta$ . Основание такого прямоугольника в первом случае дает расчетную полюсную дугу  $b'$ , а во втором случае – расчетную длину якоря  $l'$ . Отношение  $b'/\tau = \alpha'$  называют расчетным коэффициентом полюсного перекрытия, от величины которого зависит максимальное значение напряжения между коллекторными пластинами. В машинах постоянного тока с добавочными полюсами  $\alpha' = 0,62-0,72$  с достаточной точностью определяют расчетную длину якоря  $l'' = (l_{\Pi} + l')/2$ , где  $l_{\Pi}$  – длина полюса по оси машины;  $l'$  – длина якоря без вентиляционных каналов. Если  $b_B$  – ширина вентиляционного канала, а  $n_B$  – число каналов, то  $l = l_{\text{я}} - n_B b_B$ , где  $l_{\text{я}}$  – длина якоря в осевом направлении. Пользуясь расчетными величинами  $B_\delta$ ,  $b'$ ,  $l'$ , определяем основной магнитный поток машины  $\Phi_0 = B_\delta b' l' = B_\delta \alpha' \tau l'$  откуда  $B_\delta = \Phi_0 / (\alpha' \tau l')$ . Для упрощения расчета зубчатый якорь приводится к гладкому путем увеличения величины действительного воздушного зазора  $\delta$  до расчетного  $\delta' = \delta k_\delta$  где  $k_\delta = (t_1 + 10\delta) / (b_{31} - 10\delta)$  – коэффициент воздушного зазора;  $t_1 = \pi D_{\text{я}} / z$  – зубцовый шаг;  $b_{31}$  – ширина верхней части зубца по окружности якоря;  $D_{\text{я}}$  – диаметр якоря.

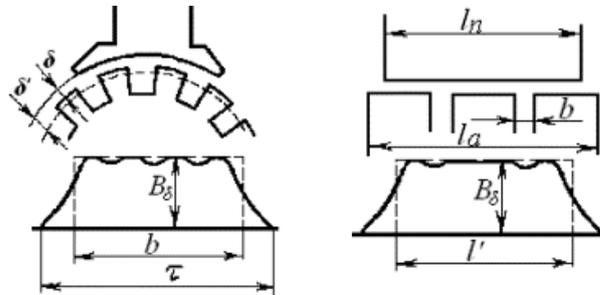
Необходимая для проведения магнитного потока через зазор намагничивающая сила

$$F_\delta = 2B_\delta \delta' / \mu_0 = 2B_\delta \delta k_\delta / \mu_0. \quad (2.5)$$



а)

Рисунок 2.3 – Магнитная индукция в зазоре зубчатого якоря



б)

Рисунок 2.4 – Распределение магнитной индукции под полюсом:  
а – на полюсном делении;  
б – по длине полюса

н.с. зубцового слоя. При определении магнитной индукции в зубцах якоря могут быть рассмотрены два случая: первый, когда  $B_3 < 1,8 T_l$  и когда  $B_3 > 1,8 T_l$ . Принимаем, что в первом случае весь поток проходит через зубцы, во втором – часть потока проходит через пазы.

Второй случай является более общим. Расчет н.с. при этом будем вести на один зубцовый шаг. Приходящийся на один зубцовый шаг магнитный поток  $\Phi_t = B_\delta l' l' = \Phi_3 + \Phi_{\text{паз}}$ , где  $\Phi_3$ ,  $\Phi_{\text{паз}}$  – потоки в зубце и пазах соответственно. Расчетная магнитная индукция

$$B_3' = B_3 + B_{\Pi} k_3, \quad (2.6)$$

где  $B_3 = \Phi_3 / S_3$  – действительная индукция в зубце;

$B_{\Pi} = \Phi_{\Pi} / S_{\Pi}$  – индукция паза;

$k_3$  – зубцовый коэффициент, определяемый геометрическими размерами зубца и паза.

Пользуясь (2.6) и эскизом зубца и паза якоря, находим величину магнитной индукции в верхнем, среднем и нижнем сечениях зубца (рисунок 2.5). В зависимости от этих значений индукция по кривым намагничивания зубцов  $B_3 = f(H_3)$  (рисунок 2.2), определяем напряженность магнитного поля зубцов верхнего, среднего и нижнего сечений. Для зубцов расчетное значение напряженности магнитного поля  $H_3 = (H_{31} + 4H_{3\phi} + H_{32}) / 6$ , значение н.с.  $F_3 = H_3 2h_3$ .

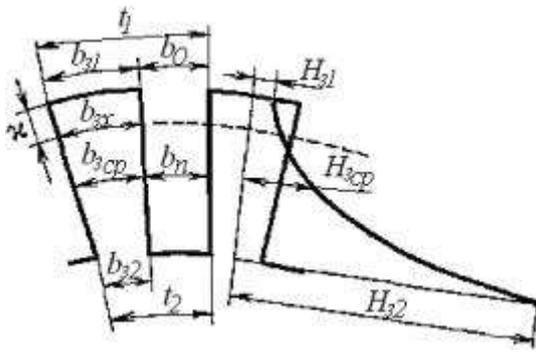


Рисунок 2.5 – Намагничивающая сила зубцов

Н.с. сердечника якоря, полюсов и станины. Магнитный поток в сердечнике якоря  $\Phi_{Я}=0,5\Phi_0=B_{Я}S_{Я}$ . Площадь поперечного сечения якоря  $S_{Я}=h_{Я}lk_c$ , где  $h_{Я}$  – высота сердечника якоря,  $k_c=0,88\div 0,93$  – коэффициент заполнения сталью. Для сердечника якоря магнитная индукция  $B_{Я}=\Phi_0/(2h_{Я}lk_c)$ . По кривой намагничивания для стали рассматриваемой марки находим напряженность поля якоря  $H_{Я}$ , и тогда н.с. сердечника якоря  $F_{Я}=H_{Я}L_{Я}$ , где  $L_{Я}$  – длина средней магнитной линии в сердечнике якоря. В сердечнике полюса магнитная индукция  $B_{П}=\Phi_{П}/S_{П}=\Phi_0 k_{\sigma}/S_{П}$ , где  $\Phi_{П}$  – магнитный поток полюса;  $S_{П}$  – поперечное сечение полюса. По кривой намагничивания стали полюса находим напряженность поля  $H_{П}$  и тогда н.с. полюса  $F_{П}=H_{П}L_{П}=H_{П}2h_{П}$ , где  $h_{П}$  – высота сердечника полюса. В станине магнитный поток  $\Phi_C=0,5\Phi_{П}=0,5\Phi_0 k_{\sigma}$ , индукция  $B_C=\Phi_C/S_C=\Phi_0 k_{\sigma}/(2S_C)$ . Сечение  $S_C$  определяют по геометрическим размерам ярма. По характеристике намагничивания для материала ярма находим напряженность поля  $H_C$ , тогда н.с.  $F_C=H_C L_C$ ,

$$L_C = \frac{\pi}{2p} (D + 2\delta + 2h_{П} + h_C)$$

#### Характеристика намагничивания машины

Зависимость  $\Phi_0=f(F_0)$  построенная в прямоугольных координатах, называется кривой намагничивания машины или магнитной характеристикой (рисунок 2.6). В начальной части магнитная характеристика имеет прямолинейный характер, так как при малых значениях потока  $\Phi_{\delta}$  сталь машины слабо насыщена и н.с. затрачивается на проведение потока через зазор. Продолжение прямолинейной части кривой позволяет выделить н.с. для зазора при различных значениях потока  $\Phi_{\delta}$  (линия  $Ob$ ) т.е. получить зависимость  $F_{\delta}=f(\Phi_{\delta})$ . По мере увеличения магнитного потока большая часть н.с. затрачивается на проведение потока по стальным участкам. Эта часть н.с. соответствует отрезку  $bc$ . По отношению  $k_H=ac/ab$ , называемым коэффициентом насыщения, можно судить о степени насыщения магнитной цепи машины при заданном значении потока  $\Phi_{\delta}$ . Строить машину с насыщенной магнитной цепью невыгодно, так как при этом материалы будут недоиспользованы и машина получится тяжелой.

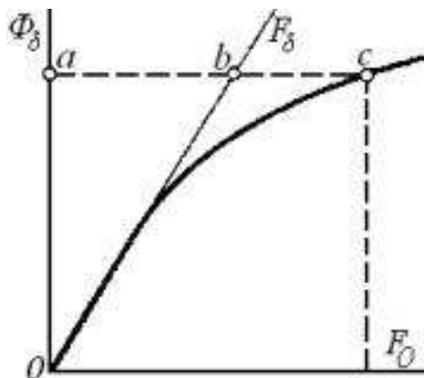


Рисунок 2.6 – Характеристика намагничивания

Нецелесообразна также чрезвычайно насыщенная магнитная цепь, так как в этом случае необходимо выполнить мощную обмотку возбуждения с большим расходом меди или алюминия и с большими потерями мощности на возбуждение. По этим причинам электрические машины изготавливают с умеренным насыщением при номинальном режиме. При этом рабочая точка лежит несколько выше колена магнитной характеристики. Обычно  $k_H = 1,1 \div 1,35$ , а в некоторых случаях  $k_H \approx 1,7 \div 2$ .

### Вопросы для самоконтроля

1. Магнитная цепь машины постоянного тока.
2. Характеристика намагничивания машины
3. Формула для определения намагничивающей силы машины.

### Тема 3. Обмотки якоря машин постоянного тока.

Обмотка якоря – важнейший элемент машины, удовлетворяющий следующим требованиям:

- а) обмотка должна быть рассчитана на заданные величины напряжения и тока нагрузки, соответствующие номинальной мощности, и иметь необходимую электрическую, механическую и термическую прочности, обеспечивающие достаточно продолжительный срок службы машины (до 20 лет);
- б) конструкция обмотки должна обеспечить удовлетворительные условия токосъема с коллектора без вредного искрения;
- в) расход материала при заданных эксплуатационных показателях (к.п.д. и др.) должен быть минимальным;
- г) технология изготовления обмотки должна быть по возможности простой.

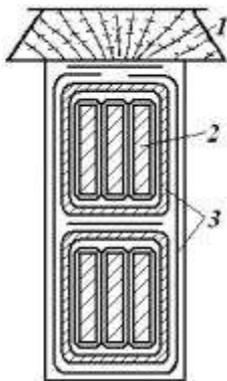


Рисунок 2.1 – Расположение пазов на внешней поверхности якоря

В современных машинах постоянного тока обмотку якоря укладывают в пазы на внешней поверхности якоря (рисунок 3.1), что упрощает технологию ее изготовления, повышает использование провода и делает обмотку более надежной. Обмотка состоит из ряда последовательно соединенных секций, каждая из которых имеет две активные стороны, размещаемые в пазах якоря. На торцевых сторонах сердечника якоря активные стороны соединяют лобовыми проводами. Для того чтобы не было пересечения лобовых соединений, т.е. чтобы они не лежали в одной плоскости, обмотки выполняют двухслойными (рисунок 3.2). Активные стороны располагают в пазах  $1$ , находящимися между зубцами  $2$ , а с торцевых сторон скрепляют лобовыми соединениями  $3$ . При этом одна активная сторона каждой секции лежит в верхнем слое паза, а другая – в нижнем (рисунок 3.3). Каждую активную сторону секции  $2$  изолируют и укладывают в паз  $3$ , предварительно изолированный. После укладки всех активных сторон паз заклинивают немагнитным клином  $1$ . Для придания якорю большей механической прочности лобовые соединения обмотки стягивают стальными бандажами.



Рисунок 3.2 – Двухслойное расположение обмотки якоря

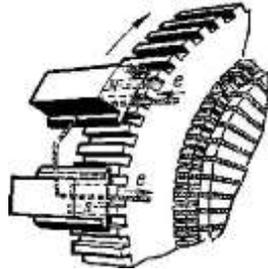
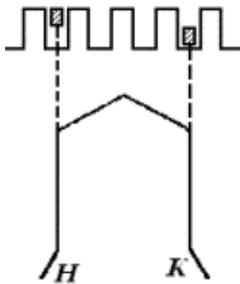
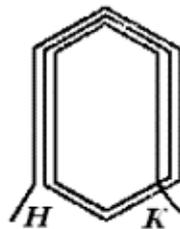


Рисунок 3.3 – Поперечный разрез паза с обмоткой

Секции обмоток машин постоянного тока могут быть одновитковыми (рисунок 3.4, а), состоящими из двух активных проводов, и многовитковыми (рисунок 3.4, б)



а)



б)

Рисунок 3.4 – Секции обмоток якоря

Обмотки якорей машин постоянного тока подразделяют на петлевые (параллельные), волновые (последовательные) и комбинированные (параллельно-последовательные). Обмотки могут быть простыми и сложными (кратными), причем последние образуются из нескольких простых обмоток. На рисунке 3.6, а показана секция (катушка) многовитковой волновой обмотки. Полукатушка из двух одинаковых полусекций волновой обмотки изображена на рисунке 3.6, б, а петлевой – на рисунке 3.6, в. На развернутых схемах обмоток стороны секций находящиеся в верхнем слое, изображают сплошными линиями, а стороны, расположенные в нижнем слое, прерывистыми линиями (рисунок 3.5).

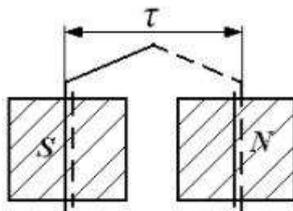


Рисунок 3.5 – Изображение секции на развернутой схеме

Секции обмотки соединяют друг с другом в последовательную цепь таким образом, что начало последующей секции присоединяют вместе с концом предыдущей секции к общей коллекторной пластине. Поскольку каждая секция имеет два конца и к каждой коллекторной пластине присоединены также концы двух секций, то общее число пластин коллектора  $K$  равно числу секций обмотки  $S$ ;

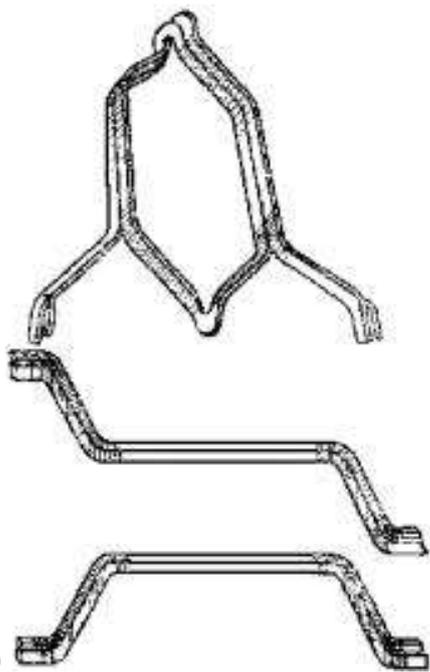
$$K=S=N/(2\omega),$$

где  $N$  - число активных проводов обмотки якоря;

$\omega$  – число витков в секции.

В простейшем случае в пазу находятся две секционные стороны – одна в верхнем и другая в нижнем слое. При этом число пазов якоря  $Z=S$ . Для уменьшения пульсации выпрямленного напряжения, а также во избежание чрезмерно большого напряжения между соседними коллекторными пластинами число пазов должно быть достаточно большим.

а)



б)



в)

Рисунок 3.6 – Катушка (а),  
полукатушка волновой обмотки (б),  
полукатушка секции петлевой обмотки (в)

Однако изготовление якорей с большим числом пазов нецелесообразно, так как при этом пазы будут узкими, следовательно, значительная часть их площади занята изоляцией секций от корпуса, и для проводников остается мало места, что приводит к потере мощности машины. По этим причинам обычно в каждом слое паза располагают рядом несколько ( $u_n=2,3,4,5$ ) секционных сторон (рисунок 3.7). При этом  $K=S=u_n Z$ . В данном случае говорят, что в каждом реальном пазу имеется  $u$  элементарных пазов, поэтому в каждом слое элементарного паза – одна секционная сторона. Очевидно, что общее число элементарных пазов якоря  $Z_{\text{э}}=u_n Z=S=K$ . В одном полюсном делении  $\tau$  содержится  $Z_{\text{э}}/2p$  элементарных пазов. Но часто  $Z_{\text{э}}$  не делится без остатка на  $2p$ , тогда вводят дробную величину  $\xi$ , с помощью которой величина шага округляется до целого числа

$$y \approx \tau = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} \pm \xi \quad (3.1)$$

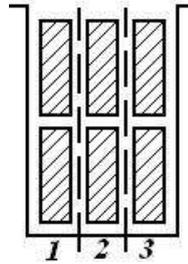


Рисунок 3.7 – Подразделение реального паза на элементарные.

### Петлевая обмотка

Простая петлевая обмотка. Простой петлевой (параллельной) обмоткой якоря называют обмотку, у которой концы каждой секции присоединены к двум рядом лежащим коллекторным пластинам (рисунок 3.8).

Если при выполнении обмотки конец секции присоединяют к коллекторной пластине, находящейся справа от исходной, то такую обмотку называют правоходовой или неперекрещивающейся. При смещении в левую сторону обмотку называют левоходовой или перекрещивающейся. Левоходовые обмотки не находят практического применения, так как увеличивают расход обмоточного провода. На рисунке 3.8 показаны шаги обмотки  $y_1$ ;  $y_2$ ;  $y$ , которые будем определять числом элементарных пазов.

Первый частичный шаг  $y_1 = Z_{\partial} / (2p) \pm \xi$  определяет расстояние по поверхности якоря между начальной «Н» и конечной «К» сторонами секции:  $\xi$  – величина, меньшая единицы, вычитая или суммируя которую, можно получить шаг  $y_1$ , выраженный целым числом.

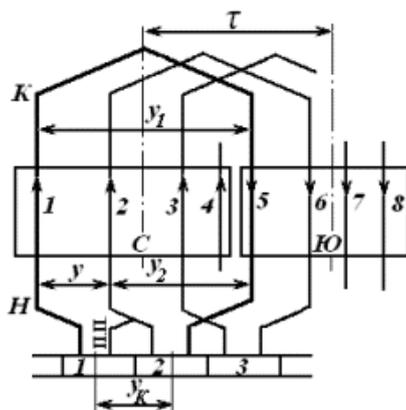


Рисунок 3.8 – Развернутая схема простой петлевой обмотки якоря:  
Н – начало провода; К – конец провода,  
п.п. – последний провод

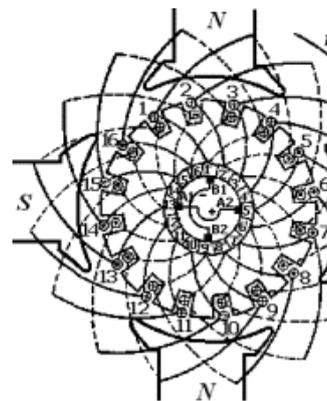


Рисунок 3.9 – Радиальная схема простой петлевой обмотки:  
 $2p=4$ ;  $S=K=16$

Второй частичный шаг обмотки  $y_2$  определяет расстояние между конечной стороной данной секции и начальной стороной последующей. Результирующий шаг обмотки  $y$  определяет расстояние между начальными сторонами данной и последующей за ней секций.

Шаг по коллектору  $y_k$  определяет расстояние в коллекторных делениях между серединами коллекторных пластин, к которым присоединены концы данной секции. Шаг по коллектору всегда равен результирующему шагу обмотки:  $y_k = y$ . В простой петлевой обмотке шаг по коллектору  $y_k = 1$ .

Пример – На рисунке 3.9 изображена радиальная схема простой петлевой обмотки со следующими данными:  $2p=4$ ;  $S=K=Z_{\partial}=16$ .

Тогда  $y_1 = S / (2p) \pm \xi$ ;  $y_1 = 16 / 4 - 0 = 4$ ;  $y = y_k = 1$ ;  $y_2 = y_1 - y$ ;  $y_2 = 4 - 1$ ;  $y_2 = 3$ .

Для облегчения вычерчивания схемы удобно обозначить одинаковыми цифрами секционные стороны, пазы и коллекторные пластины, с которыми они соединены. Выполнение схемы

начинают с соединения секционных сторон, образующих секции в соответствии с первым шагом. Таким образом, необходимо соединить верхнюю сторону 1 секции с нижней стороной, расположенной на расстоянии четырех промежутков от стороны 1, т.е. с нижней стороной 5. Начало первой секции (сторону 1) соединяют с коллекторной пластиной 1', а конец первой секции (нижнюю сторону 5) – с коллекторной пластиной 2', с которой соединяют также начало 2 второй секции. Вторая секция образована сторонами 2 и 6, и конец ее присоединяют к пластине 3' и т.д. При вращении якоря по часовой стрелке направление э.д.с. (согласно правилу правой руки) в проводниках показано на рисунке 3.9 точками и крестиками. При обходе обмотки по схеме можно установить, что для рассматриваемого положения якоря коллекторные пластины 1', 5', 9' и 13' являются узловыми точками, к которым присоединены секции, имеющие встречное направление э.д.с. Эти коллекторные пластины делят всю обмотку на участки с одинаковым направлением э.д.с. в секциях. Если на эти пластины установить щетки, то щетки A1 и A2, с которых поступает ток во внешнюю сеть, считаются положительными, а щетки B1 и B2 – отрицательными. Щетки одинаковой полярности соединяют между собой параллельно. Для характеристики обмотки необходимо знать, как расположены в магнитном поле ее секции и как они соединены между собой. На схеме обмотки цилиндрическая поверхность якоря, разрезанная вдоль оси машины в любом месте, из соображений удобства разворачивается на плоскость и представляется прямоугольником. Развернутая схема рассмотренной выше обмотки изображена на рисунке 3.10. От каждой щетки отходят в противоположные стороны две параллельные ветви обмотки и заканчиваются на соседних щетках. Секции параллельной ветви размещаются под парой расположенных рядом полюсов, и так как обмотка двухслойная, то на каждую пару полюсов приходится две параллельные ветви. Таким образом, общее количество параллельных ветвей обмотки  $2a=2p$ . Для большей наглядности параллельные ветви рассмотренной обмотки показаны на рисунке 3.11. В данном примере четырехполюсной машины обмотка образует четыре параллельные ветви, в каждой из которых протекает ток одной параллельной ветви  $I_0$ , а во внешней цепи –  $I_2=4I_0$ .

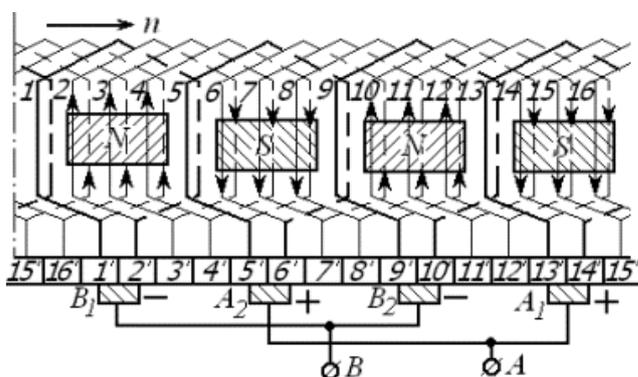


Рисунок 3.10 – Развернутая схема  
одноходовой петлевой обмотки:  
 $2p=4; S=K=16$

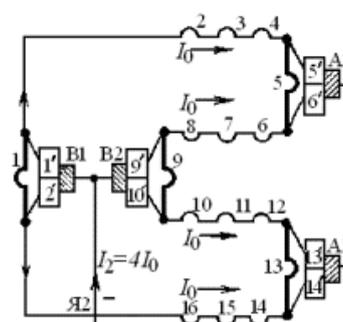


Рисунок 3.11 – Параллельные  
ветви одноходовой  
петлевой обмотки

**Сложная петлевая обмотка.** Сложную или кратную петлевую обмотку можно рассматривать как сочетание нескольких ( $m=2,3,4...$ ) простых петлевых обмоток. Такую обмотку называют также сложной параллельной. В рассматриваемой обмотке секции и коллекторные пластины  $m$  простых обмоток по окружности чередуются, и для отвода тока из обмотки необходимо, чтобы ширина щеток была не меньше  $m$  коллекторных делений. Таким образом,  $m$  простых обмоток включаются с помощью щеток параллельно и количество параллельных ветвей сложной петлевой обмотки  $2a=2pm$ . Результирующий шаг по элементарным пазам и шаг по коллектору сложной петлевой обмотки  $y=y_k-m$ . Шаги  $y_1$  и  $y_2$  определяются так же, как и для простой петлевой обмотки. Возможность получения в сложных обмотках большого числа ветвей без увеличения числа полюсов составляет наиболее отличительную особенность этих

обмоток. Их применяют в мощных машинах низкого напряжения с большими токами якоря, например в генераторах для электролиза.

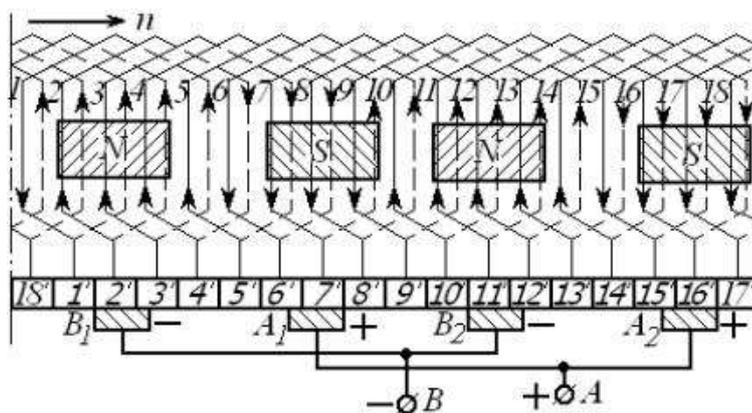


Рисунок 3.12 – Развернутая схема сложной петлевой обмотки:

$$2p=4; S=K=18; 2a=2mp=8$$

Пример – На рисунке 3.12 изображена развернутая схема сложной петлевой обмотки для  $2p=4; S=K=18; m=2$ . Здесь  $y=y_k=m=2$ ;  $y_1=18/4-2/4; y_1=4; y_2=y_1-y, y_2=4-2; y_2=2$ . При этом заметим, что если  $K/p$  равно четному числу, то такая сложная петлевая обмотка называется симметричной, если же  $K/p$  равно нечетному числу, – несимметричной. Построение развернутой схемы обмотки начнем с пластины и секции 1, обойдем все нечетные секции и пластины и вернемся к пластине 1', замкнув первый ход обмотки. Начав второй ход с пластины 2' и секции 2, обойдем все четные секции и пластины и снова вернемся к пластине 2, замкнув второй ход обмотки. Таким образом, мы имеем совокупность двух отдельных обмоток, совмещенных на якоре и работающих параллельно, – это сложная петлевая двукратнозамкнутая обмотка. В нашем случае имеем  $2a=2\cdot4=8$  ветвей. Число щеток остается равным числу полюсов  $2p$ , но ширина каждой щетки должна быть такова, чтобы одновременно могли работать обе обмотки.

### Волновая обмотка

Простая волновая обмотка. Простая волновая (последовательная) обмотка получается при последовательном соединении секций, находящихся под разными парами полюсов. Концы секций волновой обмотки присоединены к коллекторным пластинам, удаленным друг от друга на расстоянии шага обмотки по коллектору  $y_k=y=(K\pm 1)/p$  (рисунок 3.13).

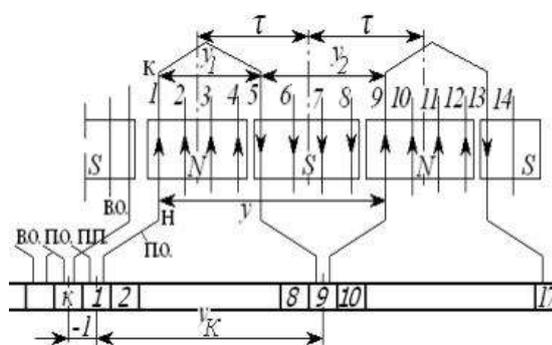


Рисунок 3.13 – Схема построения простой волновой обмотки якоря:

п.о. – первый обход обмотки по якору; в.о. – второй обход;

п.п. – последний провод обмотки

За один обход по якору последовательно соединяют столько секций, сколько пар полюсов имеет машина. Таким образом, обойдя обмотку по окружности якоря, попадаем в коллекторную пластину, расположенную рядом (слева) с той, от которой начат обход.

Затем делается второй, третий и все последующие обходы, пока все провода не будут соединены между собой в одну замкнутую обмотку, конец которой присоединяют к первой

коллекторной пластине. Такую обмотку называют левоходовой. Если же эта пластина расположена справа от исходной, то обмотку называют правоходовой. Для правоходовой обмотки требуется больший расход обмоточного провода. Характерным свойством простой волновой обмотки является то, что число ее параллельных ветвей не зависит от числа полюсов и всегда равно двум:  $2a=2$ . У волновой обмотки результирующий шаг равен сумме частичных шагов  $y_1$  и  $y_2$ , т.е.  $y=y_1+y_2$ . Секции каждой параллельной ветви равномерно распределены под всеми полюсами машины. В такой обмотке можно было бы ограничиться применением только двух щеток. Если это условие не выполняется, то уменьшают число элементарных пазов путем неприсоединения одной секции к коллектору. Такую секцию называют «мертвой» секцией.

Развернутая схема волновой обмотки с «мертвой» секцией изображена на рисунке 3.14.

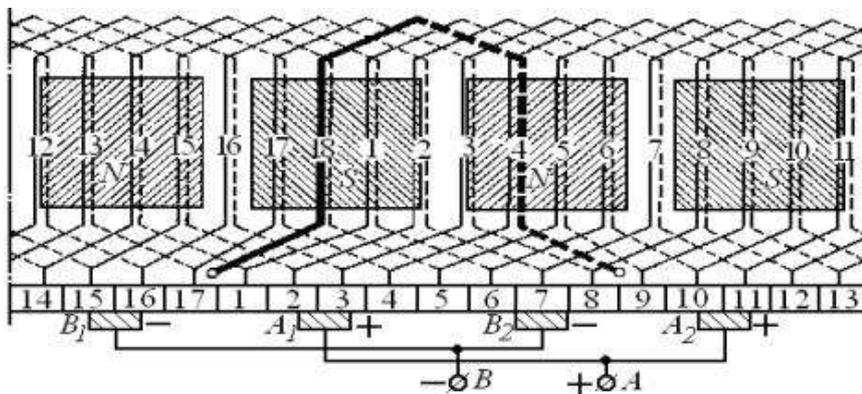


Рисунок 3.14 – Развернутая схема волновой обмотки с «мертвой» секцией

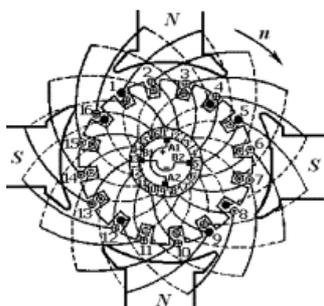


Рисунок 3.15 – Радиальная схема простой волновой обмотки:  
 $2p=4; S=k=15$

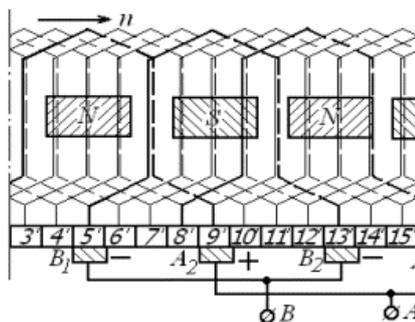


Рисунок 3.16 – Развернутая схема обмотки:  $2p=4; S=k=15$

Однако, в этом случае нарушилась бы симметрия обмотки, так как число секций в параллельных ветвях стало бы различным. Поэтому в машине обычно устанавливают столько щеток, сколько основных полюсов, это позволяет уменьшить величину тока, приходящегося на каждую щетку. Но в некоторых случаях устанавливают только две щетки с тем, чтобы сделать доступной для осмотра и смены щеток не всю окружность коллектора, а только ее часть. В простой волновой обмотке шаг по коллектору должен быть обязательно равен целому числу.

Однако наличие несимметрии обмотки вызывает некоторые осложнения в условиях коммутации в зонах «мертвой» секции, поэтому в мощных машинах с напряженными условиями коммутации рекомендуется избегать применения волновых обмоток с «мертвой» секцией.

Пример – На рисунке 3.15 изображена радиальная схема простой волновой обмотки по данным:  $2p=4; S=K=15$ . При выполнении обмотки мы соединяем между собой: коллекторную пластину  $1'$ , начало секции  $1$  в пазу  $1$ , конец ее в пазу  $1+3=4$  и коллекторную пластину  $1'+7'=8'$ ; отсюда идем к началу секции  $8$  в пазу  $8$ , к концу ее в пазу  $11$ , к коллекторной пластине  $8'+7'=15'$  и т.д. Схема той же обмотки в развернутом виде изображена на рисунке 3.16. Секции, замкнутые накоротко щетками, показаны жирными линиями. Таким образом, имеем

только две параллельные ветви, хотя число полюсов  $2/p=4$ . Схема токопрохождения внутри обмотки или схема ветвей показана на рисунке 3.17. Поскольку каждая из ветвей волновой обмотки проходит под всеми полюсами, то неравенство потоков полюсов не вызывает неравенства э.д.с. и токов параллельных ветвей. Поэтому простая волновая обмотка не нуждается в уравнивательных соединениях.

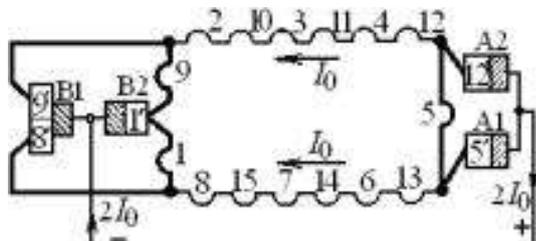


Рисунок 3.17 – Параллельные ветви волновой обмотки

Сложная волновая обмотка. Сложная волновая обмотка представляет собой несколько простых волновых обмоток, уложенных в пазы одного якоря. Так как каждая простая волновая обмотка имеет две параллельные ветви, то сложноволновая обмотка будет иметь число параллельных ветвей  $2a=2m$ , где  $m$  – число простых волновых обмоток, составляющих данную сложноволновую обмотку. Между собой эти обмотки соединяются параллельно проводниками – уравнивательными соединениями, и щетками на коллекторе. Желательно, чтобы число пластин, перекрываемое щеткой, было больше числа пар параллельных ветвей  $a$ . Шаг обмотки по коллектору  $y_k=y=(K\pm m)/p$ . При выполнении сложной волновой обмотки после одного обхода  $p$  последовательно соединенных секций якоря, конец секции присоединяют к коллекторной пластине, отстоящей от исходной на  $m$  пластин, оставляя свободное место для укладки секций других простых обмоток. Сложные волновые обмотки могут быть однократнозамкнутыми, когда одна простая обмотка является продолжением другой, и многократнозамкнутыми, когда каждая простая обмотка оказывается замкнутой на себя.

Пример. На рисунке 3.18 приведена схема двухходовой двукратнозамкнутой волновой обмотки четырехполюсной машины

$$S=K=Z_{\partial}=18; y_k=y=(K\pm m)/p=8; y_1=K/(2p)\pm\xi=4; y_2=y-y_1=4.$$

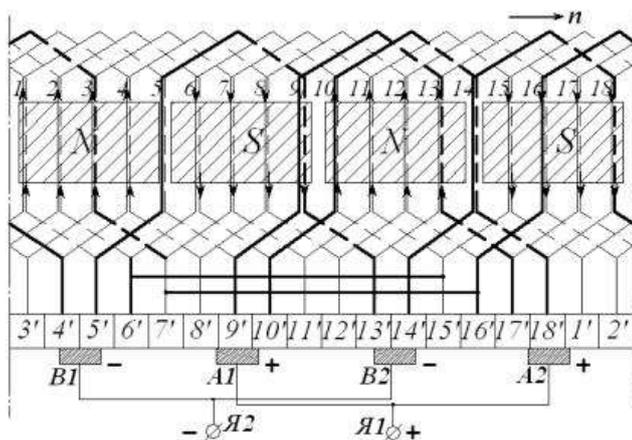


Рисунок 3.18 – Схема двухходовой двукратнозамкнутой волновой обмотки:  $2p=4; Z=S=K=18$

Построение схемы обмотки начинается с коллекторной пластины  $1'$ . После первого обхода, в процессе которого соединяют секции  $1$  и  $9$ , конец девятой секции соединяют с коллекторной пластиной  $17'$ , т.е. не доходят до первой пластины на два коллекторных деления. При дальнейшем выполнении обмотки соединяют по схеме все нечетные секции и коллекторные пластины, при этом получают замкнутую одноходовую обмотку. Четные секции и коллекторные пластины

образуют вторую одноходовую обмотку. Обе обмотки включены параллельно при помощи щеток и образуют двухходовую двукратнозамкнутую волновую обмотку.

### Вопросы для самоконтроля

1. Устройство обмоток.
2. Типы и виды обмоток.
3. Простая обмотка.
4. Волновая обмотка

### Тема 4. Коммутация в машинах постоянного тока.

Коммутацией называют совокупность явлений, связанных с изменением тока в проводниках обмотки якоря при переходе секций из одной параллельной ветви в другую при замыкании этих секций щетками. Процесс коммутации имеет очень большое значение в теории электрических машин постоянного тока, так как искрение, имеющее место на коллекторе этих машин, большей частью происходит вследствие неправильного протекания этого процесса. На рисунке 4.1 представлено распределение токов при коммутации одной секции простой петлевой обмотки для пяти следующих друг за другом положений якоря через интервалы времени  $T_K/4$ , где  $T_K$  – период коммутации. Ширина  $b_{щ}$  щетки равна  $b_K$  коллекторному делению, толщину изоляции между коллекторными пластинами не учитывают.

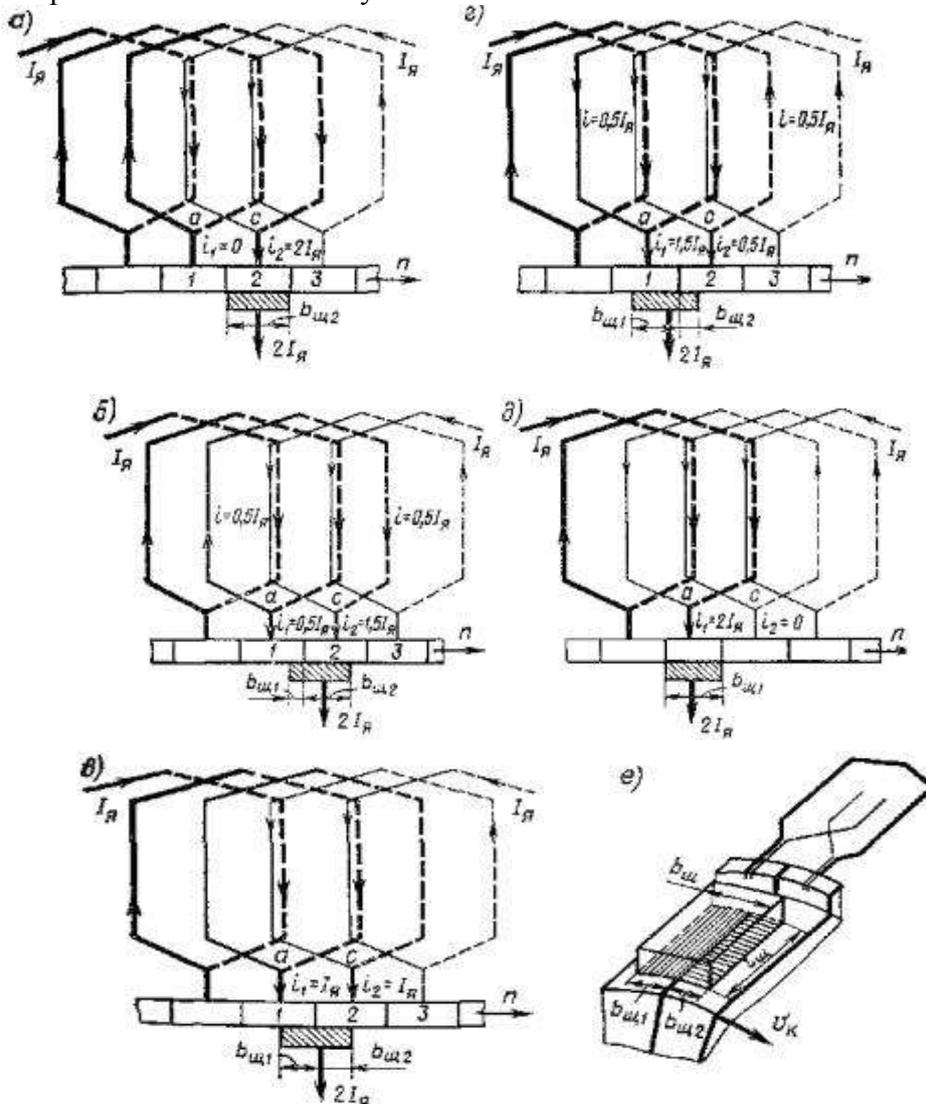


Рисунок 4.1 – Взаимное положение щетки и коллектора в процессе коммутации

Предполагается, что нагрузка машины постоянна и ток в каждой параллельной ветви равен  $I_{Я}$ . Короткое замыкание рассматриваемой секции начинается в момент  $t=0$  и заканчивается в момент  $t=T_K$ .

Для первого момента времени щетка касается только коллекторной пластины 2, а коммутируемая секция входит в число секций левой параллельной ветви обмотки и в ней протекает ток  $i=I_{Я}$ . Токи в соединительных проводах между коллектором и обмоткой для этого момента времени будут:  $i_1=0$  и  $i_2=2I_{Я}$  (рисунок 4.1, а); они соответствуют началу коммутации. В следующий момент (рисунок 4.1, б) при вращении коллектора пластина 2 постепенно сбегает со щетки и на смену ей набегают пластины 1.

Для нашего примера левый край щетки называют набегающим, а правый – сбегаящим. Как только щетка войдет в контакт с коллекторной пластиной 1, коммутируемая секция окажется замкнутой накоротко щеткой и ток в ней постепенно начнет уменьшаться. Следовательно, через коллекторную пластину 1 будет проходить ток  $i_1=0,5I_{Я}$ , а через пластину 2 протекает больший ток  $i_2=1,5I_{Я}$ , так как площадь соприкосновения пластины 2 со щеткой больше и потому сопротивление контакта между щеткой и коллекторной пластиной меньше. Ток в коммутируемой секции будет иметь то же направление, что и до начала коммутации, но величина его будет меньше, чем  $I_{Я}(i=0,5I_{Я})$ . Когда же контактная поверхность щетки равномерно перекроет обе коллекторные пластины  $R_{Щ1}=R_{Щ2}$  (рисунок 4.1, в), ток в коммутируемой секции станет равным нулю  $i=0$ , так как  $i_1=i_2=0,5I_{Я}$ . Для последующего момента времени (рисунок 4.1, г) токи в соединительных проводах примут значения:  $i_1=1,5I_{Я}$ ,  $i_2=0,5I_{Я}$ . В конце коммутации для пятого момента времени (рисунок 4.1, д) щетка будет полностью касаться коллекторной пластины 1 и коммутируемая секция уже не будет замкнута накоротко щеткой. При этом она будет принадлежать первой параллельной ветви обмотки якоря, и ток в ней становится равным  $I_{Я}$ , но противоположно направленным току в начале коммутации. Токи в соединительных проводах  $i_1=2I_{Я}$  и  $i_2=0$ . Общий ток равен  $2I_{Я}$ . Таким образом, за время перехода щетки с коллекторной пластины 2 на пластину 1 произошло изменение тока в коммутируемой секции от  $+I_{Я}$  до 0 и от 0 до  $-I_{Я}$ . Указанное изменение тока происходит очень быстро  $0,0003-0,001$  сек. На рисунке 4.1, е изображено положение щетки на коллекторных пластинах в процессе коммутации.

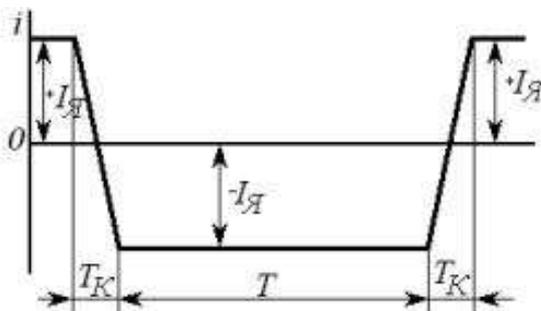


Рисунок 4.2 – График изменения тока секции во времени

На рисунке 4.2 представлен график изменения тока в секции по времени при переходе ее дважды из одной параллельной ветви в другую. Время  $T_K$ , в течение которого происходит процесс коммутации в секции, называют периодом коммутации. За время  $T$  секции передвигаются между щетками различной полярности. Короткозамкнутый контур (рисунок 4.1, б) состоит из секции, двух коллекторных пластин и щетки; сопротивлениями самой секции и соединительных проводников между секцией и коллекторными пластинами пренебрегаем, так как они незначительны по сравнению с сопротивлениями переходного контакта между щеткой и коллекторными пластинами. Обозначив сопротивления переходных контактов сбегаящего и набегающего краев щетки через  $R_{Щ2}$  и  $R_{Щ1}$ , составим уравнение по второму закону Кирхгофа:  $\Sigma e=0$ . Это предположение соответствует, например, если  $n \approx 0$  или полному уравновешиванию всей суммы э.д.с. в контуре секции

$$\Sigma e = R_{Щ2}i_2 - R_{Щ1}i_1 = 0. \quad (4.1)$$

Кроме того, для узлов  $a$  и  $c$  по первому закону Кирхгофа

$$i_1 = I_{Я} - i; \quad i_2 = I_{Я} + i, \quad (4.2)$$

где  $i$  – ток коммутируемой секции.

Изменение тока секции  $i$  определяется только изменением  $R_{щ1}$  и  $R_{щ2}$ , вследствие чего этот случай называют коммутацией сопротивлением. В рассматриваемые моменты времени щетка перекрывает по ширине участки коллекторных пластин:

$$b_{щ1} = v_K t; \quad b_{щ2} = v_K (T_K - t);$$

где  $v_K$  – окружная скорость коллектора. Площади касания щетки с коллекторными пластинами 2 и 1 будут:  $S = b_{щ1} l_{щ1}$ ;  $S_2 = b_{щ2} l_{щ2}$ , полная площадь контакта  $S_{щ} = b_{щ} l_{щ}$ , где  $l$  длина щеток. Учитывая, что контактное сопротивление обратно пропорционально площади контакта, выражения для переходных сопротивлений между щеткой и коллекторной пластиной запишем в следующем виде

$$\frac{R_{щ1}}{R_{щ}} = \frac{S_{щ}}{S_1} = \frac{l_{щ} v_K T_K}{l_{щ} v_K t} = \frac{T_K}{t};$$

$$\frac{R_{щ2}}{R_{щ}} = \frac{S_{щ}}{S_2} = \frac{l_{щ} v_K T_K}{l_{щ} v_K (T_K - t)} = \frac{T_K}{(T_K - t)}, \quad (4.3)$$

$$R_{щ1} = \frac{R_{щ} T_K}{t} \quad R_{щ2} = \frac{R_{щ} T_K}{(T_K - t)}$$

Подставляя в (4.1) значения токов  $i_1$  и  $i_2$  из (4.2) и сопротивлений  $R_{щ1}$  и  $R_{щ2}$  из (4.3), получим

$$i = I_{Я} \frac{R_{щ} - R_{щ2}}{R_{щ1} + R_{щ2}} = I_{Я} \left( \frac{1 - 2t}{T_K} \right). \quad (4.4)$$

Коммутацию, соответствующую изменению тока по (5.4), называют прямолинейной, так как ток в короткозамкнутой секции изменяется по прямолинейному закону. На рисунке 4.3 показан график изменения тока в коммутируемой секции  $i=f(t)$ , построенный согласно (4.4). Прямолинейная коммутация является наиболее благоприятной, так как только при ней обеспечивается одно из основных условий работы щеток без искрения, а именно – равномерная плотность тока под щетками

$$i_{щ1} = \frac{i_1}{S_{щ1}} = \frac{2I_{Я}}{l_{щ} b_{щ}}; \quad i_{щ2} = \frac{i_2}{S_{щ2}} = \frac{2I_{Я}}{l_{щ} b_{щ}}. \quad (4.5)$$

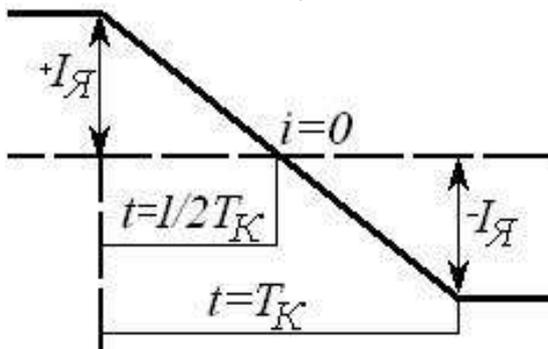


Рисунок 4.3 График прямолинейной коммутации

## Замедленная и ускоренная коммутации

В действительности  $\Sigma e \neq 0$ . В коммутируемой секции возникают э.д.с. самоиндукции  $e_L$ , взаимной индукции  $e_M$  и вращения  $e_K$ .

Э.д.с. самоиндукции  $e_L$ . Так как период коммутации очень мал ( $\approx 10^{-4}$  с), то в коммутируемой секции возникает э.д.с. самоиндукции  $e_L = -L(di/dt)$  ( $L$  – индуктивность секции), которая стремится замедлить коммутацию, так как в результате самоиндукции изменение тока в цепи всегда замедляется.

Э.д.с. взаимной индукции  $e_M$ . Обычно щетка машины перекрывает несколько коллекторных пластин, т.е.  $b_{щ} > b_K$ . Поэтому коммутация происходит одновременно в нескольких секциях, которые могут находиться как в одном и том же пазу, так и в рядом лежащих, следовательно, в коммутируемых секциях возникают э.д.с. взаимной индукции  $e_M = -M(di/dt)$ , где  $M$  – взаимная индуктивность одновременно коммутируемых секций. Э.д.с. самоиндукции и взаимной индукции создают результирующую реактивную э.д.с.  $e_P = e_L + e_M$ , которая препятствует процессу изменения тока в коммутируемой секции.

Э.д.с. вращения  $e_K$ . Кроме э.д.с. самоиндукции и взаимной индукции в короткозамкнутой секции при вращении якоря индуцируется э.д.с. вращения  $e_K$  вызванная тем, что стороны короткозамкнутой секции пересекают внешнее магнитное поле, которое может возбуждаться в зоне коммутации. Поле реакции якоря и внешнее поле, создаваемое добавочными полюсами, образуют в зоне коммутируемых секций коммутирующее поле. Это поле индуцирует э.д.с. вращения, направление которой зависит от направления магнитных линий поля и направления вращения якоря:  $e_K = 2B_K l v \omega_C$ , где  $B_K$  – магнитная индукция коммутирующего поля;  $l$  – длина активных сторон секции;  $v$  – линейная скорость движения секции;  $\omega_C$  – число витков в секции. Таким образом, в коммутирующей секции возникает сумма э.д.с.  $\Sigma e = e_P + e_K$ . С учетом (4.1), (4.2) и (4.3) ток в коммутируемой секции

$$i = I_{я} \frac{R_{щ1} - R_{щ2}}{R_{щ1} + R_{щ2}} + \frac{\Sigma e}{R_{щ1} + R_{щ2}} = I_{я} \left( 1 - \frac{2t}{T_K} \right) + \frac{\Sigma e}{R_{щ1} T_K^2} (T_K - t)t = i_L + i_K \quad (4.6)$$

где  $i_L = I_{я} \left( 1 - \frac{2t}{T_K} \right)$  – ток прямолинейной коммутации;

$$i_K = \frac{\Sigma e}{R_{щ1} T_K^2} (T_K - t)t \quad \text{– добавочный ток коммутации.}$$

Действие добавочного тока коммутации зависит от направления  $\Sigma e$ . При  $\Sigma e > 0$  ток  $t_K$ , складываясь с линейным током  $i_L$ , вызывает замедленный процесс коммутации. Когда ток  $i$  проходит через нулевое значение за время, прошедшее от начала коммутации  $t_K > T_K/2$ , то плотность тока под сбегающим краем щетки больше, чем под набегающим, что может стать причиной возникновения искрения под сбегающим краем щетки. Размыкание контура короткозамкнутой секции подобно выключению или разрыву цепи с  $R$  и  $L$ .

На рисунке 4.4, а изображен график криволинейной замедленной коммутации. Для сравнения на том же рисунке показан и график прямолинейной коммутации. При  $\Sigma e < 0$  добавочный ток коммутации  $i_K$  имеет противоположный знак, и характер изменения токов будет ускоренный (рисунок 4.4, б). В этом случае токи  $i$ ,  $i_1$  и  $i_2$  изменяются быстро в начале коммутации и медленно в конце. Ток и плотность тока под набегающим краем щетки уже в начале коммутации становятся большими. В конце же процесса ускоренной коммутации ток, а также плотность тока под сбегающим краем щетки малы. Поэтому размыкание цепи короткозамкнутой секции при такой ускоренной коммутации происходит в благоприятных условиях подобно размыканию цепи с малым током. Замедленная коммутация неблагоприятна и нежелательна, а слегка ускоренная, наоборот, желательна, поэтому на практике стремятся достичь именно такой коммутации.

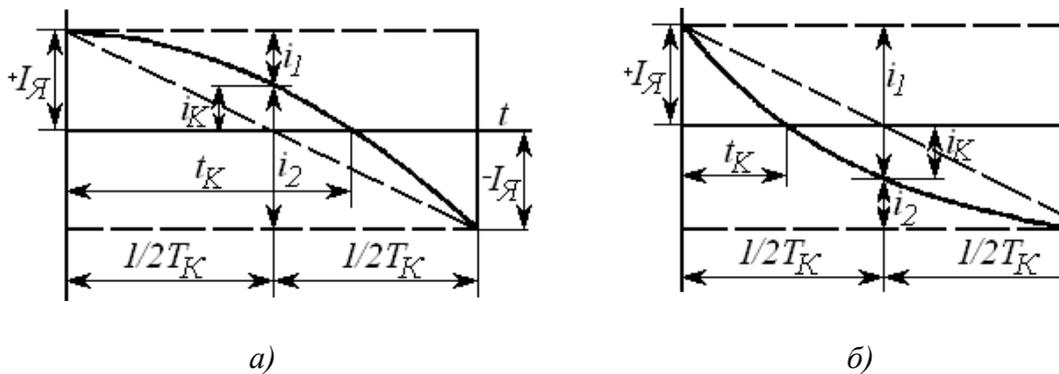


Рисунок 4.4 Криволинейная коммутация

#### Причины искрения щеток

Согласно ГОСТ 183-74 степень искрения на коллекторе должна оцениваться по шкале искрения (классам коммутации), приведенной в таблице 4.1. Степень искрения коллекторных машин указывают в стандартах на отдельные виды машин, а при отсутствии стандартов – в технических условиях (ТУ) на эти машины. Если степень искрения машин не оговорена, то она при нормальном режиме работы машины должна быть не выше 1½.

Механические причины искрения щеток обусловлены неровностью поверхности коллектора, выступанием слюдяных изолирующих прокладок между пластинами коллектора, вибрацией щеточного устройства, неправильным расположением и неравномерным давлением щеток и др.

Причины потенциального характера. Испытания показали, что коммутация проходит нормально, если максимальное значение напряжения между коллекторными пластинами  $25 \div 35$  В для машин большой и средней мощности и  $50 \div 60$  В для машин малой мощности. Если это напряжение выходит за указанные пределы, то между соседними пластинами появляется искрение или даже дуга.

Механические причины искрения щеток обусловлены неровностью поверхности коллектора, выступанием слюдяных изолирующих прокладок между пластинами коллектора, вибрацией щеточного устройства, неправильным расположением и неравномерным давлением щеток и др.

Таблица 4.1

Степень искрения	Характеристика степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствие искрения	Отсутствие почернения на коллекторе и следов нагара на щетках
1¼	Слабое искрение под небольшой частью края щетки	
1½	Слабое искрение под большей частью края щетки	Появление следов почернения на коллекторе и следов нагара на щетках, легко устранимых протиранием поверхности коллектора бензином
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузке	Появление следов почернения на коллекторе и следов нагара на щетках, не устранимых протиранием поверхности коллектора бензином
3	Значительное искрение под всем краем щетки с появлением крупных и вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого включения или реверсирования машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы	Значительное почернение на коллекторе, не устранимое протиранием поверхности коллектора бензином, а также подгар и частичное разрушение щеток

Причины потенциального характера. Испытания показали, что коммутация проходит нормально, если максимальное значение напряжения между коллекторными пластинами  $25 \div 35 \text{ В}$  для машин большой и средней мощности и  $50 \div 60 \text{ В}$  для машин малой мощности. Если это напряжение выходит за указанные пределы, то между соседними пластинами появляется искрение или даже дуга.

Причины электромагнитного характера обусловлены величиной запаса электромагнитной энергии коммутируемой секции  $0,5Lc^2$  в момент ее размыкания. Разряд электромагнитной энергии и является причиной искрения. Таким образом, причины электромагнитного характера зависят от величины реактивной э.д.с.  $e_p$  и вызываемого ею добавочного тока коммутации  $i_k$ . Сильное искрение может перейти в круговой огонь на коллекторе, что приводит к повреждению щеточно-коллекторного устройства машины.

#### Основные средства улучшения коммутации

Основная причина неудовлетворительной коммутации в машинах постоянного тока – добавочный ток коммутации  $i_k = \Sigma e / \Sigma R_k = (e_p \pm e_k) / \Sigma R_k$ , где  $R_k$  – сумма электрических сопротивлений добавочному току коммутации  $i_k$ . В сумму входят сопротивления щетки, секций, пайки в «петушках» и контактное сопротивление между щеткой и коллектором. Однако из перечисленных сопротивлений наибольшую величину имеют контактное сопротивление и сопротивление щетки. Уменьшения тока  $i_k$  можно достичь следующими способами: уменьшением реактивной э.д.с.  $e_p$ ; созданием в коммутирующей зоне магнитного поля такой величины и такой полярности, чтобы э.д.с. вращения  $e_k$  скомпенсировала бы э.д.с.  $e_p$ ; увеличением сопротивления  $\Sigma R_k$ . Реактивная э.д.с.  $e_p$  может быть уменьшена чисто конструктивными методами. Для этого надо при проектировании машины предусматривать секции с укороченным шагом и с возможно меньшим числом витков, уменьшать частоту вращения и линейную нагрузку якоря, устанавливать соответствующие размеры щеток, коллектора и секций. Однако выполнение всех этих условий может быть использовано лишь в ограниченной степени из-за увеличения габаритов машины и соответственно ее стоимости.

Для создания в зоне коммутации магнитного поля, индуктирующего компенсирующую э.д.с. вращения  $e_k$  в машинах постоянного тока применяют добавочные полюсы (рисунок 4.5). Намагничивающая сила добавочных полюсов должна обеспечивать магнитную индукцию  $B_k$  в зоне коммутации такой величины, чтобы э.д.с. вращения  $e_k$  была равна э.д.с.  $e_p$  по величине и противоположна по направлению, т.е. чтобы для любого момента времени выполнялось равенства  $e_p - e_k = 0$ .

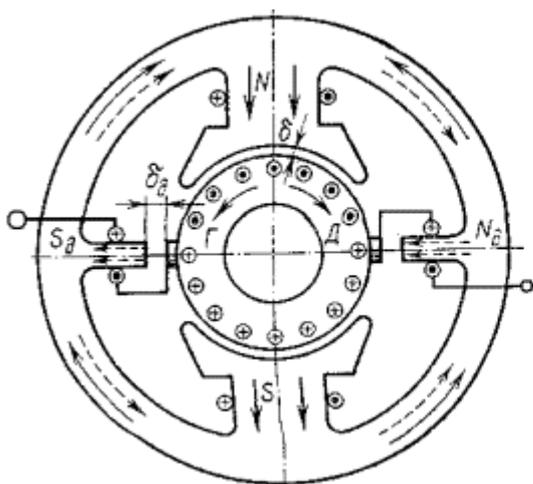


Рисунок 4.5 – Полярность добавочных полюсов при работе машины генератором  $\Gamma$  и двигателем  $D$

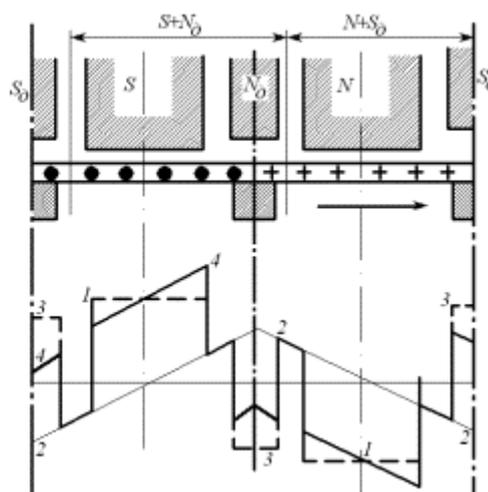


Рисунок 4.6 – Намагничивающая сила генератора с добавочными полюсами

На рисунок 4.6 показаны н.с. генератора с добавочными полюсами. Кривая 1 представляет собой н.с. главных полюсов, кривая 2 – н.с. якоря, кривая 3 – н.с. добавочных полюсов, кривая 4 – результирующую н.с. генератора с добавочными полюсами, полученную путем сложения ординат кривых 1, 2 и 3. Кроме того, магнитный поток добавочных полюсов должен быть направлен навстречу поперечному потоку реакции якоря, т.е. компенсировать размагничивающее и искажающее действие поперечной реакции якоря в зоне между главными полюсами. Поэтому полярность добавочного полюса в генераторе должна быть такой же, как и у следующего по направлению вращения главного полюса, а в двигателе – как у предшествующего главного полюса (рисунок 4.5).

Так как н.с. поперечной реакции якоря и реактивная э.д.с.  $e_r$  пропорциональны току якоря, то для их компенсации н.с. добавочного полюса и магнитная индукция  $B_k$  также должны быть пропорциональны току якоря. Для удовлетворения этого условия обмотку добавочных полюсов соединяют последовательно с обмоткой якоря, а добавочные полюсы выполняют ненасыщенными при номинальной нагрузке машины. Для этого увеличивают зазор под добавочным полюсом по сравнению с зазором под главным полюсом, берут индукцию в сердечнике добавочного полюса не более  $0,8 \div 1 Tл$ , чтобы не сказывалось насыщение стали. Число добавочных полюсов обычно равно числу главных полюсов, и только в машинах малой мощности их иногда уменьшают в два раза. Добавочные полюсы располагают между главными полюсами по линиям геометрических нейтралей. Щетки устанавливают по этим же линиям и оставляют в этом положении при всех нагрузках.

В машинах без добавочных полюсов магнитное поле, необходимое для создания компенсирующей э.д.с. вращения, можно получить сдвигом щеток с геометрической нейтрали (рисунок 4.7). Предположим, что машина работает генератором и якорь вращается по часовой стрелке. Если щетки установлены на геометрической нейтрали  $1-1'$ , то в зоне коммутации имеется только поперечное поле якоря. При вращении в этом поле коммутируемых секций в них будет наводиться э.д.с., направленная так же, как они были направлены до вступления секций в зону коммутации.

Следовательно, э.д.с. вращения  $e_k$ , обусловленные поперечным полем якоря, будут действовать в том же направлении, что и э.д.с. самоиндукции  $e_L$  и э.д.с. взаимоиндукции  $e_M$ , и будут замедлять процесс коммутации.

Если щетки передвинуть в зону  $2-2'$ , где поле якоря полностью компенсировано полем полюсов (физическая нейтраль), то э.д.с. вращения  $e_k$  в коммутируемых секциях были бы равны нулю, однако э.д.с.  $e_L$  и  $e_M$  по-прежнему замедляли бы процесс коммутации. Для того чтобы скомпенсировать и эти э.д.с., необходимо щетки сдвинуть еще дальше – в положение  $3-3'$ , где результирующее поле в воздушном зазоре имеет направление, обратное направлению поля тех полюсов, под которыми секции находились до начала коммутации. Как видно из рисунка 4.7, для создания коммутирующего поля необходимо сдвигать щетки с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря в генераторном режиме и против направления вращения в режиме двигателя.

Если щетки передвинуть в зону  $2-2'$ , где поле якоря полностью компенсировано полем полюсов (физическая нейтраль), то э.д.с. вращения  $e_k$  в коммутируемых секциях были бы равны нулю, однако э.д.с.  $e_L$  и  $e_M$  по-прежнему замедляли бы процесс коммутации. Для того чтобы скомпенсировать и эти э.д.с., необходимо щетки сдвинуть еще дальше – в положение  $3-3'$ , где результирующее поле в воздушном зазоре имеет направление, обратное направлению поля тех полюсов, под которыми секции находились до начала коммутации. Как видно из рисунка 4.7, для создания коммутирующего поля необходимо сдвигать щетки с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря в генераторном режиме и против направления вращения в режиме двигателя. Недостаток рассмотренного метода – в том, что коммутирующее поле не изменяется автоматически пропорционально току якоря, и требуемая компенсация поля якоря и э.д.с.  $e_L$  и  $e_M$  получается лишь при определенной нагрузке машины. При других нагрузках условия коммутации получаются менее благоприятными. Осуществить автоматическое изменение сдвига щеток при изменениях нагрузки практически невозможно.

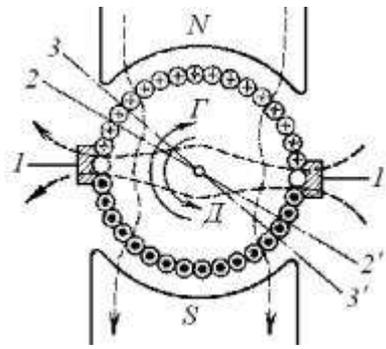


Рисунок 4.7 – Сдвиг щеток для улучшения коммутации

Увеличение сопротивления цепи коммутируемой секции в принципе возможно за счет выполнения «петушков» с повышенным сопротивлением. Однако это приводит к уменьшению к.п.д. машины, а также к увеличению плотности тока у сбегающего края щетки. Кроме того, такие «петушки» ненадежны в работе. Существенным является подбор щеток с надлежащими характеристиками и сохранение оксидной пленки на поверхности коллектора. При выборе марки щеток часто приходится находить компромиссное решение взаимно противоречивых требований. Например, с точки зрения улучшения коммутации выгодно выбирать твердые сорта щеток. Однако это приводит к повышенному износу коллектора и к увеличению размеров всего щеточного аппарата и коллектора вследствие меньшей допустимой плотности тока этих сортов щеток. В настоящее время в машинах обычного исполнения широко применяют графитные щетки, в машинах с более тяжелым режимом работы – угольнографитные и электрографитные, в низковольтных машинах – медно- или бронзографитные. На контактное сопротивление между щеткой и коллектором большое влияние оказывает химическое состояние поверхности коллектора. При нормальной работе коллектор должен быть покрыт тонкой оксидной пленкой, обладающей повышенными прочностью и электрическим сопротивлением. Добавочные полюсы компенсируют действие реакции якоря только в междуполюсном пространстве (в зоне коммутации). Непосредственно под главными полюсами реакция якоря остается некомпенсированной, что приводит к искажению основного поля и резкой разнице между э.д.с., наведенными в соседних секциях обмотки якоря, вследствие чего возникает искрение потенциального характера. Для компенсации реакции якоря в зоне главных полюсов применяют компенсационную обмотку (рисунок 4.8).

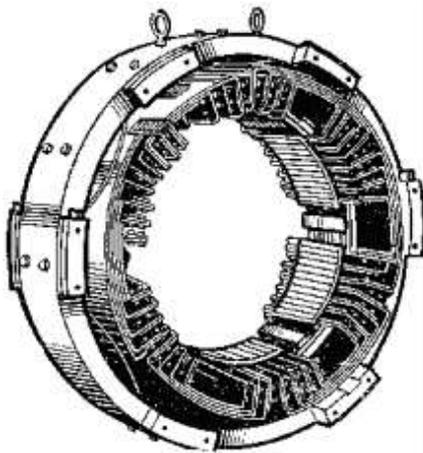


Рисунок 4.8 – Станина машины постоянного тока с компенсационной обмоткой

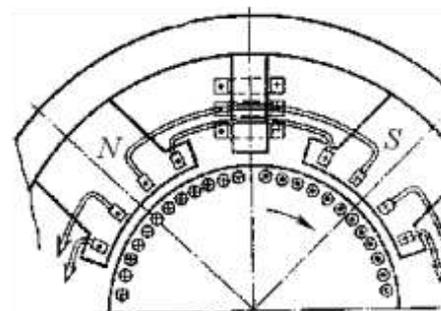


Рисунок 4.9 – Направление тока в компенсационной обмотке

В пазу полюсных наконечников укладывают изолированные проводники, которые соединяют так, что они образуют обмотку с магнитной осью, совпадающей с геометрической нейтралью (рисунок 4.9). Компенсационную обмотку включают последовательно с обмоткой якоря. Намагничивающая сила компенсационной обмотки распределена по длине полюсной дуги, ее направление противоположно направлению н.с. поперечной реакции якоря и равна ей по величине. Наличие компенсационной обмотки повышает надежность работы машины, увеличивая ее стоимость и потери в цепи якоря, поэтому ее применяют в машинах малой мощности, работающих в тяжелых условиях (тяговые электродвигатели, крановые), а также в машинах большой мощности с резкими колебаниями нагрузки (электродвигатели прокатных станов).

#### Вопросы для самоконтроля

1. Замедленная и ускоренная коммутации.
2. Причины искрения щеток.
3. Криволинейная коммутация.
4. Прямолинейная коммутация.
5. Основные средства улучшения коммутации.

### Тема 5. Машины постоянного тока специального назначения

#### Электромашинные усилители

В современных производственных электроустановках широко применяют системы непрерывного автоматического регулирования и управления. Один из основных элементов этой системы – усилитель мощности. Существуют различные типы усилителей: электронные, электромагнитные и электромашинные. Последние представляют собой специальную разновидность электромашинных генераторов, которые приводятся во вращение приводными электродвигателями с  $n = const$ . Эти машины позволяют получить при малой мощности управления на выходе достаточно большую мощность за счет мощности, получаемой от приводного двигателя. Одной из основных характеристик электромашинных усилителей (ЭМУ) является коэффициент усиления мощности, равный отношению выходной электрической мощности  $P_2$  к мощности управления  $P_U$

$$k_U = P_2 / P_U \quad (5.1)$$

Важное требование к системе регулирования – наименьшее время передачи сигнала управления, но ЭМУ обладает электромагнитной инерцией, обусловленной потоком возбуждения. Быстродействие ЭМУ определяется электромагнитными постоянными времени обмоток

$$T = L/R, \quad (5.2)$$

где  $L$  и  $R$  – индуктивность и активное сопротивление обмоток управления.

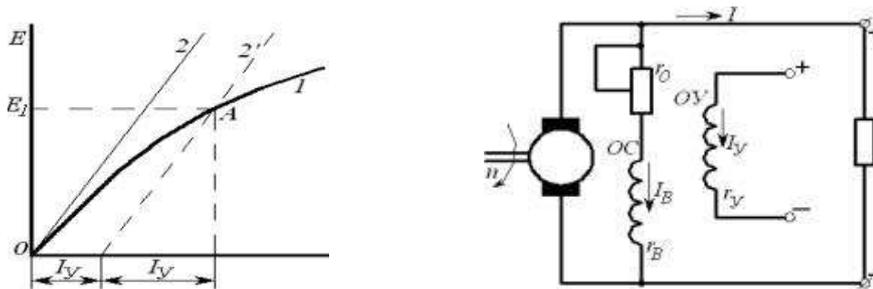
С увеличением коэффициента усиления возрастает также и постоянная времени усилителя. Сопоставляют усилители с различным  $k_U$  и  $T$  по коэффициенту добротности

$$k_D = k_U / T \quad (5.3)$$

и называют их одноступенчатыми. В многоступенчатых усилителях происходит последовательное многократное усиление мощности. По способу возбуждения различают ЭМУ с продольным и поперечным потоком. В усилителях продольного поля основной поток возбуждения направлен по продольной оси машины.

Конструктивно одноступенчатый ЭМУ с продольным потоком (рисунок 5.1, а) представляет собой генератор параллельного возбуждения, имеющий одну обмотку независимого возбуждения, которую называют обмоткой управления (ОУ). Цепь самовозбуждения ЭМУ с обмоткой самовозбуждения (ОС) в настроенном состоянии имеет сопротивление, равное критическому или несколько превышающее его по условию возникновения процесса самовозбуждения. При этом напряжение на выходе усилителя, как генератора с самовозбуждением, равно нулю, так как вольтамперная характеристика 2 пересекает характеристику холостого хода  $I$  в начале координат (рисунок 5.1, б). Если в обмотке управления ОУ пропустить некоторый ток  $I_U$ , то под действием ее

н.с. генератор быстро самовозбудится до точки  $A$  характеристики х.х. При этом прямая займет положение  $2'$ .



а) б)  
Рисунок 5.1 – Схема электромашинного усилителя с продольным полем (а) и его характеристика холостого хода (б)

Электромашинные усилители с поперечным полем самые распространенные, их изготавливают обычно с неявновыраженными полюсами с  $2p=2$ . В обычной машине постоянного тока поперечная реакция якоря искажает поле главных полюсов и часто нарушает коммутацию, поэтому принимаются меры для ослабления поперечной реакции якоря. В ЭМУ с поперечным полем поперечный поток реакции якоря используется для получения э.д.с. Для этой цели на коллекторе помещают дополнительную пару вертикальных щеток 2, ось которых перпендикулярна оси основных горизонтальных щеток 1 (рисунок 5.2).

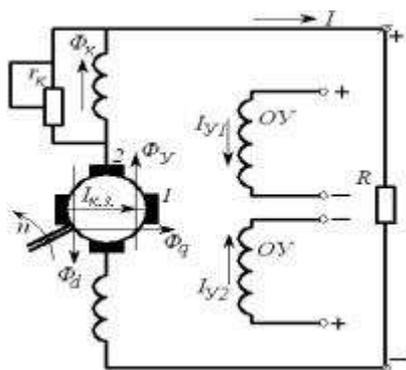


Рисунок 5.2 – Схема соединения обмоток ЭМУ с поперечным потоком

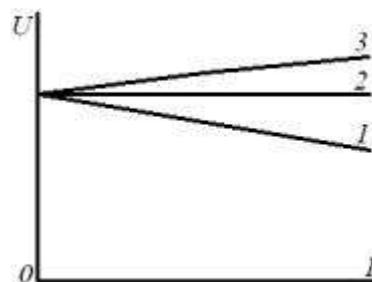


Рисунок 5.3 – Внешние характеристики ЭМУ

После подачи входных сигналов на обмотки управления токи этих обмоток  $I_y$  создают н.с. и поток  $\Phi_y$ , который действует в направлении поперек оси короткозамкнутых щеток 1. При пересечении этого относительно небольшого потока в обмотке якоря индуцируется э.д.с., под действием которой создается ток  $I_{кз}$ . Это является первой ступенью усиления, что по существу представляет собой генератор независимого возбуждения, работающий в режиме к.з. Ток  $I_{кз}$  создает поперечный поток реакции якоря  $\Phi_q$ , который направлен вдоль оси горизонтальных щеток 1 и перпендикулярно к оси вертикальных щеток 2. Под действием потока  $\Phi_q$  в обмотке якоря наводится э.д.с., приложенная между щетками 2. Если к этим щеткам подключена нагрузка, то в цепи вертикальных щеток 1 возникает ток нагрузки  $I$ . Следовательно, вторая ступень усиления ЭМУ – цепи поперечных и продольных щеток. Ток нагрузки  $I$  создает продольный поток реакции якоря  $\Phi_d$ , направление которого совпадает с осью вертикальных щеток 2 и является встречным по отношению к потоку  $\Phi_y$  обмотки управления. Если не принять мер по компенсации потока  $\Phi_d$ , машина окажется размагниченной и неработоспособной. Поэтому в станину ЭМУ обязательно укладывают компенсационную обмотку, поток которой  $\Phi_k$  направлен навстречу потоку  $\Phi_d$ . Точную настройку компенсации осуществляют реостатом  $r_k$ , включенным

параллельно компенсационной обмотке. Для улучшения коммутации над вертикальными щетками 2, через которые проходит ток нагрузки  $I$ , устанавливаются дополнительные полюсы.

Ввиду того, что магнитная цепь усилителя ненасыщенна, напряжение  $U$  является линейной функцией тока нагрузки  $I$ , т.е. внешняя характеристика ЭМУ представляет собой прямую линию (рисунок 5.3). При недокомпенсации реакции якоря при увеличении нагрузки напряжение усилителя падает (кривая 1). При полной компенсации напряжение ЭМУ изменяется незначительно, только за счет изменения падения напряжения на якоре (кривая 2). При значительной перекомпенсации (кривая 3) возможно самовозбуждение усилителя, т.е. произвольный рост напряжения при постоянстве тока в обмотке управления. Общий коэффициент усиления ЭМУ с поперечным полем находится в пределах  $2000 \div 10\ 000$ , но иногда достигает  $100\ 000$ .

#### Машины постоянного тока с беспазовым якорем

Современные системы автоматического регулирования предъявляют к исполнительным двигателям постоянного тока жесткие требования: быстроедействие, максимальная точность регулирования частоты вращения, высокая коммутационная надежность. В последнее время появились двигатели, у которых обмотку якоря располагают не в пазах, а непосредственно на сердечнике якоря. Машины с гладкими якорями обладают следующими особенностями: обмотка якоря имеет относительно меньшую индуктивность, чем обмотка, размещенная в пазах; отсутствие зубцов дает возможность значительно повысить магнитную индукцию в воздушном зазоре. Уменьшение индуктивности обмоток снижает реактивную э.д.с. в коммутируемых секциях. Наличие относительно большого немагнитного участка магнитной цепи машины уменьшает реакцию якоря, поэтому двигатели с гладким якорем имеют прямолинейные устойчивые характеристики частоты вращения и прямолинейную зависимость момента от тока якоря даже при больших перегрузках. Кроме того, вследствие отсутствия зубцов в двигателе практически отсутствуют пульсации основного магнитного потока, что очень важно при эксплуатации электродвигателя. Целесообразность применения гладкого якоря обусловлена в машинах малой мощности улучшением их характеристик, а в машинах большой мощности – обеспечением достаточной коммутационной надежности и улучшением распределения потенциалов на коллекторе. Обмотка якоря крепится либо непосредственно на изолированном сердечнике, либо в пластмассовом слое.

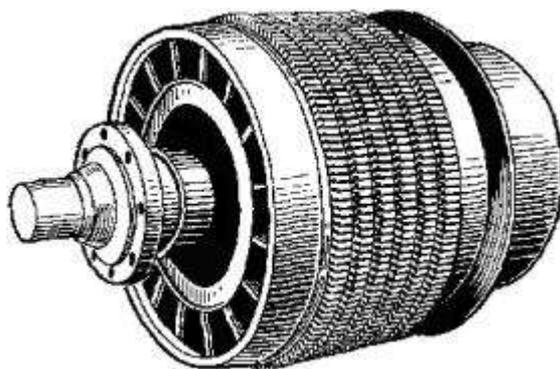


Рисунок 5.4 – Гладкий якорь с пластмассовыми сегментами до укладки обмотки

В первом случае на изолированный сердечник укладывают пропитанные эпоксидной смолой секции якорной обмотки, которые закрепляют с помощью бандажной стеклоленты. Во втором случае на гладкой поверхности сердечника якоря устанавливают пластмассовые сегменты, в пазы которых укладывают обмотку (рисунок 5.4). Одна из главных проблем, возникающих при изготовлении машин с гладкими якорями, – создание обмотки возбуждения, обеспечивающей большую н.с. при ограниченных габаритах. Применяют такие двигатели в приводах, работающих с широким регулированием частоты вращения и нагрузки (прокатные станы, подъемно-транспортные устройства).

### Униполярные машины

Униполярные генераторы позволяют получать большой постоянный ток (до  $500\ 000\ A$ ) при низком напряжении (например, в электролизных установках). Одна из схем униполярного генератора показана на рисунке 5.5.

Массивный стальной ротор  $1$  вращается в магнитном поле, которое создается неподвижными кольцевыми катушками обмотки возбуждения  $2$ . Основной магнитный поток  $\Phi$  в центральной активной части машины имеет по всей окружности одинаковую полярность, отсюда и происходит название машины. Индуцируемая в стержнях обмотки ротора при его вращении в магнитном поле э.д.с.  $E=Blv$  также имеет по всей окружности одинаковое направление. Ток с ротора снимается с помощью неподвижных щеток  $3$ . Применение униполярных генераторов ограничено в связи с трудностями отвода тока, так как щеточный аппарат получается громоздким. В настоящее время с ротора отводят ток с помощью жидких металлов (ртуть, натрий).

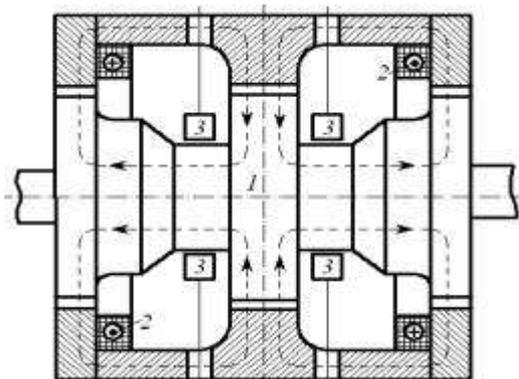


Рисунок 5.5 – Униполярный генератор

Униполярная индукция используется также в магнитогидродинамических (МГД) генераторах. В этих генераторах вместо движущегося проводника используется поток раскаленных ионизированных газов, называемый «плазма».

### Исполнительные двигатели

Исполнительными двигателями называют двигатели, которые применяют в системах автоматического управления и регулирования различных автоматизированных установок и которые предназначены для преобразования электрического сигнала (напряжения управления), получаемого от какого-то измерительного органа или датчика, в механическое перемещение (вращение) вала с целью воздействия на соответствующий регулирующий или управляющий аппарат. Если напряжение и мощность сигнала малы для управления исполнительным двигателем, то применяют промежуточные усилители мощности (магнитные или электронные). Номинальная мощность исполнительных двигателей обычно мала – до  $500\div 600\ Bm$ . К этим двигателям предъявляют требования по точности работы и быстродействию: требуется, чтобы зависимости момента  $M$  и частоты вращения  $n$  от напряжения сигнала (управления) были по возможности линейными.

На рисунке 5.6 показан исполнительный двигатель постоянного тока с печатной обмоткой якоря. Якорь этого двигателя имеет вид тонкого диска  $5$  из немагнитного материала (текстолит, стекло и др.), на обеих сторонах которого печатным способом нанесены проводники обмотки якоря  $8$ . Принцип работы этого двигателя такой же, что и двигателей с цилиндрическим якорем. При включении двигателя в сеть ток в обмотке якоря взаимодействует с магнитным полем возбуждения постоянных магнитов  $2$ , расположенных на статоре двигателя и обращенных своими полюсными наконечниками  $3$  к одной стороне пластмассового диска якоря.

С другой стороны диска расположено кольцо  $4$  ферромагнитного материала. Это кольцо выполняет те же функции, что и сердечник якоря в двигателях обычной конструкции, т.е. является

элементом магнитной системы машины, через который замыкается основной магнитный поток. Якорь двигателя закрепляется на валу 6 втулкой 7.

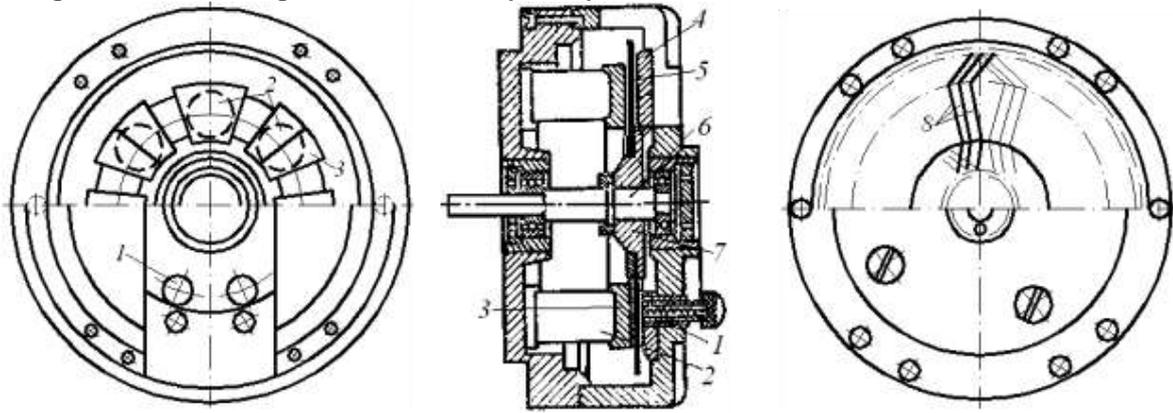


Рисунок 5.6 – Конструкция двигателя постоянного тока с печатной обмоткой

Включение двигателя в сеть осуществляется через щеточный контакт с щеткодержателем 1. Так как секции печатной обмотки одновитковые, а количество секций в обмотке ограничено площадью поверхности диска, то двигатели с печатной обмоткой выполняют обычно на низкое напряжение сети.

#### Тахогенераторы

Тахогенераторами называют электрические микромашины, работающие в генераторном режиме и служащие для преобразования частоты вращения в пропорциональный электрический сигнал. При этом пропорциональность преобразования определяется видом выходной характеристики тахогенератора, т.е. зависимостью между входной величиной (частотой вращения вала  $n$ ) и выходной (напряжением  $U_{ВЫХ}$  в выходной обмотке). Большинство тахогенераторов имеет обычную конструкцию машин постоянного тока с независимым возбуждением при  $I_B = const$  или с постоянными магнитами, у которых  $\Phi = const$ . При постоянстве магнитного потока

$$E_{Я} = k_{ЭП} \Phi = k_{ЭП} n - \text{э.д.с. генератора,}$$

$E_{Я} = U + I_{Я} R_{Я} = U(1 + R_{Я}/R)$ , где  $I_{Я} = U/R$  – ток якоря генератора;  $R$  – сопротивление внешней цепи, на которую включен генератор.

Таким образом,

$U = E_{Я}(1 + R_{Я}/R)k_{ЭП}/(1 + R_{Я}/R)$ , т.е. при постоянстве сопротивления нагрузки и цепи якоря сохраняется пропорциональность между напряжением генератора и частотой вращения его якоря.

Характеристики тахогенератора приведены на рисунке 5.7 для нескольких значений  $R$ . По мере увеличения тока  $I_{Я}$  якоря начинает проявляться размагничивающее действие реакции якоря. Характеристики тахогенератора приведены на рисунке 5.7 для нескольких значений  $R$ . По мере увеличения тока  $I_{Я}$  якоря начинает проявляться размагничивающее действие реакции якоря. Величина магнитного потока уменьшается, и характеристика тахогенератора отклоняется от прямой линии вниз. Применение измерительных приборов с большим внутренним сопротивлением уменьшает нелинейность выходной характеристики.

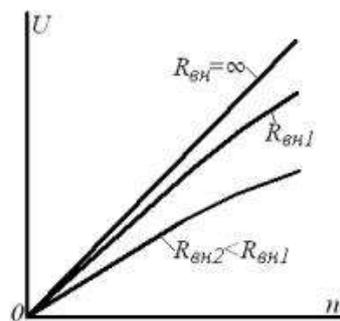


Рисунок 5.7 – Характеристики тахогенератора

Важный показатель тахогенератора – крутизна выходной характеристики, которая представляет собой отношение приращения выходного напряжения к приращению частоты вращения  $[B/(об/мин)]$ :  $e = \Delta U_{ВЫХ} / \Delta n$ , где  $\Delta U_{ВЫХ}$  – приращение выходного напряжения,  $B$ ;  $\Delta n$  – приращение частоты вращения. В процессе работы тахогенераторов крутизна выходной характеристики может изменяться под действием температуры обмотки возбуждения и переходного падения напряжения в щеточном контакте.

#### Тяговые электродвигатели

Тяговые электродвигатели приводят в движение подвижной состав на самых различных видах транспорта: на городских, пригородных и магистральных электрических железных дорогах, на водном, внутризаводском, рудничном транспорте и др. В соответствии с этим тяговые двигатели постоянного тока выполняют на различные мощности и напряжения. По сравнению с машинами стационарного типа условия работы тяговых электродвигателей значительно тяжелее, так как габариты двигателя ограничены диаметром ведущих колес и шириной колеи.

Работа двигателя протекает в условиях частого пуска при значительных ускорениях подвижного состава и сопровождается резкими изменениями напряжения на зажимах двигателя, тока и частоты вращения.

Тяговые двигатели пульсирующего тока.

Особенность таких двигателей в том, что их питают от сети переменного тока через выпрямительный блок из кремниевых диодов. Величину пульсации тока оценивают коэффициентом пульсации

$$k_{ПЛУЛ} = (I_{МАКС} - I_{МИН}) / (I_{МАКС} + I_{МИН}).$$

Существенный недостаток электродвигателя пульсирующего тока – напряженные потенциальные условия на коллекторе, способствующие возникновению на нем кругового огня.

#### Вопросы для самоконтроля

1. Электромашинные усилители
2. Машины постоянного тока с беспазовым якорем
3. Униполярные машины
4. Исполнительные двигатели
5. Тахогенераторы
6. Тяговые электродвигатели

## Раздел 2 Трансформаторы

### Тема 6. Основные сведения о трансформаторах. Устройство и рабочий процесс трансформаторов

*Трансформатором* называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

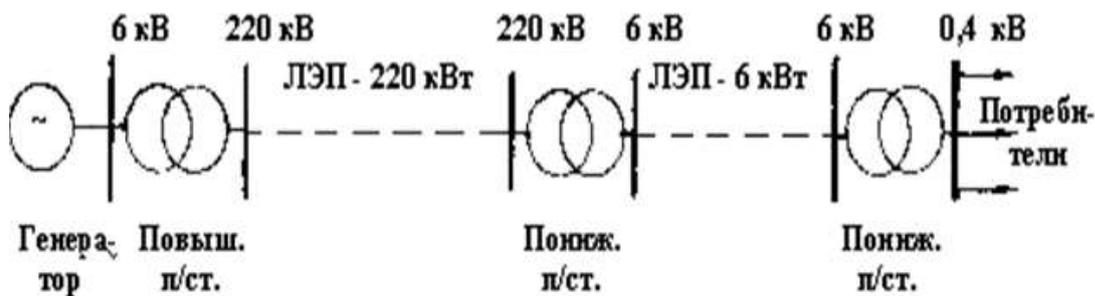


Рис. 1. Схема распределения электроэнергии

Известно, что передача электроэнергии на дальние расстояния осуществляется на высоком напряжении (220, 400, 500 кВ и более), благодаря чему значительно уменьшаются потери энергии в линии (рис.1). Получить такое высокое напряжение непосредственно в генераторе невозможно, поэтому в начале линии электропередачи устанавливают повышающие трансформаторы, а в конце линии устанавливают понижающие трансформаторы. Таким образом, переменный ток по пути от электростанции до потребителя подвергается трех-, а иногда и четырехкратному трансформированию. В зависимости от назначения трансформаторы разделяются на силовые и специальные.

С помощью трансформаторов повышается или понижается напряжение, изменяется число фаз, а в некоторых случаях преобразуется частота переменного тока. Возможность передачи электрических сигналов от одной обмотки к другой посредством взаимной индукции была открыта *М. Фарадеем* в 1831 г.; при изменении тока в одной из обмоток, намотанной на стальной магнитопровод, в другой обмотке индуцировалась ЭДС. Однако первый практически работающий трансформатор создал известный изобретатель *П. Н. Яблочков* в содружестве с *И. Ф. Усагиным* в 1876 г. Это был двухобмоточный трансформатор с разомкнутым магнитопроводом.

В дальнейшем несколько конструкций однофазных трансформаторов с замкнутым магнитопроводом были созданы венгерскими электротехниками *О. Блати*, *М. Дери* и *К. Циперноеским*. Для развития трансформаторостроения и вообще электромашиностроения большое значение имели работы проф. *А. Г. Столетова* по исследованию магнитных свойств стали и расчету магнитных цепей.

Важная роль в развитии электротехники принадлежит *М. О. Доливо-Добровольскому*. Он разработал основы теории многофазных и, в частности, трехфазных переменных токов и создал первые трехфазные электрические машины и трансформаторы. Трехфазный трансформатор современной формы с параллельными стержнями, расположенными в одной плоскости, был изобретен им в 1891 г. С тех пор происходило дальнейшее конструктивное усовершенствование трансформаторов, уменьшалась их масса и габариты, повышалась экономичность. Основные положения теории трансформаторов были разработаны в трудах *Е. Арнольда* и *М. Видмара*.

В развитии теории трансформаторов и совершенствовании их конструкции большое значение имели работы советских ученых *В. В. Корицкого*, *Л. М. Пиотровского*, *Г. Н. Петрова*, *А. В. Сапожникова*, *А. В. Трамбицкого* и др.

Трансформаторы широко используют для следующих целей.

1. Для передачи и распределения электрической энергии. Обычно на электростанциях генераторы переменного тока вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6—24 кВ. Передавать же электроэнергию на дальние расстояния выгодно при больших напряжениях, поэтому на каждой электростанции устанавливают трансформаторы, повышающие напряжение.

В настоящее время для высоковольтных линий электропередачи в СССР применяют силовые трансформаторы с масляным охлаждением напряжением 330, 500 и 750 кВ, мощностью до 1200—1600 МВ-А. В связи со строительством дальних линий электропередачи Экибастуз — Центр, Экибастуз — Урал и других напряжением 1150 кВ переменного тока наша электропромышленность создала трансформаторные группы, состоящие из трех однофазных трансформаторов мощностью 667 МВ-А, а для линий 1500 В постоянного тока — двенадцати фазные преобразовательные блоки с четырехобмоточными трансформаторами общей мощностью 1500 МВ-А. КПД таких трансформаторов составляет 98 — 99% и выше.

Для перспективных линий электропередачи переменного тока напряжением 1800—2000 кВ и постоянного тока напряжением 3000 кВ разрабатывают трансформаторы мощностью 1320 МВ-А на одну фазу.

Электрическая энергия распределяется между промышленными предприятиями и населенными пунктами, в городах и сельских местностях, а также внутри промышленных предприятий по воздушным и кабельным линиям при напряжении 220, 110, 35, 20, 10 и 6 кВ. Следовательно, во всех узлах распределительных сетей должны быть установлены трансформаторы, понижающие напряжение. Кроме того, понижающие трансформаторы следует устанавливать в пунктах потребления электроэнергии, так как большинство электрических потребителей переменного тока работает при напряжениях 220, 380 и 660 В. Таким образом,

электрическая энергия при передаче от электрических станций к потребителям подвергается в трансформаторах многократному преобразованию (3 — 5 раз). Применяемые для этих целей трансформаторы могут быть одно- и трехфазными, двух- и трехобмоточными.

2. Для обеспечения нужной схемы включения вентилях в преобразовательных устройствах и согласования напряжений на входе и выходе преобразователя. В вентильных преобразователях, выпрямляющих переменный ток или преобразующих его из постоянного в переменный (инверторы), отношение напряжений на входе и выходе зависит от схемы включения вентилях. Поэтому если на вход преобразователя подается стандартное напряжение, то на выходе получается нестандартное. Для устранения этого недостатка вентильные преобразователи, как правило, снабжают трансформаторами, обеспечивающими стандартное выходное напряжение при принятой схеме включения вентилях. Кроме того, ряд схем включения вентилях требует обязательного применения трансформатора. Трансформаторы, применяемые для этой цели, называют *преобразовательными*. Их мощность достигает тысяч киловольт-ампер, напряжение 110 кВ; они работают при частоте 50 Гц и более. Рассматриваемые трансформаторы выполняют одно-, трех- и многофазными с регулированием выходного напряжения в широких пределах и без регулирования.

В последнее время для возбуждения мощных турбо- и гидрогенераторов, электропривода и других целей все шире начинают применять трансформаторы с естественным воздушным охлаждением напряжением 3 — 24 кВ и мощностью 133–6300 кВ·А. Благодаря использованию в этих трансформаторах новой теплостойкой изоляции удается повысить их нагрузочную способность и в 1,3 — 1,5 раз сократить, массогабаритные показатели по сравнению с применявшимися ранее трансформаторами с масляным охлаждением.

3. Для различных технологических целей: сварки (сварочные трансформаторы), питания электротермических установок (электропечные трансформаторы) и др. Мощность их достигает десятков тысяч киловольт-ампер при напряжении до 10 кВ; они работают обычно при частоте 50 Гц.

4. Для питания различных цепей радио- и телевизионной аппаратуры; устройств связи, автоматики в телемеханике, электробытовых приборов; для разделения электрических цепей различных элементов этих устройств; для согласования напряжений и т. п. Трансформаторы, используемые в этих устройствах, обычно имеют малую мощность (от нескольких вольт-ампер до нескольких киловольтампер), невысокое напряжение, работают при частоте 50 Гц и более. Их выполняют двух-, трех- и многообмоточными; условия работы, предъявляемые к ним требования и принципы проектирования весьма специфичны.

5. Для включения электроизмерительных приборов и некоторых аппаратов, например реле, в электрические цепи высокого напряжения или в цепи, по которым проходят большие токи, с целью расширения пределов измерения и обеспечения электробезопасности. Трансформаторы, применяемые для этой цели, называют *измерительными*. Они имеют сравнительно небольшую мощность, определяемую мощностью, потребляемой электроизмерительными приборами, реле и др.

Трансформаторы, перечисленные в п. 1, 2, 3 и частично в п. 4, предназначенные для преобразования электрической энергии в сетях энергосистем и потребителей электрической энергии, называют *силовыми*. Для режима их работы характерны неизменная частота переменного тока и очень малые отклонения первичного и вторичного напряжений от номинальных значений.

Силовые трансформаторы, выпускаемые отечественными заводами, разделены на несколько групп (габаритов) от I до VIII. Например, трансформаторы мощностью до 100 кВ·А включительно относят к габариту I, от 160 до 630 кВ·А — к габариту II, от 1000 до 6300 кВ·А — к габариту III и т. п.

В данной главе в основном рассматривается теория силовых трансформаторов; другие же виды трансформаторов рассмотрены кратко на основе общей теории.

*Классификацию трансформаторов можно произвести по нескольким признакам:*

1. По назначению трансформаторы разделяют на силовые общего и специального применения. Силовые трансформаторы общего применения используются в линиях передачи и распределения электроэнергии. Для режима их работы характерна частота переменного тока 50 Гц и очень малые отклонения первичного и вторичного напряжений от номинальных значений. К

трансформаторам специального назначения относятся силовые специальные (печные, выпрямительные, сварочные, радиотрансформаторы), измерительные и испытательные трансформаторы, трансформаторы для преобразования числа фаз, формы кривой ЭДС, частоты и т.д.

2. По виду охлаждения – с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением.

3. По числу фаз на первичной стороне – однофазные и трёхфазные.

4. По форме магнитопровода – стержневые, броневые, тороидальные.

5. По числу обмоток на фазу – двухобмоточные, трёхобмоточные, многообмоточные (более трёх обмоток).

6. По конструкции обмоток – с concentрическими и чередующимися (дисковыми) обмотками.

*Устройство трансформаторов.*

Магнитная система. В зависимости от конфигурации магнитной системы трансформаторы подразделяют на *стержневые*, *броневые* и *тороидальные*. *Стержнем* называют часть магнитопровода, на которой размещают обмотки. Часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют, называют *ярмом*. Трансформаторы большой и средней мощности обычно выполняют стержневыми. Они имеют лучшие условия охлаждения и меньшую массу, чем броневые.

Силовые трансформаторы большой мощности броневые типа отечественная промышленность не выпускает.

Но при значительных мощностях (более 80—100 МВ•А на фазу) часто применяют *бронестержневые* трансформаторы, у которых крайние стержни имеют боковые ярма.. Такая конструкция позволяет уменьшить поперечное сечение верхнего и нижнего ярм по сравнению со стержневыми трансформаторами, в результате чего уменьшается высота трансформатора и упрощается его транспортировка по железным дорогам. При дальнейшем повышении мощности для еще большего уменьшения высоты верхнего и нижнего ярм применяют трансформаторы *многостержневой конструкции*. В этом случае «расщепляют мощность» каждой фазы между двумя или тремя отдельными стержнями, т. е. обмотки каждой фазы располагают на нескольких стержнях, включенных в магнитном отношении параллельно. По способу сборки различают стыковые и шихтованные магнитопроводы.

*В стыковых магнитопроводах стержни и ярма собирают и скрепляют отдельно, а затем устанавливают в стык и соединяют между собой. В месте стыка во избежание замыкания листов устанавливают изоляционные прокладки.*

*В шихтованных магнитопроводах ярма и стержни собирают как цельную конструкцию с взаимным перекрытием отдельных слоев в месте стыка («впереплет»). Каждый слой состоит из двух - трех листов. При сборке магнитопровода листы в двух смежных слоях располагают листы каждого последующего слоя перекрывают стык в листах предыдущего слоя, существенно уменьшая магнитное сопротивление в месте сочленения. После сборки магнитопровода листы верхнего ярма вынимают, на стержни устанавливают катушки и ярмо снова ставят на место. Шихтованные магнитопроводы имеют значительно меньшее магнитное сопротивление, чем стыковые; поэтому последние применяют сейчас только в микротрансформаторах.*

Трансформаторы малой мощности и микротрансформаторы часто выполняют броневыми, так как они имеют более низкую стоимость по сравнению со стержневыми трансформаторами из-за меньшего числа катушек и упрощения сборки и изготовления. Применяют также и маломощные трансформаторы стержневого типа с одной или двумя катушками. Преимущество тороидальных трансформаторов — отсутствие в магнитной системе воздушных зазоров, что значительно уменьшает магнитное сопротивление магнитопровода.

В трансформаторах малой мощности магнитопровод собирают из штампованных пластин П-, Ш- и О-образной формы. При использовании листов Ш- и П-образной формы магнитопровод может быть собран «впереплет» или «встык». Сборку пластин «встык» применяют при необходимости введения в магнитопровод воздушного зазора; в этом случае в месте стыка устанавливают изоляционные прокладки.

*Обмотки.* В современных трансформаторах первичную и вторичную обмотки стремятся расположить для лучшей магнитной связи как можно ближе одну к другой. При этом на

каждом стержне магнитопровода размещают обе обмотки либо концентрически — одну поверх другой, либо в виде нескольких дисковых катушек, чередующихся по высоте стержня. В первом случае обмотки называют *концентрическими*, во втором — *чередующимися*. В силовых трансформаторах обычно применяют концентрические обмотки, причем ближе к стержням располагают обмотку НН, требующую меньшей изоляции относительно остова трансформатора, а снаружи — обмотку ВН.

В некоторых случаях для уменьшения индуктивного сопротивления рассеяния обмоток применяют двойные концентрические (расщепленные) обмотки, в которых обмотку НН делят на две части с одинаковым числом витков. Аналогично можно выполнить и обмотку ВН. При чередующихся обмотках всю обмотку подразделяют на симметричные группы, состоящие из одной или нескольких катушек ВН и расположенных по обе стороны от них двух или нескольких катушек НН. Чередующиеся обмотки применяют редко и в основном для специальных трансформаторов.

Обмотки трансформаторов изготавливают из медных или алюминиевых проводов. При использовании алюминия поперечное сечение провода берется примерно на 70% больше, чем при использовании меди из-за большего удельного электрического сопротивления алюминия. В связи с этим габариты и масса трансформаторов с алюминиевыми обмотками больше, чем у трансформаторов с медными обмотками.

По конструкции концентрические обмотки подразделяют на цилиндрические, непрерывные и винтовые.

*Цилиндрические обмотки*, выполненные из прямоугольного провода, обычно применяют в качестве обмоток низшего напряжения при мощностях до 250 кВ•А на один стержень (до 630 кВ•А для трехфазного трансформатора) и напряжении до 6 кВ. При мощности 10—16 кВ•А обмотку наматывают в один-два слоя, а при больших мощностях — в два слоя, соединенных последовательно.

*Винтовые* одно- и многоходовые обмотки используют обычно в качестве обмоток низшего напряжения в трансформаторах мощностью свыше 250 кВ•А на стержень при напряжениях до 15 кВ и токах свыше 300 А для медных проводов и 150—200 А для алюминиевых. Винтовую обмотку наматывают по винтовой линии из нескольких параллельных проводов прямоугольного сечения, прилегающих друг к другу в радиальном направлении. Подобно резьбе винта она может быть одно-, двух- и иногда многоходовой. Между отдельными витками и параллельными ходами располагают охлаждающие каналы.

*Изоляция силовых трансформаторов.* В трансформаторах изоляцию обмоток подразделяют на главную — изоляцию их от магнитопровода и между собой (обмоток НН от ВН) и продольную — изоляцию между витками, слоями и катушками каждой обмотки. Имеется также изоляция отводов от обмоток, переключателей и выводов. Изоляция обмоток трансформатора от заземленных частей и друг от друга определяется в основном электрической прочностью при частоте 50 Гц. Она обеспечивается соответствующим выбором величины изоляционных промежутков, которые в масляных трансформаторах одновременно выполняют роль охлаждающих каналов.

В трансформаторах напряжением 35 кВ для защиты от атмосферных перенапряжений две начальные и две конечные катушки обмотки высшего напряжения выполняют с усиленной изоляцией. Такая изоляция ухудшает условия охлаждения начальных и конечных катушек, поэтому их выполняют из провода большего поперечного сечения.

В трансформаторах напряжением 110 кВ и выше для уменьшения напряжения на концевых катушках обмотки высшего напряжения и выравнивания электрического поля у концов обмотки применяют емкостную компенсацию в виде емкостных витков и емкостных, которые служат электрическими экранами.

*Вводы* трансформатора. Для вывода наружу концов от обмоток в трансформаторах, охлаждаемых маслом или негорючим жидким диэлектриком, используют проходные фарфоровые изоляторы, размещаемые на крышке или на стенке бака. Проходной изолятор вместе с токоведущим стержнем и крепежными деталями называют *вводом*.

Вводы трансформаторов, устанавливаемых внутри помещений, имеют гладкую наружную поверхность, а вводы трансформаторов, предназначенных для наружной установки, снабжают ребрами, число которых зависит от напряжения соответствующей обмотки трансформатора.

При наличии ребер увеличивается расстояние между токоведущим стержнем и корпусом по поверхности изолятора и уменьшается вероятность поверхностного разряда во время дождя, при попадании на изолятор листьев и т. п. Крепление ввода к крышке бака и токоведущего стержня в изоляторе должно быть прочным, а применяемые уплотнения — маслостойкими.

При напряжениях свыше 110 кВ вводы часто выполняют составными — из двух фарфоровых изоляторов. Внутри такой ввод заполняют маслом, не сообщаясь с маслом, находящимся в баке трансформатора. Токоведущий кабель проходит внутри металлической трубы, которую изолируют кабельной бумагой или бумажно-бакелитовыми цилиндрами с установленными в них металлическими обкладками из фольги (для выравнивания электрического поля).

В трансформаторах, рассчитанных на большие токи, вокруг ввода создается большой магнитный поток, вследствие чего в крышке бака и крепежном фланце возникают значительные вихревые токи, нагревающие эти детали до высокой температуры.

Во избежание этого при больших токах вместо стального или чугунного фланцев применяют латунные и в крышке вырезают для них общее отверстие. При этом магнитные потоки всех вводов замыкаются вокруг отверстия и при одно- и трехфазном токах сильно уменьшаются из-за взаимной компенсации магнитодвижущих сил. В трансформаторах, охлаждаемых, воздухом, концы от обмоток присоединяют к контактным зажимам, которые укрепляют к остову трансформатора.

#### *Принцип действия трансформатора*

Электромагнитная схема однофазного двухобмоточного трансформатора состоит из двух обмоток, размещенных на замкнутом магнитопроводе, который выполнен из ферромагнитного материала. Применение ферромагнитного магнитопровода позволяет усилить электромагнитную связь между обмотками, т. е. уменьшить магнитное сопротивление контура, по которому проходит магнитный поток машины. Первичную обмотку подключают к источнику переменного тока — электрической сети с напряжением  $U_1$ . Ко вторичной обмотке присоединяют сопротивление нагрузки  $Z_H$ .

Обмотку более высокого напряжения называют *обмоткой высшего напряжения* (ВН), а низкого напряжения — *обмоткой низшего напряжения* (НН). Начала и концы обмотки ВН обозначают буквами *A* и *X*; обмотки НН — буквами *a* и *x*.

При подключении к сети в первичной обмотке возникает переменный ток  $i_1$ , который создает переменный магнитный поток  $\Phi$ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток  $\Phi$  индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС —  $e_1$  и  $e_2$ , пропорциональные, согласно закону Максвелла, числам витков  $w_1$  и  $w_2$  соответствующей обмотки и скорости изменения потока  $d\Phi/dt$ .

Таким образом, мгновенные значения ЭДС, индуцированные в каждой обмотке,  $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$ ;  $e_2 = -w_2 d\Phi/dt$ .

Следовательно, отношение мгновенных и действующих ЭДС в обмотках определяется выражением

Если пренебречь падениями напряжения в обмотках трансформатора, которые обычно не превышают 3 — 5% от номинальных значений напряжений  $U_1$  и  $U_2$ , и считать  $E_1 \approx U_1$  и  $E_2 \approx U_2$ , то получим

*Следовательно, подбирая соответствующим образом числа витков обмоток, при заданном напряжении  $U_1$  можно получить желаемое напряжение  $U_2$ . Если необходимо повысить вторичное напряжение, то число витков  $w_2$  берут больше числа  $w_1$ ; такой трансформатор называют *повышающим*. Если требуется уменьшить напряжение  $U_2$ , то число витков  $w_2$  берут меньшим  $w_1$ ; такой трансформатор называют *понижающим*,*

Отношение ЭДС  $E_{ВН}$  обмотки высшего напряжения к ЭДС  $E_{НН}$  обмотки низшего напряжения (или отношение их чисел витков) называют *коэффициентом трансформации*

Коэффициент  $k$  всегда больше единицы.

В системах передачи и распределения энергии в ряде случаев применяют трехобмоточные трансформаторы, а в устройствах радиоэлектроники и автоматики — многообмоточные трансформаторы. В таких трансформаторах на магнитопроводе размещают три или большее число

изолированных друг от друга обмоток, что дает возможность при питании одной из обмоток получать два или большее число различных напряжений ( $U_2, U_3, U_4$  и т.д.) для электроснабжения двух или большего числа групп потребителей. В трехобмоточных силовых трансформаторах различают обмотки высшего, низшего и среднего (СН) напряжений.

В трансформаторе преобразуются только напряжения и токи. Мощность же остается приблизительно постоянной (она несколько уменьшается из-за внутренних потерь энергии в трансформаторе). Следовательно,

При увеличении вторичного напряжения трансформатора в  $k$  раз по сравнению с первичным, ток  $i_2$  во вторичной обмотке соответственно уменьшается в  $k$  раз.

*Трансформатор может работать только в цепях переменного тока.* Если первичную обмотку трансформатора подключить к источнику постоянного тока, то в его магнито-проводе образуется магнитный поток, постоянный во времени по величине и направлению. Поэтому в первичной и вторичной обмотках в установившемся режиме не индуцируются ЭДС, а следовательно, не передается электрическая энергия из первичной цепи во вторичную. Такой режим опасен для трансформатора, так как из-за отсутствия ЭДС  $E_1$  первичной обмотке ток  $I_1 = U_1/R_1$  весьма большой.

Важным свойством трансформатора, используемым в устройствах автоматики и радиоэлектроники, является способность его преобразовывать нагрузочное сопротивление. Если к источнику переменного тока подключить сопротивление  $R$  через трансформатор с коэффициентом трансформации  $k$ , то для цепи источника

где  $P_1$  — мощность, потребляемая трансформатором от источника переменного тока, Вт;  
 $P_2 = I_2^2 R \approx P_1$  — мощность, потребляемая сопротивлением  $R$  от трансформатора.  
 Таким образом, *трансформатор изменяет значение сопротивления  $R$  в  $k^2$  раз.* Это свойство широко используют при разработке различных электрических схем для согласования сопротивлений нагрузки с внутренним сопротивлением источников электрической энергии.

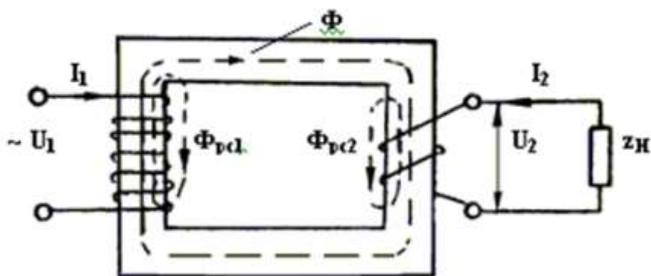


Рис. 4.2.1. Принципиальная схема трансформатора

Основной магнитный поток  $\Phi$ , действующий в магнито-проводе трансформатора, сцепляется

с витками обмоток и наводит в них ЭДС: 
$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Предположим, что магнитный поток  $\Phi$  является синусоидальной функцией, т.е. 
$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega \cdot t$$

Подставим это значение в выражения для ЭДС и, произведя дифференцирование, получим:

$$e_1 = -\omega \cdot W_1 \Phi_{\max} \cos \omega \cdot t = \omega \cdot W_1 \Phi_{\max} \sin(\omega \cdot t - \pi/2),$$

$$e_2 = -\omega \cdot W_2 \Phi_{\max} \cos \omega \cdot t = \omega \cdot W_2 \Phi_{\max} \sin(\omega \cdot t - \pi/2),$$

где  $\cos \omega \cdot t = -\sin(\omega \cdot t - \pi/2)$

Из последних формул видно, что ЭДС  $e_1$  и  $e_2$  отстают по фазе от потока  $\Phi$  на угол  $\pi/2$ . Максимальное значение ЭДС:

$$E_{1\max} = \omega \cdot W_1 \Phi_{\max},$$

$$E_{2\max} = \omega \cdot W_2 \Phi_{\max}$$

Переходя к действующим значениям, имеем

$$E_1 = \frac{E_{1\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} W_1 f \Phi_{\max} = 4,44 W_1 f \Phi_{\max}$$

$$E_2 = \frac{E_{2\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} W_2 f \Phi_{\max} = 4,44 W_2 f \Phi_{\max}$$

Если  $\Phi_{\max}$  выражено в максвеллах, а  $E$  в вольтах, то

$$E_1 = 4,44 W_1 f \Phi_{\max} 10^{-8},$$

$$E_2 = 4,44 W_2 f \Phi_{\max} 10^{-8}$$

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения называется *коэффициентом трансформации*.

$$k = \frac{E_1}{E_2}$$

Подставив вместо ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  их значения, получим:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 W_1 f \Phi_{\max}}{4,44 W_2 f \Phi_{\max}} = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$$

Вследствие перемагничивания стали в магнитопроводе трансформатора возникают потери энергии от *гистерезиса* и вихревых токов. Мощность этих потерь эквивалентна активной составляющей тока  $I_{10}$ . Следовательно, ток  $I_{10}$  наряду с реактивной составляющей  $I_{0r}$ , идущей на создание основного потока  $\Phi$ , имеет еще и активную составляющую  $I_{0a}$ . В итоге:

$$I_{10} = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}$$

На рис. 4.4.1 приведена векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода. Обычно ток  $I_{0a}$  не превышает 10% от тока  $I_{0r}$ , поэтому незначительно влияет на величину  $I_{10}$ . Обычно он равен (0,02 0,1)  $I_1$ , поэтому при нагрузке  $I_{10}$  принимаем равным нулю, и тогда:

$$I_1 = I_2 w_2 / w_1, \text{ откуда}$$

$$I_1 / I_2 = w_2 / w_1,$$

т. е. отношение токов обратно пропорционально числам витков обмоток.

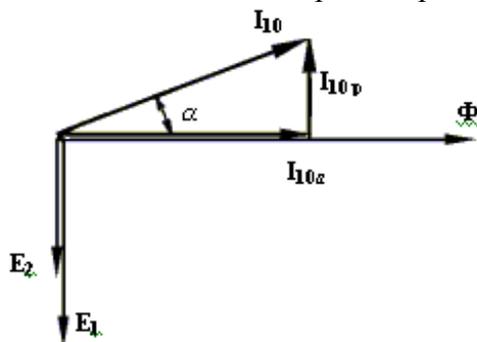


Рис. 4.4.1. Векторная диаграмма трансформатора

перепишем вместе уравнения ЭДС и токов трансформатора:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - j \underline{I}_2 x_2 - \underline{I}_2 r_2 \quad \underline{U}_1 = (-\underline{E}_1) + j \underline{I}_1 x_1 + \underline{I}_1 r_1 \quad \underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + (-\underline{I}_2)$$

Эти уравнения получили название основных уравнений, на которых базируется теория трансформатора и общая теория электрических машин переменного тока.

### Вопросы для самоконтроля

1. Назначение трансформаторов.
2. Классификация трансформаторов.
3. Область применения трансформаторов.
4. Принцип действия трансформатора.

## Тема 7. Работа трансформатора под нагрузкой и несимметричной нагрузкой.

Работа трансформатора под нагрузкой.

Если к первичной обмотке трансформатора подключить напряжение  $U_1$ , а вторичную обмотку соединить с нагрузкой, в обмотках появятся токи  $I_1$  и  $I_2$ . Эти токи создадут магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , направленные навстречу друг другу. Суммарный магнитный поток в магнитопроводе уменьшается. Вследствие этого индуцированные суммарным потоком ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  уменьшаются. Действующее значение напряжения  $U_1$  остается неизменным. Уменьшение  $E_1$  вызывает увеличение тока  $I_1$ . При увеличении тока  $I_1$  поток  $\Phi_1$  увеличивается ровно настолько, чтобы скомпенсировать размагничивающее действие потока  $\Phi_2$ .

Вновь восстанавливается равновесие при практически прежнем значении суммарного потока.

В нагруженном трансформаторе, кроме основного магнитного потока, имеются потоки рассеяния  $\Phi_{1s}$  и  $\Phi_{2s}$ , замыкающиеся частично по воздуху. Эти потоки индуцируют в первичной и вторичной обмотках ЭДС рассеяния.

$$\dot{E}_{1s} = -jX_{1s} \cdot \dot{I}_1, \quad (1)$$

$$\dot{E}_{2s} = -jX_{2s} \cdot \dot{I}_2, \quad (2)$$

где  $X_{2s}$  - индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки. Для первичной обмотки можно записать уравнение

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \cdot \dot{I}_1 + jX_{1s} \cdot \dot{I}_1, \quad (3)$$

Для вторичной обмотки

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 \cdot R_2 + jX_{2s} \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_2 \cdot Z_H, \quad (4)$$

где  $R_2$  - активное сопротивление вторичной обмотки;  
 $Z_H$  - сопротивление нагрузки.

Основной магнитный поток трансформатора есть результат совместного действия магнитодвижущих сил первичной и вторичной обмоток.

$$\Phi_m = f(\dot{I}_1 \cdot W_1 + \dot{I}_2 \cdot W_2).$$

Трансформаторная ЭДС  $E_1$ , пропорциональная основному магнитному потоку, приблизительно равна напряжению на первичной катушке  $U_1$ . Действующее значение напряжения постоянно. Поэтому основной магнитный поток трансформатора остается неизменным при изменении сопротивления нагрузки от нуля до бесконечности.

Если  $\Phi_m = const$ , то и сумма магнитодвижущих сил трансформатора

$$\dot{I}_1 \cdot W_1 + \dot{I}_2 \cdot W_2 = const = \dot{I}_{1X} \cdot W_1, \quad (5)$$

Уравнение (5) называется уравнением равновесия магнитодвижущих сил.

Уравнения (3), (4), (5) называются основными уравнениями трансформатора.

Из уравнения (5) получим формулу

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1X} - \dot{I}_2 \cdot \frac{W_2}{W_1} = \dot{I}_{1X} - \dot{I}_2 \cdot \frac{1}{K_T}. \quad (6)$$

Согласно формуле (6), ток в первичной обмотке складывается из тока холостого хода, или намагничивающего тока, и тока, компенсирующего размагничивающее действие вторичной обмотки.

Умножим левую и правую части уравнения (4) на коэффициент трансформации  $K_T$

$$\dot{E}_2 \cdot K_T = \dot{E}_1 = K_T \cdot \dot{I}_2 \cdot R_2 + j \cdot K_T \cdot X_{2s} \cdot \dot{I}_2 + K_T \cdot \dot{I}_2 \cdot Z_H =$$

$$= K_T^2 \cdot R_2 \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} + j K_T^2 \cdot X_{2s} \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} + K_T^2 \cdot Z_H \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} =$$

$$= R'_2 \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} + j X'_{2s} \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} + Z'_H \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T},$$

(7)

где  $R'_2 = K_T^2 \cdot R_2$  - приведенное активное сопротивление вторичной обмотки;

$X'_{2s} = K_T^2 \cdot X_{2s}$  - приведенное индуктивное сопротивление вторичной обмотки;

$$U'_2 = K_T \cdot I_2 \cdot Z_H = K_T \cdot \dot{U}_2 - \text{приведенное напряжение на нагрузке};$$

$$Z'_H = K_T^2 \cdot Z_H - \text{приведенное сопротивление нагрузки.}$$

Величиной намагничивающего тока можно пренебречь, так как она мала по сравнению с током

$$I_1 = -\frac{1}{K_T} \cdot I_2$$

первичной обмотки трансформатора в нагрузочном режиме  $I_{LX} \approx 0$ , тогда  
Подставим уравнение (7) в уравнение (3).

Получим

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\frac{I_2}{K_T} \cdot R'_2 - j \frac{I_2}{K_T} \cdot X'_{2s} - \frac{I_2}{K_T} \cdot Z'_H + I_1 \cdot R_1 + jX_{1s} \cdot I_1 = \\ &= I_1 \cdot R'_2 + jI_1 \cdot X'_{2s} + \dot{U}'_2 + I_1 \cdot R_1 + jX_{1s} \cdot I_1 = \\ &= I_1(R_1 + R'_2) + I_1 j(X_{1s} + X'_{2s}) + \dot{U}'_2. \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнению (8) соответствует упрощенная схема замещения трансформатора, изображенная на рис. 1.

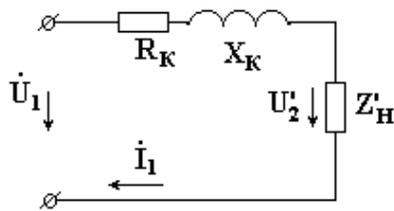


Рис. 1

$$R_k = R_1 + R'_2 = R_1 + R_2 \cdot K_T^2 - \text{активное сопротивление короткого замыкания трансформатора,}$$

$$X_k = X_{1s} + X'_{2s} = X_{1s} + X_{2s} \cdot K_T^2 - \text{индуктивное сопротивление короткого замыкания.}$$

Параметры упрощенной схемы замещения определяются из опыта короткого замыкания.

Для этого собирается схема рис. 2.

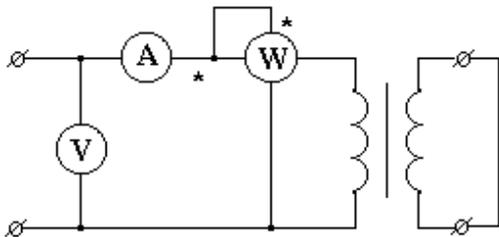


Рис. 2

Зажимы вторичной обмотки замыкаются накоротко. Измеряют напряжение, ток и мощность:  $U_{1k}, I_{1k}, P_k$ .

Опыт короткого замыкания осуществляется при пониженном напряжении на первичной обмотке.

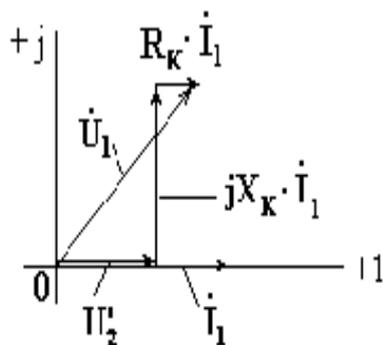


Рис.3

Затем вычисляют

$$R_K = \frac{P_K}{I_{1K}^2}, \quad Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}}, \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2},$$

где  $Z_K$  - полное сопротивление короткого замыкания.

На рис. 3 изображена векторная диаграмма трансформатора, соответствующая упрощенной схеме замещения. Нагрузкой трансформатора является активное сопротивление  $R_N$ .

Вектор тока  $\dot{I}_1$  совмещен с вещественной осью комплексной плоскости. Вектор напряжения на сопротивлении нагрузки совпадает с вектором тока по направлению. Вектор напряжения на индуктивном сопротивлении  $jX_K \dot{I}_1$  перпендикулярен, а вектор напряжения  $R_K \dot{I}_1$  параллелен вектору тока. Вектор напряжения на входе трансформатора равен сумме трех векторов напряжения.

Упрощенная схема используется для расчета цепей, содержащих трансформаторы.

#### *Несимметричная нагрузка трансформаторов*

В качестве причин несимметричной нагрузки могут быть названы: неравномерное распределение однофазных приемников нагрузки; аварийные режимы, возникающие при 1-фазных, 2-фазных коротких замыканиях или при обрыве одной из фаз ЛЭП.

Несимметрия вторичных напряжений трансформатора неблагоприятно отражается как на потребителях, так и на самом трансформаторе. Например, у двигателей переменного тока снижается допустимая мощность нагрузки, у ламп накаливания при повышенном напряжении резко уменьшается срок службы, а при пониженном напряжении уменьшается сила света. У трансформатора происходит перегрузка отдельных его фаз, чрезмерное повышение фазных напряжений и насыщение магнитопровода.

При рассмотрении трехфазного понижающего трансформатора несимметричная система токов обмотки НН может быть представлена в виде суммы трех симметричных систем прямой, обратной и нулевой последовательностей, отличающихся друг от друга последовательностью прохождения токов через максимум

$$\left. \begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\ I_b &= I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \\ I_c &= I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \end{aligned} \right\}$$

Токи, образующие систему прямой последовательности, достигают максимумов последовательно в фазах а, б, с. Токи, образующие систему обратной последовательности, достигают максимумов последовательно в фазах а, с, б. Токи нулевой последовательности во всех трех фазах имеют одно направление (нулевой сдвиг).

После введения в уравнения коэффициентов, они будут записаны в следующем виде

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_0 \\ \dot{I}_b &= a^2 \dot{I}_{a1} + a \dot{I}_{a2} + \dot{I}_0 \\ \dot{I}_c &= a \dot{I}_{a1} + a^2 \dot{I}_{a2} + \dot{I}_0 \end{aligned} \right\}$$

Умножение любого вектора на коэффициент  $a$  не изменяет его абсолютного значения, но изменяет его аргумент на  $\pi/3$ , т.е. поворачивает вектор на  $\pi/3$  в сторону вращения векторов.

Из токи прямой, обратной и нулевой последовательностей могут быть получены через несимметричные

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a \dot{I}_b + a^2 \dot{I}_c) \\ \dot{I}_{a2} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2 \dot{I}_b + a \dot{I}_c) \\ \dot{I}_{оп} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \end{aligned} \right\}$$

На основании последнего равенства следует, что при наличии токов нулевой последовательности сумма токов трех фаз не равна нулю.

Преимущество метода симметричных составляющих состоит в том, что с симметричной системой каждой последовательности можно оперировать независимо от систем других последовательностей обычными методами математического и графического анализа. Однако метод симметричных составляющих предполагает использование принципа наложения, справедливого только для линейных систем. Поэтому применительно к трансформатору необходимо сделать допущение, приняв отсутствие насыщения электротехнической стали магнитопровода или пренебречь током холостого хода.

Кроме того, несимметрично нагруженный трансформатор рассматривается с равными числами витков первичной и вторичной обмоток, что позволяет не использовать процедуру приведения.

$$\vec{I}_a, \vec{I}_b = a^2, I_c = a \vec{I}_a$$

Для случая симметричной нагрузки, когда токи фаз трансформатора составляют симметричную систему.

Подставив эти значения, получим

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^3 \dot{I}_a + a^3 \dot{I}_a) = \dot{I}_a;$$

$$\dot{I}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^4 \dot{I}_a + a^2 \dot{I}_a) = 0;$$

$$\dot{I}_{0П} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + a^2 \dot{I}_a + a \dot{I}_a) = 0, \text{ т.к. } a^3 = 1; 1 + a + a^2 = 0.$$

Таким образом, в случае симметричной нагрузки существуют токи только прямой последовательности. Поэтому все рассмотренное ранее для симметричной нагрузки соответствует работе трансформатора с токами прямой последовательности.

А что произойдет, если у трансформатора, работающего с симметричной нагрузкой, поменять местами две клеммы обмотки высшего напряжения (например, В и С) и низшего напряжения. Чередование векторов токов фаз трансформатора изменится на обратное, т.е. будет соответствовать чередованию токов обратной последовательности. Режим работы самого трансформатора и потребителей при этом не изменится.

Таким образом, токи обратной последовательности трансформируются из одной обмотки в другую так же, как и токи прямой последовательности. Поведение трансформатора по отношению к токам прямой и обратной последовательности одинаково. Ранее рассмотренные схемы замещения действительны как для токов прямой, так и для токов обратной последовательностей, сопротивление трансформатора по отношению к токам этих последовательностей так же одинаково и равно сопротивлению короткого замыкания  $Z_k$ .

Токи нулевой последовательности в обмотках, соединенных по схеме “звезда”, могут возникать только при наличии нулевого провода. А в обмотках, соединенных по схеме “треугольник”, токи нулевой последовательности составляют ток, циркулирующий по замкнутому контуру, и линейные токи, как разности токов смежных фаз, не содержат токов нулевой последовательности. Поэтому токи нулевой последовательности в обмотке, соединенной по схеме “треугольник”, могут возникать только в результате индуктирования их другой обмоткой трансформатора.

Потоки нулевой последовательности создаются токами нулевой последовательности и поэтому во времени совпадают по фазе. Рассмотрим, как будет сказываться наличие потоков нулевой последовательности на трансформаторах с различными типами магнитопроводов.

$$\vec{I}_{a0} = \vec{I}_{b0} = \vec{I}_{c0}$$

В трехфазных трансформаторах с броневыми, бронестержневыми магнитопроводами и в групповом трансформаторе потоки нулевой последовательности ФОП замыкаются по магнитопроводам. Магнитное сопротивление для потоков ФОП мало и поэтому уже небольшие токи нулевой последовательности способны создавать большие потоки ФОП. Если ток равен току

холостого хода трансформатора, то создается поток ФОП, равный номинальному рабочему потоку трансформатора. Подобное относится и к ЭДС, наведенной потоком ФОП.

В трехфазном трансформаторе со стержневым магнитопроводом потоки нулевой последовательности всех фаз вынуждены замыкаться от одного ярма к другому (например, в трансформаторе с масляным охлаждением) через масло и бак трансформатора. В этом случае магнитное сопротивление для потока ФОП относительно велико, а в стенках бака индуктируются вихревые токи и возникают потери. Поэтому поток ФОП и наводимая им ЭДС малы.

Физические условия работы трансформаторов при несимметричной нагрузке

Случай 1. Токи нулевой последовательности отсутствуют. При несимметричной нагрузке падения напряжения в фазах трансформатора различны. Если токи отдельных фаз не превышают номинальных значений, то относительно малы, вследствие малости сопротивления  $Z_k$  трансформатора.

Таким образом, несимметричная нагрузка трансформатора при отсутствии токов нулевой последовательности не вызывает значительного искажения симметрии фазных и линейных напряжений на клеммах вторичной обмотки.

Для рассматриваемого случая первичные и вторичные токи прямой последовательности в каждой фазе равны по величине и обратны по знаку. Это же справедливо и для токов обратной последовательности, а значит и для суммы токов прямой и обратной последовательностей. Поэтому принятые ранее упрощения (пренебрежение намагничивающим током) позволяют сделать следующую запись:

В результате можно сказать, что намагничивающие силы и токи первичных и вторичных обмоток уравниваются в каждой фазе и на каждом участке магнитопровода по отдельности.

Случай 2. Имеются токи нулевой последовательности. Вариант а: токи нулевой последовательности возникают в обеих обмотках трансформатора. Это трансформаторы с соединением обмоток. Намагничивающим током нулевой последовательности можно пренебречь, потому что он составляет небольшую долю полного тока нулевой последовательности.

Таким образом, намагничивающие силы токов нулевой последовательности обеих обмоток взаимно уравниваются в каждой фазе трансформатора. Нулевые составляющие вторичного напряжения возникают только за счет относительно небольших падений напряжения. Поэтому в трансформаторах с соединением обмоток при несимметричной нагрузке система фазных напряжений искажается относительно слабо.

Например, в трансформаторах с броневыми, бронестержневыми магнитопроводами и в групповом трансформаторе сопротивление намагничивающей цепи для токов нулевой последовательности равно сопротивлению намагничивающей цепи для токов прямой последовательности. Поэтому уже при ЭДС нулевой последовательности ЕОП, и система фазных ЭДС и напряжений сильно искажается, что неприемлемо и опасно для однофазных потребителей. Направление вектора зависит от фазы токов нулевой последовательности и определяется условиями нагрузки.

На величину линейных напряжений не влияют ЭДС нулевой последовательности, так как в разностях фазных напряжений нулевые составляющие исчезают.

Соединение обмоток в трансформаторах с броневыми, бронестержневыми магнитопроводами и в групповых трансформаторах обычно не применяются, но если все же в таком соединении имеется необходимость, то на каждой фазе выполняется еще третья обмотка, соединяемая по схеме “треугольник”. Клеммы этой обмотки наружу не выводятся, если эта обмотка предназначена только для уравнивания токов нулевой последовательности.

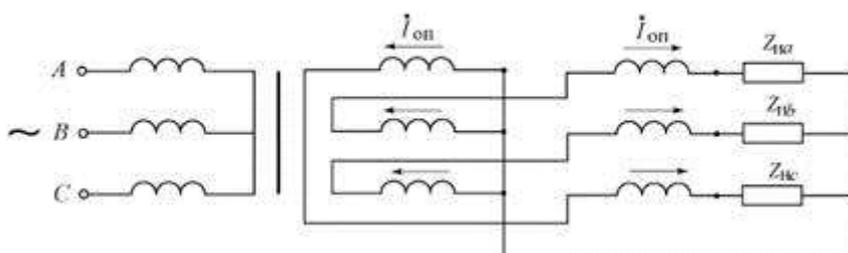


Рис. 4

При несимметричной нагрузке токи нулевой последовательности протекают по обеим частям вторичной обмотки, соединенной по схеме “зигзаг”, в противоположных направлениях. При одинаковом числе витков в каждой части вторичной обмотки сумме намагничивающих сил от токов нулевой последовательности в каждой фазе равна нулю. Токи нулевой последовательности создают только поля рассеяния. На каждом стержне магнитопровода имеет место магнитное равновесие и смещение нейтрали фазных напряжений будет незначительным.

### Вопросы для самоконтроля

1. Основные уравнения трансформатора
2. Коэффициент трансформации
3. Работа трансформатора под нагрузкой
4. Работа трансформатора в несимметричном режиме.

### Тема 8. Автотрансформаторы и трехобмоточные трансформаторы.

В трехобмоточном трансформаторе на каждую трансформируемую фазу приходится три обмотки. За номинальную мощность такого трансформатора принимают номинальную мощность наиболее нагружаемой его обмотки. Токи, напряжения и сопротивления других обмоток приводят к числу витков этой, наиболее мощной обмотки. Принцип работы трехобмоточного трансформатора по существу не отличается от принципа работы обычного двухобмоточного трансформатора.

Существуют трехобмоточные трансформаторы с одной первичной и двумя вторичными обмотками и трансформаторы с двумя первичными и одной вторичной обмотками. Рассмотрим основные уравнения, особенности работы и область применения трехобмоточного трансформатора с одной первичной обмоткой, имеющего наибольшее распространение (рис. 8.1, а). Первичная (наиболее мощная) обмотка этого трансформатора является намагничивающей и создает в магнитопроводе магнитный поток, который сцепляется с двумя вторичными обмотками и наводит в них ЭДС  $\dot{E}_2$  и  $\dot{E}_3$ . Аналогично двухобмоточному трансформатору запишем для трехобмоточного трансформатора уравнение МДС:

$$\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 + \dot{I}_3 w_3 = \dot{I}_0 w_1 \quad (8.1)$$

Разделив (8.1) на  $w_1$ , получим уравнения токов:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 = \dot{I}_0 \quad (8.2)$$

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 / k_{12}; \dot{I}'_3 = \dot{I}_3 / k_{13} \quad (8.3)$$

Здесь  $k_2 = w_1/w_2$  — коэффициент трансформации между обмотками  $w_1$  и  $w_2$ ;

$k_{13} = w_1/w_3$  — коэффициент трансформации между обмотками  $w_1$  и  $w_3$ . Пренебрегая током х.х.  $\dot{I}_0$ , получим упрощенное уравнение токов трехобмоточного трансформатора:

$$\dot{I}_1 \approx -(\dot{I}'_2 + \dot{I}'_3) \quad (8.4)$$

Экономическую целесообразность применения трехобмоточных трансформаторов можно объяснить тем, что, как это следует из (8.4), первичный ток трехобмоточного трансформатора равен не арифметической, а геометрической сумме приведенных вторичных токов. Учитывая это равенство, а также и то, что нагрузка на вторичные обмотки достигает номинального значения не одновременно, первичную обмотку трехобмоточного трансформатора рассчитывают на мощность, меньшую арифметической суммы номинальных мощностей обеих вторичных обмоток. Еще одно достоинство трехобмоточного трансформатора состоит в том, что он фактически заменяет два двухобмоточных.

Обмотки трехобмоточного трансформатора располагают на стержне обычно концентрически (рис. 8.1, б), при этом целесообразнее двустороннее расположение вторичных обмоток относительно первичной, тогда первичной является обмотка 2, а вторичными — обмотки 1 и 3. В этом случае взаимное влияние вторичных обмоток заметно ослабевает.

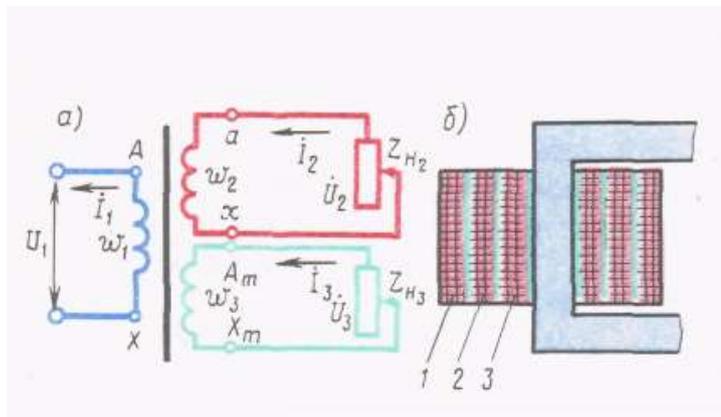


Рис. 8.1. Трехобмоточный трансформатор с одной первичной и двумя вторичными обмотками

На крупных электростанциях иногда применяют трехобмоточные трансформаторы с двумя первичными обмотками (к каждой из них подключается генератор) и одной вторичной (от нее отходит линия электропередачи). Обычно это установки большой мощности, а поэтому в них применяют однофазные трехобмоточные трансформаторы, соединенные в трансформаторную группу.

### Автотрансформаторы

Автотрансформатор — это такой вид трансформатора, в котором помимо магнитной связи между обмотками имеется еще и электрическая связь. Обмотки обычного трансформатора можно включить по схеме автотрансформатора, для чего выход  $X$  обмотки  $w_{AX}$  соединяют с выводом  $a$  обмотки  $w_{ax}$  (рис.8.2). Если выводы  $AX$  подключить к сети, а к выводам  $ax$  подключить нагрузку  $Z_H$ , то получим понижающий автотрансформатор. Если же выводы  $ax$  подключить к сети, а к выводам  $Ax$  подключить нагрузку  $Z_H$  то получим повышающий автотрансформатор. Рассмотрим подробнее работу понижающего автотрансформатора. Обмотка  $w_{ax}$  одновременно является частью первичной обмотки и вторичной обмоткой. В этой обмотке проходит ток  $I_{12}$ . Для точки  $a$  запишем уравнение токов:

$$I_2 = I_1 + I_{12} \quad (8.5)$$

или

$$I_{12} = I_2 - I_1 \quad (8.6)$$

т. е. по виткам  $w_{ax}$  проходит ток  $I_{12}$ , равный разности вторичного  $I_2$  и первичного  $I_1$  токов. Если коэффициент трансформации автотрансформатора  $k_a = w_{Ax}/w_{ax}$  немногим больше единицы, то токи  $I_1$  и  $I_2$  мало отличаются друг от друга, а их разность составляет небольшую величину. Это позволяет выполнить витки  $w_{ax}$  проводом уменьшенного сечения.

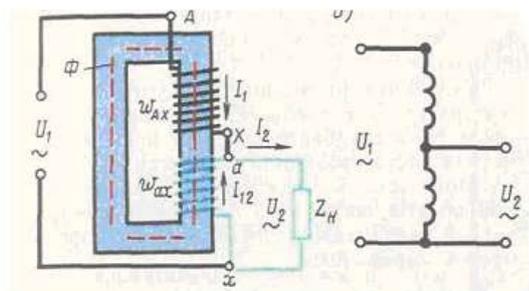


Рис.8.2. Электромагнитная (а) и принципиальная (б) схемы однофазного понижающего автотрансформатора.

Введем понятие *проходной мощности* автотрансформатора, представляющей собой всю передаваемую мощность  $S_{пр} = U_2 I_2$  из первичной цепи во вторичную. Кроме того, различают еще *расчетную мощность*  $S_{расч}$ , представляющую собой мощность, передаваемую из первичной во вторичную цепь магнитным полем. Расчетной эту мощность называют потому, что размеры и вес трансформатора зависят от величины этой мощности. В трансформаторе вся проходная мощность является расчетной, так как между обмотками трансформатора существует лишь магнитная связь. В автотрансформаторе между первичной и вторичной цепями помимо магнитной связи существует еще и электрическая. Поэтому расчетная мощность составляет лишь часть проходной мощности, другая ее часть передается между цепями без участия магнитного поля. В подтверждение этого разложим проходную мощность автотрансформатора  $S_{пр} = I_2 U_2$  на составляющие. Воспользуемся для этого выражением (8.5). Подставив это выражение в формулу проходной мощности, получим

$$S_{пр} = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_{э} + S_{расч} \quad (8.7)$$

Здесь  $S_{э} = U_2 I_1$  — мощность, передаваемая из первичной цепи автотрансформатора во вторичную благодаря электрической связи между этими цепями. Таким образом, расчетная мощность в автотрансформаторе  $S_{расч} = U_2 I_{12}$  составляет лишь часть проходной. Это дает возможность для изготовления автотрансформатора использовать магнитопровод меньшего сечения, чем в трансформаторе равной мощности. Средняя длина витка обмотки также становится меньше; следовательно, уменьшается расход меди на выполнение обмотки I автотрансформатора. Одновременно уменьшаются магнитные и I электрические потери, а КПД автотрансформатора повышается. V Таким образом автотрансформатор по сравнению с трансформатором равной мощности обладает следующими преимуществами: меньшим расходом активных материалов (медь и электротехническая сталь), более высоким КПД, меньшими размерами и стоимостью. У автотрансформаторов большой мощности КПД достигает 99,7%. Указанные преимущества автотрансформатора тем значительнее, чем больше мощность  $S_{э}$ , а следовательно, чем меньше расчетная часть проходной мощности.

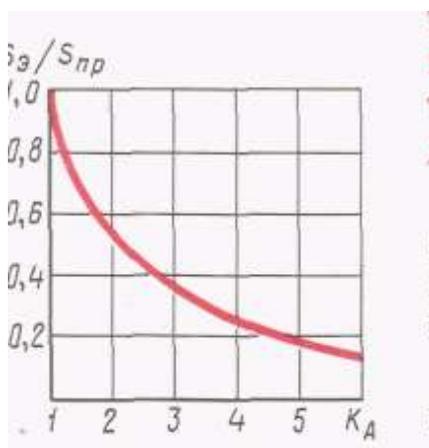


Рис.8.3. Зависимость  $S_{э}/S_{пр}$  от коэффициента трансформации автотрансформатора

Мощность  $S_{э}$ , передаваемая из первичной во вторичную цепь благодаря электрической связи между этими цепями, определяется выражением

$$S_{э} = U_2 I_1 = U_2 I_2 / k_A = S_{пр} / k_A \quad (8.8)$$

т. е. значение мощности  $S_{э}$  обратно пропорционально коэффициенту трансформации автотрансформатора  $k_A$

Из графика (рис.8.3) видно, что применение автотрансформатора дает заметные преимущества по

сравнению с двухобмоточным трансформатором лишь при небольших значениях коэффициента трансформации.

Например, при  $k_A=1$  вся мощность автотрансформатора передается во вторичную цепь за счет электрической связи между цепями ( $S_2/S_{пр}=1$ ). Наиболее целесообразно применение автотрансформаторов с коэффициентом трансформации  $k_A \leq 2$ .

При большом значении коэффициента трансформации преобладающее значение имеют недостатки автотрансформатора, состоящие в следующем:

1. Большие токи к.з. в случаях понижающего автотрансформатора: при замыкании точек  $a$  и  $x$  напряжение  $U_1$  подводится лишь к небольшой части витков  $Aa$ , которые обладают очень малым сопротивлением к. з. В этом случае автотрансформаторы не могут защитить сами себя от разрушающего действия токов к. з., поэтому токи к. з. должны ограничиваться сопротивлением других элементов электрической установки, включаемых в цепь автотрансформатора.

2. Электрическая связь стороны ВН со стороной НН; это требует усиленной электрической изоляции всей обмотки.

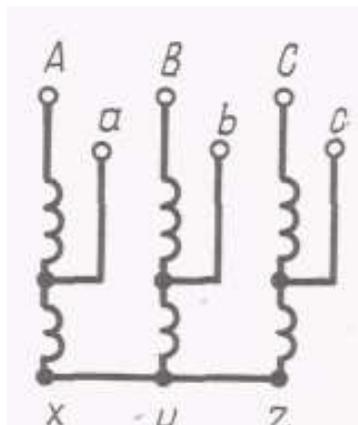


Рис.8.4.Трехфазный автотрансформатор

3. При использовании автотрансформаторов в схемах понижения напряжения между проводами сети НН и землей возникает напряжение, приблизительно равное напряжению между проводом и землей на стороне ВН.

4. В целях обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала нельзя применять автотрансформаторы для понижения напряжения сетей ВН до значений НН, подводимого непосредственно к потребителям.

Силовые автотрансформаторы широко применяют в линиях передачи и распределения электроэнергии для связи сетей смежных напряжений, например 110 и 220, 220 и 500 кВ и др. Такие автотрансформаторы обычно выполняют на большие мощности (до 500 МВ·А и выше).

Обмотки трехфазных автотрансформаторов обычно соединяют в звезду (рис. 13.3). Автотрансформаторы применяют в электроприводе переменного тока для уменьшения пусковых токов двигателей значительной мощности, а также для регулировки режимов работы электрометаллургических печей.

Автотрансформаторы малой мощности применяют в устройствах радио, связи и автоматики. Широко распространены автотрансформаторы с переменным коэффициентом трансформации.

В этом случае автотрансформатор снабжают устройством, позволяющим регулировать значение вторичного напряжения путем изменения числа витков  $w_{ax}$ .

Осуществляется это либо переключателем, либо с помощью скользящего контакта (щетки), перемещаемого непосредственно по зачищенным от изоляции виткам обмотки. Такие автотрансформаторы, называемые регуляторами напряжения, могут быть однофазными и трехфазными.

### Вопросы для самоконтроля

1. Каковы достоинства трехобмоточных трансформаторов.
2. Перечислите достоинства и недостатки автотрансформаторов.
3. Зависят ли достоинства автотрансформатора от коэффициента трансформации?
4. Объясните устройство автотрансформатора с переменным коэффициентом трансформации.
5. Мощности автотрансформатора.
6. Коэффициент трансформации автотрансформатора.

### Тема 9. Трансформаторы специального назначения.

#### Трехобмоточный трансформатор

В трехобмоточном трансформаторе имеются три электрически несвязанные друг с другом обмотки, из которых одна является первичной, а две другие - вторичными (рис. 4.12.1).

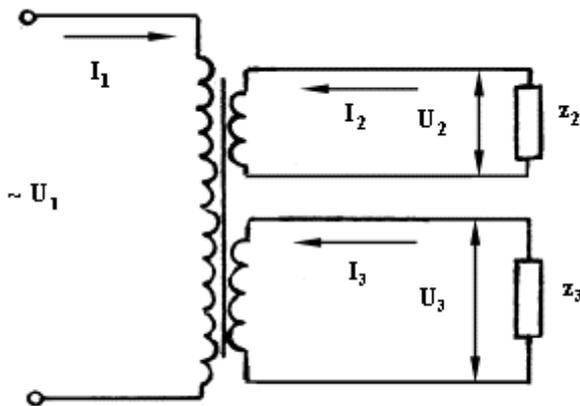


Рис. 4.12.1. Трех обмоточный трансформатор

Первичная обмотка трансформатора является намагничивающей и создает в магнитопроводе магнитный поток, который пронизывает две вторичные обмотки и наводит в них ЭДС  $E_2$  и  $E_3$ . Пренебрегая током холостого хода, можно записать уравнение токов трех обмоточного трансформатора

$$I_1 = -(I_2' + I_3'),$$

т.е. первичный ток равен геометрической сумме приведенных вторичных токов. Целесообразность применения трехобмоточных трансформаторов объясняется еще и тем, что один трехобмоточный трансформатор фактически заменяет два двухобмоточных. За номинальную мощность принимается мощность первичной обмотки. По такому же принципу устроены многообмоточные трансформаторы малой мощности, применяемые в радиоустройствах, связи и в автоматике.

#### Автотрансформатор

В автотрансформаторе (рис. 4.12.2) часть витков в обмотке В.Н. используется в качестве обмотки Н.Н., т.е. в автотрансформаторе имеется всего лишь одна обмотка, часть которой (а X) принадлежит одновременно сторонам В.Н. и Н.Н.

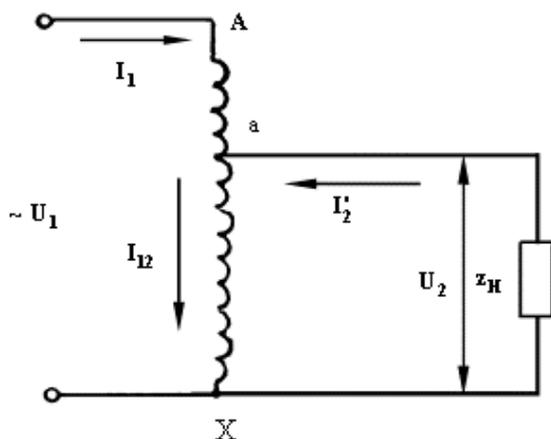


Рис. 4.12.2. Автотрансформатор

На участке аХ протекает ток  $i_{12} = i_2 - i_1$ , или переходя к действующим значениям, учитывая, что  $I_1$  и  $I_2$  находятся в противофазе, можно записать

$$I_{12} = I_2 - I_1$$

Таким образом, величина тока в общей части обмоток равна разности токов  $I_1$  и  $I_2$ . Если коэффициент трансформации близок к единице, то  $I_1$  и  $I_2$  мало отличаются друг от друга, разность между ними будет также небольшой. Это позволит выполнять часть обмотки аХ проводом меньшего поперечного сечения. Мощность, передаваемая первичной обмоткой во вторичную цепь автотрансформатора, будет равна:

$$S = I_2 U_2$$

Учитывая, что  $I_2 = I_1 + I_{12}$ , ее можно записать в виде:

$$S = U_2 (I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_{\text{Э}} + S_{\text{М}}$$

Здесь  $U_2 I_1 = S_{\text{Э}}$ , есть мощность, поступающая во вторичную цепь электрическим путем,  $U_2 I_{12} = S_{\text{М}}$  - мощность, поступающая во вторичную цепь посредством магнитного потока. Следовательно, в автотрансформаторе посредством магнитного потока передается только часть мощности, что дает возможность уменьшить поперечное сечение магнитопровода. Магнитные потери при этом также уменьшаются. При меньшем поперечном сечении магнитопровода уменьшается средняя длина витка обмотки, следовательно, вновь уменьшается расход обмоточной меди и снижаются электрические потери. Таким образом, автотрансформатор имеет преимущества перед трансформаторами, заключающиеся в меньшем весе, меньших размерах более высоком К.П.Д., меньшей стоимости и. т.д.

Однако эти достоинства имеют значение лишь при коэффициенте трансформации  $k \leq 2$ . При большем коэффициенте трансформации имеют место следующие недостатки. Это: большие токи короткого замыкания в случае понижающего автотрансформатора (при замыкании точек а и Х напряжение  $u_1$  окажется на небольшой части витков автотрансформатора, обладающих малым сопротивлением короткого замыкания); электрическая связь стороны В.Н. со стороной Н.Н.; требующая усиления изоляции между обмотками и корпусом и возникающая опасность попадания В.Н. на сторону Н.Н. Автотрансформаторы могут быть повышенными и пониженными, однофазными и трехфазными. Автотрансформаторы применяются в высоковольтных линиях электропередач для пуска асинхронных и синхронных двигателей в лабораторной практике и при испытаниях. Регулировка напряжения осуществляется как переключателями, изменяющими вводимое число витков во вторичной цепи, так и посредством скользящего контакта, перемещающегося непосредственно по виткам обмотки.

### Трансформатор для дуговой сварки

Сварочный трансформатор представляет собой однофазный трансформатор, понижающий напряжение сети до 60-65 В (рис. 4.12.3.1, а). В рабочем режиме трансформатор находится близко к короткому замыканию. Чтобы величина тока не возросла сверх допустимого значения, последовательно к нему включается реактивная катушка РК с раздвижным сердечником, в результате чего характеристика трансформатора становится круто падающей (рис. 4.12.3.1, б).

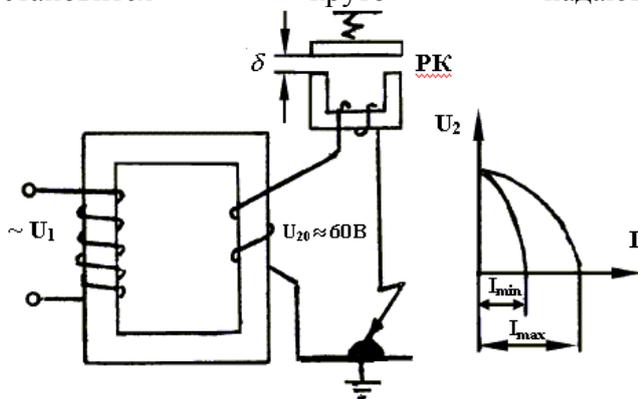


Рис. 4.12.3.1. Сварочный трансформатор

Изменяя зазор  $d$ , можно плавно менять сварочный ток. Максимальное значение тока будет при  $d_{\max}$ . Для безопасного обслуживания вторичная обмотка сварочного трансформатора заземляется.

### Измерительные трансформаторы тока и напряжения

Эти трансформаторы применяются совместно с измерительными приборами для расширения их пределов измерения (рис. 4.12.4.1). Измерительный трансформатор напряжения представляет собой понижающий трансформатор с таким отношением витков  $w_1/w_2$ , чтобы при  $U_1 = U_{\text{сети}}$ ;  $U_2 = 100$  В. Во вторичную цепь включаются вольтметры, частотомеры, обмотки напряжения ваттметров, счетчиков и фазометров. Так как электрическое сопротивление этих приборов велико (порядка 1000 Ом), то трансформаторы напряжения работают в режиме, близком к холостому ходу. Такой режим связан с большими магнитными потерями, а это, в свою очередь, приводит к увеличению размеров магнитопровода и устройству специального масляного охлаждения.

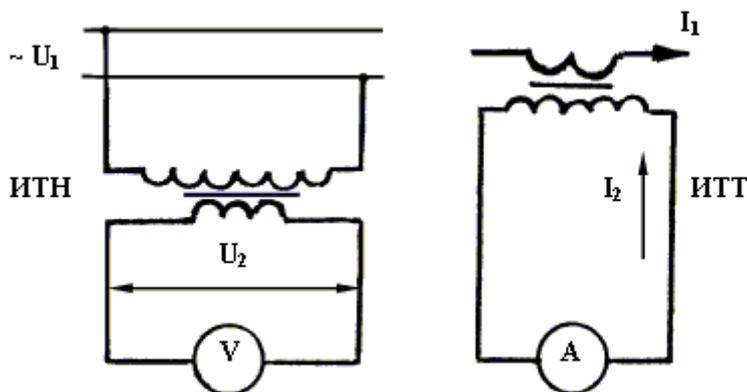


Рис. 4.12.4.1. Измерительные трансформаторы напряжения и тока.

Измерительные трансформаторы тока (рис. 4.12.4.1) применяются для включения в сеть амперметров, обмоток тока ваттметров, счетчиков и фазометров. Первичная обмотка трансформатора тока выполняется из провода большого поперечного сечения и включается в цепь последовательно.

Вторичная обмотка выполняется всегда на ток  $I_2 = 5\text{А}$ . Рабочий режим трансформатора тока близок к короткому замыканию, поэтому размеры магнитопровода у него значительно меньше, чем у трансформатора напряжения. Для определения напряжения или тока в цепи необходимо показания приборов умножить на коэффициент трансформации измерительных трансформаторов. В целях безопасности нельзя оставлять вторичную обмотку трансформатора тока разомкнутой, если первичная включена в сеть. В этом режиме напряжение  $U_2$  возрастает до нескольких тысяч вольт.

Разновидностью измерительного трансформатора тока являются токоизмерительные клещи с разъемным магнитопроводом, где роль первичной обмотки выполняет сам провод, по которому течет измеряемый ток.

#### Трансформатор для преобразования числа фаз

Для питания различных выпрямителей или для электродвигателей возникает необходимость в увеличении числа фазных обмоток трансформатора. Так, трехфазная система сети с помощью специального трансформатора может быть преобразована в шестифазную или двенадцатифазную. На рис. 4.12.5.1, а приведена схема шестифазного преобразователя.

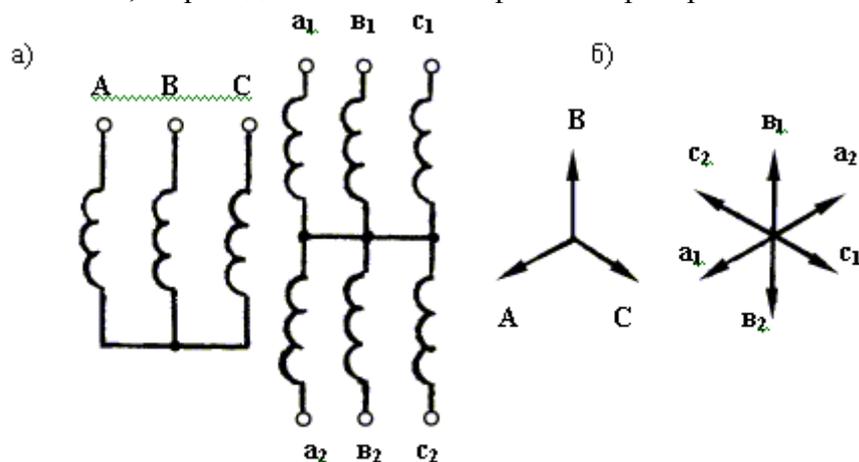


Рис. 4.12.5.1. Преобразователь числа фаз

Первичная обмотка такого преобразователя соединена "звездой", а вторичная - "двойной звездой". Векторная диаграмма вторичной обмотки преобразователя представляет собой шестизвездную звезду (рис. 4.12.5.1, б).

#### Стабилизатор напряжения

Для стабилизации напряжения в устройствах небольшой мощности (до 5 кВт) применяются электромагнитные стабилизаторы:

1) ферромагнитные насыщенного типа (без емкости), в которых используются явления, основанные на насыщении ферромагнитного сердечника;  
 2) феррорезонансные (с емкостью), работа которых основана на резонансе токов и напряжений. Рассмотрим работу феррорезонансного стабилизатора. Он состоит из реактивной катушки 1, сердечник которой при заданном диапазоне напряжений  $U_1$  работает в состоянии магнитного насыщения, конденсатора С и автотрансформатора 2 магнитопровод которого не насыщен (рис. 4.12.6.1).

Обмотка автотрансформатора включена таким образом, чтобы напряжение на выходе стабилизатора  $U_2$  было равно разности

$$U_2 = U_2' - U_2'',$$

где  $U_2''$  - напряжение на выходе автотрансформатора;  
 $U_2'$  - напряжение на выходах реактивной катушки.

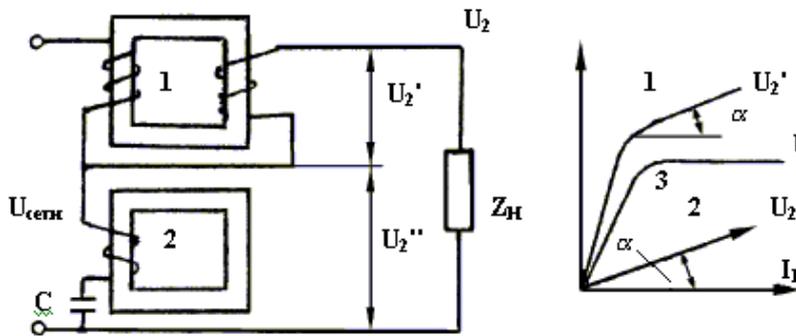


Рис. 4.12.6.1. Стабилизатор напряжения

Напряжение  $U_2'$  благодаря явлению феррорезонанса имеет резко нелинейную зависимость от тока  $I_1$  (кривая 1). Напряжение на выходе автотрансформатора  $U_2''$  в виду насыщенного состояния его магнитопровода пропорционально току  $I_1$  (кривая 2). Если параметры автотрансформатора и реактивной катушки подобраны таким образом, что наклон кривой 1 к оси абсцисс в области магнитного насыщения равен наклону кривой 2, то разность  $U_2' - U_2'' = \text{const}$ . В этом случае напряжение на выходе не зависит от тока  $I_1$  (кривая 3) и, следовательно, от напряжения  $U_1$ .

### Магнитный усилитель

*Магнитный усилитель* - это статический аппарат, применяемый в схемах автоматического регулирования.

Работа магнитного усилителя основана на нелинейности характеристики намагничивания магнитопровода (рис. 4.12.7.1).

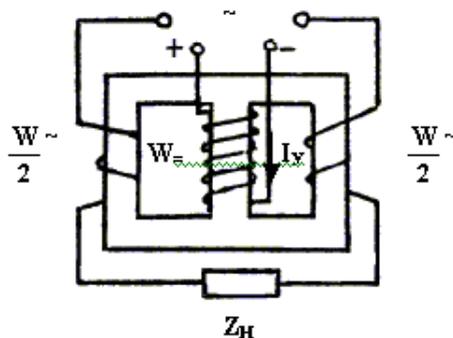


Рис. 4.12.7.1. Магнитный усилитель

На крайних стержнях магнитного усилителя находится рабочая обмотка, которая состоит из двух катушек соединенных последовательно. На среднем стержне размещается обмотка управления из большого количества витков. Если ток в нее не подается, а к рабочей обмотке подведено напряжение  $U_1$ , то из-за малого количества витков  $W_~$  магнитопровод не насыщается и почти все напряжение сети падает на сопротивление рабочих обмоток  $Z_H$ . На потребителе в этом случае выделяется малая мощность. Если теперь пропустим по обмотке управления ток  $I_y$ , то даже при небольшом его значении (из-за большого  $W_~$ ), возникает насыщение магнитопровода. В результате сопротивление рабочей обмотки резко уменьшается, а величина тока в цепи - увеличивается. Таким образом, посредством малых сигналов в обмотке управления можно управлять значительной величиной мощности в рабочей цепи магнитного усилителя.

## Трансформатор для преобразования частоты

С помощью трансформаторов легко построить удвоитель или утроитель частоты. Утроитель частоты состоит из трех однофазных трансформаторов, работающих при сильно насыщенном сердечнике (рис. 4.12.8.1). Первичные обмотки соединены "звездой", а вторичные - последовательно. Как известно, намагничивающий ток имеет сложную форму кривой и помимо основной гармонической составляющей имеет третью, изменяющуюся с частотой  $f_3 = 3f_1$ . При соединении первичной обмотки "звездой" токи основной гармоники уравниваются, и под действием третьей гармоники магнитный поток наводит во вторичной обмотке напряжение, изменяющееся с тройной частотой.

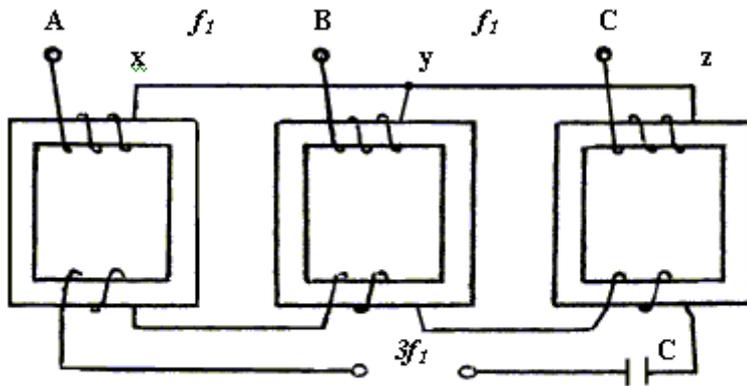


Рис. 4.12.8.1. Утроитель частоты.

### Вопросы для самоконтроля

- 1.Трехобмоточный трансформатор
- 2.Автотрансформатор
- 3.Трансформатор для дуговой сварки
- 4.Измерительные трансформаторы тока и напряжения
- 5.Трансформатор для преобразования числа фаз
- 6.Стабилизатор напряжения
- 7.Магнитный усилитель
- 8.Трансформатор для преобразования частоты

## Раздел 3 Общие вопросы теории бесколлекторных машин переменного тока

### Тема 10.Введение. Бесколлекторные машины переменного тока.

Действие всех электрических машин переменного тока основано на принципе вращающегося магнитного поля, и поэтому их теория является общей. На практике применяются преимущественно трехфазные ( $m=3$ ) машины переменного тока. Машины с другим числом фаз ( $m=2; 6$ ) используются для специальных целей.

Трехфазные машины переменного тока подразделяются на два основных типа: 1) синхронные и 2) асинхронные. В свою очередь асинхронные машины подразделяются на: а) бесколлекторные и б) коллекторные.

Синхронной называется бесколлекторная машина переменного тока, в которой частота вращения ротора  $n_2$  находится в строго постоянном отношении к частоте сети

$$n_2 = \frac{f_1}{p} \quad (1)$$

[об/с],

где  $p$  - число пар полюсов машины.

Другими словами, в синхронной машине ротор (подвижная часть) вращается с такой скоростью и в том же направлении, как и вращающееся магнитное поле статора.

Применение синхронных машин весьма широко и многообразно. Синхронная машина как и все электрические машины обратима и может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Синхронный генератор является основным типом генератора переменного тока, устанавливаемого на электростанции для производства электроэнергии.

Синхронные двигатели обладают рядом преимуществ, главными из которых являются постоянная частота вращения и возможность регулирования их коэффициента мощности. Поэтому они находят широкое применение в электроприводах большой мощности. Синхронные двигатели малой мощности применяются в системах автоматики.

Синхронные машины применяются в качестве синхронных компенсаторов, дающих возможность улучшать коэффициент мощности энергосистем.

Асинхронной называется такая машина, частота вращения которой зависит не только от частоты сети  $f_1$ , но и от нагрузки на валу, т.е. ротор асинхронной машины вращается несинхронно по отношению к вращающемуся магнитному полю статора. На практике асинхронные машины используются, главным образом, в качестве двигателей. Выгодно отличаясь от других электродвигателей простотой конструкции и надежностью в работе, асинхронный двигатель в настоящее время является основным типом электродвигателя.

Общие вопросы теории многофазных машин переменного тока целесообразно рассмотреть совместно, предварительно приведя краткое описание принципов действия и устройства основных видов машин переменного тока.

### Вопросы для самоконтроля

1. В чем конструктивное сходство асинхронных и синхронных машин?
2. Классификация машин переменного тока.
3. Понятие обратимости для электрических машин.

### Тема 11 Принцип действия бесколлекторных машин переменного тока.

В конструктивном отношении различают два основных типа синхронных машин: а) неявнополюсные, т.е. машины с неявно выраженными полюсами и б) явнополюсные, т.е. машины с явно выраженными полюсами.

Полюса, возбуждаемые постоянным током, располагаются на вращающейся части машины, называемой ротором, а обмотка переменного тока укладывается в пазах неподвижной части машины, называемой статором.

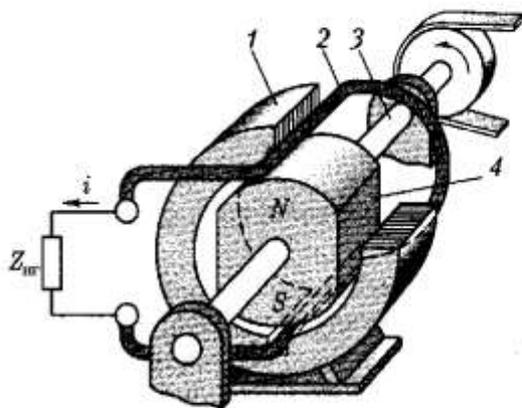


Рис. 6.1. Упрощенная модель синхронного генератора

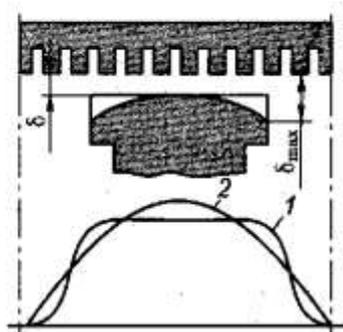


Рис. 6.2. Графики распределения магнитной индукции в воздушном зазоре синхронного генератора

При заданной частоте сети  $f_1$  наибольшую частоту вращения имеют машины с числами пар полюсов  $p = 1$  и  $p = 2$  (соответственно  $n = 3000$  об/мин и  $n = 1500$  об/мин). В таких машинах большой мощности скорость на окружности ротора настолько велика, что из соображений

механической прочности и укрепления обмотки возбуждения ее, приходится распределять по поверхности ротора, т.е. выполнять обмотку как неявнополюсную.

Синхронные генераторы приводятся во вращение паровыми и гидравлическими турбинами. В первом случае, синхронный генератор называется турбогенератором, а во втором - гидрогенератором.

Паровые турбины принадлежат к числу быстроходных машин, и поэтому турбогенераторы имеют неявнополюсное исполнение. Гидрогенераторы имеют явнополюсное исполнение, так как гидравлические турбины принадлежат к тихоходным машинам.

На одном валу с гидрогенератором устанавливаются вспомогательные машины: возбудитель генератора (генератор постоянного тока) и регуляторный генератор.

При аварийном отключении гидрогенератора от сети его частота вращения сильно возрастает, т.к. быстрое прекращения доступа воды в турбину невозможно (из-за гидравлического удара), а подача энергии в сеть прекращается (исчезает тормозной электромагнитный момент). Достижимая при этом максимальная (угонная) частота вращения может в два и более раз превышать номинальную, поэтому механическая прочность генератора рассчитывается на эту частоту вращения.

Гидрогенераторы обычно изготавливаются в вертикальном исполнении для непосредственного соединения с гидравлической турбиной.

Неявнополюсные синхронные машины имеют цилиндрический ротор из массивной стальной поковки, в лазах которого уложена обмотка возбуждения.

Турбогенераторы предназначены для непосредственного соединения с работающими на тепловых станциях паровыми турбинами, и поэтому они имеют горизонтальное исполнение.

Предельный диаметр активной части ротора при  $n = 3000$  об/мин по условиям механической прочности из-за больших центробежных сил не может превышать 1,2-1,3 м. В связи с этим ротор мощных машин приходится делать длинным. В то же время увеличение длины ротора ограничено пределом увеличения гибкости и прогиба ротора и связанного с этим увеличения вибрации. Наибольшая возможная активная длина ротора составляет  $l = 7,5 \div 8,5$  м. Таким образом, предельные размеры турбогенераторов ограничены возможностями современной металлургии. Мощность выпускаемых турбогенераторов достигает 1200 МВт.

Увеличение предельных мощностей связано с увеличением электромагнитных нагрузок (линейной нагрузки и плотности тока обмоток) и интенсификацией способов охлаждения.

В настоящее время разработаны и внедряются в эксплуатацию криогенные турбогенераторы, использующие принцип сверхпроводимости обмоток при охлаждении их жидким гелием. В будущем это позволит довести предельную мощность генератора до 10 млн. кВт при существующих габаритах за счет увеличения линейной токовой нагрузки.

Принцип действия синхронного генератора основан на явлении электромагнитной индукции и заключается в преобразовании механической энергии, отдаваемой потребителю.

Намагничивающая сила, создаваемая током обмотки возбуждения, возбуждает постоянный магнитный поток. Этот поток, вращаясь вместе с ротором генератора, пересекает обмотки статора и наводит в них трехфазную систему электродвижущих сил (ЭДС). При замыкании обмотки статора через нагрузку под действием ЭДС начинает протекать ток.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Каково назначение контактных колец и щеток в синхронном генераторе?
2. Может ли ротор асинхронного двигателя вращаться синхронно с вращающим полем?
3. Принцип действия синхронного генератора.

## Раздел 4 Асинхронные машины

### Тема 12. Принцип действия асинхронных машин переменного тока. Режимы работы и устройство асинхронной машины.

Асинхронная машина состоит из двух основных частей неподвижной части - статора и подвижной части - ротора. Между статором и ротором имеется воздушный зазор. Увеличение воздушного зазора резко уменьшает коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ ) и вращающий момент двигателя.

Сердечник статора собирают из листов электротехнической стали в виде колец, на внутренней окружности которых штампуют пазы для укладки обмотки статора. Обмотка выполняется из изолированных медных проводов. Стальные листы изолируют друг от друга лаком для уменьшения потерь от вихревых токов.

Сердечник статора с обмоткой помещают в станину, посредством которой машина крепится к фундаменту. Ротор собирают также из листов электротехнической стали и крепят на валу машины.

В зависимости от типа ротора асинхронные двигатели делятся на: а) двигатели с короткозамкнутым ротором; б) двигатели с контактными кольцами.

Работа асинхронного двигателя основана на принципе электромагнитной индукции.

При подаче в обмотку статора трехфазного переменного тока возникает вращающееся магнитное поле, которое перемещается в воздушном зазоре между статором и ротором с частотой вращения  $n_1$  и при своем вращении пересекает проводники обмотки ротора, индуцируя в этой обмотке ЭДС  $E_2$ .

Если обмотка ротора замкнута, то под действием ЭДС в ней возникает ток, совпадающий по направлению с ЭДС.

В результате взаимодействия тока в проводнике обмотки ротора с вращающимся магнитным полем статора возникает сила  $f$ , которая перемещает проводник в направлении, определяемом правилом «левой руки». Если умножим силу  $F$  на расстояние от оси ротора до проводника, то получим вращающий момент  $M=FR$ , развиваемый током этого проводника. Так как на роторе помещено большое количество проводников, то произведения сил, действующих на каждый проводник, на расстояние этих проводников до оси ротора определяет вращающий момент двигателя. Под действием вращающего момента ротор двигателя вращается в направлении вращения магнитного поля.

Электродвижущие силы в обмотках машин переменного тока

Необходимо, чтобы индуцируемые в обмотках ЭДС были синусоидальными, т.е. не содержали высшие гармоники, вызывающие дополнительный нагрев и тормозные моменты. Так как ЭДС индуцируются вращающимися магнитными потоками, то для этого необходимо, чтобы распределение магнитной индукции вдоль воздушного зазора было синусоидальным. Для этого применяются различные конструктивные меры. Например, для улучшения кривой поля возбуждений явнополюсных синхронных генераторов, их полюсные наконечники выполняют с радиусом несколько меньшим, чем радиус воздушного зазора, т.е. делают зазор ( $\delta_m$ ) у краевполюсного наконечника больше зазора посередине ( $\delta$ ). Хорошие результаты дает полюсный наконечник с соотношением  $\delta_m/\delta=1,5\div 2$ .

В неявнополюсных машинах синусоидальный характер распределения магнитной индукции создается подбором соответствующего отношения между частью окружности ротора без пазов и частью его окружности с пазами, в которые укладывается обмотка возбуждения. Обычно это отношение равно  $2/3$ . Однако и в этих случаях кривая магнитной индукции лишь приближается к синусоиде, поэтому ЭДС обмотки статора остается несинусоидальной и наряду с основной гармоникой содержит высшие гармоники. В силу симметрии кривой ЭДС обмотки статора относительно оси абсцисс, в кривой ЭДС не будет четных гармоник.

Определим ЭДС, индуцируемую в обмотке статора основной пространственной гармоникой вращающегося поля ( $k = 1$ ).

*а) электродвижущая сила проводника*

Вращающееся со скоростью  $v=2\pi f$  синусоидальное магнитное поле индуцирует в каждом проводнике витка ЭДС

$$e_{np} = E_{m,np} \sin \omega t \quad (2)$$

амплитуда, которой

$$E_{m,np} = B_{\delta} l_{\delta} \nu = 2 f B_{\delta} l_{\delta} \tau \quad (3)$$

и действующее значение

$$E_{np} = \sqrt{2} f B_{\delta} l_{\delta} \tau, \quad (4)$$

где  $B_{\delta} = B_{m1}$  - амплитуда индукции основной гармоники поля в зазоре;

$l_{\delta}$  - расчетная активная длина машины;

$\tau$  - полюсное деление.

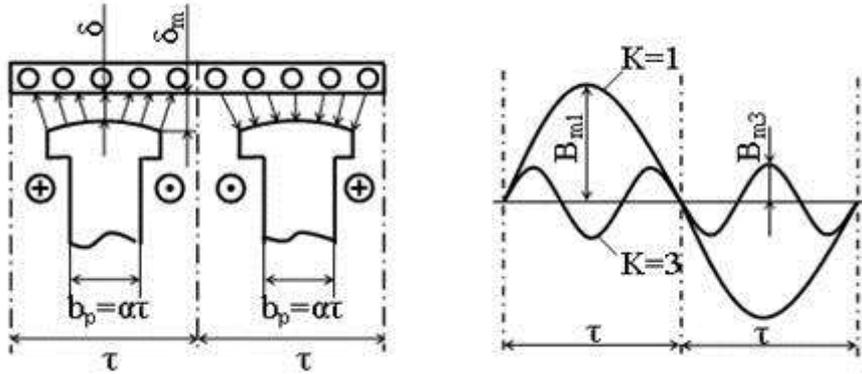


Рисунок 1 - Распределение магнитной индукции поля возбуждения явнополюсной синхронной машины вдоль поверхности статора

В ряде случаев, для улучшения формы ЭДС обмотки статора осуществляется скос пазов относительно бегущего магнитного поля. При этом фаза ЭДС, индуцируемая в отдельных участках проводника синусоидально распределенным магнитным полем, непрерывно изменяется вдоль проводника, и элементарные ЭДС  $\Delta E$ , индуцируемые на обоих концах проводника, сдвинуты по фазе на угол

$$\gamma_c = \frac{v_c}{\tau} \pi, \quad (5)$$

где  $v_c$  - величина скоса.

В этом случае, для определения ЭДС проводника необходимо сложить векторы ЭДС отдельных участков проводника  $\Delta E$ . В пределе, если рассматривать бесконечно малые участки,  $\Delta \vec{E} \rightarrow 0$  и геометрическая сумма векторов  $\Delta \vec{E}$  изобразится дугой и будет равна хорде окружности, опирающейся на центральный угол  $\gamma_c$ .

Отношение длины хорды к ее дуге

$$k_c = \frac{2R \sin \gamma_c / 2}{R \gamma_c} = \frac{\sin \gamma_c / 2}{\gamma_c / 2} \quad (6)$$

определяет степень уменьшения ЭДС  $E_{np}$  при наличии скоса и называется коэффициентом пазов обмотки.

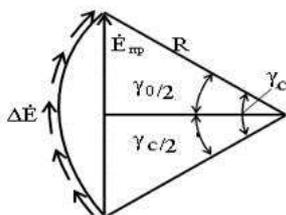


Рисунок 2 - Определение ЭДС проводника при скосе пазов

Подставив значение  $\gamma_c$ , получим

$$k_c = \frac{\sin\left(\frac{\epsilon_c \pi}{\tau 2}\right)}{\frac{\epsilon_c \pi}{\tau 2}}, \quad (7)$$

так как скос невелик, то  $k_c \approx 1$ . Например, при  $\frac{\epsilon_c}{\tau} = \frac{1}{6}$

$$k_c = \frac{\sin \frac{\pi}{6 \times 2}}{\frac{\pi}{6 \times 2}} = \frac{12}{\pi} \sin 15^\circ = 0,989 \quad (8)$$

т.е. ЭДС  $E_{np}$  уменьшается на 1,1 %. Окончательно ЭДС проводника

$$E_{np} = \sqrt{2} f B_\sigma l_\sigma \tau \quad (9)$$

*б) электродвижущая сила витка и катушки*

Шаг витка и катушки обмоток переменного тока у чаще всего несколько укорачивают по сравнению с полюсным делением  $\tau$ , так что относительный шаг  $\beta = y/\tau$  обычно меньше единицы.

ЭДС проводников витка имеют одинаковую величину, но сдвинуты по фазе на угол  $\beta\pi$ , так как активные проводники витка сдвинуты в магнитном поле на такой же угол.

ЭДС витка равна  $E_e = E'_{np} - E''_{np}$  и согласно рисунку 3

$$E_e = 2E_{np} \sin \beta\pi/2 = 2\sqrt{2} f k_c k_y B_\sigma l_\sigma \tau \quad (10)$$

где  $k_y = \sin \beta\pi/2$  - коэффициент укорочения шага обмотки.  $E_e$  максимальна при полном шаге ( $y=\tau$ ;  $\beta=1$ ), тогда  $k_y=1$ .

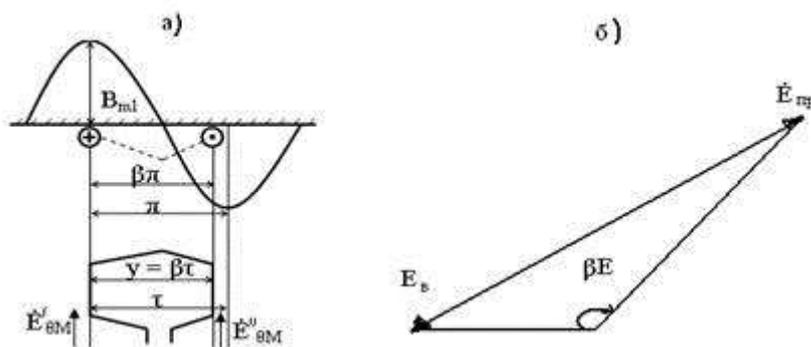


Рисунок 3 - ЭДС витка

Группа последовательно соединенных витков, вместе с общей пазовой изоляцией стенок паза, называется катушкой.

Если катушка содержит  $\omega_k$  витков, то ЭДС катушки

$$E_x = \omega_k E_e = 2\sqrt{2} f \omega_k k_y k_c B_\sigma l_\sigma \tau \quad (11)$$

Поток одного полюса при синусоидальном распределении индукции

$$\Phi = B_{\text{cp}} d_{\text{б}} = 2 / \pi B_{\text{м}} l_{\text{б}} \tau \quad (12)$$

и после постановки значения  $B_{\text{м}} l_{\text{б}} \tau$  в (11) получим окончательно

$$E_x = \pi \sqrt{2} f \omega_k k_y k_c \Phi = 4,44 f \omega_k k_y k_c \Phi \quad (13)$$

в) электродвижущая сила катушечной группы

Для получения достаточного количества проводников и витков в фазе и сохранения в то же время приемлемых размеров пазов, количество пазов в машине делают больше единицы. При этом ряд ( $q$ ) катушек, имеющих по одинаковому количеству витков  $\omega_k$  и лежащих в соседних пазах, соединяют последовательно. Такую группу катушек, принадлежащих одной фазе, называют катушечной группой.

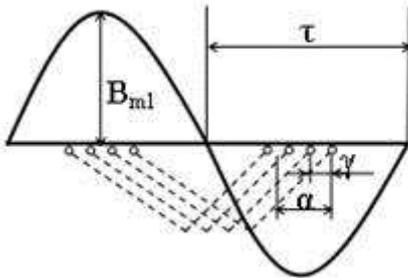


Рисунок 4 - Катушечная группа в магнитном поле ( $q=4$ )

ЭДС соседних катушек группы сдвинуты на угол

$$\gamma = \frac{2\pi p}{z} \quad (14)$$

Вся группа из  $q$  катушек занимает по окружности якоря угол (электрический)

$$\alpha = q\gamma = \frac{2\pi p q}{z} \quad (15)$$

называемый углом фазной зоны. ЭДС катушечной группы  $E_q$  равна геометрической сумме ЭДС отдельных катушек группы и меньшеарифметической суммы ЭДС этих катушек  $qE_k$ . Отношение  $E_q / qE_k = k_p$  называется коэффициентом распределения обмотки.

Таким образом,

$$E_q = k_p q E_k \quad (16)$$

Из рисунка 5 следует, что

$$E_q = 2R \sin \alpha / 2 \quad (17)$$

и  $E_k = 2R \sin \gamma / 2 = 2R \sin \alpha / 2q$

Подставив эти значения, получаем

$$k_p = \frac{\sin \alpha / 2}{q \sin \alpha / 2q} \quad (18)$$

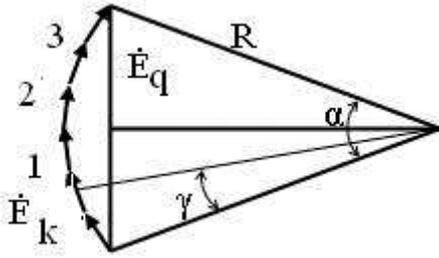


Рисунок 5 - Определение ЭДС катушечной группы

При  $q=1$ , имеем  $k_p = 1$ , а при  $q>1$ ,  $k_p < 1$ .

На основании выражений (13) и (16) получим:

$$E_q = \pi \sqrt{2} f \omega_x k_{об} k_c \Phi = 4,44 f \omega_x q k_{об} k_c \Phi, \quad (19)$$

где  $k_{об} = k_y k_p$  - коэффициент обмотки.

г) *электродвижущая сила фазы обмотки.*

В многополюсной машине каждая фаза обмотки содержит ряд катушечных групп, лежащих под разными полюсами. Если группы содержат одинаковое число катушек  $q$ , то они занимают одинаковые углы  $\alpha$  и сдвинуты относительно друг друга на целое число полюсных делений. В этом случае ЭДС катушечных групп равны по величине и сдвинуты по фазе на  $360^\circ$  (при сдвиге группы на четное число  $\tau$ ) или на  $180^\circ$  (при сдвиге на нечетное число  $\tau$ ). Такие катушечные группы можно соединить последовательно таким образом, что ЭДС групп будут складываться арифметически. Возможно также их параллельное соединение так, что ЭДС всех параллельных ветвей будут одинаковы по величине и совпадут по фазе.

Если в каждой ветви соединено последовательно  $n$  катушечных групп, то действующее значение ЭДС каждой ветви и фазы обмотки в целом будет:

$$E = n E_q,$$

или

$$E_x = \pi \sqrt{2} f \omega_x k_{об} k_c \Phi = 4,44 f \omega_x k_{об} k_c \Phi. \quad (20)$$

где  $\omega = nq$ , ( $\omega_x$  - число последовательно соединенных витков каждой параллельной ветви и называется числом витков фазы).

Если  $m$  - фазная обмотка имеет  $Z$  пазов и  $a$  параллельных ветвей, то:

$$\omega = \frac{Z S_n}{2 a m}, \quad (21)$$

где  $S_n$  - число эффективных проводников в пазу.

Трехфазную обмотку конструируют таким образом, чтобы ЭДС всех фаз были равны по величине и сдвинуты по фазе на  $120^\circ$ . Такую обмотку называют симметричной. Пространство машины используется в наибольшей степени, когда все  $Z$  пазов машины заняты обмоткой. В симметричной обмотке  $Z/m$  - целое число.

#### Электродвижущая сила обмотки от высших гармоник магнитного поля

Полюсное деление  $k$ -гармоники  $\tau_k$  в  $k$  раз меньше  $\tau$  и поэтому, если сдвиг фаз двух проводников витка относительно основной гармоники ( $k = 1$ ) составляет угол  $\beta\pi$ , то относительно  $k$ -гармоники этот сдвиг равен  $\beta k\pi$ .

При определении коэффициента укорочения для  $K$ -гармоники пользуются формулой:

$$k_{pk} = \sin \frac{k \beta \pi}{2}. \quad (22)$$

Сдвиг фаз ЭДС соседних катушек группы также будет в  $K$  раз больше, и поэтому коэффициент распределения следует вычислять по формуле:

$$k_{pk} = \frac{\sin \alpha / 2}{q \sin k\alpha / 2q} = \frac{\sin k\pi / 2m}{q \sin k\pi / 2mq} \quad (23)$$

Угол скоса паза относительно поля  $K$ -гармоники также будет в  $K$  раз больше и поэтому для коэффициента скоса:

$$k_{sk} = \frac{\sin \frac{k_{ec} \pi}{\tau 2}}{\frac{k_{ec} \pi}{\tau 2}} \quad (24)$$

Обмоточный коэффициент для  $k$ -гармоники:

$$k_{обк} = k_{ук} k_{pk} \quad (25)$$

ЭДС фазы от высшей гармоники поля:

$$E_x = \pi \sqrt{2} f_k \omega k_{обк} k_{sk} \Phi_k = 4,44 f_k \omega k_{обк} k_{sk} \Phi_k \quad (26)$$

Поток  $k$ -гармоники определяется выражением:

$$\Phi_k = \frac{2}{\pi} B_{ск} I_{\sigma} \tau_k = \frac{2}{k\pi} B_{ск} I_{\sigma} \tau \quad (27)$$

Действующее значение полной ЭДС

$$E_{\Sigma} = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots + E_k^2} \quad (28)$$

Обмотки двигателя переменного тока

*а) трехфазные двухслойные обмотки*

Обмотка переменного тока представляет собой систему проводов, определенным образом уложенных в пазах сердечника статора.

Элементом обмотки статора является катушка, которая состоит из активных сторон и лобовой части. Расстояние между активными сторонами называется шагом обмотки  $y$ .

Шаг называется полным, если равен полюсному делению  $y = \tau$  и укороченным, если он меньше полюсного деления  $y < \tau$ .

Применяемые в настоящее время обмотки переменного тока классифицируются следующим образом:

- а) по числу фаз - однофазные и трехфазные;
- б) в зависимости от размеров катушек обмотки с полным и обмотки с укороченным шагом;
- в) по способу укладки катушек в пазы - однослойные и двухслойные.

В современных машинах переменного тока применяются преимущественно двухслойные обмотки.

В двухслойных обмотках стороны катушек лежат в пазах в два слоя, и каждая катушка лежит одной стороной в верхнем, а другой стороной - в нижнем слое. При этом все катушки имеют одинаковые размеры и форму. Преимущества двухслойных обмоток:

- 1) возможность укорочения шага обмотки на любое целое число зубцовых делений, что выгодно с точки зрения подавления высших гармоник ЭДС обмоток и уменьшения расхода обмоточного провода;
- 2) одинаковые размеры и форма катушек, что облегчает изготовление обмоток;
- 3) относительно простой формой лобовых частей катушек, что также упрощает изготовление обмоток.

Обмотки переменного тока делятся на петлевые и волновые, которые в электромагнитном отношении равноценны.

Простейшая трехфазная обмотка выполняется тремя катушками, оси которых сдвинуты по окружности статора на  $1/3$  двойного полюсного деления  $2m$ . Каждая катушка в этом случае представляет собой фазную обмотку. Обычно фазная обмотка состоит не из одной, а из нескольких

катушек, занимающих  $q$  пазов в пределах каждого полюсного деления. Таким образом, для образования трехфазной обмотки зубцовый слой сердечника статора в пределах каждого полюсного деления необходимо разделить на три зоны по  $q$  пазов в каждой. Порядок чередования таких зон под каждым полюсом должен быть одинаковым. Катушки, уложенные в пазы одинаковых зон, образуют фазные обмотки.

Для определения величины  $q$  - числа пазов на полюс и фазу следует пользоваться формулой

$$q = \frac{z}{2pm}, \quad (29)$$

где  $m$  - число пазов.

Угол между соседними пазами

$$\alpha = \frac{360p}{z}. \quad (30)$$

Сдвиг между соседними фазами, выраженный в пазах

$$\lambda = \frac{120}{\alpha}. \quad (31)$$

Пример. Выполнить развернутую схему трехфазной двухслойной обмотки с укороченным шагом, если  $Z=24$ ,  $2p=4$ ,  $Y=5$ .

По заданным  $m$ ,  $2p$  и  $z$  определяем:

а) число пазов на полюс и фазу  $q = z/2pm = 6$ ;

б) полюсное деление  $\tau = z/2p = 6$ ;

в) угол сдвига между соседними пазами  $\beta = 360p/z - 30$  эл. град;

г) сдвиг между соседними фазами  $\lambda = 120/\alpha = 4$ .

На развернутой поверхности статора размечаем пазы ( $z=24$ ) и полюсные деления  $\tau = 6$  пазов, а затем наносим верхние (сплошные) и нижние (пунктирные) стороны катушек (см. рисунок 6,а). Размечаем зоны по  $q = 2$  паза для всех фаз (см. рисунок 6,б); при этом расстояние между зоной какой-либо фазы в одном полюсном делении и зоной этой же фазы в другом полюсном делении должно быть равно полюсному делению  $\tau$ . Далее отмечаем расстояние между началами фазных обмоток  $\lambda = 4$  паза.

Соединяем верхние стороны катушек 1 и 2 с их нижними сторонами (пазы 6 и 7) и получаем первую катушечную группу первой фазы; соединяем верхние стороны катушек 7 и 8 с их нижними сторонами (пазы 12 и 13) и получаем вторую катушечную группу; соединяем верхние стороны 13 и 14 с их нижними сторонами 9 пазы 18 и 19) и получаем третью катушечную группу и, наконец, соединяем верхние стороны катушек 19 и 20 с нижними сторонами (пазы 24 и 1) и получаем четвертую группу катушек.

Катушки в группах, а также катушечные группы между собой соединяем последовательно (см. рисунок 6,в) и получаем фазную обмотку первой фазы. Начало первой катушечной группы присоединяем к выводу  $A$ , а начало четвертой катушечной группы к выводу  $X$ . Пропеделав то же самое с катушками второй и третьей фаз и соединив катушечные группы так же, как это сделано в первой фазе, получаем фазные обмотки второй ( $B-Y$ ) и третьей ( $C=Z$ ) фаз (см. рисунок 6,в).

*б) волновые обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу*

В мощных машинах переменного тока, в частности и в крупных турбогенераторах, вследствие большого магнитного потока и большого числа катушек необходимое напряжение обмотки статора достигается при числе витков в катушке  $q = 1$ . В этом случае двухслойная обмотка имеет в каждом пазу только два стержня большого сечения, из которых образованы витки путем пайки в лобовых частях.

Стержневые обмотки можно выполнять как петлевыми, так и волновыми. Однако в большинстве случаев их делают волновыми, так как при этом за счет уменьшения между катушечными группами достигается экономия меди и уменьшается трудоемкость изготовления обмотки.

Схема трехфазной двухслойной стержневой волновой обмотки с теми же данными, что на рисунке 6, изображена на рисунке 7. Для удобства обозрения схемы счет пазов начат с отступлением от левого края. Начало фазы *A* взято из верхнего слоя пазы 2. При обходе этой фазы от ее начала *A* обойдем виток 2, лежащий своей верхней стороной в пазу 2, из конца витка 2 (нижний слой пазы 19) завершим полный обход вокруг статора. При этом будет обойдено (в данном случае  $p=2$ ) витков. Второй обход вокруг статора начинается с соединения конца витка 14 с началом витка 1. При втором обходе пройдем еще  $q=2$  катушки (1 и 13) и закончим обход выходом из нижней стороны пазы 18 (см. рисунок 7). В данном случае, при  $q=2$ , этим заканчивается первый цикл обходов. При  $q=3$  и 4 этот цикл включает 3 и 4 обходов, причем будет использовано  $pq$  витков (катушек) обмотки (в данном случае  $2 \cdot 2=4$  витка), т.е. половина всех  $2pq$  витков (катушек) фазы.

Второй цикл обходов фазы *A* начат (начало 2) из нижней стороны катушки 19 (нижняя сторона пазы 24), при этом все витки фазы соединены последовательно перемычкой *IK-2H*. Второй цикл обходов совершается в противоположном направлении, причем  $q=2$  захватывает катушки 20, 8, 19, 7 и заканчивается концом фазы *X*.

Аналогично выполняются соединения в фазах *B* и *C*, независимо от числа полюсов обмотка будет иметь три перемычки, соединяющие циклы обходов в каждой фазе.

Таким образом, каждая фаза волновой обмотки состоит из двух половинок по  $pq$  катушек в каждой. Эти половинки можно соединить и параллельно, и получить обмотку с  $a=1$  параллельных ветвей.

На рисунке 8 показано последовательное соединение четырех катушечных групп. Вторая и третья катушечные группы соединены верхними концами. Третья и четвертая катушечные группы - нижними концами, а к выводам фазной обмотки присоединены верхние концы первой и четвертой катушечных групп. При последовательном соединении катушечных групп каждая фазная обмотка, независимо от числа полюсов, содержит одну параллельную ветвь.

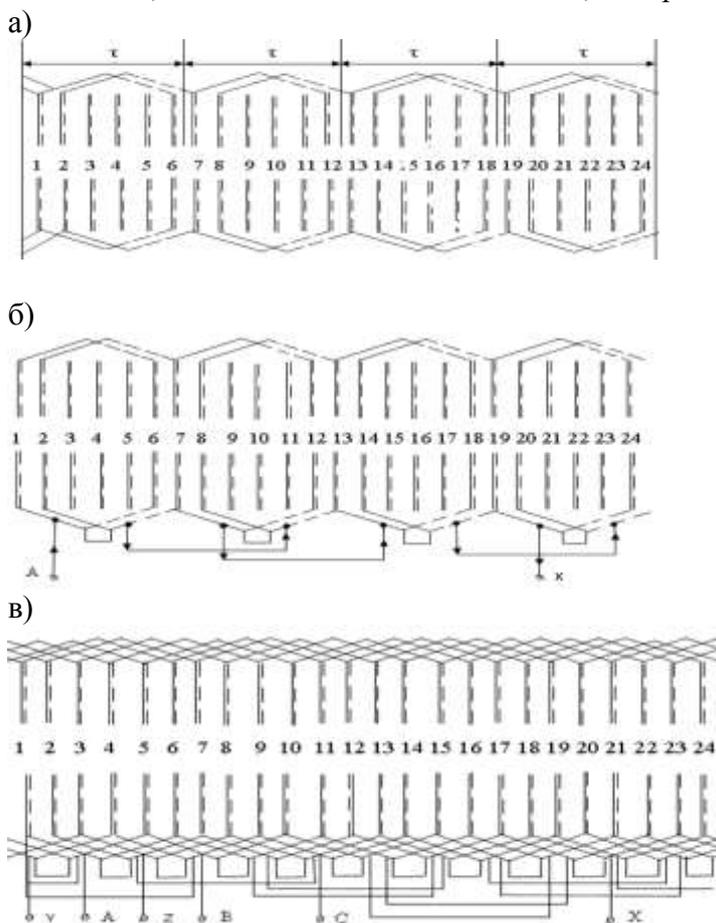


Рисунок 6 - Порядок построения трехфазной двухслойной петлевой обмотки с укороченным шагом

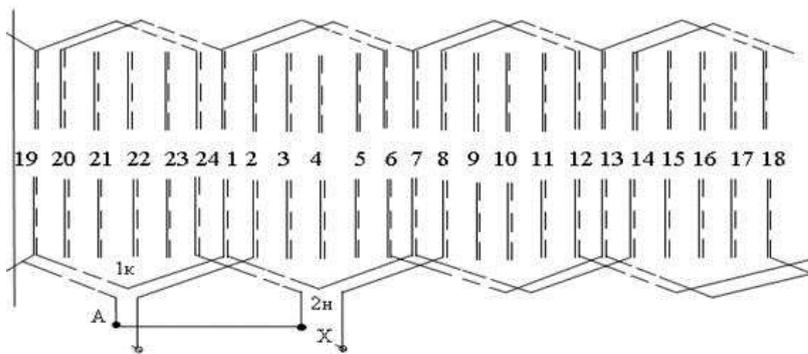


Рисунок 7 – Порядок построения двухслойной волновой обмотки с укороченным шагом обмотки (фаза А)

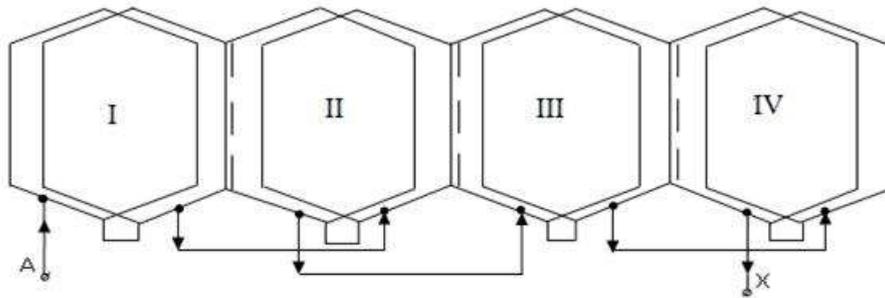


Рисунок 8 – Последовательный способ соединения катушечных групп

Двухслойная обмотка в каждой фазе имеет  $2p$  катушечных групп, поэтому соединив все катушечные группы параллельно, получим обмотку, состоящую из  $2p$  параллельных ветвей.

На рисунке 8 показано параллельное соединение четырех катушечных групп. Чтобы соединить все катушечные группы параллельно, следует к одному выводу обмотки А подключить верхние концы нечетных катушечных групп (I и III) и нижние концы четных катушечных групп (II и IV). Оставшиеся концы катушечных групп присоединяют к другому выводу фазной обмотки X. Такой порядок присоединения группы объясняется следующим: ЭДС рядом лежащих катушечных групп сдвинуты по фазе друг относительно друга на  $180^\circ$ , так как они расположены под разными полюсами. Поэтому, чтобы ЭДС рядом лежащих катушечных групп фазной обмотки совпадали по фазе, приходится их присоединять, меняя концы.

Если половину катушечных групп каждой фазной обмотки соединить последовательно в одну ветвь, а затем полученные ветви соединить параллельно, то получим обмотку с двумя параллельными ветвями ( $2a=2$ ). Для того, чтобы ЭДС параллельных ветвей были одинаковы, в каждую параллельную ветвь включают катушечные группы через одну. Таким образом, в одной параллельной ветви оказываются все четные катушечные группы, в другой все нечетные. Катушечные группы каждой фазы статорной обмотки могут быть соединены последовательно или параллельно, что влияет на число параллельных ветвей в обмотке.

*в) способы соединения катушечных групп обмоток статора* Катушечной группой называется ряд последовательно соединенных между собой катушек, которые лежат в соседних пазах и принадлежат одной фазной обмотке. Каждая катушечная группа имеет  $q$  последовательно соединенных катушек. Количество катушечных групп в фазной обмотке равно числу полюсов и, следовательно, общее число катушечных групп в двухслойной обмотке  $A=2pm$ .

### Вопросы для самоконтроля

1. Устройство асинхронной машины
2. Электродвижущие силы в обмотках машин переменного тока
3. Электродвижущая сила обмотки от высших гармоник магнитного поля
4. Принцип действия асинхронной машины
5. Режимы работы асинхронной машины.

### Тема 13. Рабочий процесс трехфазного асинхронного двигателя.

Холостой ход асинхронного двигателя при неподвижном роторе

Предположим, что ротор асинхронного двигателя (АД) разомкнут и неподвижен, а статор включен в электрическую сеть с напряжением  $U_1$  и частотой  $f_1$ . Все величины, относящиеся к статору, называются первичными и обозначаются индексом «1», а все величины, относящиеся к ротору вторичными и обозначаются индексом «2».

Под действием напряжения  $U_1$  по обмотке статора будет протекать ток холостого хода  $I_0$ . Образованная этим током магнитодвижущая сила (МДС) создает магнитный поток, одна часть которого  $\Phi_m$  сцеплена с обмотками обеих частей машины, а другая часть  $\Phi_{s1}$  - только с обмоткой статора. Первый поток является основным, второй - потоком рассеяния. Если  $p$  - число пар полюсов АД, то частота вращения  $n_1$  МДС  $f_1$  и соответственно магнитного потока составляет

$$n_1 = \frac{f_1}{p} \text{ об/с.} \quad (32)$$

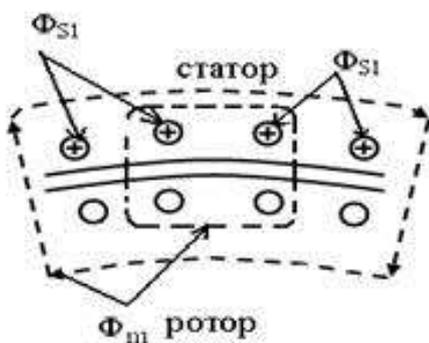


Рисунок 9 – Поток статора при разомкнутом роторе

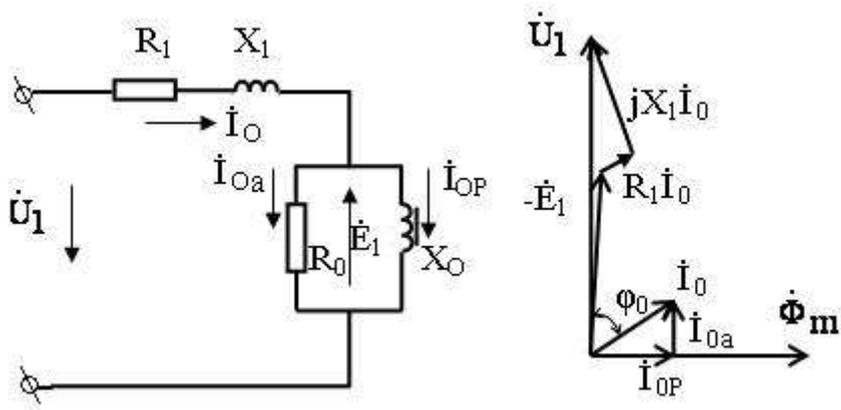


Рисунок 10 - Эквивалентная схема (а) и векторная диаграмма (б) асинхронного двигателя в режиме холостого хода

Основной поток создает в обмотках статора и ротора ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ , определяемые формулами:

$$\begin{aligned} E_1 &= \pi \sqrt{2} f_1 \omega_1 k_{\sigma 1} \Phi_m = 4,44 f_1 \omega_1 k_{\sigma 1} \Phi_m; \\ E_2 &= \pi \sqrt{2} f_1 \omega_2 k_{\sigma 2} \Phi_m = 4,44 f_1 \omega_2 k_{\sigma 2} \Phi_m; \end{aligned} \quad (33)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  – число витков обмоток статора и ротора;  
 $k_{\sigma 1}, k_{\sigma 2}$  – обмоточные коэффициенты обмоток.

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\pi\sqrt{2}f_1\omega_1k_{\phi\phi 1}\Phi_m}{\pi\sqrt{2}f_1\omega_2k_{\phi\phi 2}\Phi_m} = \frac{\omega_1k_{\phi\phi 1}}{\omega_2k_{\phi\phi 2}} \quad (34)$$

Отношение

называется коэффициентом трансформации ЭДС асинхронного двигателя, который определяется опытным путем отношений фазных значений ЭДС обмоток статора и ротора при холостом ходе.

Поток рассеяния  $\Phi_{s1}$  индуцирует в каждой фазе обмотки статора ЭДС рассеяния  $E_{s1} = -jX_1 I_0$ , где  $X_1$  - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора. Кроме того, каждая фаза обмотки статора обладает активным сопротивлением  $r_1$ , вызывающим падение напряжения  $r_1 I_0$ .

Следовательно, для одной фазы статора уравнение равновесия ЭДС будет

$$U_1 = -E_1 + r_1 I_0 + jX_1 I_0 = -E_1 + Z_1 I_0 \quad (35)$$

Соответствующая этому уравнению эквивалентная схема и векторная диаграмма АД изображена на рисунке 10. Ток  $I_0$  имеет реактивную составляющую  $I_{op}$ , потребляемую для возбуждения магнитного поля, и активную составляющую  $I_{oa}$ , необходимую для покрытия потерь в стали сердечников статора и ротора.

Для построения схемы замещения, т.е. перехода от магнитной связи между обмотками статора и ротора к электрической, обмотку ротора приводят к обмотке статора, заменяя действительную обмотку ротора другой, имеющей такое же число витков, шаг обмотки и количество пазов на полюс и фазу, такое же как в обмотке статора.

При этом параметры вторичной обмотки должны быть пересчитаны так, чтобы сохранить энергетические соотношения в машине.

ЭДС приведенной вторичной обмотки равна

$$E'_2 = k_e E_2 = E_1 \quad (36)$$

При разомкнутом роторе в асинхронном двигателе имеются потери в обмотке статора  $m_1 I_{0a}^2 r_1$ , и потери в сердечниках статора и ротора  $p_{c1}$  и  $p_{c2}$ . На покрытие этих потерь идет мощность  $p_{10}$ , потребляемая двигателем из сети

$$P_{10} = m_1 I_{0a}^2 r_1 + P_{c1} + P_{c2} \quad (37)$$

Короткое замыкание асинхронного двигателя

Режим короткого замыкания АД возникает при заторможенном роторе. Для того, чтобы токи в обмотках статора и ротора при коротком замыкании были ограничены, их номинальные значения напряжения, подводимые к двигателю, надо понизить до значения  $U_k$ , то есть на 10-20% от номинального напряжения  $U_{ном}$ .

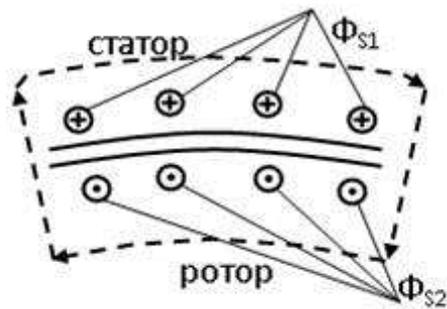


Рисунок 11- Поток АД при коротком замыкании

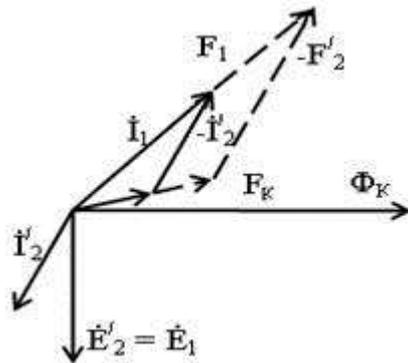


Рисунок 12 - Векторная диаграмма АД при коротком замыкании

Токи  $I_1$  и  $I_2$  создают МДС  $F_1$  и  $F_2$ , которые вращаются относительно неподвижных статора и ротора в одинаковом направлении с одинаковой скоростью  $n_1 = f_1 / p$ , они неподвижны относительно друг друга и образуют результирующую, вращающуюся со скоростью  $n_1$  МДС  $F_k$ , которая создает основной вращающий поток  $\Phi_{s1}$ , сцепленный с обмотками статора и ротора. Кроме того МДС  $F_1$  создает первичный поток рассеяния  $\Phi_{s1}$  сцепленный только с первичной обмоткой, а МДС  $F_2$  - вторичный поток рассеяния  $\Phi_{s2}$ , сцепленный только со вторичной обмоткой (см. рисунок 11).

МДС и  $F_1$  при коротком замыкании действуют навстречу друг другу. Поэтому, несмотря на значительную величину токов  $I_1$  и  $I_2$  и создаваемых ими  $F_1$  и  $F_2$  результирующая МДС относительно мала, вследствие чего и поток  $\Phi_k$  мал и, следовательно, магнитная цепь в этом случае ненасыщена.

Первичный ток  $I_1$  можно представить как сумму двух составляющих, из которых одна ( $I_k$ ) создает МДС  $F_k$ , а вторая ( $-I_2$ ) создает МДС  $-F_2$ , компенсирующую МДС  $F_2$  вторичного тока  $I_2$ . Таким образом, имеем:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_k + \left( -\dot{I}_2 \right) \quad \text{или} \quad \dot{I}_k = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \quad (38)$$

соответственно

$$\dot{F}_1 = \dot{F}_k + \left( -\dot{F}_2 \right) \quad \text{или} \quad \dot{F}_1 = \dot{F}_k + \left( \dot{F}_2 \right) \quad (39)$$

Из условия равновесия ЭДС статора и ротора получим:

$$m_1 \omega_1 k_{\sigma 1} I_2' = m_2 \omega_2 k_{\sigma 2} I_2, \quad (40)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  - число фаз статора и ротора.

Коэффициент трансформации токов будет:

$$k_i = \frac{I_2}{I_2'} = \frac{m_1 \omega_1 k_{\sigma\sigma 1}}{m_2 \omega_2 k_{\sigma\sigma 2}} \quad (41)$$

Следовательно, приведенный ток ротора

$$I_2' = \frac{I_2}{k_i} \quad (42)$$

Пользуясь коэффициентами трансформации ЭДС и токов, определяем приведенные значения активного и индуктивного сопротивления ротора  $r_2'$  и  $x_2'$ .

При приведении  $r_2$  исходим из того, что потери в обмотке ротора должны оставаться неизменными, т.е

$$m_2 r_2 I_2'^2 = m_1 r_2' I_2'^2,$$

Откуда

$$r_2' = \frac{m_2 I_2'^2}{m_1 I_2'^2} r_2 = \frac{m_2 (m_1 \omega_1 k_{\sigma\sigma 1})^2}{m_1 (m_2 \omega_2 k_{\sigma\sigma 2})^2} r_2 = \frac{\omega_1 k_{\sigma\sigma 1}}{\omega_2 k_{\sigma\sigma 2}} \cdot \frac{m_1 \omega_1 k_{\sigma\sigma 1}}{m_2 \omega_2 k_{\sigma\sigma 2}} r_2 = k r_2 \quad (43)$$

где  $k = k_e k_i$  - коэффициент приведения сопротивления, при приведении индуктивного сопротивления рассеяния исходим из того, что угол  $\psi_2$  между ЭДС  $E_2$  и током  $I_2$  должен остаться неизменным. Следовательно,

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x_2}{r_2} = \frac{x_2'}{r_2'},$$

откуда

$$x_2' = x_2 \frac{r_2'}{r_2} = k x_2 \quad (44)$$

Уравнения первичных и вторичных ЭДС при коротком замыкании

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1K} &= -\dot{E}_{1K} + I_1 Z_1 \\ 0 &= \dot{E}_{2K} - I_2 Z_2' \end{aligned} \right\}, \quad (45)$$

где  $r_1 + jx_1 = Z_1$  и  $r_2' + jx_2' = Z_2'$  - полные сопротивления обмоток статора и ротора.

Принимая во внимание что  $\dot{E}_{2K} = \dot{E}_{1K}$  и  $I_2' = -I_1'$  и решая совместно уравнения (45) относительно тока, получаем:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{1K}}{Z_1 + Z_2'} \quad (46)$$

Соответственно, этому имеем схему замещения АД в режиме короткого замыкания (рисунок 13).

Параметры схемы замещения короткого замыкания:

$$\left. \begin{aligned} r_K &= r_1 + r_2' \\ x_K &= x_1 + x_2' \end{aligned} \right\}, \quad \begin{aligned} r_1 &= r_2' \\ x_1 &= x_2' \end{aligned} \quad (47)$$

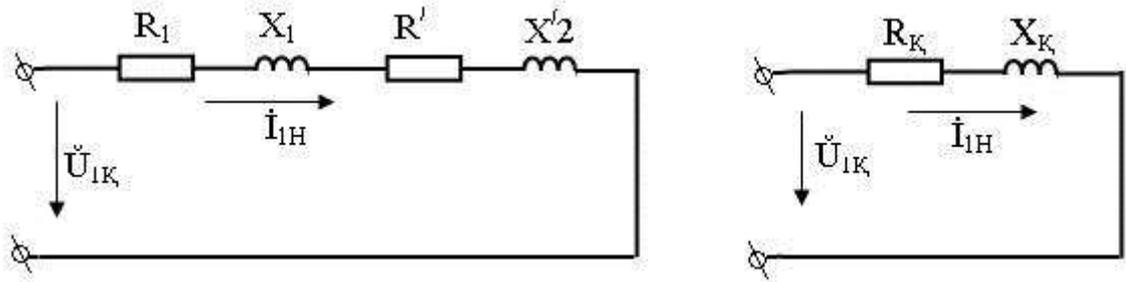


Рисунок 13 - Схема замещения АД в режиме короткого замыкания

Асинхронный двигатель при вращающемся роторе

а) скольжение, частота ЭДС и сопротивление обмотки ротора

Из принципа действия асинхронного двигателя знаем, что частота вращения ротора  $n_2$  меньше частоты вращения поля статора  $n_1$ . Если бы  $n_2$  стало равно  $n_1$ , то не было бы пересечения вращающимся полем статора витков обмоток ротора, а, следовательно, в обмотке ротора не индуцировалось бы ЭДС. Поэтому в обмотке ротора не возникал бы ток  $I_2$ , и отсутствовал бы вращающий момент.

Степень отставания ротора от вращающегося магнитного поля статора характеризуется скольжением  $S$ , представляет собой разность между  $n_1$  и  $n_2$ , выраженной в относительных, единицах, относительно частоты поля статора

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (48)$$

откуда 
$$n_2 = n_1(1 - S) = \frac{f_1}{p}(1 - S)$$

Частота ЭДС  $E_2$ , индуцируемой в обмотке ротора, равна:

$$f_2 = p(n_1 - n_2) = p n_1 \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 S, \quad (49)$$

т.е. при заданной частоте сети  $f_1$  ЭДС ротора изменяется пропорционально скольжению  $S$  ( $f_2$  называется частотой скольжения). Согласно общему выражению (33) для ЭДС ротора имеем:

$$E_2 = 4,44 f_2 \omega_2 k_{\text{об}2} \Phi_m = 4,44 f_1 \omega_2 k_{\text{об}2} \Phi_m S = E_{2H} S, \quad (50)$$

или, если обмотка ротора приведена к обмотке статора,

$$E'_2 = E_{2H} \cdot S. \quad (51)$$

Таким образом, при заданном основном потоке  $\Phi_m$  ЭДС, индуцируемая в обмотке ротора при его вращении, равна ЭДС  $E_{2H}$  при неподвижном роторе, умноженной на скольжение.

Если не принимать во внимание явления вытеснения тока на поверхность проводника обмотки ротора и изменения активного сопротивления обмотки в связи с изменением ее температуры, то можно считать постоянным индуктивное сопротивление рассеяния неподвижного ротора

$$x_{2H} = 2\pi f_1 L_2,$$

где  $L_2$  - индуктивность, определяемая потоком рассеяния.

Так как потоки рассеяния проходят в основном по воздуху, то  $L_2$  постоянна.

Следовательно, индуктивное сопротивление ротора при его вращении равно:

$$x_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 L_2 S = x_{2H} S, \quad (52)$$

или, при приведении к обмотке статора:

$$\dot{x}'_2 = \dot{x}'_{2H} S \quad (53)$$

т.е. индуктивное сопротивление обмотки ротора при его вращении равно индуктивному сопротивлению неподвижного ротора  $X_{2H}$ , умноженному на скольжение  $S$ .

*б) уравнения электродвижущей силы и тока ротора*

Если цепь ротора замкнута, то в ней течет ток  $I_2$ , создающий поток рассеяния  $\Phi_{s2}$  и встречающий сопротивление  $r_2$ . Соответственно этому в обмотке ротора существуют ЭДС  $E_2$ , создаваемые основным потоком  $\Phi_m$  и ЭДС рассеяния  $E_{s2} = -jx_2 I_2$ . Тогда по второму закону Кирхгофа имеем:

$$\dot{E}_2 - jx_2 \dot{I}_2 = \dot{I}_2 r_2 \quad \text{или} \quad \dot{E}_2 = jx_2 \dot{I}_2 + \dot{I}_2 r_2 = z_2 \dot{I}_2 \quad (54)$$

где  $z_2 = r_2 + jx_2$  - полное сопротивление ротора.

Следовательно

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{z_2} = \frac{\dot{E}_2}{r_2 + jx_2} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}} \quad (55)$$

Если обмотка ротора приведена к обмотке статора, то:

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{E}'_2}{z'_2} = \frac{\dot{E}'_2}{r'_2 + jx'_2} \quad \text{и} \quad I'_2 = \frac{E'_2}{\sqrt{r'^2_2 + x'^2_2}} \quad (56)$$

Протекая по обмотке ротора, ток  $I_2$  создает МДС  $F_2$ , вращающуюся относительно ротора со скоростью  $n$ , соответствующей частоте тока в роторе.

Сам ротор вращается со скоростью  $n_2$ . Следовательно, МДС  $F_2$  ротора вращается относительно статора со скоростью  $n_1 + n_2$

$$n = \frac{f_2}{p} = \frac{f_1 S}{p} = n_1 S = n_1 \frac{n_1 - n_2}{n_1} = n_1 - n_2 \quad (57)$$

Таким образом  $n + n_2 = n_1 - n_2 + n_2 = n_1$ , т.е. намагничивающая сила ротора  $F$  вращается в пространстве всегда (независимо от режима работы) с той частотой вращения и в том же направлении, что и намагничивающая сила статора  $F_1$ .

*в) схема замещения и векторная диаграмма асинхронного двигателя*

Выражение для тока ротора (55) может быть преобразовано путем деления числителя и знаменателя на скольжение к виду:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2H} S}{r_2 + jx_{2H} S} = \frac{\dot{E}_{2H}}{r_2 / S + jx_{2H}} \quad (58)$$

Новое выражение имеет новый физический смысл. Во вторичной цепи теперь вместо ЭДС вращающегося ротора  $E_2$  с частотой  $f_2$  будет существовать ЭДС подвижного ротора с частотой  $f_1$ . Вместо индуктивного сопротивления при вращении ротора  $X_2$  действует индуктивное сопротивление при неподвижном роторе  $X_{2H}$ . Для того, чтобы через вторичную цепь протекал тот же по величине и по фазе относительно  $E_2$ , ток  $I_2$ , необходимо вместо сопротивления  $r_2$  ввести новое сопротивление, равное

$$\frac{r_2}{S} = r_2 \frac{1-S}{S} \quad (59)$$

В обоих случаях сдвиг по фазе тока от производящей его ЭДС будет один и тот же. Действительно в первом случае

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X_{2H} S}{r_2} \quad , \quad \text{во втором} \quad \operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X_{2H}}{r_2 / S} = \frac{X_{2H} \cdot S}{r_2} \quad (60)$$

В дальнейшем будем обозначать постоянное по величине индуктивное сопротивление  $x_{2H}$  через  $X_2$  и постоянную по величине ЭДС  $E_{2H}$  через  $E_2$ . Очевидно,

что и ток статора  $I_1$  остается прежним по величине и по фазе, а следовательно, не изменится потребляемая из сети мощность. Так как электрические потери в обмотках останутся прежними, то мощность, развиваемая на валу двигателя при его вращении, будет равна мощности, потребляемой в добавочном сопротивлении  $r_2(l-S)/S$ .

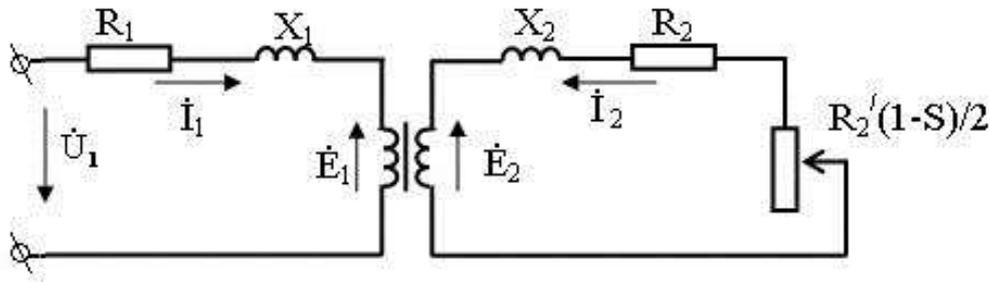


Рисунок 14 - Физическая схема замещения асинхронного двигателя, приведённая к неподвижному ротору

Указанное положение дает право анализировать вместо вращающегося двигателя неподвижный, с указанным добавочным активным сопротивлением. Физическая схема замещения приведена на рисунке 14.

Опирируя для вторичной цепи приведенными величинами, напишем для первичной и вторичной цепей:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + r_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ 0 &= -\dot{E}_2 + \frac{r_2'}{S} \dot{I}_2 + jX_2' \dot{I}_2 = -\dot{E}_2 + Z_2' \dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (61)$$

Учитывая, что  $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ ; и падение напряжения в намагничивающем контуре равно ЭДС с обратным знаком, то есть  $z_m \dot{I}_0 = \dot{E}_1 = -\dot{E}_2$ , решим совместно уравнения (61) и получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_0 z_m + z_1 \dot{I}_1 = \left( \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \right) z_m + \dot{I}_1 z_1 \\ 0 &= z_m \dot{I}_0 + z_2 \dot{I}_2 = z_m \left( \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \right) + z_2 \dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (62)$$

Решая совместно уравнения (62), получим

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{z_1 + \frac{1}{\frac{1}{z_m} + \frac{1}{z_2}}} = \frac{\dot{U}_1}{z_1 + \frac{z_m \cdot z_2'}{z_m + z_2}} \quad (63)$$

На основании уравнений (61) и (62) строим эквивалентную схему замещения и векторную диаграмму асинхронного двигателя при нагрузке (см. рисунки 15 и 16). При уменьшении нагрузки напряжение на зажимах обычно остается неизменным, а поток взаимной индукции и соответствующая ему ЭДС  $F = E_2$  на зажимах намагничивающего контура схемы (см. рисунок 15) при изменении нагрузки под влиянием падения напряжения  $Z_1 I_1$  в первичной цепи изменяется.



Активная мощность, потребляемая двигателем из сети, равна

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 = m_1 E_1 I_1 \cos \Psi_1 + m_1 I_1^2 \gamma_1 \quad (64)$$

Из векторной диаграммы (рисунок 16) имеем:

$$\begin{aligned} U_1 \cos \varphi_1 &= E_1 \cos \Psi_1 + I_1 r_1 \\ I_1 \cos \Psi_1 &= I_0 \sin \delta + I_2' \cos \Psi_2' \end{aligned} \quad (65)$$

Окончательное выражение для подводимой к статору активной мощности

$$P_1 = m_1 I_1^2 \gamma_1 + m_1 E_1 I_0 \sin \delta + m_1 E_1 I_2 \cos \Psi_2' = P_{\text{эл}} + P_{\text{с1}} + P_{\text{эм}} \quad (66)$$

где  $p_{M1}$  - электрические потери в обмотке статора;

$p_{c1}$  - магнитные потери в сердечнике статора;

$p_{эм}$  - электромагнитная мощность, передаваемая вращающимся магнитным полем в цепь ротора.

Для реактивной мощности, потребляемой двигателем, имеем:

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1 = m_1 E_1 I_1 \sin \Psi_1 + m_1 I_1^2 x_1 \quad (67)$$

После аналитических преобразований получим:

$$Q_1 = m_1 E_1 I_2' \sin \Psi_2' + m_1 I_1^2 x_1 + m_1 E_1 I_0 \cos \delta \quad (68)$$

т.е. реактивная мощность, потребляемая двигателем из сети, расходуется на создание магнитного поля рассеяния обмотки статора, намагничивания сердечников статора и ротора и передачу реактивной мощности ротору, для создания полей рассеяния обмотки ротора.

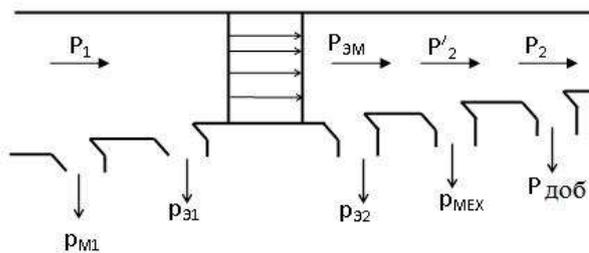


Рис.17 Диаграмма преобразование энергии и потери в асинхронном двигателе.

$p_{\text{мех}}$  - механические потери в роторе;

$p_{\text{м2}}$  - электрические потери в обмотке ротора;

$p_{\text{доб}}$  - прочие добавочные потери.

Рисунок 18-Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Потери в стали сердечника ротора при обычной частоте (1 - 2 Гц) ничтожны, и их учитывают только при глубоком регулировании скорости двигателя.

Электромагнитная мощность вращающегося магнитного поля

$$P_{эм} = P_1 - (p_{\text{эл}} + p_{\text{с1}}) \quad (69)$$

Мощность, передаваемая со статора на вал ротора.

$$P_2' = P_{эм} - P_{м2} \quad (70)$$

Полезная механическая мощность на валу двигателя

$$P_2 = P_2' - P_{мех} - P_{доб} \quad (71)$$

Обозначив угловую скорость поля статора через  $\Omega_1$ , а ротора через  $\Omega_2$  имеем:

$$P_{эм} = M\Omega_1, \quad (72)$$

$$P_2' = M\Omega_2.$$

Следовательно,  $P_{м2} = P_{эм} - P_2' = M(\Omega_1 - \Omega_2)$ , но так как скольжение

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1},$$

то  $P_{м2} = M\Omega_1 S = P_{эм} S. \quad (73)$

Таким образом, потери в обмотках роторной цепи равны мощности вращающегося поля, умноженной на скольжение, т.е. чем больше скольжение (меньше частота вращения), тем больше потери в цепи ротора.

Из зависимости (72) получается общее выражение для момента асинхронного двигателя.

Полный вращающий момент равен:

$$M = \frac{P_{эм}}{\Omega_1} = \frac{P_2'}{\Omega_2} \quad (74)$$

б) вращающий момент асинхронного двигателя из (73) получается

$$M = \frac{P_{м2}}{S\Omega_1} = \frac{m_2 I_2'^2 r_2'}{S\Omega_1} = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{S \frac{\omega_1}{p}} \quad (75)$$

Из схемы замещения (см. рисунок 17) имеем:

$$I_2' = \frac{u_1}{\sqrt{\left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{S} \right)^2 + (x_1 + x_2)^2 \right]}}, \quad (76)$$

$$I_2'^2 = \frac{u_1^2}{\sqrt{\left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{S} \right)^2 + (x_1 + x_2)^2 \right]}} \quad (77)$$

следовательно,

Подставив значение в уравнение (75), получим общее выражение для вращающегося момента асинхронного двигателя:

$$M_{\text{век}} = \frac{m_1 p u_1^2 r_2'}{2\pi f_1 S \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{S} \right)^2 + x_k^2 \right]}, \quad (78)$$

где  $x_k = x_1 + x_2$  - индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Из (78) вытекает, что момент  $M$  пропорционален квадрату напряжения сети  $U_1^2$ , т.е. асинхронный двигатель уменьшает перегрузочную способность при понижении напряжения. Напряжение сети будем считать постоянным, поэтому момент является функцией скольжения  $S$ .

Имея параметры двигателя  $r_1, x_1, r_2'$  и  $x_2$  и задаваясь различными значениями скольжения от  $S = 1$  до  $S=0$ , можем построить механическую характеристику двигателя  $M=f(S)$ , показанную на рисунке 19.

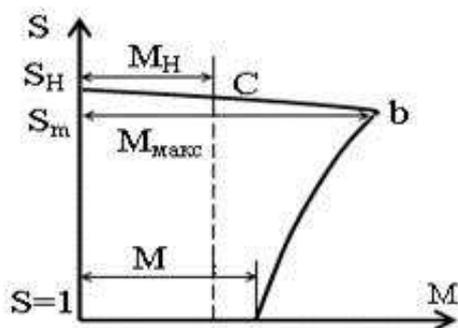


Рисунок 19 - Механическая характеристика асинхронного двигателя

При пуске двигателя развивается пусковой момент (точка *a*) при  $S=1$ , проходит через максимальный момент (точка *b*) при  $S=S_m$ .

Равновесие между вращающим моментом двигателя и моментом сопротивления на валу со стороны приводного механизма наступает тогда, когда момент двигателя становится равным моменту сопротивления  $M=M_c$  (точка *c*).

*в) пусковой, максимальный и номинальный моменты асинхронного двигателя*

1) *пусковой момент.*  $M_{пуск}$  составляет одну из его важнейших эксплуатационных характеристик. Значение пускового момента получается из общего выражения момента при  $S=1$

$$M_{пуск} = \frac{m_1 P}{2\pi f_1} \frac{u_1^2 r_2^1}{[(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]} = \frac{m_1 P}{2\pi f_1} \frac{u_1^2 r_2'}{r_k^2 + x_k^2} \quad (79)$$

Из формулы (79) видно, что пусковой момент:

- при заданной частоте  $f_1$  и параметрах двигателя прямо пропорционален квадрату напряжения статора  $U_1^2$ ;

- достигает максимума при условии, что активное сопротивление ротора равно индуктивному сопротивлению рассеяния

$$r_2' + r_{доб}' = x_1 + x_2' \quad (80)$$

Пусковой момент обычно выражается отношением:  $k_{II} = \frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$ , называемым кратностью пускового момента.

2) *максимальный или опрокидывающий момент  $M_{max}$* , находим, взяв производную  $dM/dS$  и

$$r_1^2 + x_k^2 = \frac{r_2'^2}{S_m^2}$$

приравняв её к нулю. Из полученного равенства определим скольжение  $S_m$ , при котором момент будет максимальным. Таким образом, скольжение соответствующее максимальному моменту

$$S_m = \frac{r_2^1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \quad (81)$$

Подставив (81) в общее выражение вращающего момента (78), получим

$$M_{MAX} = \frac{m_1 P}{4\pi f_1} \left[ \frac{u_1^2}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \right] \quad (82)$$

В нормальном асинхронном двигателе  $r_1$  значительно меньше  $x_k$ , и поэтому можно считать  $r_1=0$ . Тогда выражение для максимального момента приобретает вид:

$$M_{MAX} = \frac{m_1 P}{4\pi f_1} \frac{U_1^2}{X_k} \quad (83)$$

Из формулы (80) следует, что максимальный момент:

- при заданной частоте и заданных параметрах двигателя пропорционален квадрату напряжения статора  $U_1^2$ ;
- не зависит от активного сопротивления цепи ротора;
- получается при тем большем скольжении (меньшей частоте вращения), чем больше активное сопротивление цепи ротора;
- г) получается тем меньше, чем больше индуктивное сопротивление рассеяния первичной и вторичной цепи.

Таким образом, при увеличении активного сопротивления цепи ротора максимальный момент, не меняясь по величине, перемещается в область больших скольжений (см. рисунок 20). Кривые  $M=(S)$  при разных значениях  $r_{доб}$ .

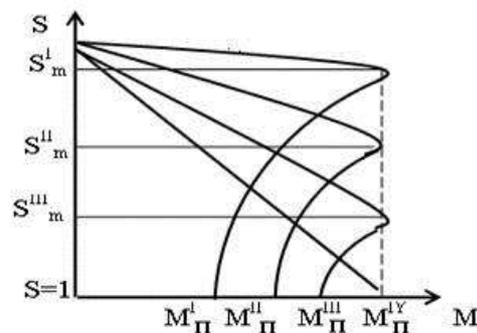


Рисунок 20 - Кривые  $M=(S)$  при значениях  $r_{доб}$

Показанные на рисунке 20 четыре кривые момента соответствуют четырем различным значениям добавочного активного сопротивления в  $r_{доб}$  в цепи ротора. Кривая 1 получается при  $r_{доб} = 0$  (естественная характеристика).

Подбор величины  $r_{доб}$  диктуется необходимой величиной пускового момента в зависимости от требований электропривода. Предельная величина пускового момента равна максимальному

$$S_m = \frac{r_2 + r_{доб}}{x_k} - 1$$

моменту (кривая 4). При этом , откуда может быть определена величина  $r_{доб} = r_k - r_2$  для условия  $M_{пуск} = M_{макс}$ . Введением реостата в цепь ротора одновременно уменьшают и величину пускового тока.

Работа асинхронного двигателя становится неустойчивой при скольжениях  $s > s_m$ . Если момент двигателя равен максимальному, а скольжение  $s \sim s_m$ , то увеличение нагрузочного момента  $M_c$  вызовет увеличение  $s$ , а следовательно, уменьшение вращающего момента. Это приведет к дальнейшему увеличению скольжения до тех пор, пока скольжение  $s$  станет равным единице, т.е. пока ротор двигателя не остановится (опрокидывание двигателя).

Таким образом, при достижении вращающим моментом максимального значения наступает предел устойчивого режима работы асинхронного двигателя. Следовательно, для устойчивой работы двигателя необходимо, чтобы вращающий момент был меньше максимального. В этом случае двигатель будет работать устойчиво не только при номинальной нагрузке, но будет выдерживать и перегрузки, что необходимо для надежной работы двигателя в электроприводе.

Другими словами двигатель должен обладать перегрузочной способностью, которая определяется отношением максимального момента к номинальному (коэффициент перегрузки):

$$k_M = \frac{M_{MAX}}{M_{НОМ}} = 1,7 \div 2,5 \quad (84)$$

3) Номинальный момент асинхронного двигателя имеет место при номинальном скольжении  $S_H$ , когда нагрузка на валу двигателя равна номинальной, на которую рассчитан двигатель. Номинальный момент двигателя определяется по формуле:

$$M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_{2к}}, \text{ [Н}\cdot\text{м]}, \quad (85)$$

где  $P_H$  - номинальная мощность двигателя, Вт,  
 $n_{2к}$  - номинальная частота вращения ротора

$$n = \frac{60 \cdot f_1}{p} (1 - S_H) \quad (86)$$

, [об./мин].

### Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Под рабочими характеристиками асинхронного двигателя понимается зависимость частоты вращения  $n_2$ , развиваемого вращающего момента  $M$ , коэффициента мощности  $\cos\phi_1$ , коэффициента полезного действия  $\eta$  от полезной активной мощности на валу двигателя  $P_2$ .

а) частота вращения ротора  $n = f(P_2)$

Из формулы для скольжения следует, что  $n_2 = n_1(1 - S)$ . С другой стороны  $S = P_{м2} / P_{эм}$ , т.е. скольжение численно равно отношению потерь в обмотке ротора  $P_{м2}$  развиваемой двигателем электромагнитной мощности  $P_{эм}$ .

В режиме холостого хода  $P_{м2}$  очень малы по сравнению с  $P_{эм}$ , и поэтому здесь  $S = 0$  и  $n_2 = n_1$ . По мере увеличения нагрузки отношение  $P_{м2} / P_{эм}$  растет, но для поддержания высокого КПД оно ограничено и при номинальной нагрузке составляет 1,5-3%.

Зависимость представляет кривую, слабо наклоненную к оси абсцисс (рисунок 21), т.е. асинхронный двигатель имеет скоростную характеристику двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

б) момент вращения  $M = f(P_2)$

При установившемся режиме работы  $M = M_2 + M_0$ ,

где  $M_2$  - полезный тормозной момент двигателя;

$M_0$  - момент холостого хода.

Так как при изменении нагрузки  $P_2$  от холостого хода до номинальной частота вращения ротора изменяется незначительно, то зависимость  $M = f(P_2)$  почти прямолинейна.

в) коэффициент полезного действия  $\eta = f(P_2)$

В асинхронном двигателе имеют место следующие виды потерь: механические потери, потери в обмотках статора и ротора, потери в сердечнике статора и добавочные потери.

Добавочные потери вызываются высшими гармониками намагничивающих сил и учитываются приближенно. Согласно ГОСТ 183-55 добавочные потери  $P_{доб}$  при номинальной нагрузке составляют 0,5% от подводимой мощности.

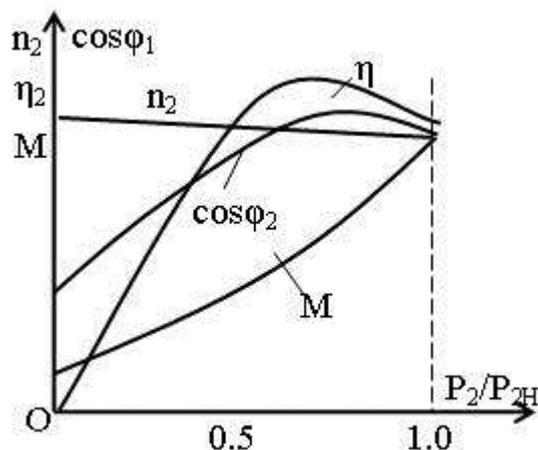


Рисунок 21- Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Полные потери в двигателе равны:

$$\Sigma P = P_{M1} + P_{M2} + P_{C1} + P_{Mex} + P_{доб}, \quad (87)$$

где  $P_{M1} + P_{M2}$  - переменные потери, пропорциональные квадрату тока нагрузки;  
 $P_{C1} + P_{Mex} + P_{доб}$  - постоянные потери.

Максимум КПД достигается при равенстве постоянных и переменных потерь. На рисунке 21 показана типичная кривая КПД асинхронного двигателя, достигающая максимума примерно при 75% номинальной нагрузки.

г) коэффициент мощности  $\cos \varphi = f(P_2)$ .

Асинхронный двигатель потребляет из сети, как и трансформатор, отстающий ток, почти не зависящий от нагрузки. Поэтому, его коэффициент мощности всегда меньше единицы. При холостом ходе он не превышает 0,2, а затем, с увеличением нагрузки, он довольно быстро растет и достигает максимума при нагрузке, близкой к номинальной. При дальнейшем росте нагрузки частота вращения ротора падает, соответственно чему увеличивается угол  $\psi_2 = \arctg Sx_2 / r_2$ , и указываются  $\cos \psi_2$  и  $\cos \varphi$ .

### Вопросы для самоконтроля

1. Вращающий момент асинхронного двигателя
2. Пусковой, максимальный и номинальный моменты асинхронного двигателя
3. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

## Тема 15. Пуск и регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей.

Пусковые характеристики асинхронных двигателей тесно связаны с их конструкцией. Двигатели с фазной обмоткой ротора имеют, по сравнению с двигателями с короткозамкнутой обмоткой ротора, лучшие пусковые характеристики, так как включением в цепь ротора пускового реостата можно уменьшить пусковой ток  $I_n$  и одновременно увеличить пусковой момент  $M_n$ . Но двигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора дешевле, надежнее в работе и имеют лучшие рабочие характеристики. Многочисленные попытки сочетать в одной конструктивной форме преимущества обоих типов двигателей, избежав их недостатков или сведя их до минимума, показали, что эту задачу пока нельзя считать решенной. Наилучших результатов добились, применяя двигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора специального исполнения. В связи с ростом пропускной способности распределительных сетей такие двигатели в настоящее время выполняются на мощности порядка тысяч киловатт.

Главными способами пуска асинхронных двигателей являются: а) пуск в ход с помощью реостата, вводимого в цепь ротора двигателя с фазной обмоткой ротора; б) включение в сеть двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора при  $U_n = U_M$  (прямое включение); в) то же при  $U_n < U_n$ .

а) пуск двигателей с фазной обмоткой ротора.

Сопротивление  $r_{\partial}$  пускового реостата (см. рисунок 22) выбирается из соображений ограничения пускового тока. Обычно величина пускового тока получается допустимой при таком сопротивлении  $r_{\partial}$ , когда начальное значение пускового момента  $M_n$  равно максимальному моменту  $M_m$ . Тогда  $S_M = 1$  и по формуле

$$S_M = \pm \frac{r_2}{x_1 + x_2} = \frac{r_2'}{x_k} \quad (88)$$

$$r_2' = x_k - r_2' \quad (89)$$

Плавность пуска двигателя достигается устройством в реостате нескольких ступеней сопротивления. На рисунке 23 а приведены механические характеристики двигателя для пяти значений сопротивления  $r_{\partial}$ , а на рисунке 23 б - соответствующие зависимости тока от скорости вращения ротора.

Для уменьшения времени пуска выключение отдельных ступеней сопротивления следует производить при скорости вращения, соответствующей наибольшему вращающему моменту  $M_m$  двигателя, для остающегося сопротивления цепи ротора, как это показано на рисунке 23.

Одновременное уменьшение пускового тока  $I_n$  и увеличение момента  $M_n$  объясняется тем, что при включении в цепь ротора добавочного сопротивления  $r_{\partial}' < x_k - r_2'$  уменьшается угол  $\psi_2'$  между э.д.с.  $E_2'$  и током  $I_2'$  (увеличивается активная составляющая тока ротора  $I_2' \cos \psi_2'$ ) и увеличивается вращающий момент  $M_n$ . При сопротивлении цепи ротора  $r_{\partial}' + r_2' > x_k$  активная составляющая тока уменьшается, а это снижает вращающий момент.

Включение в сеть двигателя с разомкнутой обмоткой ротора может вызвать значительные всплески тока, как это имеет место при включении ненагруженного трансформатора. Поэтому, начала первых ступеней сопротивления трех фаз реостата соединяются в общую точку. Наличие замкнутой вторичной цепи предохраняет также от перенапряжений в обмотках статора и ротора при выключении двигателя.

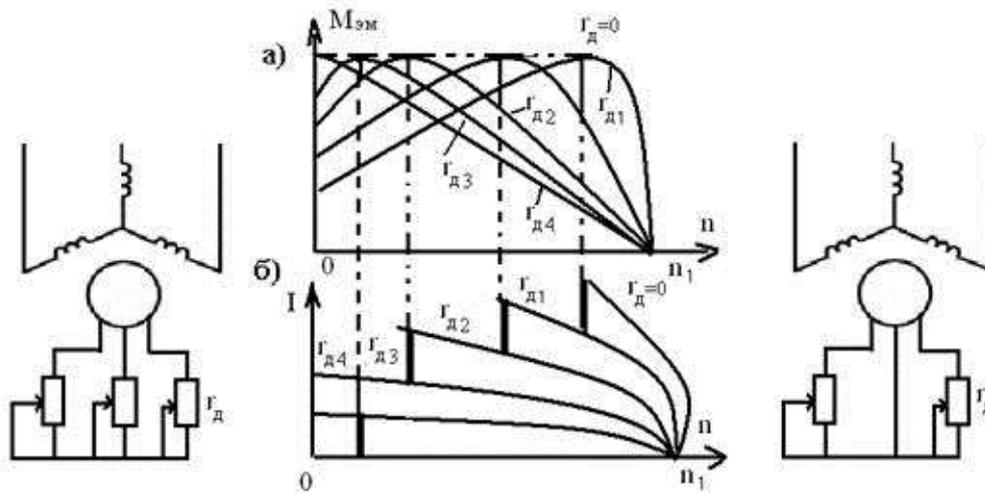


Рисунок 22- Включение симметричного пускового реостата

Рисунок 24 - Включение несимметричного реостата

Рисунок 23 - Пуск двигателя с реостатом цепи ротора:  
а - изменение момента;  
б - изменение тока реостата

Для пуска двигателей малой и средней мощности применяются металлические реостаты, чаще всего с масляным охлаждением, для двигателей большой мощности - водяные реостаты с подвижными электродами.

Для уменьшения числа контактов и удешевления пускового реостата иногда добавочные сопротивления вводят только в две фазы обмотки ротора (см. рисунок 24), что вызывает асимметрию тока ротора, асимметрию систему токов в общем случае можно разложить на три симметричные системы с различным порядком следования фаз. Но система нулевой последовательности токов в данном случае отсутствует, так как средние точки реостата и обмотки ротора не соединяются. Система прямого следования фаз и система обратного следования фаз вращаются относительно ротора с одинаковой скоростью

$$n_2 = 60f_2 / p = n_1 s, \tag{90}$$

но в противоположные стороны.

Ротор вращается со скоростью  $n = n_1(1 - s)$ . Следовательно, скорость вращения прямого поля относительно статора

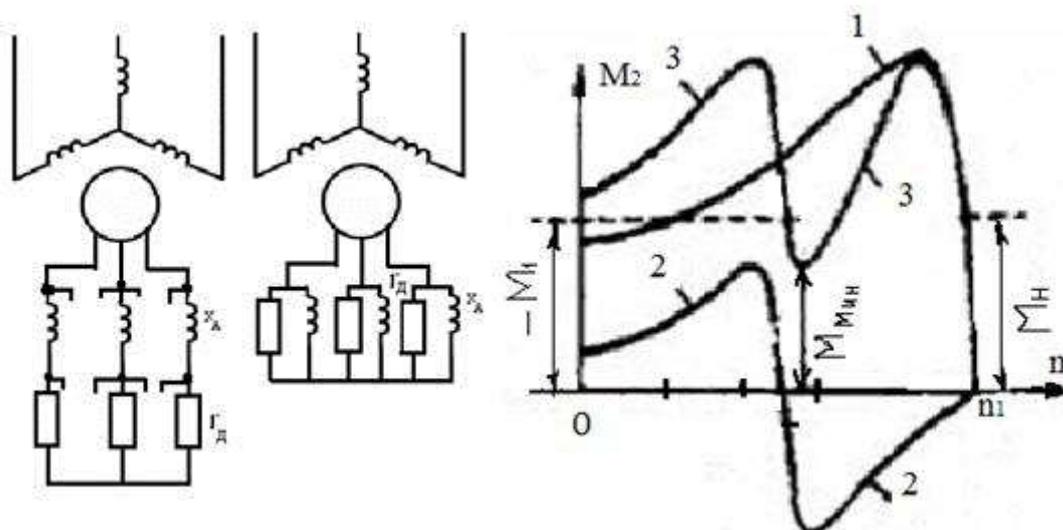
$$n + n_2 = n_1(1 - s) + n_1 s = n_1, \tag{91}$$

скорость вращения обратного поля

$$n_2 - n = n_1(1 - s) - n_1 s = n_1(1 - 2s). \tag{92}$$

Таким образом, прямое поле вращается синхронно с полем статора, их взаимодействие создает на валу машины вращающий момент (линия 1 на рисунке 26).

Обратное поле ротора вращается в пространстве с переменной скоростью, причем при изменении скольжения от  $s = 1$  до  $s = 0,5$ . Обратное поле вращается против вращения ротора; при  $s = 0,5$  скорость обратного поля  $n_1(1-2s)=0$ , а при изменении скольжения от  $s = 0,5$  до нуля направление вращения обратного поля совпадает с направлением вращения ротора.



а - последовательно с  $r_d$ ;  
б - параллельно с  $r_d$ .

Рисунок 25 - Включение индуктивного сопротивления в цепь ротора

Рисунок 26 - Механическая характеристика при несимметрии токов ротора

Для обратно вращающегося поля ротора можно считать обмотку статора замкнутой накоротко, так как сопротивление сети очень мало. Поэтому взаимодействие обратного поля ротора с короткозамкнутой обмоткой статора при скорости вращения ротора  $n < n_1/2$  приводит к увеличению вращающего момента двигателя, а при  $n > n_1/2$  момент, создаваемый

обратным полем, является тормозящим, как показано на рисунке 26 (линия 2). Результирующий момент представлен линией 3. Резкое снижение вращающего момента наблюдается при  $n \approx 0,5n_1$  и, если нагрузочный момент  $M_m$  окажется больше вращающего момента  $M_{мин}$ , то двигатель не достигнет нормальной для него скорости вращения, а будет устойчиво работать в точке  $a$  механической характеристики.

Такое же явление наблюдается вследствие асимметрии токов обмотки ротора при нарушении контактов в цепи ротора.

Для автоматизации процесса пуска в некоторых случаях в цепь ротора включают активное сопротивление  $r_d$  и последовательно или параллельно с ним индуктивное сопротивление  $x_d$ .

По схеме (см. рисунок 25, а) в первый момент пуска, когда  $s = 1$  и  $f_2 = f$ , индуктивное сопротивление велико и в основном ограничивает пусковой ток. По мере увеличения скорости вращения ротора частота  $f_2 = f_s$  уменьшается, соответственно чему уменьшаются э.д.с. ротора  $E_{2s}$  и индуктивное сопротивление  $X_{dS} = X_d$ . В результате ток в цепи ротора спадает медленнее, чем при наличии только сопротивления  $r_d$ , т. е. пусковая операция идет более плавно.

По схеме (см. рисунок 25, б) в начале пуска, когда частота  $f_2$  еще велика, велико и индуктивное сопротивление  $x_d$ , поэтому основная часть тока ротора идет через активное сопротивление, которое таким образом определяет пусковой ток и вращающий момент. По мере увеличения скорости вращения ротора индуктивное сопротивление уменьшается пропорционально частоте  $f_2 = f_s$  и к концу пуска почти весь ток ротора потечет по индуктивному сопротивлению. Такое перераспределение тока в цепи ротора позволяет иметь во время пуска почти постоянные значения вращающего момента и тока.

б) прямое включение асинхронного двигателя в сеть

При этом способе включения двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора явления, имеющие место в первый момент включения, те же, что и в короткозамкнутом трансформаторе. Сверхток короткого замыкания имеет две составляющие - периодическую, соответствующую установившемуся току короткого замыкания, и апериодическую, налагающуюся на первую составляющую и затухающую во времени. В асинхронных двигателях затухание второй составляющей тока короткого замыкания происходит очень быстро. Поэтому под пусковым током двигателя  $I_{п}$  обычно понимают только установившийся ток короткого замыкания.

Величина начального значения пускового тока обычно выражается отношением его к номинальному току и называется кратностью пускового тока. Для современных двигателей кратность пускового тока находится в пределах  $I_{п}/I_{н} = 4 \div 7$ , поэтому предохранители и тепловое реле должны выдерживать кратковременно значительные токи.

Возможность прямого включения электродвигателя в сеть определяется падением напряжения, зависящим от пускового тока и полного сопротивления линии и трансформатора. В настоящее время в связи с ростом мощностей распределительных систем допускается прямое включение в сеть двигателей мощностью в несколько сот и даже тысяч киловатт.

в) Включение двигателя в сеть при  $U_n < U_H$

Понижение напряжения включением индуктивного сопротивления

На рисунке 27, а показана схема включения двигателя 1 и индуктивного сопротивления 2. При пуске сначала замыкают рубильник 3, а затем при вращении ротора рубильник 4. Величина индуктивного сопротивления подбирается таким образом, чтобы кратность пускового тока  $I_{п}/I_{н} = 2 \div 2,5$ ; для этого нужно понизить напряжение на двигателе в 2-3 раза. Включение регулируемого индуктивного сопротивления позволяет осуществить плавный пуск двигателя. Начальное значение пускового момента уменьшается пропорционально  $(U_n/U_H)^2$ , т. е. в 4-9 раз.

Понижение напряжения автотрансформатором

Вместо индуктивного сопротивления можно применить автотрансформатор (см. рисунок 27, б). Применение автотрансформатора позволяет получить большую величину пускового момента, чем в случае индуктивного сопротивления при одинаковых токах в линии. Если сохранить прежнее значение  $I_{п}/I_{н} = 2 \div 2,5$ , то требуется понижение напряжения автотрансформатором только в 1,5-2 раза, а это приводит к уменьшению пускового момента в 2-4 раза.

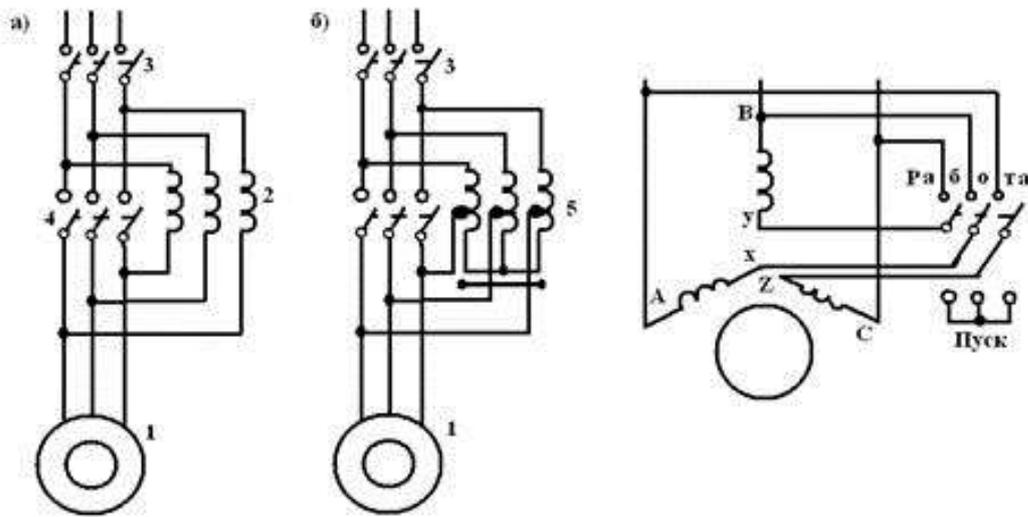


Рисунок 28 - Пуск двигателя переключением с треугольника на звезду

- а - индуктивным сопротивлением;  
 б – автотрансформатором.  
 Рисунок 27 - Понижение напряжения при пуске

Недостатком обоих способов пуска является значительная стоимость пусковой аппаратуры.

Переключение треугольник - звезда

В этом случае пуск осуществляется следующим образом (см. рисунок 28). Переключатель ставится в положение «пуск» и обмотка статора включается в сеть. При скорости вращения, близкой к номинальной, перебрасывают переключатель в положение «работа», чем и заканчивается пусковая операция.

При пусковом положении переключателя обмотки статора соединены звездой, при рабочем положении - треугольником.

Пусть  $U_{л}$  - напряжение в линии;  $U_{Y}$  и  $U_{\Delta}$  - напряжения на фазу при соединении обмоток статора звездой и треугольником;  $I_{п.л.Y}$ ;  $I_{п.ф}I_{п.л\Delta}$ ;  $I_{п.ф\Delta}$  - пусковые токи в линии и в фазах обмотки статора при ее соединении звездой и треугольником. При соединении обмотки звездой

$$I_{н.фY} = I_{н.лY} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}Z_k} \quad (93)$$

Если включить двигатель в сеть при соединении обмотки статора треугольником, то

$$I_{н.ф\Delta} = \frac{U_{\Delta}}{Z_k} \quad (94)$$

$$I_{н.л\Delta} = I_{н.ф\Delta} \sqrt{3} = \frac{U_{л} \sqrt{3}}{Z_k} \quad (95)$$

Из сопоставления этих формул следует, что  $\frac{I_{н.лY}}{I_{н.л\Delta}} = \frac{1}{3}$ .

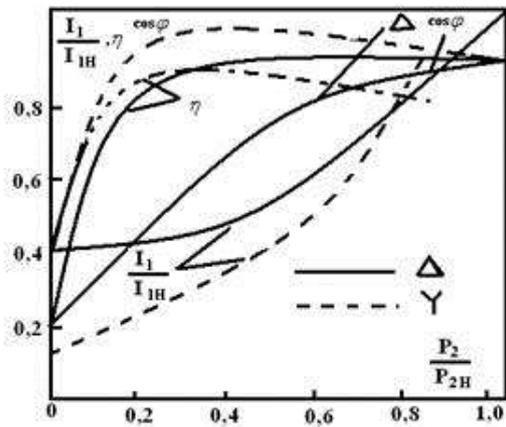


Рисунок 29 - Рабочие характеристики асинхронного двигателя при соединении обмотки статора треугольником и звездой

Таким образом, пусковой ток в линии при соединении статора звездой в три раза меньше, чем при соединении треугольником. Это весьма ценное преимущество рассматриваемого способа пуска. Но так как при соединении обмоток статора звездой фазное напряжение в  $\sqrt{3}$  раз меньше, чем при соединении треугольником, то пусковой момент  $M_n$  тоже уменьшается в три раза

$$M_{II} = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{2\pi f [(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (96)$$

Поэтому рассматриваемый способ пуска в ход применяется только там, где нагрузочный момент при пуске значительно меньше номинального.

К недостаткам данного способа относится неплавность пусковой операции, имеющей всего только две пусковые ступени, и увеличение продолжительности пуска.

Способ переключения треугольник - звезда применяется не только для пуска двигателей в ход, но также для улучшения  $\cos \varphi$  и к.п.д. двигателей при малых нагрузках (не превышающих 0,4 номинальной). Переключив обмотки статора с треугольника на звезду, уменьшают фазное напряжение в  $\sqrt{3}$  раза при том же линейном напряжении. Следовательно, э.д.с.  $E_2$  и поток  $\Phi_{эм}$  уменьшаются, так как  $E_1 \approx U_1$  и  $n_1$ , и  $\Phi_{эм} \approx E_1$ . Это приводит к уменьшению намагничивающего тока  $I_0$  несколько больше, чем в  $\sqrt{3}$  раз, так как магнитная цепь двигателя обычно насыщена, а также к уменьшению потерь в стали приблизительно в 3 раза, так как они зависят от магнитного потока во второй степени.

Но, согласно формуле

$$M_{эм} = k_M I_2 \Phi_{эм} \quad (97)$$

Если момент  $M_m$  задан ( $M_m = \text{const}$ ), то уменьшение потока  $\Phi_{эм}$  вызывает соответствующее увеличение тока в роторе  $I_2'$  за счет большего скольжения  $s$ :

$$I_2' = \frac{U'}{\sqrt{(r_1 + r_{2H}'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (98)$$

Это приводит к увеличению потерь в обмотке ротора примерно в 3 раза.

В обмотке статора ток равен геометрической сумме намагничивающего и приведенного вторичного токов. При соединении звездой первый уменьшается, а второй увеличивается.

Поэтому при малых нагрузках, где главную роль играет намагничивающий ток  $I_0$ , ток в статоре  $I_1$  уменьшается; но при относительно больших нагрузках, где большее значение имеет приведенный вторичный ток  $I'_2$ , ток  $I'_1$  при соединении звездой может оказаться больше, чем при соединении треугольником (см. рисунок 29).

Из сказанного следует, что к.п.д. двигателя при соединении звездой немногим отличается от к.п.д. при соединении треугольником; при малых нагрузках, не превышающих 40% номинальной, он несколько выше, но затем быстро уменьшается.

При малых нагрузках переключение с треугольника на звезду оказывает большое влияние на  $\cos\phi$  двигателя (см. рисунок 29).

#### Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей

Асинхронный двигатель, как правило, используется в электроприводе с постоянной скоростью вращения, однако в ряде случаев требуется эту скорость регулировать.

Из формулы 
$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$
 следует, что скорость вращения ротора асинхронного двигателя

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s) \quad (99)$$

Таким образом, чтобы изменить скорость вращения ротора, необходимо изменить либо скольжение  $s$ , либо скорость вращения поля статора  $n_1$ . Последнее достигается изменением числа пар полюсов обмотки статора или же частоты тока в обмотке статора.

Перечисленные способы имеют существенные недостатки, и поэтому было предложено большое число соединений (каскадов) асинхронного двигателя с другими электрическими машинами для получения необходимых характеристик скорости:

##### а) изменение скольжения

Проще всего регулирование скольжения осуществляется в двигателе с фазной обмоткой ротора, введением добавочного активного сопротивления (см. рисунок 22). Процесс регулирования скорости вращения ротора этим способом рассматривается при постоянстве подведенного к двигателю напряжения  $U_1$ , и частоты  $f$ . Момент  $M_2$  считается также постоянным.

При отсутствии добавочного сопротивления в цепи ротора скольжение двигателя в установившемся режиме определяется точкой пересечения линии нагрузочного момента ( $M_m$ ) и характеристики скорости 1 (см. рисунок 30), соответствующей скорости вращения  $n'$ . Если ввести сопротивление в цепь ротора, то  $U_1$  останется постоянным согласно условию, следовательно, останутся постоянными э.д.с.  $E_1$  и поток  $\Phi_{\dot{m}}$ . Так как ротор обладает инерцией, то в ближайший момент времени после введения реостата, скорость вращения ротора останется прежней и, соответственно этому, сохраняется величина э.д.с. ротора  $E'_{2s} = E'_2 s$ . Ток ротора

$$I'_2 = \frac{E'_2 s}{\sqrt{(r'_2 + r'_D)^2 + (x'_2 s)^2}}, \quad (100)$$

уменьшается вследствие увеличения сопротивления цепи ротора до значения  $r'_2 + r'_D$ , а это приводит к уменьшению вращающего момента

$$M_{\dot{m}} = k_M I'_2 \Phi_{\dot{m}} \quad (101)$$

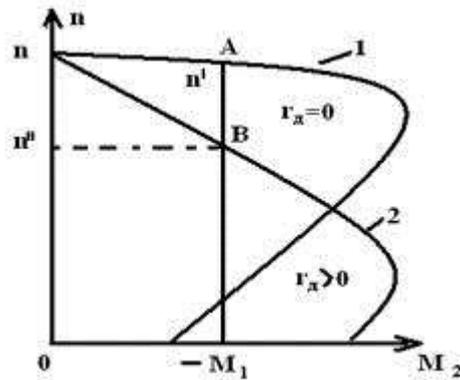


Рисунок 30 - Скорость вращения при различных сопротивлениях цепи ротора

Так как нагрузочный момент  $M_m$  остается постоянным, то он будет превышать вращающий момент, на валу двигателя появится отрицательный динамический момент  $M_j = M_2 + M_T$  и скорость вращения ротора начнет уменьшаться. Соответственно возрастающему скольжению  $s$  будет также увеличиваться э.д.с.  $E'_2 s$  и ток  $I'_2$ . Процесс уменьшения скорости вращения и увеличения тока  $I'_2$  будет происходить до тех пор, пока активная составляющая этого тока  $I'_2 \cos \varphi_2$  не достигнет прежнего значения. Вращающий момент  $M_2$  станет равным нагрузочному моменту ( $-M_m$ ), и ротор будет вращаться с установившейся скоростью  $n''$  меньшей, чем до введения реостата (точка  $B$  характеристики).

Так как ток ротора и магнитный поток при уменьшении скорости вращения не претерпевают изменений, то ток статора  $I_1$  и  $\cos \varphi_2$  также остаются без изменений, поэтому потребляемая двигателем мощность  $P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1$  не изменяется. Полезная мощность уменьшается вследствие уменьшения скорости вращения и при постоянном моменте  $M_2$ . Следовательно, КПД двигателя

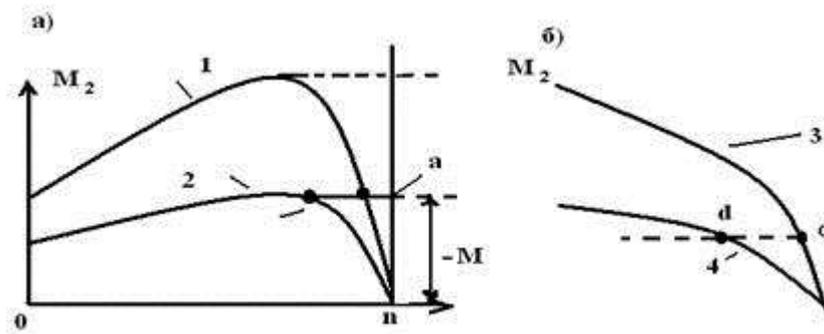
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{M_2 2\pi / 60}{P_1} \equiv n \quad (102)$$

уменьшается пропорционально уменьшению скорости вращения.

С уменьшением скорости вращения происходит ухудшение вентиляции двигателя, поэтому одновременно необходимо также понижать нагрузочный момент  $M_m$ .

Наклон характеристик скорости с увеличением сопротивления цепи ротора увеличивается, это понижает устойчивость работы двигателя, т. е. малые изменения нагрузочного момента вызывают большие колебания скорости вращения.

В случае резко нарастающих нагрузок «смягчение», т. е. увеличение наклона характеристики скорости желательно для использования кинетической энергии  $J \omega^2 / 2$ , запасенной во вращающихся частях привода с общим моментом инерции  $J$ . При повышении нагрузки скорость вращения двигателя понижается, и динамический момент способствует преодолению нагрузочного момента  $M_T$ , уменьшая таким образом вращающий момент  $M_2$  двигателя. Это позволяет выбрать двигатель меньшей мощности и понизить наибольший ток статора.



а - при малом активном сопротивлении ротора; б - при большом сопротивлении.  
 Рисунок 31 - Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением напряжения

Изменение скольжения может быть получено также за счет изменения подведенного к двигателю напряжения  $U_i$ ; однако при малом сопротивлении цепи ротора скольжение изменяется в узких пределах вследствие большого угла наклона механической характеристики (см. рисунок 31, а). Механическая характеристика 1 построена для номинального напряжения  $U_{IH}$ , критическое скольжение  $S_M=0,2$  (в двигателях средней и большой мощности  $S_M$  значительно меньше). При уменьшении напряжения ординаты механической характеристики уменьшаются пропорционально  $(U_i/U_{IH})^2$ . Характеристика 2 соответствует уменьшению напряжения на  $0,3 U_{IH}$ . При заданном нагрузочном моменте скольжение будет изменяться в пределах между точками а и в, т. е. скорость вращения изменится не более чем на 15%. Но при этом пусковой момент  $M_n$  становится меньше момента ( $M_m$ ), вследствие чего резко снижается перегрузочная способность двигателя. При увеличении сопротивления цепи ротора пределы регулирования скорости вращения значительно расширяются, особенно если  $S_M$  становится равным единице, однако при этом понижается устойчивость работы двигателя.

На рисунке 31, б приведены механические характеристики двигателя при  $S_M=1$  для номинального напряжения (линия 3) и для пониженного на 30% напряжения (линия 4). Регулирование скорости вращения при заданном значении  $M_T$  находится в пределах с-д.

Пределы регулирования скольжения зависят также от характера изменения нагрузочного момента, от скорости вращения; эти пределы уменьшаются, если момент  $M_m$  возрастает с увеличением скорости вращения.

Регулирование напряжения может производиться автотрансформатором, переменным индуктивным сопротивлением или другими способами.

#### б) изменение числа пар полюсов

При изменении числа пар полюсов обмотки статора изменяется скорость вращения поля статора, а следовательно, и скорость вращения ротора. Число полюсов может быть только целым, поэтому изменение скорости вращения будет ступенчатым. Особенно большие ступени получаются при малом числе полюсов.

Изменение числа полюсов может быть достигнуто двумя способами: на статоре можно уложить две обмотки, каждая из которых имеет требуемое число полюсов, или же использовать одну обмотку, допускающую переключение на разное число полюсов.

В двигателе с переключением числа полюсов ротор обычно выполняется с короткозамкнутой обмоткой, так как применение фазной обмотки с переключением числа полюсов значительно усложняет изготовление ротора.

Наиболее простая схема переключения числа полюсов обмотки получается при отношении скоростей вращения 1:2.

Двухслойные обмотки предпочтительнее, так как они обеспечивают лучшую форму магнитного поля в зазоре. Шаг обмотки выбирается таким образом, чтобы он был близким к полюсному делению при большем числе полюсов. На рисунке 32 представлена схема обмотки, фаза которой состоит из двух катушек  $AB$  и  $CD$ . Показанное на рисунке 32, а направление тока при соединении конца катушки  $B$  с началом катушки  $C$  создает четыре полюса. При изменении направления тока в катушке  $CD$  получается два полюса (см. рисунок 32, б) Изменение направления тока в катушке  $CD$  может быть получено и при параллельном соединении катушек (см. рисунок 32,

в). При этом требуется только три выведенных конца вместо четырех по схеме (см. рисунок 32, б), а при внутреннем соединении трехфазной обмотки звездой или треугольником только шесть концов. При изменении числа полюсов может изменяться также индукция в зазоре и приблизительно пропорционально ей - вращающий момент двигателя.

Индукция в зазоре зависит от величины вращающегося магнитного потока и полюсного деления. Магнитный поток определяется приложенным к обмотке напряжением, числом последовательно соединенных витков и обмоточным коэффициентом.

При одинаковом фазном напряжении магнитный поток при параллельном соединении будет в 2,5 раза больше, чем при последовательном (в два раза за счет половинного числа последовательно соединенных витков и в 1,25 раза за счет меньшего обмоточного коэффициента). При переходе от удвоенного числа полюсов к меньшему полюсное деление увеличивается в два раза. Таким образом, индукция в зазоре  $B_{\delta}$  и, следовательно, вращающий момент при переходе к большей скорости вращения возрастает в 1,25 раза. Соединение фазных обмоток при высшей скорости вращения в этом случае выполняется звездой с двумя параллельными ветвями (YY), а при низшей - звездой (Y).

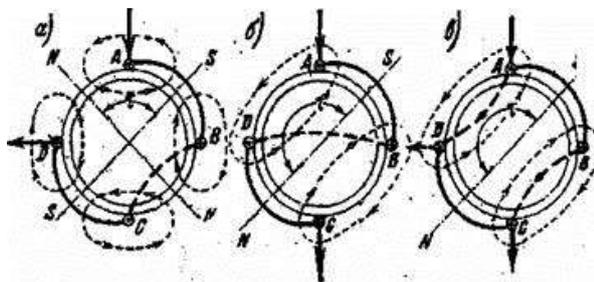


Рисунок 32 - Регулирование скорости вращения изменением числа пар полюсов двигателя

Эта схема переключения обмоток пригодна для двигателей привода вентиляторов.

Для получения приблизительно одинакового вращающего момента при обеих скоростях вращения, например, у двигателя для привода компрессора; применяется схема соединения обмоток YY/A. В этом случае фазное напряжение при переходе к высшей скорости вращения уменьшается в  $\sqrt{3}$ , следовательно, магнитный поток увеличивается только в 1,45 раза. Вследствие увеличения полюсного деления в два раза индукция в зазоре и вращающий момент при высшей скорости вращения составляют 0,7 индукции и момента при низшей скорости. Увеличение вращающего момента может быть достигнуто за счет соответствующего выбора шага обмотки и повышения плотности тока при высшей скорости вращения.

При необходимости сохранения одинаковой мощности на обеих ступенях скорости вращения (для привода металлорежущих станков) применяется схема переключения обмотки  $\Delta/YY$ .

в) Изменение частоты питающей сети

Этот способ применяется в тех случаях, когда требуется регулировать скорость вращения одного или нескольких двигателей одновременно или получить скорость вращения более 3000 об/мин.

В качестве примера можно привести привод 1 ребных винтов на судах, привод двигателей в деревообделочной промышленности со скоростью вращения 12000 об/мин, привод электрошпинделей для шлифовки со скоростью вращения до 150 000 об/мин.

При питании двигателей от синхронного генератора изменение частоты достигается изменением скорости приводного двигателя. Это возможно только в сравнительно узких пределах. Существуют специальные схемы, которые позволяют регулировать частоту тока без изменения скорости приводного двигателя.

С изменением частоты тока будут изменяться в общем случае все величины, характеризующие работу двигателя: напряжение на зажимах, поток, ток холостого хода, вращающий момент, мощность, перегрузочная способность, скорость вращения. Анализ этого способа регулирования скорости отличается значительной сложностью. Поэтому приводятся только конечные результаты без вывода их.

Пусть поставлено условие, чтобы двигатель работал при переменной частоте, но с практически постоянными значениями КПД,  $\cos\varphi$ , перегрузочной способности  $M_m$  и постоянным абсолютным скольжением  $s$ . Если двигатель не насыщен, то поставленные условия соблюдаются при следующем соотношении между напряжением, частотой и вращающим моментом

$$\frac{U_1}{U_{11}} = \frac{f_1}{f_{11}} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}}, \quad (103)$$

где  $U_1$  и  $M_1$  - напряжение и вращающий момент при частоте  $f_1$ ;  
 $U_{11}$  и  $M_{11}$  - те же величины при частоте  $f_{11}$ .

Если  $M_1 = M_{11} = \cos nt$ ,  $\frac{U_1}{U_{11}} = \frac{f_1}{f_{11}}$ , т. е. напряжение, подводимое к двигателю, должно изменяться пропорционально частоте.

При использовании в качестве источника электроэнергии синхронного генератора изменение частоты и напряжения получается при постоянном возбуждении и изменяющейся скорости вращения.

Если двигатель работает на центробежный вентилятор или на гребной винт, то  $M_2 = f^2$ . В

этом случае  $\frac{U_1}{U_{11}} = \left(\frac{f_1}{f_{11}}\right)^2$ , т. е. напряжение на зажимах должно изменяться пропорционально частоте во второй степени. Этот режим соответствует работе синхронного генератора с током возбуждения, изменяющимся пропорционально скорости вращения.

Иногда подобное регулирование частоты применяется для пуска крупных асинхронных двигателей.

### Вопросы для самоконтроля

1. Пуск двигателей с фазной обмоткой ротора.
2. прямое включение асинхронного двигателя в сеть
3. Переключение треугольник - звезда
4. Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей
5. Изменение скольжения
6. Изменение числа пар полюсов
7. Изменение частоты питающей сети

### Тема 16. Асинхронные машины специального назначения.

**Сельсины** представляют собой особый вид электрических машин переменного тока мощностью от нескольких ватт до нескольких сот ватт (менее киловатта). Служит сельсин для дистанционной передачи механического угла поворота электрическим путем между устройствами, не имеющими между собой механической связи.

Всякий сельсин имеет статор и ротор, на которых расположены обмотки переменного тока. Существуют сельсины с однокатушечной обмоткой на статоре и трехкатушечной на роторе, и, наоборот, с трехкатушечной обмоткой на статоре и однокатушечной на роторе, и, наконец, с трехкатушечной обмоткой на статоре и с такой же обмоткой на роторе.

По своему назначению в схемах авторегулирования сельсины делятся на:

- сельсин-датчики,
- сельсин-приемники
- дифференциальные.

Для уяснения работы сельсина рассмотрим рис. 1, а.

Сельсин-датчик и сельсин-приемник своими однокатушечными обмотками статора подключены к одной и той же сети переменного тока, а трехкатушечные обмотки ротора

соединены между собой. Если теперь повернуть ротор датчика на произвольный угол, то на такой же угол повернется ротор приемника. Если ротор датчика вращать непрерывно с произвольной скоростью, то с такой же скоростью будет вращаться и ротор приемника.

Действие сельсинной связи основано на принципе электромагнитной индукции, заключающейся в следующем. Переменный ток однокатушечной обмотки статора индуктирует в трехкатушечной обмотке ротора токи, величины которых зависят от относительного расположения обмоток ротора и статора.

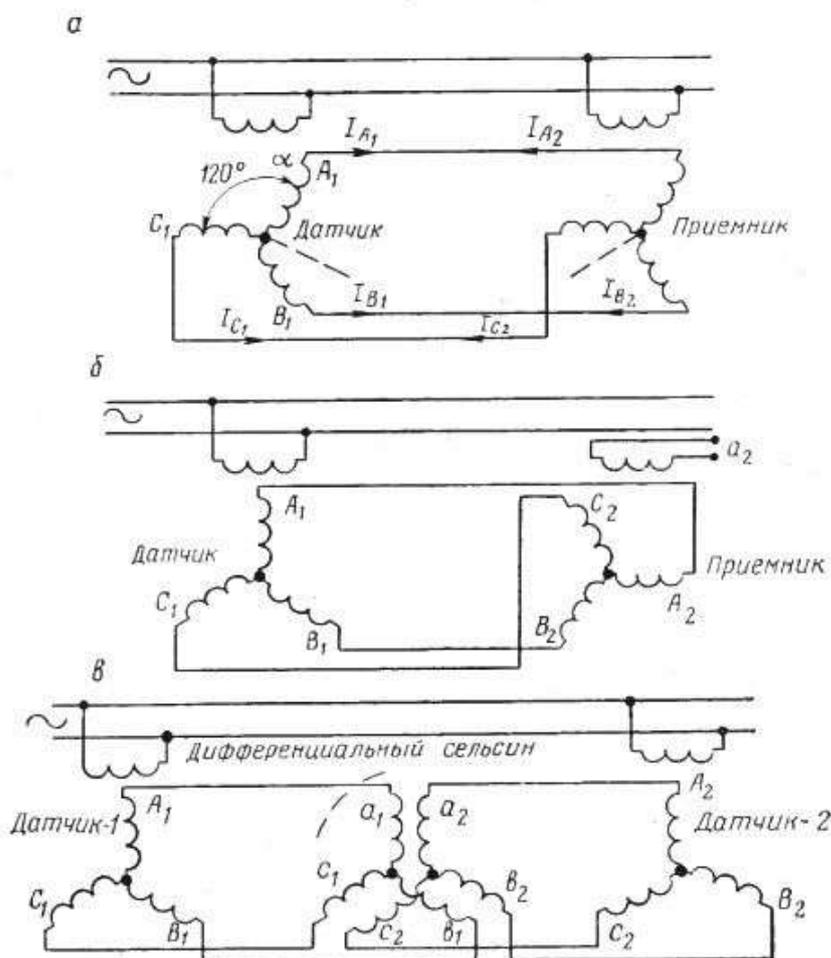


Рис. 1. Схемы включения сельсинов: а - по системе датчик - приемник; б - сельсин-приемник в трансформаторном режиме; в – дифференциального

Если роторы обоих сельсинов расположены одинаково по отношению к своим статорам, то токи в соединительных проводах роторов равны и противоположны между собой, и поэтому ток в каждой катушке равен нулю. Как следствие, равен нулю вращающий момент на валу одного и другого сельсинов.

Если теперь вручную или иным способом повернуть ротор сельсин-датчика на определенный угол, то нарушится равновесие токов между роторами, и на валу сельсин-приемника возникнет вращающийся момент, благодаря чему его ротор будет поворачиваться до тех пор, пока не исчезнет неравновесие, токов, т. е. пока этот ротор не примет то же положение, что и сельсин-датчик.

В системах авторегулирования нередко сельсин-приемник работает в трансформаторном режиме (рис. 1, б). В этом случае ротор приемника закрепляется неподвижно, а обмотка его статора отключается от сети. В этой обмотке индуктируется э. д. с. со стороны ротора, по обмоткам которого протекают токи, обуславливаемые положением ротора сельсин-датчика. Это означает, что величина э. д. с. на зажимах ротора приемника пропорциональна углу поворота датчика.



В исходном положении роторы смещены на  $90^\circ$  относительно друг друга и в этом случае индуцируемая на роторе датчика э. д. с. равна нулю. Теперь при повороте ротора-датчика на роторе приемника будет индуцироваться э. д. с.  $E_{пр}$ , пропорциональная углу рассогласования роторов

$$E_{пр} = E_{макс} \times \sin\theta$$

Дифференциальный сельсин применяется в тех случаях, когда нужно контролировать разность углов поворота двух осей, т. е. их рассогласование. В этом случае два сельсин-датчика находятся на двух валах, скорости которых сравниваются между собой. Трехкатушечными обмотками роторы этих сельсинов соединены с трехкатушечными обмотками статора и ротора третьего сельсина, являющегося дифференциальным (рис. 1, в). Угол поворота ротора дифференциального сельсина равен разности углов поворота сельсин-датчиков.

Стремление улучшить характеристики пуска асинхронных двигателей привело к созданию асинхронных двигателей с особой конструкцией ротора.

#### Двигатель с глубокими пазами на роторе.

От обычного асинхронного двигателя этот двигатель отличается тем, что у него пазы ротора сделаны в виде узких глубоких щелей, в которые вложены стержни обмотки ротора, представляющие собой узкие металлические полосы. С обеих сторон эти стержни приварены к замыкающим кольцам. В момент включения двигателя, когда ротор неподвижен и частота тока в обмотке ротора имеет наибольшее значение ( $f_2=f_1$ ), индуктивное сопротивление нижней части каждого стержня значительно больше верхней, т.к. она сцеплена с большим числом магнитных силовых линий поля рассеяния.

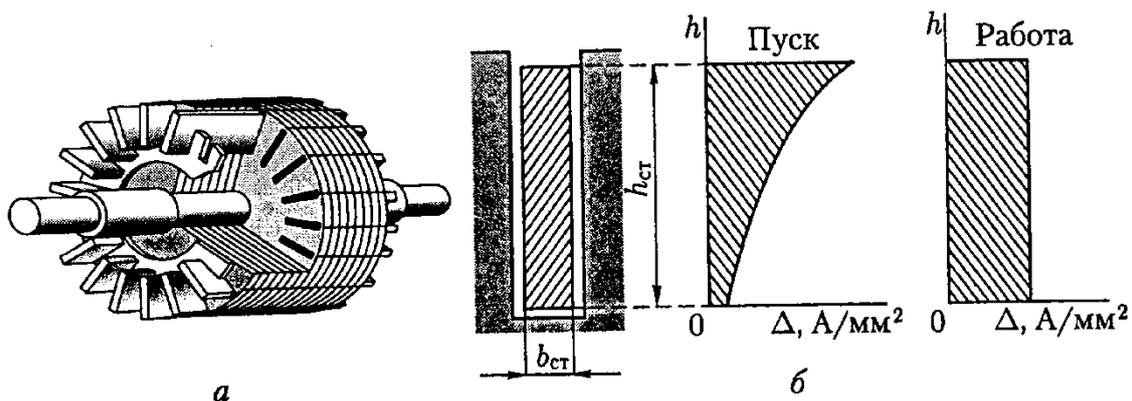


Рис. 15.6. Ротор с глубокими пазами:

*a* — устройство; *б* — распределение плотности тока ротора по высоте стержня при пуске и при работе двигателя

На рис. показан график распределения плотности пускового тока по высоте стержня ротора. Практически весь ток ротора проходит по верхней части стержня. Т.к. сечение всего стержня значительно больше сечения, по которому течет ток, такая конструкция будет равносильна увеличению активного сопротивления стержня ротора, что способствует росту пускового момента двигателя и некоторому ограничению пускового тока.

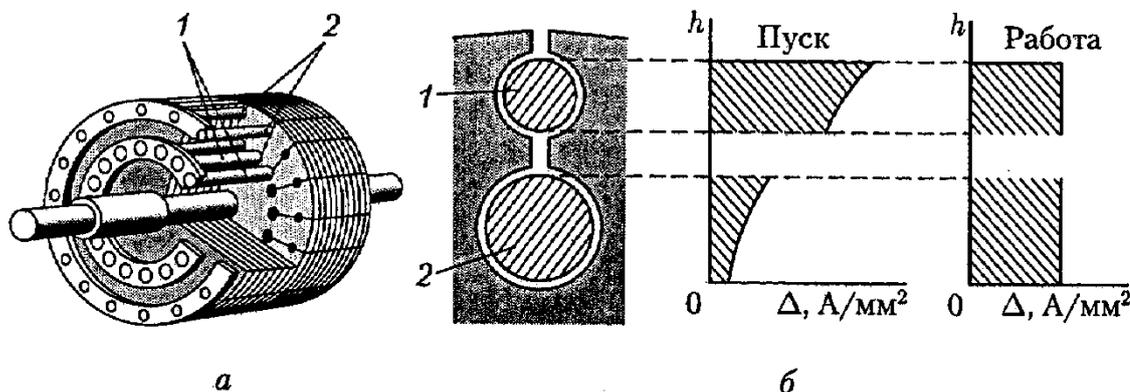


Рис. 15.8. Двухклеточный ротор:

*a* – устройство; *б* – распределение плотности тока в рабочей и пусковой клетках при пуске и работе двигателя

**Двигатель с двумя клетками на роторе.** Обладает значительно лучшими пусковыми характеристиками, чем простой асинхронный двигатель. На рис. изображены: **1 – рабочая клетка**, **2 – пусковая клетка**. Стержни пусковой клетки обычно выполняют из латуни или бронзы – материалов с более высоким, чем у меди активным сопротивлением. Индуктивное сопротивление рассеяния пусковой клетки не велико, т.к. она расположена вблизи воздушного зазора. Рабочая клетка, выполненная из меди обладает меньшим активным сопротивлением. В момент пуска двигателя ток ротора проходит в основном по верхней (пусковой) клетке, обладающей меньшим индуктивным сопротивлением. Повышенное активное сопротивление этой клетки обеспечивает значительный пусковой момент при пониженном пусковом токе. По мере увеличения частоты вращения ротора уменьшается частота тока в роторе, при этом индуктивное сопротивление клетки уменьшается, происходит перераспределение тока из области пусковой клетки в область рабочей клетки. Таким образом при пуске данного АД происходит постепенное перераспределение пускового момента между клетками.

### Вопросы для самоконтроля

1. Назначение, устройство, принцип действия сельсина.
2. Назначение, устройство, принцип действия двигателя с глубокими пазами на роторе.
3. Назначение, устройство, принцип действия двигателя с двумя клетками на роторе.

## Раздел 5 Синхронные машины

### Тема 17. Устройство синхронных машин.

Обмотка возбуждения создает магнитный поток возбуждения синхронной машины, который сцепляется с обмоткой якоря (статора) и индуцирует в ней ЭДС.

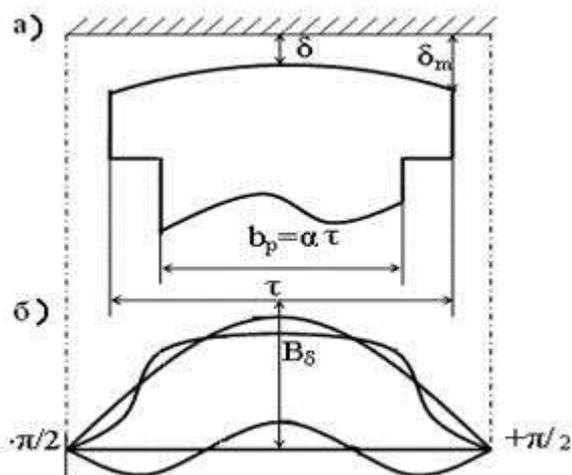


Рисунок 33 - Магнитное поле обмотки возбуждения явнополюсной машины

На рисунке 33 кривая  $I$  представляет собой распределение магнитной индукции поля возбуждения  $B_\delta$  на поверхности якоря. Кривую  $-B_\delta$  разлагают на основную и высшие гармоники, которые индуцирует в обмотке якоря основную и высшие гармоники ЭДС. Высшие гармоники ЭДС малы, так как малы высшие гармоники поля и, кроме того, выбором шага и распределением обмотки якоря достигается уменьшение высших гармоник ЭДС. Поэтому учитывается только основная гармоника ЭДС якоря, и соответственно потоком взаимной индукции между индуктором (ротором) и якорем считается основная гармоника поля возбуждения. Коэффициент формы кривой поля

$$k_\phi = \frac{B_{\phi m1}}{B_{\phi m}} \quad (104)$$

Магнитодвижущая сила (МДС) обмотки возбуждения на один полюс

$$F_B = \frac{\omega_B I_B}{2p} \quad (105)$$

где  $\omega_B$  - число витков обмотки возбуждения;

$I_B$  - ток возбуждения.

Амплитуда основной гармоники поля возбуждения

$$B_{\phi m1} = k_\phi B_{\phi m} = \frac{\mu_0 \cdot F_B k_\phi}{k_\delta k_{\mu\delta} \delta \cdot p} = \frac{\mu_0 \cdot \omega_B I_B}{k_\delta k_{\mu\delta} \delta \cdot p} \quad (106)$$

где  $k_\delta$  - коэффициент зазора;

$k_{\mu\delta}$  - коэффициент насыщения по продольной оси (оси полюсов).

Так как зазор  $\delta$  переменен, то величину  $k_\delta$  принято рассчитывать для среднего расчетного зазора

$$\delta_p = \delta + 1/3(\delta_m + \delta) \quad (107)$$

Поток основной гармоники поля возбуждения

$$\Phi_{\phi 1} = \frac{2}{\pi} B_{\phi m1} \tau \cdot l_\delta = \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta \omega_B I_B}{\pi \cdot k_\delta k_{\mu\delta} \delta \cdot p} \quad (108)$$

Потокосцепление с фазной обмоткой якоря, когда ось этой фазы совпадает с осью полюсов синхронной машины

$$\Psi_{\phi ad1} = W \Phi_{\phi 1} k_{\phi\delta 1} \quad (109)$$

При повороте ротора потокосцепление основной гармоники поля возбуждения изменяется по закону

$$\Psi_{\phi ad1} = \Psi_{\phi ad1} \cos \omega_1 t = M_{ad1} I_e \cos \omega_1 t \quad (110)$$

где взаимоиндуктивность равна

$$M_{ad1} = \frac{\Psi_{\phi ad1}}{I_e} = \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta \omega_B \cdot \omega \cdot k_{\phi\delta 1}}{k_\delta k_{\mu\delta} \delta \cdot p} \quad (111)$$

При этом в якоре индуцируется ЭДС

$$e = -\frac{d\Psi_{\phi ad1}}{dt} = \omega_1 M_{ad1} I_e \sin \omega_1 t = X_{ad1} I_e \sin \omega_1 t \quad (112)$$

Амплитуда и действующее значение этой ЭДС

$$E_m = \omega_1 M_{ad1} I_e; \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{X_{ad1} I_e}{\sqrt{2}} \quad (113)$$

где  $x_{ad1} = \omega_1 M_{ad1}$  - сопротивление взаимной индукции обмотки возбуждения с обмоткой якоря.

С обмоткой возбуждения сцепляется весь поток воздушного зазора  $\Phi_{\phi\delta}$ , определяемый площадью, ограниченной кривой  $I$  (рисунок 33,б) и осью абсцисс. Величина этого потока

$$\Phi_{e\delta} = k_e \Phi_{e1} = \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta \omega_e I_e k_\phi k_e}{k_\delta k_{\mu\delta} \delta \cdot p} \quad (114)$$

$$\omega_e = \frac{\Phi_{e\delta}}{\Phi_{e1}}$$

где  $\Phi_{e1}$  - коэффициент потока возбуждения.

Собственная индуктивность обмотки возбуждения от

$$L = \frac{\Psi_{e\delta}}{I_e} = \frac{\omega_e \Phi_{e\delta}}{I_e} = \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta \omega_e \cdot \omega \cdot k_{\omega\phi}}{k_\delta k_{\mu\delta} \delta \cdot p} k_\phi k_e \quad (115)$$

Кроме поля в воздушном зазоре обмотка возбуждения создает поток рассеяния междуполюсного пространства  $\Phi_{en}$  и поток рассеяния лобовых частей.

Полная индуктивность обмотки возбуждения

$$L_e = L_{e\delta} + L_{en} + L_{e\lambda} \quad (116)$$

В установившемся режиме работы  $I_e = const$  и поэтому ЭДС самоиндукции обмотки возбуждения  $e_e = -L_e \frac{dI_e}{dt} = 0$ . В переходном режиме  $e_e \neq 0$ . Активное сопротивление обмотки возбуждения вычисляется по известным обмоточным данным (число витков, их сечение и длина).

Магнитное поле параметры обмотки якоря. Продольная и поперечная реакции якоря.

При нагрузке генератора, когда по обмотке якоря протекает ток, обмотка создает собственное магнитное поле, называемое полем реакции якоря. Реакция якоря синхронной машины оказывает существенное влияние на характеристики и поведение машины как при установившихся, так и при переходных режимах работы.

Ввиду несимметричного устройства ротора явнополюсной синхронной машины возникает необходимость рассматривать действие реакции якоря по продольной и поперечной осям в отдельности. Метод такого рассмотрения называется методом наложения или теорией двух реакций. Метод двух реакций основан на принципе наложения, при котором предполагается, что магнитные потоки, действующие по поперечной оси, не влияют на величину потоков, действующих по продольной оси, и наоборот.

Векторные диаграммы МДС обмотки якоря

Активная нагрузка ( $\psi = 0^\circ$ ). На рисунке 34, а представлены статор и ротор двухполюсного генератора. Ротор вращается против часовой стрелки с угловой частотой  $\omega_1 = 2\pi_1 / p$  и при указанном положении ротора ЭДС фазы А максимальна. Так как ток при активной нагрузке совпадает по фазе с ЭДС, то и он максимален  $i_A = I_m$ ,  $i_d = i_c = -1/2 I_m$ .

По построенным линиям магнитной индукции поля обмотки возбуждения и магнитной индукции поля обмотки якоря видно, что МДС обмотки якоря  $f_a$  направлена перпендикулярно МДС обмотки возбуждения  $F_e$ . Этот вывод подтверждается векторной диаграммой, построенной для этого случая (см. рисунок 34). Вектор ЭДС, наведенный полем возбуждения в обмотке якоря, отстает на  $90^\circ$  от МДС  $F_e$  при подключении активной нагрузки ток в обмотке якоря  $I_1$  совпадает по фазе с ЭДС  $E$ , а поэтому вектор МДС  $F_a$ , создаваемый этим током, сдвинут в пространстве на  $90^\circ$  относительно вектора  $F_e$ .

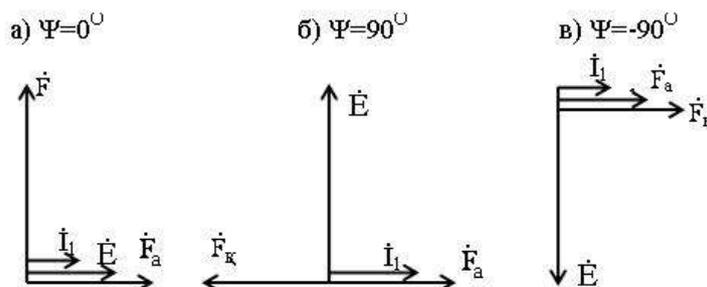


Рисунок 34 - Векторные диаграммы при активной (а), индуктивной (б) и емкостной (в) нагрузках синхронного генератора

Такой характер поля реакции якоря (при  $\psi = 0$ ) сохраняется при любом положении ротора, так как ротор и поле реакции якоря вращаются синхронно.

Поперечная реакция якоря вызывает искажение кривой поля в воздушном зазоре, и вращающее поле реакции якоря индуцирует ЭДС в обмотке якоря.

Индуктивная нагрузка ( $\psi = 90^\circ$ ). При индуктивной нагрузке ток статора  $I_1$  отстает по фазе от ЭДС  $E_1$  на  $90^\circ$ . Поэтому он достигает максимума после поворота ротора вперед на  $90^\circ$  относительно его положения, соответствующего максимуму ЭДС (см. рисунок 34,б). При этом МДС реакции якоря  $F_a$  действует по оси полюсов ротора встречно МДС обмотки возбуждения  $F_e$  (см. рисунок 34,б).

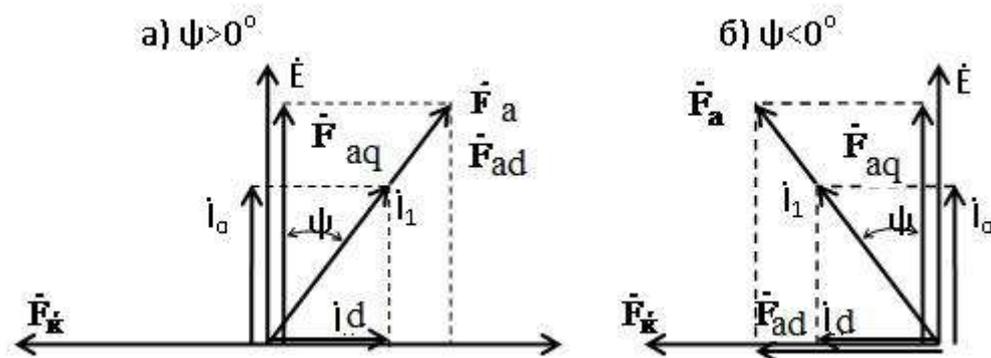
Такое действие МДС реакции якоря ослабляет магнитное поле машины. Следовательно, реакция якоря в синхронном генераторе при чисто индуктивной нагрузке оказывает продольно-размагничивающее действие.

Емкостная нагрузка ( $\psi = -90^\circ$ ). Так как ток  $I_1$  при емкостной нагрузке опережает по фазе ЭДС на  $90^\circ$ , то он достигает максимума раньше, чем ЭДС (в положении, указанном на рисунке 34, в). МДС реакции якоря  $F_a$  действует, как и в предыдущих случаях по оси полюсов, но теперь уже согласно с МДС обмотки возбуждения  $F_e$ , следовательно, реакция якоря в синхронном генераторе при чисто емкостной нагрузке оказывает продольно-намагничивающее действие.

Смешанная нагрузка. При смешанной нагрузке синхронного генератора ток статора  $I_1$  сдвинут по фазе относительно ЭДС на угол  $\psi$ , значения которого лежат в пределах  $0 < \psi < 90^\circ$ .

При активно-индуктивной нагрузке вектор  $F_a$  отстает от вектора ЭДС на угол  $0 < \psi < 90^\circ$ . Раскладываем вектор  $F_a$  на составляющие: продольную составляющую МДС реакции якоря  $F_e = F_a \sin \psi$  и поперечную составляющую  $F_{aq} = F_a \cos \psi$  (см. рисунок 35,а). Такое же разложение на составляющие сделано и для случая активно-емкостной нагрузки (см. рисунок 35,б).

Поперечная составляющая МДС  $F_{aq}$  пропорциональна активной составляющей тока  $I_{aq} = I_a \cos \psi$ , продольная составляющая МДС пропорциональна реактивной составляющей  $I_e = I_a \sin \psi$ . Если реактивная составляющая тока отстает от ЭДС ( $\psi = 0$ ), то МДС размагничивает генератор, если же реактивная составляющая тока  $I_1$  опережает ЭДС ( $\psi < 0$ ), то МДС  $F_{ad}$  подмагничивает генератор.



а) активно-индуктивная нагрузка;

б) активно-емкостная нагрузка.

Рисунок 35 - Векторные диаграммы при смешанной нагрузке

В явнополюсной машине магнитное сопротивление между полюсами значительно больше, чем под полюсами. Объясняется это значительным воздушным зазором междуполюсного пространства. Поэтому, составляющая магнитного потока реакции якоря по продольной оси значительно меньше, чем в неявнополюсной. При определении поперечной составляющей МДС реакции якоря для явнополюсной машины это уменьшение потока учитывается коэффициентом  $k_q$ :

$$F_{aq} = k_q F_a \cos \psi, \quad (117)$$

где  $k_q$  - коэффициент формы поперечной реакции якоря, представляющий отношение магнитного потока реакции якоря по поперечной оси в явнополусной машине к составляющей магнитного потока реакции якоря по той же оси в неявнополусной машине (обычно  $k_q = 0.3-0.5$ )

Продольная составляющая МДС реакции якоря в явнополусной машине

$$F_{ad} = k_d F_a \sin \psi,$$

где  $k_d$  - коэффициент формы продольной реакции якоря, учитывающий ослабление составляющей магнитного потока реакции якоря по продольной оси из-за неравномерности воздушного зазора по поверхности полюсного наконечника (обычно  $k_d = 0.8 - 0.95$ ).

Магнитные поля, ЭДС и параметры продольной и поперечной реакции якоря

Продольная составляющая МДС реакции якоря

$$F_{ad} = \frac{m \sqrt{2} \omega k_{об1}}{\pi \cdot p} I_d \quad (118)$$

Поперечная составляющая МДС реакции якоря

$$F_{aq} = \frac{m \sqrt{2} \omega k_{об1}}{\pi \cdot p} I_q \quad (119)$$

Основные гармоники полей продольной и поперечной реакции якоря создают потоки реакции якоря

$$\Phi_{ad} = \frac{2}{\pi} B_{adm} k_d \tau \cdot l_\delta \quad (120)$$

На основании (115) и (116) получим

$$\begin{aligned} \Phi_{ad} &= \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta \cdot 2m \sqrt{2} \omega \cdot k_{об1} \cdot k_d I_d}{k_\delta \cdot k_{\mu d} \cdot \delta \cdot \pi^2 \cdot p}, \\ \Phi_{aq} &= \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta \cdot 2m \sqrt{2} \omega \cdot k_{об1} \cdot k_q I_q}{k_\delta \cdot k_{\mu q} \cdot \delta \cdot \pi^2 \cdot p} \end{aligned} \quad (121)$$

Потоки  $\Phi_{ad}$  и  $\Phi_{aq}$  вращаются синхронно с ротором и индуцируют в обмотке якоря ЭДС самоиндукции которые называются ЭДС продольной и

$$\begin{aligned} E_{ad} &= \pi \sqrt{2} f_1 \omega \Phi_{ad}, \\ E_{aq} &= \pi \sqrt{2} f_1 \omega \Phi_{aq}, \end{aligned} \quad (122)$$

поперечной реакции якоря. ЭДС  $E_{aq}$  можно представить в виде

$$\dot{E}_{ad} = -jX_{ad} \dot{I}_d; \dot{E}_{aq} = -jX_{aq} \dot{I}_q, \quad (123)$$

где  $X_{ad}$  и  $X_{aq}$  - индуктивные сопротивления продольно и поперечной реакции якоря. На основании выражений (П8), (Н9) и (120) получим

$$X_{ad} = 4m f_1 \frac{\mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta \omega^2 \cdot k_{об1} \cdot k_d}{\pi \cdot k_\delta \cdot k_{\mu d} \cdot \delta \cdot p},$$

$$X_{aq} = 4mf_1 \frac{\mu_0 \cdot r \cdot I_\delta \omega^2 \cdot \kappa_{обл} \kappa_q}{\pi \cdot \kappa_\delta \cdot \kappa_{\mu q} \cdot \delta \cdot p} \quad (124)$$

Поток сцепление рассеяния обмотки якоря  $\Psi_{\sigma a}$ . Можно разложить на составляющие по осям  $d$  и  $q$ :

$$\Psi_{\sigma ad} = \Psi_{\sigma a} \sin \psi; \quad \Psi_{\sigma aq} = \Psi_{\sigma a} \cos \psi;$$

$$E_{\sigma ad} = E_{\sigma a} \sin \psi = X_{\sigma a} I_1 \sin \psi = X_{\sigma a} I_d;$$

$$E_{\sigma aq} = E_{\sigma a} \cos \psi = X_{\sigma a} I_1 \cos \psi = X_{\sigma a} I_q. \quad (125)$$

ЭДС  $E_{ad}$  и  $E_{oad}$ ,  $E_{aq}$  и  $E_{oa}$  совпадают по фазе

$$E_d = E_{ad} + E_{oad} = X_{ad} I_q + X_{oa} I_d,$$

$$E_q = E_{aq} + E_{oa} = X_{aq} I_d + X_{oa} I_q \quad (126)$$

или

$$E_d = X_d I_d; \quad E_q = X_q I_q, \quad (127)$$

где  $X_d = X_{ad} + X_{oa}$ ;  $X_q = X_{aq} + X_{oa}$  - продольные и поперечные синхронные индуктивные сопротивления обмоток якоря.

Активное сопротивление обмотки якоря  $R_a$ , вычисляется по известным обмоточным данным (число витков, их сечение и длина).

### Вопросы для самоконтроля

1. Магнитодвижущая сила (МДС) обмотки возбуждения.
2. Магнитное поле параметры обмотки якоря.
3. Продольная и поперечная реакции якоря.
4. Магнитные поля, ЭДС и параметры продольной и поперечной реакции якоря

## Тема 18. Магнитное поле и характеристики синхронных генераторов.

### Включение генератора на параллельную работу

На электрических станциях обычно устанавливают несколько синхронных генераторов, включаемых параллельно на общую электрическую сеть. Это повышает надежность энергоснабжения потребителей и позволяет лучше организовать обслуживание электрооборудования. Электрические станции, в свою очередь, объединяют для параллельной работы в мощные энергосистемы. Таким образом, синхронный генератор работает на сеть большой мощности, по сравнению с которой собственная мощность генератора является очень малой. В этом случае можно принять, что генератор работает параллельно с сетью бесконечно большой мощности, т.е. напряжение сети  $U_c$  и ее частота  $f_c$  являются постоянными, не зависящими от нагрузки данного генератора.

При включении генератора на параллельную работу необходимо обеспечить возможно меньший бросок тока, так как в противном случае срабатывает релейная защита и возможна поломка генератора или первичного двигателя.

Ток в момент подключения генератора к сети будет равен нулю, если удастся обеспечить равенство мгновенных значений напряжений сети и генератора:

$$U_{cm} \sin(\omega_c t - \alpha_c) = U_{gm} \sin(\omega_r t - \alpha_r). \quad (143)$$

Для выполнения условия (140) необходимо выполнить следующие условия: напряжение генератора в момент включения в сеть должно быть равно напряжению сети ( $U_g = U_c$ ); частота

генератора  $f_r$  - должна быть равна частоте сети  $f_c$ ; порядок следования фаз на выводах генератора должен быть таким же, что и на зажимах генератора.

Совокупность операций, проводимых при подключении генератора к сети, называют синхронизацией. При синхронизации сначала останавливают номинальную частоту вращения ротора, т.е. обеспечивают равенство  $f_r = f_c$  затем, регулируя ток возбуждения, добиваются равенства  $U_r = U_c$ . Совпадение по фазе векторов напряжений сети и генератора ( $\alpha_r = \alpha_c$ ) контролируется специальными приборами - ламповыми и стрелочными синхроскопами.

Генераторы большой мощности синхронизируют с помощью стрелочных синхроскопов, работающих по принципу вращающегося магнитного поля. При  $f_r = f_c$  стрелка устанавливается на нуль. В этот момент и следует подключать генератор. На электрических станциях используются автоматические системы синхронизации генераторов без участия обслуживающего персонала.

Довольно часто применяют метод самосинхронизации (грубой синхронизации), при котором генератор подключают к сети при отсутствии возбуждения на роторе (обмотка возбуждения для избежания перенапряжения, замыкается на активное сопротивление). Ротор приводят во вращение с помощью первичного двигателя до частоты вращения, отличающейся от синхронной не более, чем на 2-3%, и затем подключают статорную обмотку к сети.

После подключения в обмотку возбуждения подают постоянный ток, что приводит к втягиванию ротора в синхронизм. Так как в момент подключения генератора к сети ЭДС равна нулю (генератор не возбужден), то под действием напряжения сети в обмотке статора наблюдается резкий бросок тока и на валу ротора появляются механические усилия. Бросок тока не должен превышать  $3,5 I_{ном}$ , что практически всегда имеет место.

Метод самосинхронизации очень удобен при частых включениях, так как требует малого времени и легко автоматизируется.

#### Регулирование активной мощности

После подключения генератора в сеть при соблюдении всех условий синхронизации его напряжение  $U_r$  равно напряжению сети  $U_c$  совпадает по фазе, по отношению к внешней нагрузке и находится в противофазе, т.е.  $U_r = -U_c$  до контуру "генератор - сеть". Ток генератора при этом равняется нулю, т.е. генератор работает без нагрузки

$$\dot{I} = \frac{\dot{E} - \dot{U}}{jXd} = -j \frac{\dot{E} - \dot{U}}{jd} = -j \frac{\dot{E} - \dot{U}}{Xd} \quad (144)$$

Механическая мощность приводного двигателя  $P_1$  (турбины дизельного двигателя и т.д.) в этом случае затрачивается на покрытие потерь холостого хода:

$$P_1 = P_{мех} + P_{м1} + P_e + P_{доб} \quad (145)$$

При увеличении вращающего момента приводного двигателя ротор приобретает ускорение и сместится относительно первоначального положения на угол  $\theta$  в направлении вращения. На такой же угол  $\theta$  сдвинется вектор ЭДС генератора  $\dot{E}$  относительно своего положения, соответствующего режиму холостого хода (см. рисунок 45,а). В результате в цепи ротора появится результирующая ЭДС (см. рисунок 45,б) которая создаст в цепи обмотки статора ток

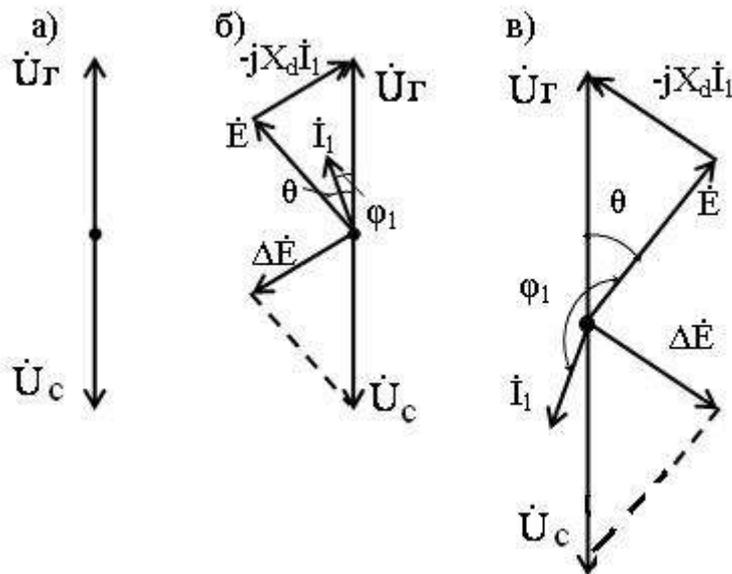
$$\Delta \dot{E} = \dot{E} - \dot{U}_r = \dot{E} + U_r = jXd \dot{I}_1 \quad (146)$$

Между намагниченными полюсами ротора и неявно выраженными полюсами вращающегося поля статора возникают силы магнитного притяжения  $F_M$ , имеющие нормальные  $F_n$  и тангенциальные  $F_t$  составляющие. Совокупность тангенциальных составляющих на всех полюсах ротора создает электромагнитный момент, направленный встречно моменту приводного двигателя

$$M = F_c \frac{2PD}{2} = F_m PD \sin \theta \quad (147)$$

где  $D$  - диаметр ротора.

При работе в рассматриваемом режиме генератор отдает в сеть активную мощность  $P = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$ . Чем больше внешний момент, приложенный к валу генератора, тем больше угол  $\theta$ , а следовательно, ток и мощность, отдаваемая генератором в сеть.



- а) при работе без нагрузки;
- б) при работе в режиме генератора;
- в) при работе в режиме двигателя.

Рисунок 45 - Векторные диаграммы синхронной машины

Если к валу ротора приложить внешний тормозной момент, то вектор  $\dot{E}$  будет отставать от вектора напряжения  $\dot{U}_r$  на угол  $\theta$  (см. рисунок 45). При этом возникнут результирующая ЭДС  $\Delta \dot{E}$  и ток  $\Delta \dot{I}$ , вектор которого отстает от вектора  $\Delta \dot{E}$  на  $90^\circ$ .

Так как теперь угол  $\theta > 0$ , то активная составляющая  $I_1$  находится в противофазе с напряжением генератора и, следовательно, в рассматриваемом режиме активная мощность  $P = m_1 u_1 I_1 \cos \varphi_1$  забирается из сети, и машина работает двигателем, создавая электромагнитный вращающий момент, который уравнивает внешний тормозной момент; частота вращения ротора при этом снова остается неизменной.

Мощность, электромагнитный момент и угловые характеристики синхронного генератора

Зависимость активной мощности синхронного генератора от угла нагрузки  $\theta$  получим из рассмотрения упрощенной векторной диаграммы, построенной при  $R_a = 0$ . Из диаграммы, приведенной на рисунке 46, а для неявнополюсной машины, устанавливаем, что сторона  $AB = OA \cdot \sin \theta = AC \cdot \cos \varphi_1$  или с учетом модулей соответствующих векторов  $E \cdot \sin \theta = I_1 \cdot x \cdot \cos \varphi_1$ .

Следовательно, активная мощность синхронной машины

$$P = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 = \frac{m_1 E U_1}{X_d} \sin \theta \quad (148)$$

Для явнополюсной машины с учетом того, что  $\varphi_1 = \psi - \theta$  получаем:

$$P = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 = m_1 U_1 (I_1 \sin \psi \sin \theta + I_1 \cos \psi \cos \theta) = m_1 U_1 (I_d \sin \theta + I_q \cos \theta) \quad (149)$$

Для определения токов  $I_d$  и  $I_q$  возьмем проекции модулей векторов напряжения  $\dot{U}_1$ , падения напряжений  $-jX_d \dot{I}_d$  и  $-jX_q \dot{I}_q$  на координатные оси (см. рисунок 46, б).

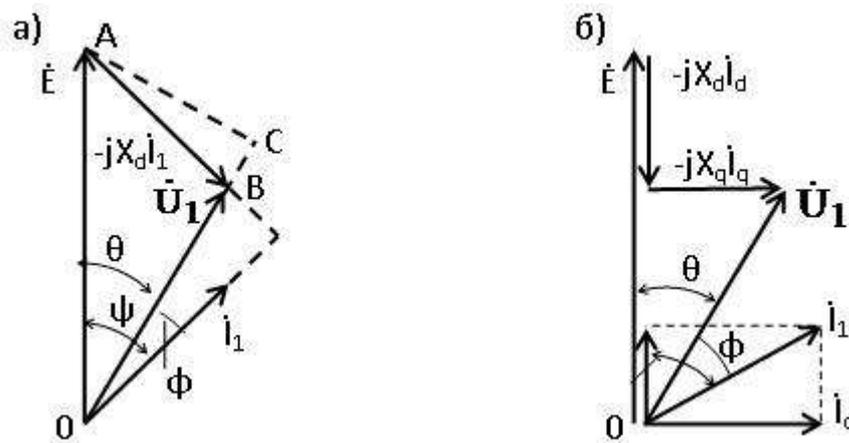


Рисунок 46 - Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсной (а) и явнополюсной (б) синхронной машин

Тогда  $E = U_1 \cos \theta + I_d X_d$

откуда  $U_1 \sin \theta = I_d x_d$ ,  $I_d = \frac{E - U_1 \cos \theta}{x_d}$  (150)

Подставив значения  $I_d$  и  $I_q$  в (146), получим:

$$P = m_1 U_1 \left( \frac{E - U_1 \cos \theta}{x_d} \sin \vartheta + \frac{U_1 \sin \theta}{x_d} \cos \theta \right) \quad (151)$$

Или, используя формулу

$$P = \frac{m_1 U_1}{x_d} \sin \vartheta - \frac{m_1 U_1^2}{2} \left( \frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_q} \right) \sin 2\theta \quad (152)$$

Если пренебречь потерями в обмотке статора, то можно считать, что электромагнитная мощность машины  $P_{эм}$  равна активной мощности  $P$ .

Поэтому электромагнитный момент для неявнополюсной и явнополюсной машин соответственно

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_n} = \frac{m_1 U_1^2 E}{\omega_1 x_d} \sin \theta \quad (153)$$

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_n} = \frac{m_1 U_1^2 E}{\omega_1 x_d} \sin \vartheta + \frac{m_1 U_1}{2} \left( \frac{1}{x} - \frac{1}{x} \right) \sin \theta \quad (154)$$

Электромагнитный момент неявнополюсной машины имеет две вставляющие; одна представляет основную составляющую момента

$$M_{осн} = \frac{m_1 U_1^2 E}{\omega_1 x_d} \sin \theta \quad (155)$$

другая - реактивную составляющую момента

$$M_{реак} = \frac{m_1 U_1^2}{2} \left( \frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta \quad (156)$$

Основная составляющая электромагнитного момента  $M_{осн}$  зависит не только от напряжения сети  $U_1$ , но и от ЭДС, т.е. от магнитного потока ротора, а также от угла  $\theta$  (см. рисунок 47, кривая 1). Отсюда следует, что в машине с невозбужденным ротором ( $\Phi = 0$ ) основная составляющая момента  $M_{сн} = 0$ .

Реактивная составляющая электромагнитного момента  $M_{реак}$  от магнитного потока ротора не зависит, т.е. возникает даже при отсутствии тока возбуждения; он пропорционален  $\sin 2\theta$  (см. рисунок 47, кривая 2). Для возникновения этой составляющей достаточно двух условий: ротор должен иметь явно выраженные полюса ( $x_d \neq x_q$ ) и чтобы к обмотке статора было подведено напряжение сети  $U_1$ .

При увеличении нагрузки синхронной машины растет угол  $\theta$ , что ведет к изменению электромагнитной мощности и его электромагнитного момента. Зависимость  $P_{эм}$  и  $M_{эм}$  от угла  $\theta$  называются угловыми характеристиками синхронной машины.

Угловые характеристики синхронного генератора (см. рисунок 47) построены при постоянстве напряжения сети ( $U_c = const$ ) и магнитного потока возбуждения ( $E = const$ ).

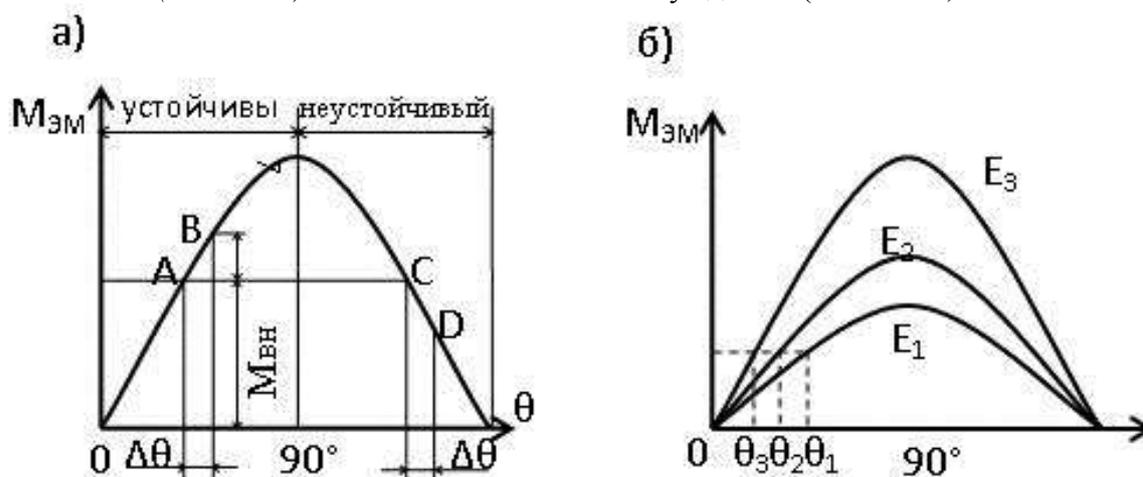


Рисунок 47 - Области устойчивости и угловые характеристики при разных значениях тока возбуждения

Зависимость результирующего момента (кривая 3)  $M_p = M_{осн} + M_{реак}$  и электромагнитной мощности  $P_{эм}$  от угла  $\theta$  получается сложением значений моментов  $M_{осн}$  и  $M_{реак}$  и соответствующих им мощности по ординатам.

Максимальное значение электромагнитного момента  $M_{макс}$  соответствует критическому значению угла  $\theta_{кр}$ .

Для явнополюсных синхронных машин  $\theta_{кр} = 60 - 80$  эл.град.

Для неявнополюсных машин  $M_{реак} = 0$ , а поэтому угловая характеристика представляет синусоиды и угол  $\theta_{кр} = 90^\circ$ .

Характеристика имеет важное значение для оценки статической устойчивости и перегрузочной способности. Под статической устойчивостью синхронной машины, работающей параллельно с сетью, понимается ее способность сохранять синхронную частоту вращения при изменении внешнего вращающего или тормозного момента, приложенного к ее валу.

Статическая устойчивость обеспечивается только при углах  $\theta$  соответствующих  $M < M_{макс}$ .

Синхронный генератор работает с внешним моментом  $M_{вн}$ , передаваемым его ротору от первичного двигателя. При этом ось полюсов сдвинута на угол  $\theta$  относительно оси суммарного магнитного потока  $\Phi$ , и генератор развивает электромагнитный момент  $M$ , который можно считать равным  $M_{вн}$  (точки A и C на рисунке 47,а).

Если момент  $M_{вн}$  возрастает, то ротор генератора ускоряется, и угол  $\theta$  увеличивается до значения  $\theta + \Delta\theta$ . При работе машины в точке A возрастание угла  $\theta$  вызывает увеличение момента до значения  $M + \Delta M$  (точка B) в результате равновесие моментов, действующих на вал ротора,

восстанавливается, и машина, после некоторого колебательного процесса, продолжит работу с синхронной частотой вращения.

Однако, если машина работает при угле  $\theta > \pi/2$  (точка С), то увеличение угла  $\theta$  вызывает уменьшение момента до значения  $M = \Delta M$  (точка Д). В результате равновесие моментов нарушается, ротор продолжает ускоряться, а угол  $\theta$  возрастает. При этом под действием избыточного момента увеличивается частота вращения ротора и происходит выпадение из синхронизма. Выпадение из синхронизма является аварийным режимом, так как оно сопровождается резким возрастанием тока в обмотке статора.

Из сказанного выше следует, что синхронная машина работает устойчиво, если  $\Delta P / \Delta \vartheta > 0$ , и неустойчиво, если  $\Delta P / \Delta \vartheta < 0$ , чем меньше угол  $\theta$ , тем больший запас по устойчивости имеет машина.

Если машина работает в установившемся режиме с углом, то малое отклонение  $\Delta \vartheta$  от этого угла сопровождается возникновением момента  $\Delta M = \Delta P / \Delta \vartheta$ , который стремится восстановить исходный угол  $\theta$ . Этот момент называют синхронизирующим. Ему соответствует синхронизирующая мощность  $\Delta P_{зм} = dP_{зм} / d\Delta \vartheta$ .

Производные  $\Delta P / \Delta \vartheta$  и  $\Delta P_{зм} / \Delta \vartheta$  называют соответственно удельным синхронизирующим моментом и удельной синхронизирующей мощностью. При неявнополусной машине

$$\frac{dM}{d\theta} = \frac{m_1 U_1 E}{\omega_1 x_d} \sin \theta, \quad \frac{dP_{зм}}{d\theta} = \frac{m_1 U_1 E}{x_d} \sin \theta \quad (157)$$

Удельный синхронизирующий момент имеет максимальное значение при  $\theta = 0$ , а с возрастанием  $\theta$  он уменьшается, и при  $\theta = \pi/2$  он равен нулю. Поэтому синхронные машины работают с углом  $\theta_{ном} = 20 \div 35^\circ$ , что соответствует двукратному или несколько большему запасу по моменту.

Статическая перегружаемость синхронной машины оценивается коэффициентом статической перегружаемое

$$k_m = \frac{M_{макс}}{M_{ном}} = \frac{P_{макс}}{P_{ном}} \quad (158)$$

По ГОСТу этот коэффициент для мощных генераторов должен быть не менее  $1,6 \div 1,7$ , а для синхронных двигателей - не менее 1,65.

Устойчивость синхронной машины при заданном значении активной мощности зависит от тока возбуждения. При увеличении тока возбуждения возрастает ЭДС, а следовательно, и момент  $M_{макс}$ , при этом увеличивается устойчивость машины.

На рисунке 47,б изображены угловые характеристики при различных токах возбуждения (при различных ЭДС). Откуда следует, что чем больше ток возбуждения, тем меньше угол  $\theta$  при заданной нагрузке, а следовательно, тем больше отношение  $M_{макс} / M_{ном}$ .

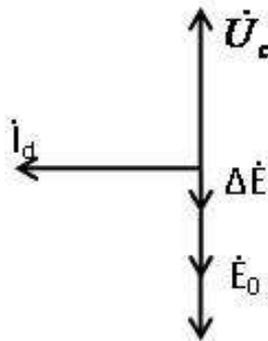
Обычно электрическая сеть, на которую работает синхронный генератор, является для него активно-индуктивной нагрузкой (генераторы отдают в сеть как активную  $P$  так и реактивную мощности). При этом синхронный генератор должен работать с некоторым перевозбуждением, обеспечивающим повышение перегрузочной способности.

По ГОСТу в синхронных генераторах при номинальном режиме ток  $\dot{I}_1$  должен опережать напряжения сети  $\dot{U}_c$  (т.е. отставать от напряжения  $\dot{U}_r$ ) и иметь  $\cos \varphi_1 = 0,8$ .

$U$  - образные характеристики синхронного генератора

Генератор после подключения к сети работает без нагрузки, и его ЭДС  $\dot{E}$  уравнивает напряжение сети  $\dot{U}_c$ . Если теперь увеличить ток возбуждения, т.е. перевозбудить генератор, то ЭДС  $\dot{E}_0$  увеличится до значения  $\dot{E}_0''$ , и в цепи генератора появится избыточная ЭДС  $\Delta \dot{E} = \dot{E} - \dot{U}_c$  (см. рисунок 48,а), вектор которой совпадает по фазе с вектором ЭДС  $\dot{E}$ . Ток  $I_d$ , вызванный ЭДС  $\dot{E}$ , будет отставать от нее по фазе на  $90^\circ$  (т.к.  $R_d = 0$ ). По отношению к ЭДС  $\dot{E}_0$  этот ток также будет отстающим (индуктивным).

а)



б)

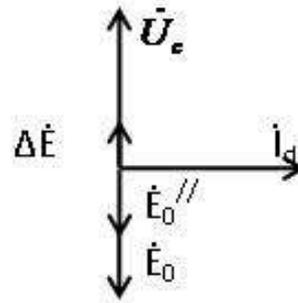


Рисунок 48 - Векторные диаграммы ЭДС синхронного генератора при параллельной работе

Если же после подключения генератора к сети уменьшить ток возбуждения, т.е. недовозбудить машину, то ЭДС  $\dot{E}$  уменьшится до значения  $\dot{E}''$  и в цепи генератора будет действовать избыточная ЭДС  $\Delta \dot{E} = \dot{U}_c - \dot{E}''$ . Теперь вектор этой ЭДС будет совпадать по фазе с вектором напряжения сети  $\dot{U}_c$  (см. рисунок 48, б), а поэтому ток  $\dot{I}_d$ , вызванный этой ЭДС и отстающий от нее по фазе на  $90^\circ$ , будет опережающим (емкостным) по отношению ЭДС генератора. Если при всех изменениях тока возбуждения вращающий момент приводного двигателя остается неизменным, то неизменной остается и активная мощность генератора:

$$P = m_1 U_1 \cos \varphi_1 = const \quad (159)$$

Из этого выражения следует, что при  $\dot{U} = const$  активная составляющая тока статора  $I_1 \cos \varphi_1 = const$ . Таким образом, изменение тока возбуждения влияет только на реактивную составляющую тока статора. Зависимость тока статора  $I_1$  от тока возбуждения  $I_e$  при неизменной активной нагрузке генератора называется U-образной характеристикой. На рисунке 49 приведены U-образные характеристики для значений активной нагрузки:  $P_2 = 0$ ;  $P_2 = 0,5 P_{ном}$  и  $P_2 = P_{ном}$ . U-образные характеристики показывают, что любой нагрузке генератора соответствует такое значение тока возбуждения  $I_e$ , при котором ток статора  $I_1$ , становится минимальным и равным активной составляющей:  $I_{1 мин} = I_1 \cos \varphi_1$ . В этом случае генератор работает при коэффициенте мощности  $\cos \varphi_1 = 1$ .

Значения тока возбуждения, соответствующие  $\cos \varphi_1 = 1$  при фазной нагрузке генератора, показаны пунктирной линией. С точки зрения уменьшения потерь генератора, наиболее выгодным является возбуждение, соответствующее минимальному току статора, т.е. когда  $\cos \varphi_1 = 1$ .

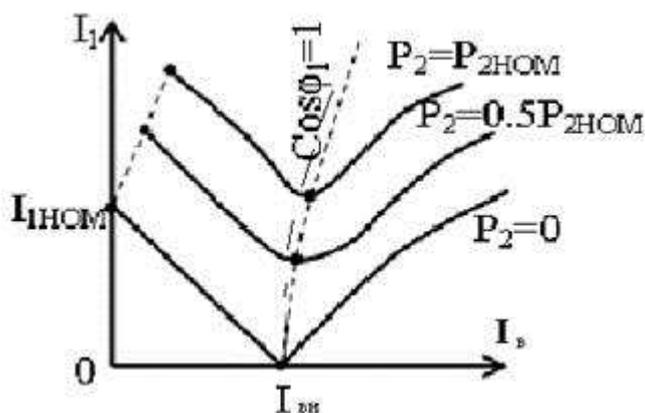


Рисунок 49 - U-образные характеристики синхронного генератора

Но так как в большинстве случаев нагрузка генератора имеет активно-индуктивный характер, то для компенсации реакции якоря приходится несколько перевозбудить генератор, для создания реактивной составляющей тока статора  $I_l$ , опережающей по фазе напряжение сети  $U_c$ .

#### Вопросы для самоконтроля

1. Включение генератора на параллельную работу
2. Регулирование активной мощности
3. Мощность, электромагнитный момент и угловые характеристики синхронного генератора

### Тема 19. Основные параметры синхронных двигателей и синхронных компенсаторов.

#### Синхронный двигатель

Синхронная машина может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, т.е. потреблять из сети электрическую энергию и преобразовывать ее в механическую. Если после подключения синхронной машины к электрической сети приложить к его валу тормозной момент, т.е. момент нагрузки, направленный против вращения ротора, то вектор ЭДС сместится на угол  $\theta$  относительно его положения в режиме холостого хода в сторону отставания. При этом в цепи статора появится результирующая ЭДС, создающая в обмотке статора ток, опережающий по фазе ЭДС на угол  $90^\circ$ . Ток  $I_l$ , создает вращающееся синхронно с ротором магнитное поле, ось которого  $d' - d'$  смещена относительно продольной оси полюсов ротора  $d - d$  на угол  $-\theta$ .

Возникшие при этом тангенциальные составляющие сил магнитного взаимодействия  $F_t = F_m \sin \theta$  создадут на роторе двигателя вращающий электромагнитный момент  $M$ , направленный согласно с вращающим магнитным полем статора и приводящий во вращение ротор с синхронной частотой  $\omega_1$ . При этом синхронная машина потребляет из сети электрическую энергию и преобразует ее в механическую энергию вращения. Вращающий электромагнитный момент преодолевает момент холостого хода, и создает полезный момент  $M_c$  под действием, которого приводится во вращение производственный механизм.

Электромагнитный момент синхронного двигателя определяется выражением (137) для неявнополюсного и (138) для явнополюсного двигателя. Угловые характеристики синхронного двигателя отличаются лишь тем, что они располагаются в третьем квадранте осей координат, т.е. определяются отрицательными значениями углов  $\theta$  и моментов  $M$ .

Отношение максимального момента к номинальному определяет перегрузочную способность синхронного двигателя

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$$

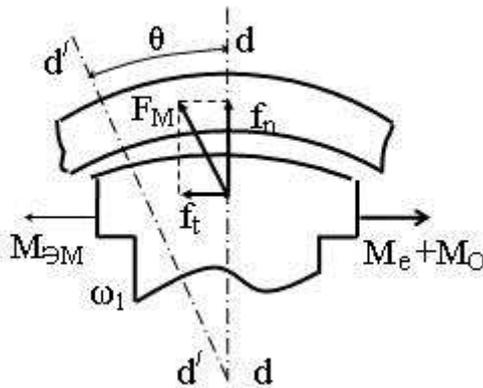


Рисунок 51 - Работа синхронной машины в двигательном режиме

Обычно перегрузочная способность  $\lambda = 2 + 3$ , что при номинальной нагрузке двигателя соответствует  $\theta_{\text{ном}} = 20 + 30$  эл.град.

U-образные и рабочие характеристики синхронного двигателя

При неизменном напряжении сети  $\dot{U}_e \approx - \sum \dot{E} = \text{const}$  результирующее магнитное поле синхронного двигателя постоянно. Поэтому при изменении МДС возбуждения  $F_b$  (изменении тока возбуждения  $I_b$ ) МДС статора  $F_a$  изменяется таким образом, чтобы их совместное действие оставалось неизменным, т.е. чтобы оставалось неизменным результирующее магнитное поле синхронного двигателя. Это изменение МДС  $F_a$  может происходить за счет изменения значения и фазы тока статора  $\dot{I}_1$ , т.е. за счет изменения реактивной составляющей тока статора  $I_d$ .

Например, при увеличении тока возбуждения от  $I_b=0$ , возрастает МДС ротора и уменьшается МДС статора, за счет уменьшения индуктивной (по отношению к напряжению сети) составляющей тока статора  $I_d$ , которая оказывает на магнитную систему подмагничивающее воздействие.

При этом полный ток статора  $I_1 = I_a + I_d$  уменьшается, а коэффициент мощности двигателя  $\cos \varphi_1 = 1$  увеличивается. При некотором значении тока возбуждения  $I_b$  индуктивная составляющая тока статора уменьшается до нуля. Ток статора станет чисто активным, а коэффициент мощности  $\cos \varphi_1 = 1$ .

При увеличении тока возбуждения сверх значения  $I_{bн}$ , т.е. перевозбуждение вызывает увеличение тока  $I_d$ , но теперь увеличивается емкостная составляющая тока  $I_l$ . Таким образом, при недозавождении ( $I_b < I_{bн}$ ) синхронный двигатель работает с отстающим, а при перевозбуждении ( $I_b > I_{bн}$ ) с опережающим током. Зависимость тока статора от тока возбуждения для синхронного двигателя представлена U-образными характеристиками (см. рисунок 52). Синхронный двигатель является генератором реактивного тока: индуктивного по отношению сети при недозавождении и емкостного при перевозбуждении. Указанная способность синхронных двигателей является их ценным качеством, которое используется для повышения коэффициента мощности электрических установок.

Рабочие характеристики синхронного двигателя представляют собой зависимости частоты вращения  $n_2$ , потребляемой мощности  $P_1$ , полезного момента  $M_2$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$  и тока статора  $I_1$  от полезной мощности двигателя  $P_2$  (рисунок 53).

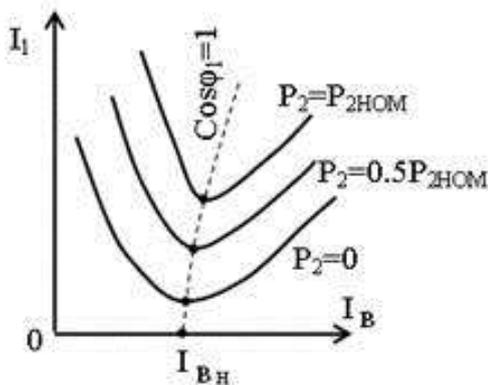


Рисунок 52 - U-образные характеристики синхронного двигателя

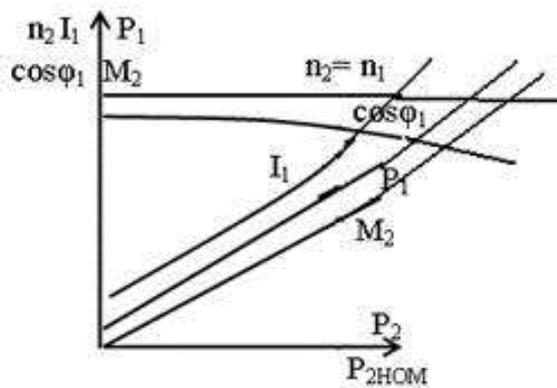


Рисунок 53 - Рабочие характеристики синхронного двигателя

Частота вращения ротора  $n_2 = const$ , и поэтому характеристика  $n_2 = f(P_2)$  прямая параллельная оси абсцисс. Полезный момент на валу синхронного двигателя  $M_2 = f(P_2 | \omega_1)$ . Так как рабочие характеристики снимают при условии  $f_1 = const$ , то график  $M_2 = f(P_2)$  имеет вид прямой, выходящей из начала координат.

Мощность, потребляемая из сети,  $P_1 = P_2 + \Delta P$ , а так как с ростом нагрузки на валу растут и потери мощности  $\Delta P$ , то характеристика  $P_1 = f(P_2)$  имеет несколько криволинейный характер.

Характеристика  $\cos \varphi_1 = f(P_2)$  зависит от характера возбуждения двигателя при холостом ходе. Если  $\cos \varphi_0 = 1$ , то при увеличении нагрузки он уменьшается.

$$I_1 = \frac{P_1}{m_1 u_1 \cos \varphi_1}$$

Ток в обмотке статора  $I_1$  - с увеличением нагрузки на валу двигателя растет быстрее, чем потребляемая мощность  $P_1$ , вследствие уменьшения  $\cos \varphi_1$ .

#### Пуск синхронных двигателей

Для пуска синхронного двигателя приходится применять специальные способы, сущность которых состоит в предварительном приведении ротора во вращение до близкой к синхронной частоте вращения, при которой между статором и ротором устанавливается устойчивая магнитная связь.

В настоящее время для этой цели применяют метод асинхронного пуска. При этом методе синхронный двигатель пускают как асинхронный, для чего снабжают пусковой короткозамкнутой обмоткой, выполненной по типу "беличьей клетки", для увеличения сопротивления стержней клетку изготавливают из латуни. Схема асинхронного пуска приведена на рисунке 54. При включении трехфазной обмотки статора в сеть образуется вращающее магнитное поле, наводящее в стержнях пусковой обмотки I э.д.с., которые создают токи  $I_n$ . Взаимодействие этих токов с вращающим полем создают электромагнитные силы, под действием которых ротор приводится во вращение. После разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной ( $n_2 = 0.95n_1$ ), обмотку возбуждения 2 подключают к источнику постоянного тока. Образующийся при этом синхронный момент втягивает ротор двигателя в синхронизм.

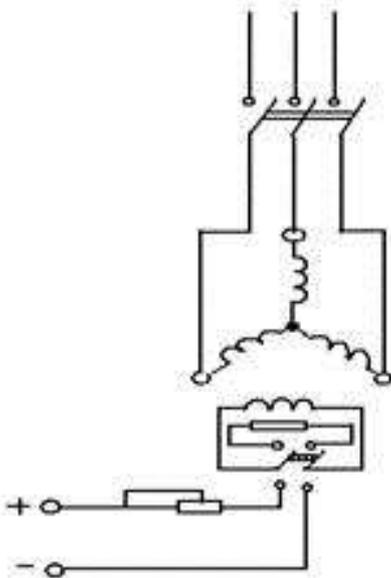


Рисунок 54 - Схема асинхронного пуска

В процессе асинхронного пуска обмотку возбуждения нельзя оставлять разомкнутой, так как во время разгона ротора в ней вращающимся магнитным полем индуцируется ЭДС  $E_e$ .

$$E_2 = 4,44 f_2 \omega_2 \Phi_m - 4,44 f_1 s \omega_e \Phi_m \quad (167)$$

В начальный момент пуска при  $s=1$  из-за большого числа витков обмотки возбуждения  $E_e$  может достигнуть большого значения и вызвать пробой изоляции обмотки возбуждения. Для предотвращения этого обмотку возбуждения на период разгона замыкают на гасящий резистор  $Z$ , сопротивление которого в 5-10 раз больше, чем активное сопротивление обмотки возбуждения

#### Синхронный компенсатор

Синхронный компенсатор - синхронный двигатель, работающий без нагрузки на валу и предназначенный для генерирования реактивной мощности. Синхронный компенсатор включают в электрическую систему с целью повышения ее коэффициента мощности или стабилизации напряжения.

К числу потребителей переменного тока, требующих для своей работы реактивной мощности в первую очередь относятся асинхронные двигатели. На рисунке 55 показана схема системы, состоящая из синхронного генератора СГ, повышающего Тр I и понижающего Тр II и трансформаторов, линии электропередачи ЛЭП, потребителя П и синхронного компенсатора СК, включенного на входе потребителя.

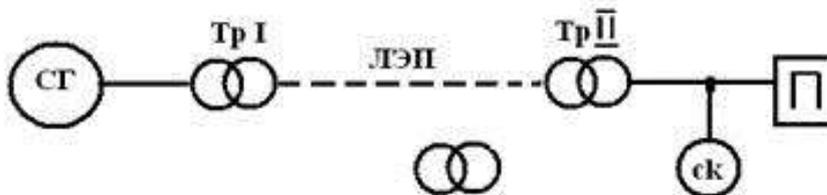


Рисунок 55- Схема включения синхронного компенсатора

Для пояснения явлений, связанных с подключением СК к электрической системе, рассмотрим рисунок 58. При подключении к сети потребителя П (группа асинхронных двигателей) в сети возникает ток  $\dot{I}_n$ , отстающий от напряжения  $\dot{U}_c$  на угол  $\varphi_n$  (рисунок 56,а).

При подключении СК параллельно потребителю П и создание в ней режима перевозбуждения (см. рисунок 56,б) в сети появится ток  $I_{СК}$ . Результирующий ток в сети:

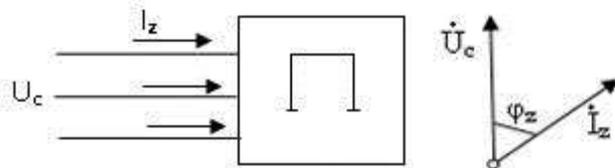
$$\dot{I}_c = \dot{I}_n + \dot{I}_{СК} \quad (168)$$

Фазовый сдвиг тока  $\dot{I}_1$  относительно напряжения  $U_c$  уменьшается и одновременно уменьшается

ток  $\dot{I}_c = \dot{I}_c \angle I_n$ .

Синхронные компенсаторы применяют и для стабилизации напряжения в сети при передаче энергии по линиям большой протяженности. При больших нагрузках напряжение в конце линии (у потребителя) оказывается меньше, чем в начале; при малых нагрузках, наоборот - под влиянием емкостей линии электропередачи в ее конце может стать больше, чем в начале. Если же в конце линии включить синхронный компенсатор, работающий при больших нагрузках с перевозбуждением и при малых нагрузках с недо возбуждением, то это позволит поддерживать напряжение в конце линии практически постоянным.

а)



б)

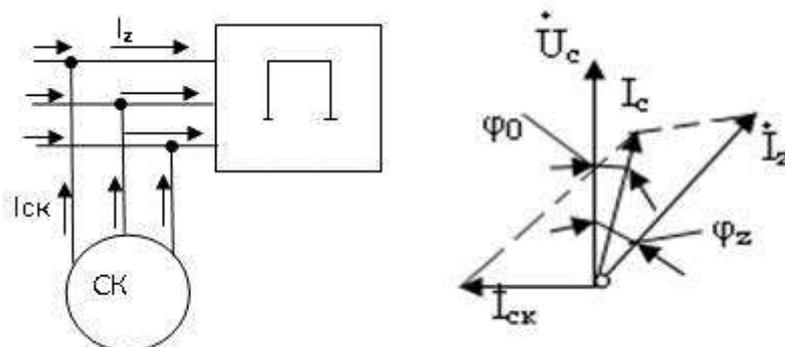


Рисунок 56 - Векторные диаграммы без асинхронного компенсатора (а) и с синхронным компенсатором (б)

### Вопросы для самоконтроля

1. Параметры синхронного двигателя.
2. Пуск синхронных двигателей.
3. Параметры синхронного компенсатора.

## Тема 20. Синхронные машины специального назначения

Двигатели с постоянными магнитами.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами довольно просты по конструкции, надежны в работе и обладают значительной устойчивостью.

Электромагнитные процессы в машинах с постоянными магнитами протекают так же, как и в генераторах с электромагнитным возбуждением. Однако значительная реакция якоря во время

пуска или при коротком замыкании может вызвать необратимое размагничивание постоянных магнитов, в результате чего после снятия размагничивающего действия свойства постоянного магнита не будут полностью восстановлены. Для уменьшения действия реакции якоря на постоянные магниты расстояние между полюсными наконечниками соседних полюсов делают значительно меньше, чем в машинах с электромагнитным возбуждением (см. рис. 5.10). В этом случае поток реакции якоря  $\Phi_{qv}$  значительной степени замыкается через полюсные наконечники, не подвергая размагничиванию постоянные магниты.

Для возможности пуска в полюсных наконечниках располагается пусковая короткозамкнутая обмотка, выполненная по типу «беличьей клетки». То обстоятельство, что поток двигателя с постоянными магнитами нельзя регулировать, не имеет существенного значения при синхронном вращении, но во время пуска оказывает вредное влияние. При разгоне поток постоянных магнитов индуцирует в обмотке якоря э. д. с, которая имеет частоту вращения  $f = f_1(1-s)$ . Вызываемый этой э. д. с. ток замыкается через сеть и создает потери, покрываемые за счет подводимой к ротору механической мощности  $P_T$ . В результате на ротор при пуске двигателя действует тормозной момент

$$M_T = \frac{P_T}{\omega_1(1-s)},$$

величина которого зависит от скольжения  $s$  (рис. 5.25). Тормозной момент  $M_T$  обычно имеет максимум при скольжении  $s = 0,9 \div 0,6$ .

Полезный пусковой момент  $M_{пдвигателя}$  равен разности асинхронного момента  $M_i$  тормозного момента  $M_T$ . Вследствие действия тормозного момента  $M_T$  кривая пускового момента  $M_{п}$  имеет провал (рис. 5.25).

При правильном выборе пусковой обмотки минимальный результирующий пусковой момент  $M_{пмин}$  получается больше номинального  $M_n$ .

Реакция якоря при пуске двигателя размагничивает постоянный магнит. Максимальное размагничивание имеет место в момент «противовключения», когда ротор при асинхронном вращении со скоростью, близкой к синхронной, проходит положение, при котором угол  $\theta = 180^\circ$ . В этот момент размагничивающий ток якоря  $I_{п}$  определяется суммой напряжения сети  $U$  и э. д. с. вращения

$$E_0, \text{ т. е. } I_{п} = \frac{U + E_0}{x_d}.$$

В машинах с электромагнитным возбуждением э. д. с.  $E_0$  определяется лишь остаточным намагничиванием и имеет величину, не превышающую нескольких процентов. Поэтому в двигателе с постоянными магнитами ток  $I_{п}$  имеет значительно большую величину.

Вследствие того, что в машинах с постоянными магнитами  $x_d < x_q$ , реактивная составляющая момента  $M_d$  уменьшает вращающий момент  $M_{двигателя}$  при  $0 < \theta < 90^\circ$  и увеличивает при  $90 < \theta < 180^\circ$ . При работе синхронной машины обычно угол  $\theta < 90^\circ$ , поэтому в машинах с постоянными магнитами добавочный реактивный момент  $M_d$  уменьшает полный момент  $M_{синхронной}$  машины.

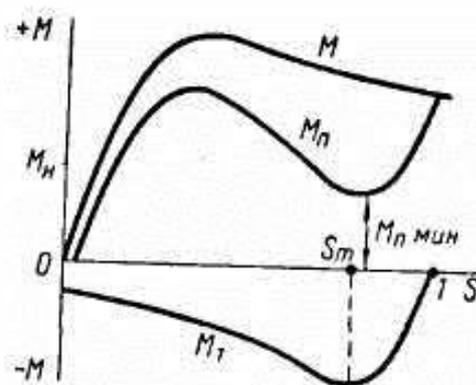


Рис. 5.25. Кривые пускового и тормозного момента при пуске синхронного двигателя с постоянными магнитами

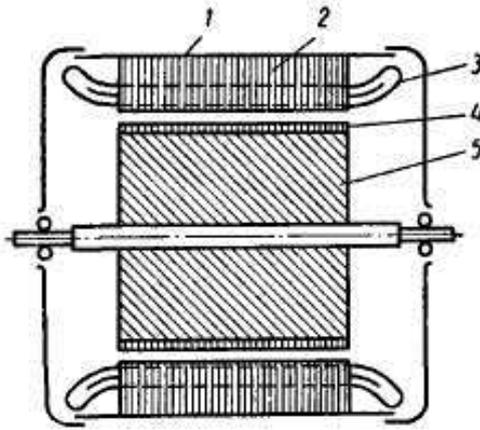


Рис. 5.26. Конструкция гистерезисного двигателя с цилиндрическим ротором: 1 — корпус; 2 — пакет статора; 3 — обмотка статора; 4 — цилиндр из магнитотвердого материала; 5 — сердечник или втулка

Рабочие характеристики двигателей с постоянными магнитами мало отличаются от характеристик (см. рис. 5.24) двигателей с обмоткой возбуждения.

Недостатком двигателей с постоянными магнитами является сравнительно низкий коэффициент мощности и сложность изготовления ротора.

Гистерезисные двигатели. В последнее время в схемах автоматики получили широкое распространение гистерезисные двигатели, ротор которых имеет стальной цилиндр (рис. 5.26), выполненный из магнитотвердого материала (например, из викаллой). С целью экономии дорогостоящего магнитотвердого материала роторы обычно делают сборными. Они состоят из втулки 5 и наружного массивного или шихтованного цилиндра 4 из магнитотвердого материала. Зазор между статором и ротором равномерный по всей окружности. Статор у гистерезисных двигателей такой же, как у других синхронных и асинхронных двигателей. Внешний вид гистерезисных двигателей не отличается от внешнего вида асинхронных двигателей с массивным стальным ротором.

Магнитодвижущая сила обмотки якоря намагничивает стальной цилиндр ротора, в результате чего при синхронном вращении он становится постоянным магнитом. Во время пуска и при асинхронном ходе поток якоря, вращающийся относительно ротора, перемагничивает стальной цилиндр. При этом полярность цилиндра как бы поворачивается вслед за полем якоря. Если бы ротор был выполнен из магнитомягкого материала, то вектор, определяющий направление потока в цилиндре ротора, точно совпадал бы с вектором вращающегося потока якоря. Вследствие сильно выраженного гистерезиса имеет место сдвиг векторов на угол  $\theta_r$ , вызванный молекулярным трением. Угол  $\theta_r$  отставания потока в роторе не зависит от частоты перемагничивания, он определяется лишь магнитными свойствами материала цилиндра. Поэтому создающийся в двигателе гистерезисный электромагнитный момент  $M_r$  не зависит от скорости вращения двигателя (кривая 2, рис. 5.27).

При пуске и асинхронном вращении ротора в массиве цилиндра возникают вихревые токи. В результате их взаимодействия с потоком машины создается асинхронный момент. Активное сопротивление ротора гистерезисного двигателя велико, поэтому критическое скольжение больше единицы и максимальное значение асинхронный момент имеет при пуске. При синхронном вращении он равен нулю (кривая 3, рис. 5.27). Таким образом, во время пуска помимо гистерезисного момента возникает также асинхронный, вследствие чего при  $s > 0$  суммарный момент двигателя возрастает (кривая 1).

У двигателей с шихтованным цилиндром из магнитотвердого материала асинхронный момент практически отсутствует. Двигатели с массивным цилиндром могут работать в синхронном и в асинхронном режимах. В последнем случае их момент увеличивается. Однако при асинхронном режиме перемагничивание кольца, выполненного из магнитотвердого материала, связано с большими потерями, поэтому гистерезисные двигатели обычно работают в синхронном режиме или в асинхронном при небольшом скольжении ротора. Для уменьшения потерь от

зубцовых гармоник в двигателях с массивным цилиндром желательно иметь на статоре закрытые пазы.

При синхронном вращении момент двигателя определяется углом  $\theta$ . С изменением нагрузки угол  $\theta$  изменяется, но не может превысить угол  $\theta_r$ , определяемый магнитными свойствами материала. В первом приближении можно считать, что при угле  $\theta$  гистерезисный момент

$$M = M_r \sin\left(\frac{\theta}{\theta_r} \frac{\pi}{2}\right).$$

Если угол  $\theta$ , соответствующий моменту на валу двигателя, превышает  $\theta_r$ , то двигатель переходит в асинхронный режим.

Ток, потребляемый гистерезисным двигателем из сети, сравнительно мало изменяется при разгоне. Поэтому в случае использования одного конденсатора создаются благоприятные условия для создания кругового поля при пуске и синхронном вращении. При малых нагрузках к. п. д. и  $\cos\varphi$  двигателя ухудшаются, так как его ток остается почти неизменным (рис. 5.28).

Существенными преимуществами гистерезисных двигателей по сравнению с синхронными двигателями других типов являются большие моменты, пусковой и входа в синхронизм, плавность входа в синхронизм, малый пусковой ток (1,1÷1,5), простота конструкции, надежность в эксплуатации, бесшумность при работе и высокий к. п. д. (достигающий 65%), малые вес и габариты.

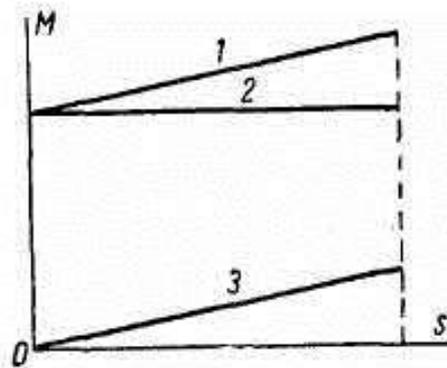


Рис. 5.27. Моментная характеристика гистерезисного двигателя

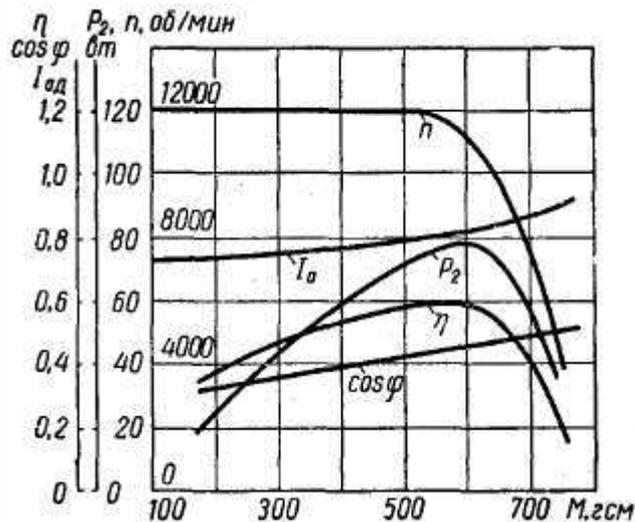


Рис. 5.28. Рабочие характеристики гистерезисного двигателя:  $U_H=127b$ ;  $f_1=400$  гц;  $n=12000$  об/мин;  $m=3$

Преимуществом гистерезисных двигателей по сравнению со всеми другими синхронными двигателями является возможность их выполнения многоскоростными с переключением обмотки статора на различное число полюсов.

К недостаткам гистерезисных двигателей следует отнести склонность ротора к качаниям. Особенно это имеет место, когда цилиндр из магнитотвердого материала выполнен шихтованным, так как токи в стали ротора оказываются малыми, и их демпфирующее действие незначительным. Недостатком гистерезисных двигателей является также малый  $\cos\phi$ , который обычно не превышает 0,5. В асинхронном режиме коэффициент мощности низок вследствие малой магнитной проницаемости ротора, а в синхронном — из-за сравнительно малой м. д. с. цилиндра ротора.

Коэффициент мощности, момент и к. п. д. двигателя могут быть существенно увеличены кратковременным подмагничиванием ротора, что может быть осуществлено повышением на  $1\div 2$  периода напряжения, подводимого к статору. Подмагниченный таким образом ротор разгружает обмотку статора от намагничивающего тока. В некоторых случаях после подмагничивания максимальный момент двигателя в синхронном режиме может увеличиться в  $4\div 6$  раз, а ток статора уменьшится вдвое и стать опережающим.

Реактивные двигатели. Реактивные двигатели распространены в аппаратах звукозаписи, звуковоспроизведения, лентопротяжные и других механических системах, в которых требуется строго постоянная скорость вращения при небольших моментах сопротивления на валу.

Реактивный двигатель представляет собой явнополюсную синхронную машину без обмотки возбуждения.

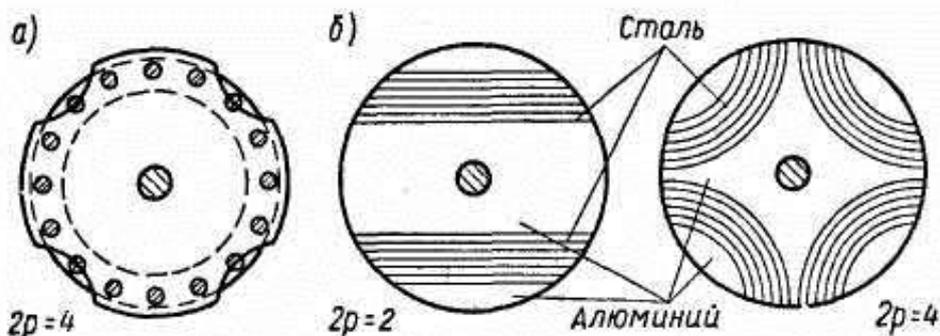


Рис. 5.29. Конструкции роторов синхронных реактивных двигателей: а — со впадинами; б — секционированные

Поток двигателя и его вращающий момент создается м. д. с. реакции якоря, отсюда и название — реактивный двигатель. Момент двигателя  $M_d$  (5.7) возникает за счет дополнительной мощности  $P_d$  (5.6), имеющей место вследствие неодинаковой проводимости ротора по осям  $d$  и  $q$ . Наивыгоднейшим отношением  $x_q/x_d$  можно считать величину, близкую к 0,5.

Роторы, в основном, выполняются двух типов: со впадинами (рис. 5.29, а) и секционированные (рис. 5.29, б). В последнем случае промежутки между магнитопроводящими секциями пластин ротора заполняются слоями алюминия или меди, которые образуют короткозамкнутую пусковую клетку. Секционированный ротор имеет большую магнитную проводимость по продольной оси и меньшее отношение  $x_q/x_d$ , в результате чего увеличивается максимальный реактивный момент двигателя. Ротор со впадинами шихтуется из штампованных стальных листов, имеющих специальный профиль, или в некоторых случаях выфрезеровывается из обычного ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя.

Намагничивающий ток реактивного двигателя, так же как и асинхронного, поступает из сети переменного тока со стороны обмотки статора. На векторной диаграмме (рис. 5.30) реактивного двигателя э. д. с.  $E_0$ , индуцируемая потоком возбуждения, равна нулю, в остальном диаграмма не отличается от диаграммы, представленной на рис. 5.16, а.

Согласно выражению (5.7) реактивный момент  $M_d$  двигателя пропорционален синусу двойного угла  $\theta$  и имеет максимум при  $\theta = 45^\circ$ . Подробное исследование реактивного момента с учетом активного сопротивления обмотки статора  $r_a$  показывает, что, вследствие влияния  $r_a$ , максимальное значение реактивного момента  $M_d$  уменьшается. В этом случае максимум  $M_d$  имеет место при угле  $\theta = 25\div 40^\circ$  (рис. 5.31).

У реактивных двигателей отсутствует начальный пусковой момент. Поэтому их роторы снабжаются короткозамкнутой пусковой обмоткой.

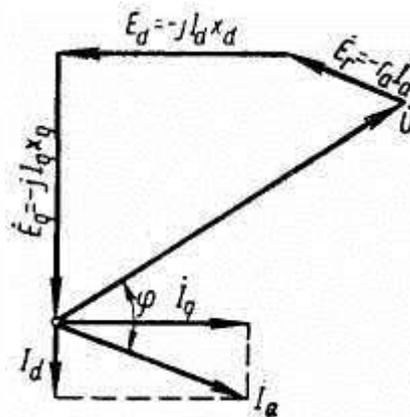


Рис. 5.30. Векторная диаграмма реактивного двигателя

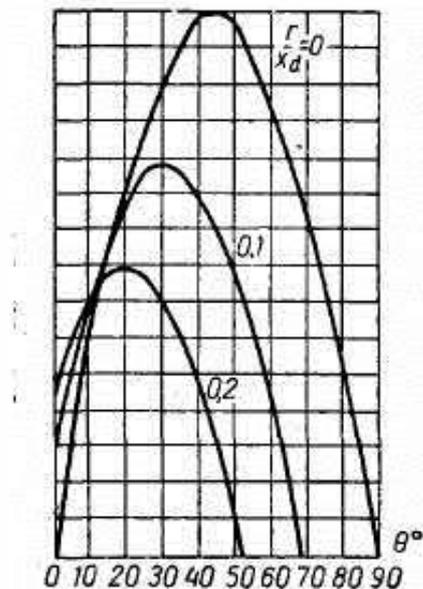


Рис. 5.31. Характеристики реактивного момента  $M_d$  в функции угла  $\theta$  с учетом активного сопротивления статора при  $\frac{x_q}{x_d} = 0,25$

При синхронном вращении короткозамкнутая обмотка является успокоительной, демпфирующей колебания ротора.

Однофазные реактивные двигатели часто выполняются конденсаторными. Эллиптичность поля приводит к неравномерному вращению двигателей, к появлению шума и вибраций. Поэтому обычно реактивные двигатели проектируют таким образом, чтобы круговое поле имело место при номинальном, синхронном режиме. Для увеличения пускового момента двигатели иногда выполняют с пусковой и рабочей емкостями.

В настоящее время в случаях, когда не требуется строгого постоянства скорости вращения, реактивные двигатели заменяются гистерезисными, которые имеют лучшие пусковые и рабочие свойства. На практике иногда синхронный реактивный двигатель получают из асинхронного. При этом статор оставляют без изменения, а в роторе выфрезеровывают часть стержней короткозамкнутой обмотки (рис. 5.29, а). Мощность такого синхронного двигателя составляет 35—40% от асинхронного, его к. п. д. и коэффициент мощности также ухудшаются.

Недостаток реактивных двигателей — низкий максимальный момент, коэффициент мощности ( $\cos\varphi = 0,5$ ) и к. п. д. У двигателей мощностью в несколько десятков ватт  $\eta = 35 \div 40\%$ , а у двигателей мощностью в несколько ватт  $\eta < 25\%$ .

К достоинству реактивных синхронных двигателей следует отнести отсутствие колебаний ротора и высокую надежность работы.

Редукторный реактивный двигатель с многофазной обмоткой статора.

Часто в системах автоматики, особенно при высокочастотных источниках питания, требуется, чтобы скорость вращения двигателя была весьма низкой по отношению к скорости вращения синхронного поля. В этих случаях удобно применять редукторные двигатели, которые позволяют получить малую скорость вращения электрическим способом (без применения механического редуктора) при стандартной частоте питающей сети.

Принцип электромагнитной редукции основан на использовании зубцовых гармоник электромагнитных полей, возникающих при открытых пазах статора и ротора. В открытых пазах статора I (рис. 5.32) располагается трех- или двухфазная обмотка, создающая вращающееся магнитное поле. На поверхности статора I и ротора II имеются зубцы. Число зубцов статора ( $z_1$ ) и ротора ( $z_2$ ) выбирается неодинаковым, и зубцовые шаги оказываются разными. Если положение осей зубцов статора и ротора, имеющих номер 1, совпадает в пространстве, то оси зубцов 2 сдвинуты на угол  $\alpha$ , оси зубцов 3 сдвинуты на угол  $2\alpha$ , оси  $n$ -ных зубцов сдвинуты на  $(n-1)\alpha$ ,

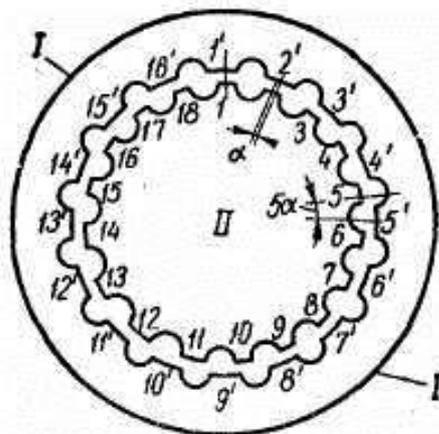


Рис 5.32. Конструкция статора и ротора редукторного реактивного двигателя: / — статор; // — ротор; 1' — 16' — зубцы статора; 1 — 18 — зубцы ротора

$$\text{где } \alpha^\circ = \frac{360^\circ}{z_1} - \frac{360^\circ}{z_2}.$$

Ротор двигателя поворачивается таким образом, чтобы проводимость потока была наибольшей. Это имеет место, если оси потока зубца статора и зубца ротора совпадают по направлению. Допустим, что в начальный момент времени ось потока совпадает с осью зубца 1' статора (рис. 5.32). Через некоторое время ось потока поворачивается и совпадает с осью зубца 2' статора. За это время ротор поворачивается на угол  $\alpha$  таким образом, чтобы оси зубцов 2 ротора и 2' статора совпадали. За время, в течение которого поток статора поворачивается на угол, соответствующий  $n$  зубцам, ротор поворачивается всего лишь на угол, равный  $n\alpha$ . За время одного полного оборота поток статора поворачивается на  $z_1$  зубцов, а ротор на угол  $\alpha z_1$ , т. е. ротор вращается медленнее потока статора в

$$\frac{\alpha^\circ z_1}{360^\circ} = 1 - \frac{z_1}{z_2} = \frac{z_2 - z_1}{z_2}. \quad (5.9)$$

Чем ближе к единице отношение  $\frac{z_1}{z_2}$ , тем медленнее вращается ротор.

По условиям симметрии магнитной цепи должно быть соблюдено равенство  $z_2 - z_1 = k \cdot 2p$ , где  $k = 1, 2$ .

Учитывая выражение (5.9), находим при  $k = 1$  минимальную скорость ротора:

$$n_{\text{мин}} = \frac{60 f_1}{p} \frac{2p}{z_2} = \frac{120 f_1}{z_2}. \quad (5.10)$$

Из формулы (5.10) следует, что минимальная скорость вращения определяется числом зубцов ротора и не зависит от числа полюсов машины. Достоинством редукторных двигателей этого типа является равномерная скорость вращения.

Однофазный редукторный реактивный двигатель.

При  $z_1 = z_2$  реактивный редукторный двигатель работает только как однофазный, поток которого пульсирует. На статоре 1 (рис. 5.33) двигатель имеет однофазную обмотку, обычно выполняемую в виде катушки. Зубцовое деление на поверхности статора и ротора одинаково и соответствует числу зубцов.

Двигатель не имеет начального пускового момента. Для приведения во вращение его необходимо раскрутить. При синхронном вращении в момент увеличения пульсирующего потока до максимального значения все зубцы ротора притягиваются к зубцам статора. Когда поток спадает, диск ротора поворачивается дальше по инерции. Затем при достижении следующего максимального значения потока зубцы ротора притягиваются к соседним зубцам статора и т. д. За полпериода изменения тока диск ротора поворачивается на угол, соответствующий одному зубцу. Скорость вращения двигателя

$$n = \frac{120 f_1}{z}.$$

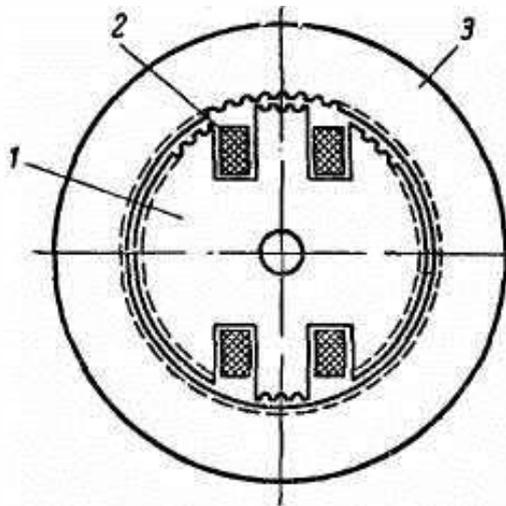


Рис. 5.33. Однофазный реактивный двигатель с зубчатым ротором: 1 — статор; 2 — обмотка статора; 3 — ротор

При выпадении двигателя из синхронизма ротор останавливается, в этом случае среднее значение момента равно нулю.

Так как поток и вызываемый им момент пульсируют, то скорость вращения двигателя неравномерна. Для сглаживания неравномерности вращения ротор выполняют с большим моментом инерции, поэтому обычно его делают внешним. Такие двигатели применяются для электроприводов. При 77 зубцах и частоте питания  $f = 50$  гц двигатель имеет 78 об/мин.

Шаговые двигатели.

Для преобразования управляющих импульсов в заданный угол поворота применяются синхронные двигатели, в которых поле вращается не равномерно, а при подаче сигнала поворачивается скачкообразно. Такие двигатели называются шаговыми или импульсными.

На статоре шаговые двигатели имеют две (иногда три) сдвинутые в пространстве обмотки, которые могут быть сосредоточенными или распределенными. Ротор двигателей всегда имеет явно выраженное исполнение. Шаговые двигатели разделяются на двигатели с активным ротором (имеющие обмотку возбуждения или постоянные магниты) и двигатели с реактивным ротором (не имеющие возбуждения).

Шаговый двигатель работает следующим образом. В обмотку статора (или комбинацию статоров) подается постоянный ток. При этом полюса ротора устанавливаются против возбужденных полюсов статора, по обмоткам которых проходит ток. Когда постоянный ток подают в другие обмотки статора, ротор поворачивается на один шаг в положение, при котором его полюсы устанавливаются против следующих возбужденных полюсов статора. При каждом переключении постоянного тока в обмотках управления ротор двигателя поворачивается на один шаг.

К шаговым двигателям предъявляются следующие требования: надежность в работе, быстрое действие, малый шаг, недопустимость накопления ошибки с увеличением числа шагов, отсутствие свободных колебаний при отработке шага, минимальное число обмоток управления.

Существует много конструкций шаговых двигателей, одна из них изображена на рис. 5.34. Число пазов статора двигателя выбирается кратным четырем. Один зубцовый шаг статора соответствует половине полюсного деления. На статоре укладываются две независимые обмотки *I* и *II*, состоящие из катушек, которые охватывают один зубец. Катушки каждой обмотки надевают на зубцы, расположенные через один. Таким образом, зубцы, охватываемые катушками одной и другой обмоток, чередуются. Полярность зубцов, создаваемая одной обмоткой, изменяется от одного зубца к другому. Катушки уложены таким образом, что если бы по обеим обмоткам одновременно проходил ток, то рядом расположились бы два зубца одинаковой полярности, охватываемые катушками разных обмоток.

Ширина полюсного наконечника ротора соответствует ширине одного зубца, но число полюсов ротора в два раза меньше числа зубцов на статоре. Поэтому полюса ротора находятся под пазами статора, расположенными через один. Эти пазы охватываются катушками одной обмотки.

Обмотка возбуждения полюсов ротора питается постоянным током через контактные кольца.

В статорные обмотки двигателя поочередно подаются импульсы постоянного тока (рис. 5.34, *б* и *в*). Полярность тока в обмотке при переключении изменяется. При каждом переключении тока в обмотках статора ротор поворачивается на один шаг. Чтобы двигатель изменил направление вращения, необходимо изменить полярность включения одной из обмоток статора.

В некоторых схемах обмотка возбуждения двигателя может быть включена в цепь анода лампы или через полупроводниковый выпрямитель (рис. 5.35, *а*). В этом случае ток проходит только в течение одной половины периода. Такие двигатели называются одно-тактными. Иногда обмотку разбивают на две:  $B_1$  и  $B_2$  (рис. 5.35, *б*).

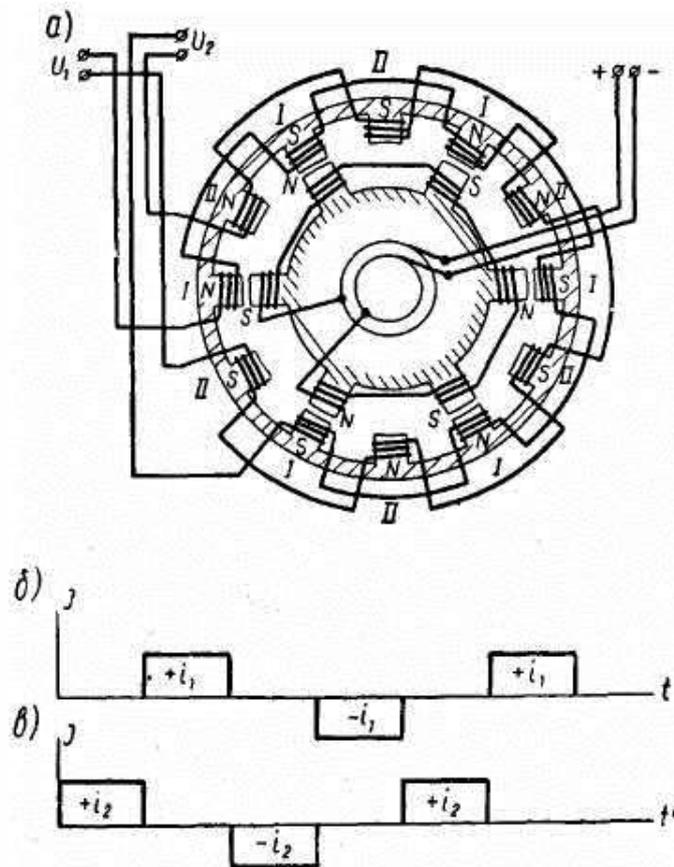


Рис. 5.34. Устройство шагового двигателя: а — схема двигателя; б — изменение тока в обмотке I статора; в — изменение тока в обмотке II статора

В следствие встречного включения вентилях в одной половине периода ток проходит по обмотке  $B_1$ , в другой половине периода по  $B_2$ .

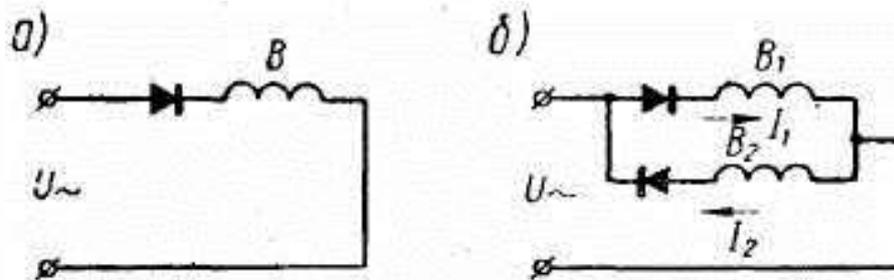


Рис. 5.35. Схемы соединения обмоток возбуждения при питании пульсирующим током шагового двигателя: а — однофазного двигателя; б — двухфазного

Такие двигатели называются двухтактными. Ротор двухтактных двигателей такой же, как и у однофазных, но конструкция статора имеет некоторые особенности. Число зубцов на статоре выбирается в два раза меньше, чем на роторе. Полюсные наконечники на зубцах статора попарно смещены таким образом, что если полюсные наконечники зубцов 1, охватываемых обмоткой  $B_1$ , расположены против пазов ротора, то наконечники зубцов 2, охватываемые обмоткой  $B_2$ , расположены против зубцов ротора (рис. 5.36) и наоборот. В двухтактном двигателе значительно уменьшается пульсация момента.

Для уменьшения шага двигателя, иногда выполняют по типу редукторных. В этом случае поверхность роторных и статорных зубцов имеет мелкие зубчики.

Современные двигатели позволяют делать до 200 шагов в секунду без потери шага при внезапных остановках и пусках. Шаговые двигатели находят широкое применение в ракетной технике, счетно-решающих машинах, самозаписывающих и лентопротяжных механизмах.

Индукторные генераторы высокой частоты.

Генераторы, вырабатывающие энергию переменного тока с частотой от ста до нескольких тысяч герц, нашли широкое применение в радиолокации, электротермии, самолетных установках и в деревообрабатывающей промышленности. В большинстве случаев подобные генераторы выполняются однофазными.

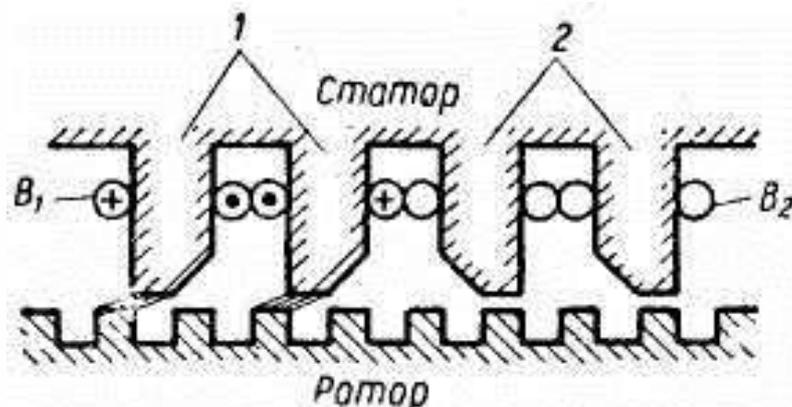


Рис. 5.36. Схема пазов двухтактного двигателя

В генераторах индукторного типа обмотки возбуждения и якоря выполняются неподвижными и закладываются в одни и те же открытые пазы статора (рис. 5.37). Обмотка возбуждения так же, как и в обычных генераторах, питается постоянным током. Паза и зубцы на статоре и на роторе имеют близкую ширину.

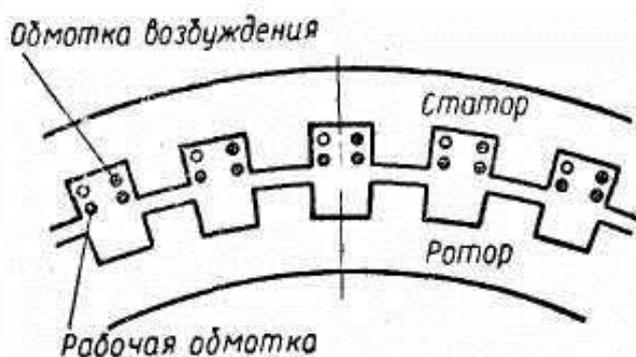


Рис. 5.37. Устройство простейшего индукторного генератора

При вращении ротора магнитная проводимость изменяется, в результате чего магнитный поток пульсирует (рис. 5.38) от максимального значения  $\Phi_{\text{макс}}$  (когда против зубцов статора находятся зубцы ротора) до минимального значения  $\Phi_{\text{мин}}$  (когда против зубцов статора находятся паза ротора).

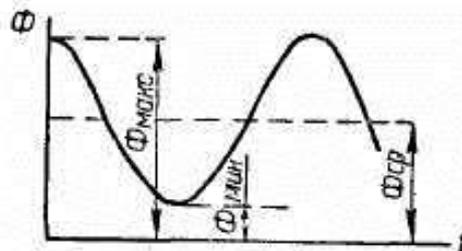


Рис. 5.38. Изменение потока индукторного генератора

Постоянная составляющая потока  $\Phi_{\text{ср}}$  не оказывает влияния на работу машины. Амплитуда индуцируемой э. д. с. пропорциональна значению потока

$$\Phi_m = \frac{\Phi_{\text{макс}} - \Phi_{\text{мин}}}{2}.$$

Величина основной гармоники э. д. с. определяется по уравнению (4.38), где частота изменения э. д. с.

$$f = \frac{zn}{60}.$$

Здесь  $z$  — число зубцов;

$n$  — скорость вращения ротора, об/мин.

Недостатком генератора такой конструкции является то, что э. д. с. индуцируется не только в обмотке якоря, но и в обмотке возбуждения. Кроме того, технологически неудобно закладывать обмотки в каждый паз статора. Поэтому обычно пазы статора разбивают на несколько групп. Обмотки закладывают не во все пазы, а только в особые, которые имеют большую ширину.

Зубцы статора, которые служат для создания пульсации потока, разбивают на группы  $I$  и  $II$  (рис. 5.39), разделяемые большими пазами. Большие пазы имеют такую ширину, что если под группой зубцов  $I$  располагаются зубцы ротора, то под группой зубцов  $II$  — пазы ротора. При вращении ротора положение групп  $I$  и  $II$  относительно ротора чередуется. Группа  $I$  зубцов охватывается обмоткой якоря  $ОЯ_I$ , группа  $II$  охватывается обмоткой якоря  $ОЯ_{II}$ . При сохранении направления намотки в обмотках  $ОЯ_I$  и  $ОЯ_{II}$  индуцируются э. д. с., направленные встречно. Шаг обмотки возбуждения в индукторном генераторе этого типа в два раза больше, чем шаг обмотки якоря, таким образом, один виток обмотки возбуждения охватывает группы зубцов  $I$  и  $II$ . Так как при нарастании потока в зубцах группы  $I$  поток в зубцах группы  $II$  убывает, то общий поток, охватываемый обмоткой возбуждения, остается неизменным. Поэтому в ней не индуцируется э. д. с.

В некоторых случаях индукторные генераторы имеют два статора  $I$  и  $II$  (рис. 5.40), расположенные в осевом направлении. В роторе поток проходит в направлении оси вала. Пазы ротора под статором  $I$  сдвинуты на половину зубцового шага относительно пазов статора  $II$  таким образом, что если под группой пазов статора  $I$  располагаются зубцы ротора, то под группой пазов статора  $II$  — пазы ротора.

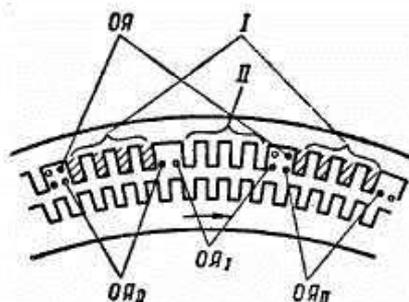


Рис. 5.39. Расположение пазов и обмоток индукторного генератора

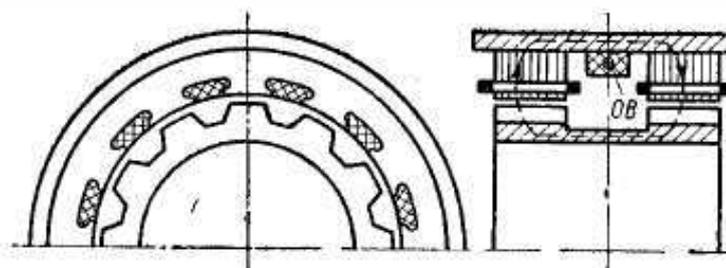


Рис. 5.40. Конструктивная схема индукторного генератора с двойным статором

Поэтому поток обмотки возбуждения не пульсирует, и рабочий процесс генератора аналогичен рассмотренному выше. Характеристика холостого хода индукторного генератора, магнитная цепь которого имеет небольшое насыщение, не отличается от характеристики обычного генератора. При большом насыщении зубцов статора значительная часть потока проходит не только по зубцам, но и по пазам. В результате этого разность  $\Phi_{\max}$  и  $\Phi_{\min}$  становится меньше, и пульсация потока э. д. с. генератора уменьшается. Поэтому характеристика холостого хода насыщенного индукторного генератора после некоторого максимума начинает падать (рис. 5.41).

Реакция якоря индукторных генераторов такая же, как и у обычных. Внешние и регулировочные характеристики близки к соответствующим характеристикам генераторов обычного типа (см. рис. 5.8 и 5.9).

Коэффициент полезного действия индукторных генераторов значительно меньше, чем у обычных генераторов: при  $\cos\varphi = 1$ ,  $\eta = 0,44 \div 0,75$ . Низкое значение к. п. д. объясняется повышенными добавочными потерями в стали и в обмотке якоря вследствие высокой частоты перемагничивания.

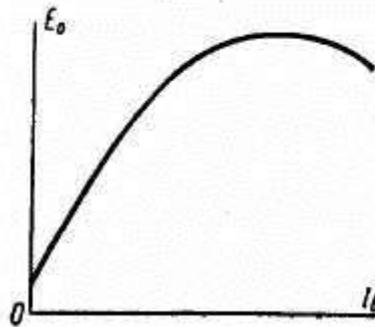


Рис. 5.41. Характеристика холостого хода индукторного генератора

#### Вопросы для самоконтроля

1. Двигатели с постоянными магнитами.
2. Гистерезисные двигатели.
3. Реактивные двигатели
4. Редукторный реактивный двигатель с многофазной обмоткой статора.
5. Однофазный редукторный реактивный двигатель.
6. Шаговые двигатели.
7. Индукторные генераторы высокой частоты.

## Практические работы

### Практическая работа №1 Расчет магнитных параметров машины постоянного тока.

**Цель занятия:** рассчитать величину магнитного потока на пару полюсов машины, магнитную индукцию в воздушном зазоре и коэффициент насыщения магнитной цепи.

**Исходные данные:** схема магнитной цепи машины постоянного тока (рисунок 1.1), МДС обмотки возбуждения, размеры и материалы участков (таблицы 1.2 и 1.3)

**При выполнении задания необходимо привести:**

- цифровые данные задания;
- расчет магнитной цепи с необходимыми пояснениями.

Изобразить эскиз магнитной цепи машины постоянного тока (МПТ), выполненный в масштабе.

**Построить:**

- кривые намагничивания заданных материалов отдельных участков магнитной цепи в удобном масштабе (по данным таблицы 1.3);
- кривую намагничивания магнитной цепи машины.

В исходных данных задана разветвленная симметричная магнитная цепь судовой машины постоянного тока (рисунок 1.1).

Станина МПТ представляет собой сплошную отливку из стали или чугуна, а сердечники полюсов **2** и сердечник якоря **4** набраны из отдельных листов специальной электротехнической стали толщиной 0,35—0,5 мм. На наружной поверхности якоря имеются пазы, в которые укладывается обмотка **6** якоря. Магнитное поле создается обмоткой возбуждения **3**, расположенной на сердечниках полюсов. Конфигурация полюсного наконечника **5** обеспечивает равномерное распределение магнитного поля в воздушном зазоре. В результате взаимодействия поля, создаваемого обмоткой возбуждения, и проводников якоря с током возникает вращающий момент, приводящий якорь во вращение в двигательном режиме работы МПТ. Учитывая симметрию магнитопровода МПТ относительно оси полюсов, можно всю разветвленную цепь представить состоящей из четырех одинаковых неразветвленных магнитных цепей и рассчитать одну из них по правилам расчета неоднородных магнитных цепей. На рисунке **1** средние линии магнитного потока показаны для каждого из четырех симметричных участков.

Как видно, эта магнитная цепь может быть разбита на четыре однородных участка [1]:  $l_{я}$  - ярмо статора;  $2h_n$  - две высоты сердечника полюса;  $2\delta$  — два воздушных зазора;  $l_a$  — сердечник якоря.

Длина средней магнитной линии для каждого однородного участка определяется по чертежу МПТ, выполненному в масштабе. Сечение каждого однородного участка равно произведению ширины участка (или его высоты) на длину  $L$  машины (на чертеже длина машины не показана).

Данные обмоток возбуждения и основные геометрические размеры МПТ приведены в таблице 1.2 применительно к реальным судовым МПТ серии «П». Цифры в условном обозначении серии машины определяют: первая - условную величину наружного диаметра статора  $D_n$ , вторая — условную величину длины машины  $L$ . Каждая строка таблицы 1.2 соответствует определенному варианту задания студенту определенной группы. Номер варианта выбирается по номеру студента в журнале преподавателя. Материалы различных частей магнитопровода и величина воздушного зазора заданы в таблице 1.3. Каждый столбец в таблице 1.3 определяет вариант задания для всей группы. Номер столбца для группы назначается преподавателем.

**Расчет магнитной цепи.** Основной задачей расчета магнитной цепи МПТ обычно является определение МДС обмотки возбуждения, необходимой для создания определенного магнитного потока в замкнутом контуре магнитной цепи или определенной величины магнитной индукции  $B_\delta$  в воздушном зазоре

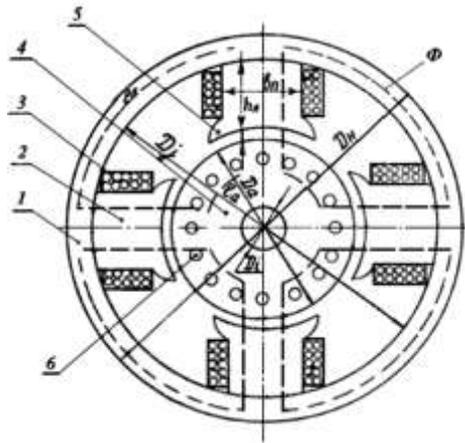


Рисунок 1.1 - Магнитная цепь машины постоянного тока

В данном случае необходимо решить обратную задачу, то есть по заданной МДС обмотки возбуждения определить величину магнитного потока в магнитной цепи МПТ и магнитную индукцию  $B_\delta$  в воздушном зазоре. Расчет проводится для холостого хода МПТ, когда ток якоря равен нулю ( $I_a = 0$ ).

Решение этой задачи необходимо проводить в соответствии с методикой расчета магнитной цепи в следующей последовательности.

1. Закон полного тока для рассматриваемой магнитной цепи записывается в виде

$$F_o = 2I_e W_e = H_\delta \cdot 2\delta + H_{я} l_{я} + H_n 2h_n + H_a l_a, \quad (1.1)$$

где  $F_o = 2I_e W_e$  — МДС обмотки возбуждения двух полюсов;

$H_\delta \cdot 2\delta = F_\delta$  — МДС, необходимая для проведения потока через воздушный зазор;

$H_{я} l_{я} = F_{я}$  — то же, для ярма статора;

$H_n 2h_n = F_n$  — то же, для полюсов;

$H_a l_a = F_a$  — то же, для сердечника якоря.

2. Средняя длина и поперечное сечение каждого однородного участка может быть определена приближенно по формулам:

- для ярма статора

$$l_{я} = \frac{\pi(D_n - h_n)}{2p}, \quad \text{м}, \quad (1.2)$$

$$S_{я} = h_n * L, \quad \text{м}^2, \quad (1.3)$$

$$h_n = \frac{D_n - D_j}{2}, \quad \text{м}$$

где  $h_n$  — высота ярма статора; (1.4)

$2p$  — число полюсов МПТ;

$D_n$  — внешний диаметр ярма статора, м;

$D_j$  — внутренний диаметр ярма статора, м;

$L$  — длина МПТ, м;

- для якоря

$$l_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{2p}, \quad \text{м}, \quad (1.5)$$

$$S_a = h_a * L, \quad \text{м}^2, \quad (1.6)$$

$$h_a = \frac{D_a - D_i}{2}, \quad \text{м}$$

где  $h_a$  — высота сердечника якоря, м; (1.7)

$D_a$  — внешний диаметр якоря, м;

$D_i$  — диаметр вала якоря, м;

- для полюса

$$2h_n = D_j - D_a - 2\delta, \quad \text{м}, \quad (1.8)$$

$$S_n = b_n * L, \quad \text{м}^2, \quad (1.9)$$

где  $b_n$  – ширина полюса;

- для воздушного зазора радиус магнитной силовой линии определяется величиной  $2\delta$ ;

- поперечное сечение воздушного зазора под полюсом равно

$$S_\delta = b_\delta * L, \text{ м}^2, \quad (1.10)$$

где  $b_\delta = \alpha\tau$  – ширина полюсного наконечника, м; (1.11)

$$\tau = \frac{\pi D_\alpha}{2p} \text{ - полюсное деление; (1.12)}$$

$\alpha = 0,62 - 0,72$  — коэффициент полюсной дуги.

3. Далее необходимо задаться первым предварительным значением магнитного потока  $\Phi_1$ , который можно определить из соотношения

$$\Phi_1 = B_{\delta l} * S_\delta, \quad (1.13)$$

где  $B_{\delta l} = 0,6 - 0,7$  Тл.

4. Определение магнитной индукции в однородных участках магнитопровода производится по этой величине магнитного потока  $\Phi_1$  по соотношениям

В воздушном зазоре

$$B_\delta = B_{\delta l}. \quad (1.14)$$

В якоре и ярме статора

$$B_a = \frac{\Phi_1}{2S_a}, \text{ Тл}, \quad (1.15)$$

$$B_\pi = \frac{\Phi_1}{2S_\pi}, \text{ Тл}, \quad (1.16)$$

так как по этим участкам проходит половина магнитного потока полюса.

В сердечнике полюса

$$B_n = \frac{\Phi_1}{S_n}, \text{ Тл}. \quad (1.17)$$

5. Напряженность магнитного поля в однородных участках цепи определяется по кривым намагничивания заданных ферромагнитных материалов, а в воздушном зазоре - по формуле

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{B_\delta}{4\pi \cdot 10^{-7}}, \text{ А/м}. \quad (1.18)$$

6. Из решения уравнения (1.1) можно найти суммарную намагничивающую силу (н. с.), соответствующую принятому значению магнитного потока  $\Phi_1$ , сравнить найденную н.с. с заданной величиной  $2I_0\omega_0$ . Задаваясь другими значениями магнитного потока и стремясь приблизиться к значению н.с.  $2I_0W_0$  повторить решение прямой задачи.

7. Результаты расчета магнитной цепи МПТ для каждого значения магнитного потока удобно представить в виде таблицы.

Таблица 1.1 – Результаты расчета магнитной цепи машины постоянного тока

Параметр Участок	Длина, м	Сечение, м <sup>2</sup>	Поток, Вб	Индукция, Тл	Напряженность, А/м	Намагничивающая сила
Зазор	$2\delta$	$S_\delta$	$\Phi$	$B_\delta$	$H_\delta$	$H_\delta \cdot 2\delta$
Якорь	$l_a$	$S_a$	$\Phi/2$	$B_a$	$H_a$	$H_a l_a$
Ярмо	$l_\pi$	$S_\pi$	$\Phi/2$	$B_\pi$	$H_\pi$	$H_\pi l_\pi$
Полюс	$2h_n$	$S_n$	$\Phi$	$B_n$	$H_n$	$H_n 2h_n$
						S=

Таблица 1.2 – Варианты задания

Тип	Мощность,	МДС пары полюсов	Размеры участков
-----	-----------	------------------	------------------

МПТ	кВт	$2I_e W_e, \text{ Ав}$	магнитной цепи						
$D_n, \text{ м}$	$D_j, \text{ м}$	$D_a, \text{ м}$	$D_i, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	$b_{п}, \text{ м}$				
1 П71	14,5		0.495	0.440	0.245	0.060	0.120	0.080	
2 П92	30,0		0.680	0.590	0.340	0.085	0.190	0.110	
3 П71	8,0		0.428	0.380	0.210	0.065	0.125	0.060	
4 П71	19,0		0.428	0.380	0.210	0.065	0.125	0.060	
5 П71	32,0		0.428	0.380	0.210	0.065	0.125	0.060	
6 П72	10,0		0.428	0.380	0.210	0.065	0.165	0.060	
7 П72	12,5		0.428	0.380	0.210	0.065	0.165	0.060	
8 П72	10,0		0.428	0.380	0.210	0.065	0.165	0.060	
9 П81	14,0		0.510	0.465	0.245	0.085	0.165	0.080	
10 П82	19,0		0.510	0.465	0.245	0.085	0.182	0.080	
11 П82	25,0		0.510	0.465	0.245	0.085	0.182	0.080	
12 П82	25,0		0.510	0.465	0.245	0.085	0.182	0.080	
13 П91	32,0		0.592	0.530	0.294	0.085	0.150	0.100	
14 П91	25,0		0.592	0.530	0.294	0.085	0.156	0.100	
15 П91	32,0		0.592	0.530	0.294	0.085	0.160	0.100	
16 П91	50,0		0.592	0.530	0.294	0.085	0.165	0.100	
17 П91	25,0		0.592	0.530	0.294	0.085	0.130	0.100	
18 П91	30,0		0.592	0.530	0.294	0.085	0.140	0.100	
19 П92	13,0		0.592	0.530	0.294	0.085	0.100	0.100	
20 П92	75,0		0.592	0.530	0.294	0.085	0.170	0.100	
21 П101	32,0		0.655	0.575	0.327	0.100	0.170	0.120	
22 П101	70,0		0.655	0.575	0.327	0.100	0.190	0.120	
23 П101	55,0		0.655	0.575	0.327	0.100	0.175	0.120	
24 П101	90,0		0.655	0.575	0.327	0.100	0.180	0.120	
25 П101	90,0		0.655	0.575	0.327	0.100	0.190	0.120	
26 П101	125,0		0.655	0.575	0.327	0.100	0.210	0.120	
27 П111	55,0		0.722	0.630	0.368	0.115	0.250	0.145	
28 П111	36,0		0.722	0.630	0.368	0.115	0.270	0.145	
29 П111	85,0		0.722	0.630	0.368	0.115	0.290	0.145	
30 П111	190,0		0.722	0.630	0.368	0.115	0.310	0.145	

\* Для всех машин принять число пар полюсов  $2p=4$ .

Таблица 1.3 - Варианты магнитной цепи машины постоянного тока

Группа Участок магнитной цепи												
Ярмо	Ст.3 поков ка	Ст. 3 Поков ка	Ст. 3 поков ка									
Полюс					Ст. 3 Лист 1мм	Ст. 3 Лист 1мм		Ст. 3 Лист 1мм			Ст. 3 Лист 1 мм	
Якорь												
Воздушный зазор, мм	1,35	1,35	1,45	1,45	1,55	1,55	1,65	1,65	1,75	1,75	2,0	2,0

Для всех машин толщину листа электротехнической стали принять равной 0,5 мм.

8. По результатам серии расчетов магнитной цепи легко построить кривую намагничивания магнитопровода МПТ  $\Phi=f(IW)$  и графически найти величину магнитного потока  $\Phi_0$ , соответствующего заданному значению н.с.  $2I_e W_e$  (как показано на рисунке 1.2).

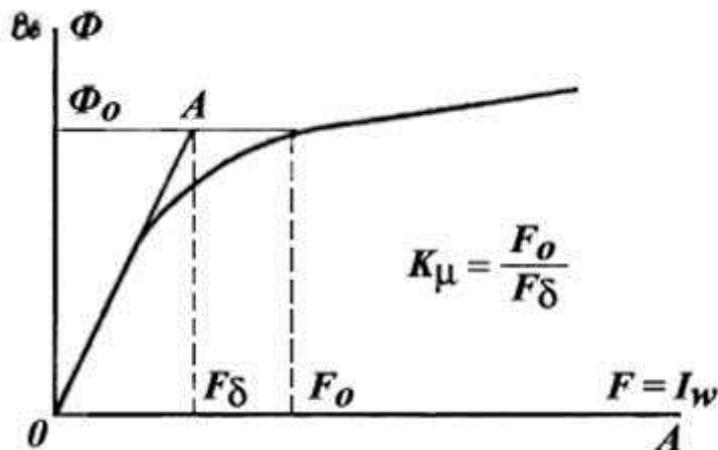


Рисунок 1.2 - Характеристика намагничивания МПТ

9. По кривой намагничивания МПТ  $\Phi = f(IW)$  можно сделать вывод о степени насыщения магнитной цепи МПТ. Для этого на графике кривой намагничивания магнитопровода необходимо провести дополнительное построение - продолжить начальную прямолинейную часть кривой намагничивания до пересечения с линией, соответствующей значению магнитного потока  $\Phi_0$  (рисунок 1.2). Точка А пересечения этих линий определяет величину н.с.  $F\delta$ , необходимой для проведения магнитного потока  $\Phi_0$  через воздушный зазор.

$$K_{\mu} = \frac{F_0}{F \delta} \quad (1.19)$$

Отношение

называется коэффициентом насыщения магнитной цепи.

Коэффициент  $K_{\mu}$  характеризует степень насыщения магнитопровода и существенно влияет на рабочие характеристики электрических машин. Для МПТ величина  $K_{\mu}$  находится в пределах 1,25 — 1,75.

Таблица 1.4 - Характеристики электротехнических материалов

Марка стали	Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м	Удельные потери						При толщине листа, м		
			$B_{10}$	$B_{50}$	$B_{100}$	$B_{500}$	$B_{1000}$		$B_{3000}$	$P_{1,0/50}$ , Вт/кг
<b>1. ГОРЯЧЕКАТАННАЯ ИЗОТРОПНАЯ СТАЛЬ</b>										
								0,001	5,8	
								0,001	5,4	
								0,0005	2,5	
								0,0005	2,0	
								0,0005	1,8	
								0,0005	1,55	
								0,0005	1,55	
								0,0005	1,40	
								0,0005	1,25	
<b>2. ХОЛОДНОКАТАННАЯ ИЗОТРОПНАЯ СТАЛЬ</b>										
								0,0005	2,5	
								-	-	
								-	-	
<b>3. ХОЛОДНОКАТАННАЯ АНИЗОТРОПНАЯ СТАЛЬ</b>										
							-	0,0005	0,8	
<b>4. ЛИСТ. СТАЛЬ (Ст.3) ТОЛЩИНОЙ 1-2 мм ДЛЯ ПОЛЮСОВ</b>										
Ст.3										
<b>5. ЛИТАЯ СТАЛЬ (Ст.3) ПОКОВКИ</b>										
<b>6. ЧУГУН</b>										

Марка стали состоит из четырех цифр: первая цифра (1,2,3) обозначает класс по структурному состоянию и виду прокатки; вторая цифра (0,1,2,3,4,5) обозначает содержание кремния (0 - содержание кремния до 0,4%; 1 - от 0,4 до 0,8 %; 2 - от 0,8 до 1,8 %; 3 - от 1,8 до 2,4 %; 4 - от 2,8 до 3,8 %; 5 - от 3,8 до 4,8 %); третья цифра (0,1,2,6,7) обозначает группу стали по удельным потерям или величине магнитной индукции при определенной напряженности магнитного поля (0 - удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц, т.е.  $P_{1,7/50}$ ; 2 -  $P_{1,0/400}$ ; 6 - величину магнитной индукции при напряженности магнитного поля 0,4 А/м, т.е.  $B_{0,4}$ ; 7 -  $B_{10}$ ); четвертая цифра (1,2,3,4,5,6) обозначает порядковый номер типа стали

## Практическая работа №2 Расчет магнитных параметров машины постоянного тока в режиме нагрузки

**Цель занятия:** рассчитать основные магнитные параметры машины постоянного тока в режиме нагрузки.

### Задача 1

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения с номинальным напряжением 220 В имеет номинальную мощность  $P_n$ , номинальную частоту вращения  $n_n$ , номинальный КПД  $\rho_n$  и сопротивления обмоток якоря  $R_{я}$ , возбуждения -  $R_v$  (табл. 7.6).

Таблица 7.6

Вариант	Тип двигателя	$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/мин	$\eta_n$ , %	$R_{я}$ , Ом	$R_v$ , Ом
1	П71	32	3000	86,5	0,0335	100
2	П61	6	1000	83,5	0,34	153
3	П112	70	600	88	0,0179	24
4	П82	25	1000	86	0,0626	46,8
5	П92	75	1500	89,5	0,0122	48,4
6	П81	19	1000	83,5	0,1045	61,8
7	П101	42	750	86	0,0358	37,8
8	П62	14	1500	86,5	0,0875	100
9	П72	11	750	79	0,264	87,3
10	П91	55	1500	87	0,0204	44

Начертить электрическую схему двигателя. Для номинального режима работы определить мощность  $P_{1n}$  и ток  $I_n$ , потребляемые двигателем из сети, ток возбуждения  $I_v$ , ток якоря  $I_{яn}$ , ЭДС якоря  $E_n$  и номинальный момент  $M_n$ . Определить частоту вращения идеального холостого хода  $n_0$  и построить естественную механическую характеристику. Рассчитать сопротивление пускового реостата  $R_n$  для ограничения пускового тока до  $2I_{яn}$ , построить соответствующую реостатную механическую характеристику. Рассчитать и построить механическую характеристику двигателя при ослаблении поля за счет введения резистора в цепь возбуждения до  $0,7\Phi_n$ . Ответить на дополнительный вопрос к задаче в соответствии с вариантом.

### Задача 2

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения подключен к сети 110 В и имеет номинальную мощность  $P_n$ , номинальную частоту вращения  $n_n$ , номинальный ток  $I_n$ , номинальный ток цепи возбуждения  $I_{вн}$ , сопротивление обмотки якоря  $R_{я}$  (табл. 7.7). Для пуска двигателя в цепь его якоря включаются две секции пускового реостата  $R_1$ ,  $R_2$  с последовательным закорачиванием их по мере разгона двигателя.

Таблица 7.7

Вариант	Тип двигателя	$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/мин	$I_n$ , А	$I_{вн}$ , А	$R_{я}$ , Ом
1	П42	1,5	750	18,8	1,26	0,47
2	П31	3,2	3000	35	0,96	0,126
3	П71	8	750	96	4,4	0,101
4	П32	4,5	3000	48,5	1,07	0,066
5	П51	2,2	750	27	2,2	0,34
6	П61	4,2	750	48,9	1,72	0,149

7	П62	5,7	750	64,3	2,03	0,088
8	П22	1	1500	12	0,63	0,725
9	П41	6	3000	68,3	2,34	0,043
10	П11	0,7	3000	4,3	0,16	3,56

Начертить электрическую схему двигателя. Рассчитать для номинального режима ток  $I_{ян}$  и ЭДС  $E_n$  якоря и вращающий момент  $M_n$ ; определить частоту вращения идеального холостого хода  $n_0$ . Рассчитать и построить пусковую диаграмму двигателя при двухступенчатом пуске (рис. 7.3), приняв  $\beta = 2$ . Написать уравнения естественной и реостатных механических характеристик. Ответить на дополнительный вопрос к задаче в соответствии с вариантом.

### Задача 3

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет номинальное напряжение  $U_n$ , номинальный ток  $I_n$ , номинальную частоту вращения  $n_n$ , сопротивление обмотки возбуждения  $R_v$  и обмотки якоря  $R_я$ ; ток, потребляемый двигателем в режиме холостого хода, равен  $I_0$  (табл.7.8). Начертить электрическую схему двигателя. Для номинального режима работы двигателя определить мощность  $P_{1н}$ , потребляемую им из сети, мощность потерь в обмотке якоря  $\Delta P_{ян}$  и в цепи возбуждения  $\Delta P_{вн}$ , мощность механических и магнитных потерь в двигателе  $\Delta P_{мех} + \Delta P_{маг}$  и номинальную мощность на его валу  $P_n$ . Рассчитать частоту вращения идеального холостого хода  $n_0$ , написать уравнение и построить естественную механическую характеристику. Рассчитать сопротивление пускового реостата из условия ограничения пускового тока до значения  $2,5I_{ян}$ , написать уравнение и построить соответствующую реостатную характеристику. Рассчитать и построить зависимость КПД от мощности на валу  $\rho = f(P_2)$ , отметив на ней точку, соответствующую номинальному режиму. Ответить на дополнительный вопрос к задаче в соответствии с вариантом.

Таблица 7.8

Вариант	$U_n$ , В	$I_n$ , А	$n_n$ , об/мин	$I_0$ , А	$R_v$ , Ом	$R_я$ , Ом
1	220	62	1000	8,2	100	0,237
2	220	9	3000	1,7	636	1,25
3	110	11,5	1000	1,6	140	0,653
4	220	12,5	3000	2,1	484	0,71
5	110	37,3	750	5,7	43	0,198
6	110	5,6	750	1	242	2,05
7	220	18,3	1000	2,7	171	0,72
8	110	18	3000	3,5	170	0,304
9	110	8,6	1000	1,5	160	1,13
10	220	78	1000	9,3	87	0,171

Дополнительные вопросы к задачам 1, 2, 3

1. Что такое рекуперативное генераторное торможение? Как получается этот режим (покажите на механических характеристиках)?
2. Как осуществляется реверс двигателя постоянного тока? Поясните математическими соотношениями и на механических характеристиках.
3. Что такое торможение противовключением? Поясните на механических характеристиках, напишите уравнение для цепи якоря двигателя в этом режиме.
4. Рассмотреть, как изменяется ток якоря двигателя, работающего с постоянной нагрузкой на валу, при увеличении его тока возбуждения.

5. Якорь двигателя, работающего на реостатной характеристике, под действием спускаемого груза вращается против направления его вращающего момента. Показать этот режим на механической характеристике, написать уравнение для цепи якоря и рассмотреть энергетические процессы в двигателе в этом режиме.
6. Как изменится противо-ЭДС двигателя, работающего с постоянной нагрузкой на валу, при введении резистора в цепь его якоря? Привести необходимые математические соотношения.
7. Объяснить, почему для малозагруженного двигателя параллельного возбуждения опасен обрыв в цепи его обмотки возбуждения.
8. Что такое динамическое торможение? Поясните на механических характеристиках и математическими соотношениями.
9. Как и почему изменяется ток якоря двигателя при увеличении нагрузки на его валу?
10. Рассмотреть возможность перехода двигателя в режим рекуперативного торможения при увеличении его тока возбуждения (показать на механических характеристиках и уравнении для цепи якоря).

**Практическая работа №3 Расчет параметров и выполнение развернутой схемы обмотки якоря.**

**Цель работы: Рассчитать параметры и выполнить развернутую схему обмотки якоря**

**Задание:** Обмотка якоря машины постоянного тока содержит элементарных пазов  $Z_{эл} = 17$  при числе полюсов  $2p$ . Рассчитать параметры и начертить развернутую схему простой волновой (ПВ) либо простой петлевой (ПП) обмотки якоря. На схеме обозначить полюсы, расставить щетки и, задавшись направлением вращения якоря, определить полярность щеток в генераторном режиме работы машины. Выполнить схему параллельных ветвей обмотки якоря и определить ее общее сопротивление, считая при этом сопротивление одной секции равным  $r_c = 0,02$  Ом (секции одновитковые).

**Методические указания**

1. Шаг обмотки по коллектору (обмотка левозодная)  
 $y_k = y = (K - 1) / p = (17 - 1) / 2 = 8$  делений
2. Первый шаг обмотки по пазам  
 $y_1 = (Z_s / 2p) \pm \varepsilon = (17 / 4) - 0,25 = 4$  паза
3. Развернутая схема обмотки представлена на рисунке 6.1

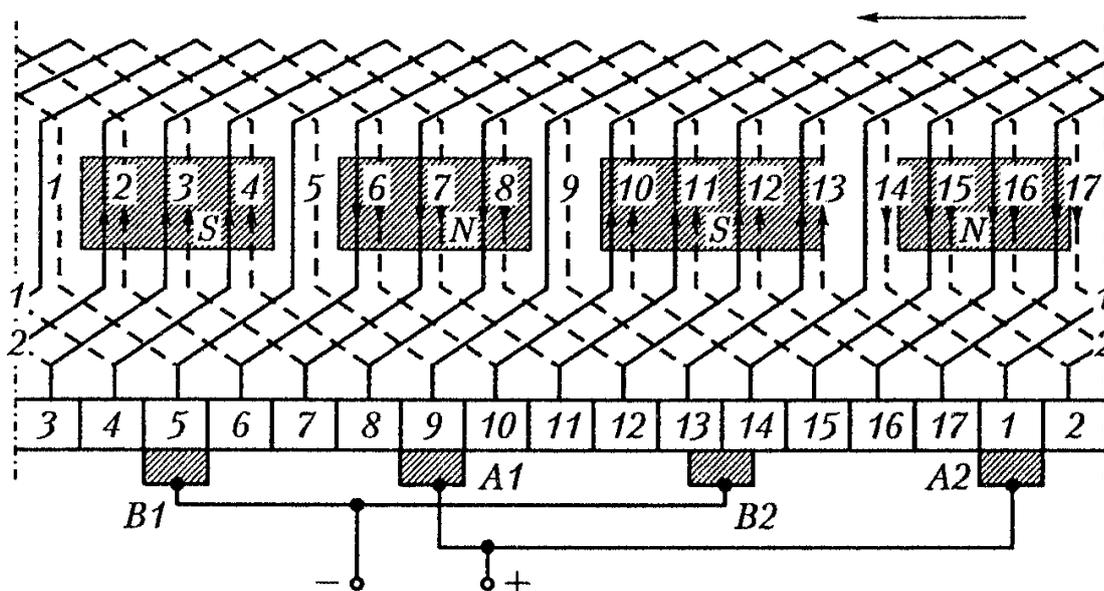


Рисунок 6.1 Развернутая схема простой волновой обмотки  
 $2p=4; Z=17; y_1=4$  паза

Выполняем схему параллельных ветвей рисунок 6.2

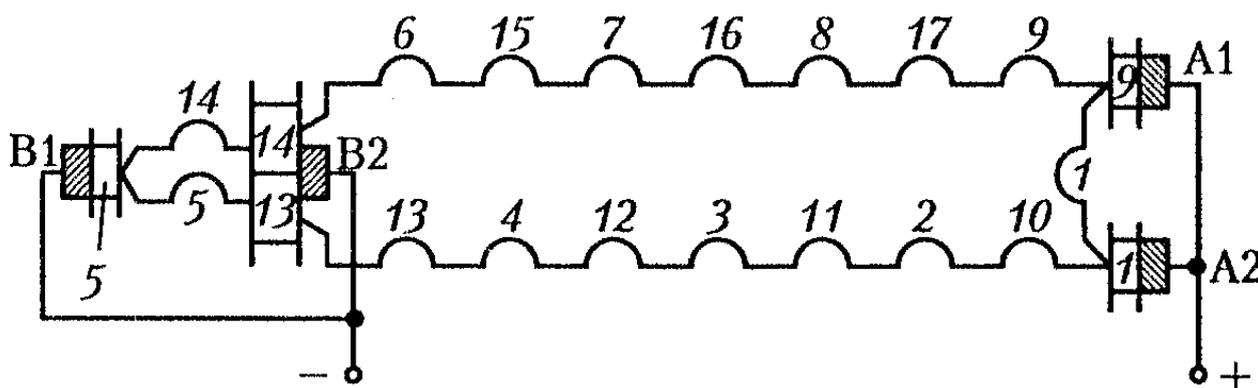


Рисунок 6.2 Схема параллельных ветвей простой волновой обмотки

### Практическая работа №4 Расчет параметров трансформатора

**Цель:** Научиться рассчитывать параметры трансформатора и его режима работы.

*Трансформатор* представляет собой статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

*Режимы работы трансформатора и КПД.*

Схема замещения реального двухобмоточного трансформатора с учетом магнитных потерь представлена на рисунке 7.1.

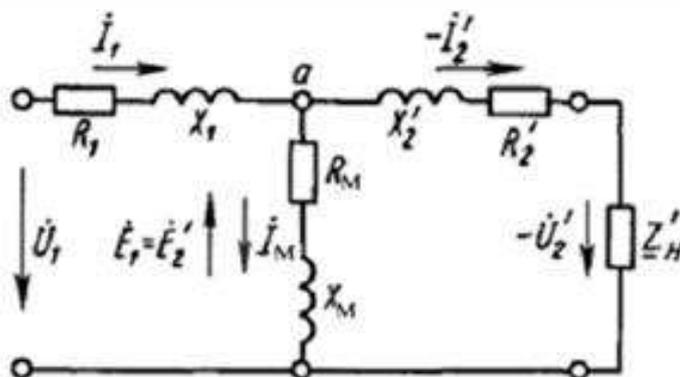


Рисунок 7.1 – Схема замещения двухобмоточного трансформатора с учетом магнитных потерь

На рисунке 7.1 приняты следующие обозначения:  $R_1, X_1$  – активное и индуктивное сопротивление первичной обмотки;  $R_2', X_2'$  – активное и индуктивное сопротивление вторичной обмотки, приведенное к первичной;  $R_M, X_M$  – активное и индуктивное сопротивление ветви намагничивания;  $U_1$  – первичное напряжение;  $U_2'$  – вторичное напряжение, приведенное к первичному;  $I_1, I_2', I_M$  – токи в соответствующих ветвях.

В связи с тем, что у первичной и вторичной обмоток трансформатора неодинаковое количество витков (т.е.  $k \neq 1$ ), первичные и вторичные напряжения, токи и сопротивления имеют различный порядок. Следовательно, для развязки магнитной связи и возможности совместного решения уравнений, описывающих работу трансформатора, параметры вторичной обмотки должны быть приведены к первичной обмотке. Для этого вторичное напряжение и ЭДС

следует умножить на коэффициент трансформации, вторичный ток разделить на коэффициент трансформации, а вторичное сопротивление умножить на квадрат коэффициента трансформации:

$$E'_2 = k \cdot E_2 = E_1, U'_2 = k \cdot U_2, I'_2 = I_2 / k, R'_2 = k^2 \cdot R_2, X'_2 = k^2 \cdot X_2. \quad (7.1)$$

Представленная схема замещения трансформатора описывается следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j \cdot X_1 \cdot \dot{I}_1 + Z_M \cdot \dot{I}_M; \\ -\dot{U}'_2 = R'_2 \cdot \dot{I}'_2 + j \cdot X'_2 \cdot \dot{I}'_2 + Z_M \cdot \dot{I}_M; \\ \dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2. \end{cases} \quad (7.2)$$

Учитывая, что  $Z_M \dot{I}_M = -\dot{E}_1$ , система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = R_1 \cdot \dot{I}_1 + j \cdot X_1 \cdot \dot{I}_1 - \dot{E}_1; \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}_1 - R'_2 \cdot \dot{I}'_2 - j \cdot X'_2 \cdot \dot{I}'_2; \\ \dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2. \end{cases} \quad (7.3)$$

Параметры схемы замещения трансформатора можно определить по опытам холостого хода и короткого замыкания.

При опыте *холостого хода* к первичной обмотке с помощью регулятора напряжения (РН) подводят номинальное напряжение  $U_0 = U_{\text{ном}}$ , а ко вторичной – вольтметр (рисунок 7.2).

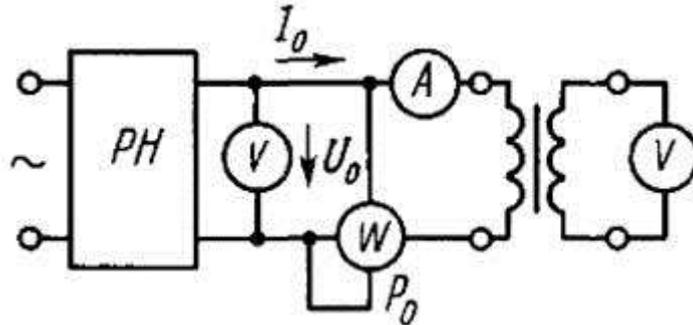


Рисунок 7.2 – Схема исследования трансформатора в режиме холостого хода

Измерив ток холостого хода  $I_0$  и мощность  $P_0$  можно рассчитать сопротивления:

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0}, R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}, X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \quad (7.4)$$

а также коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (7.5)$$

и коэффициент мощности холостого хода

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_0 \cdot I_0}. \quad (7.6)$$

Схема замещение трансформатора (рисунок 7.1) в режиме холостого хода приводится к виду, представленному на рисунке 7.3.

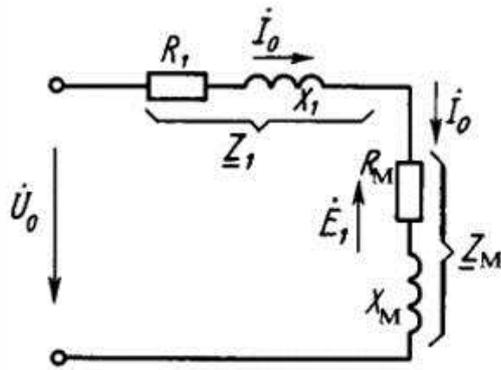


Рисунок 7.3 – Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода

При холостом ходе справедливы следующие соотношения:

$$Z_0 = Z_1 + Z_M; R_0 = R_1 + R_M; X_0 = X_1 + X_M. \quad (7.7)$$

Учитывая, что в силовых трансформаторах  $R_1$  и  $X_1$  во много раз меньше  $R_M$  и  $X_M$ , можно сказать, что

$$Z_0 \approx Z_M; R_0 \approx R_M; X_0 \approx X_M. \quad (7.8)$$

По этой же причине мощность холостого хода трансформатора равна магнитным потерям в магнитопроводе. Эти потери также называют потерями в стали трансформатора.

В опыте *короткого замыкания* вторичные обмотки замыкаются накоротко, а к первичным обмоткам во избежание перегрева и повреждения трансформатора подводится пониженное напряжение с таким расчетом, чтобы по обмоткам проходил номинальный ток (рисунок 7.4).

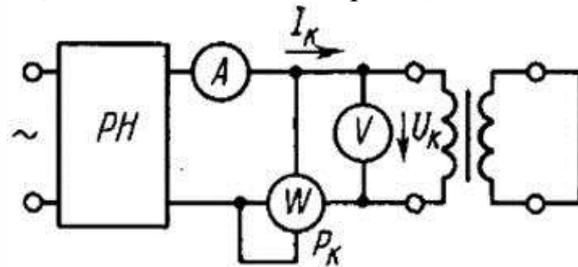


Рисунок 7.4 – Схема исследования трансформатора в режиме короткого замыкания

Полное  $Z_K$ , активное  $R_K$  и реактивное  $X_K$  сопротивления короткого замыкания рассчитываются по формулам, аналогичным для случая холостого хода.

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K}, R_K = \frac{P_K}{I_K^2}, X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}. \quad (7.9)$$

Согласно схеме замещения (рисунок 7.1):

$$Z_K = Z_1 + \frac{Z_M \cdot Z_2'}{Z_M + Z_2'}. \quad (7.10)$$

Так как  $Z_M$  во много раз больше  $Z_2'$ , то в знаменателе  $Z_2'$  можно пренебречь, тогда  $Z_K = Z_1 + Z_2'; R_K = R_1 + R_2'; X_K = X_1 + X_2'.$  (7.11)

Обычно принимают

$$Z_1 = Z_2' = 0,5 \cdot Z_K; R_1 = R_2' = 0,5 \cdot R_K; X_1 = X_2' = 0,5 \cdot X_K. \quad (7.12)$$

Учитывая (7.11) схему замещения трансформатора (рисунок 7.1) в режиме короткого замыкания можно привести к виду, представленному на рисунке 7.5.

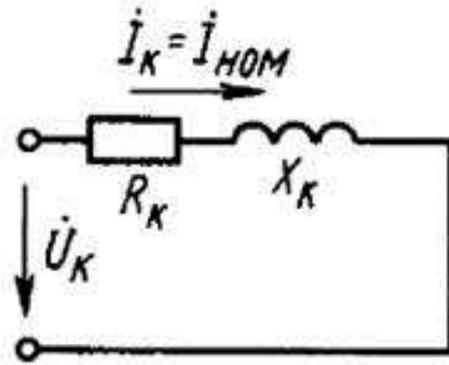


Рисунок 7.5 – Схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания

Таким образом, в режиме короткого замыкания мощность расходуется на электрические потери в обмотках трансформатора. Эти потери также называют потерями в меди трансформатора.

Полные потери мощности в трансформаторе при номинальной нагрузке:

$$\Delta P = P_0 + P_K \quad (7.13)$$

При режиме, отличном от номинального, следует учитывать коэффициент загрузки трансформатора, влияющий на электрические потери:

$$k_3 = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}} \quad (7.14)$$

где  $I_{2\text{ном}}$  – номинальный ток вторичной обмотки.

Под *номинальным* следует понимать такой режим работы трансформатора, при котором основные параметры (мощность, напряжение, ток) соответствуют величинам, на которые он рассчитан по условиям нагревания и безаварийной работы в течение установленного срока службы. В номинальном режиме трансформатор имеет наибольший коэффициент полезного действия и не перегревается. Трансформаторы могут работать и при ненормальных условиях. Обычно, при нагрузке меньше номинальной, КПД и коэффициент мощности меньше номинальных. При нагрузках больше номинальных появляется опасность перегрева обмоток, что может привести к преждевременному выходу из строя их изоляции.

Номинальный ток первичной обмотки может быть определен по формуле:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{1\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{ном}}} \quad (7.15)$$

где  $S_{1\text{ном}}$ ,  $U_{1\text{ном}}$  – номинальные мощность и напряжение первичной обмотки трансформатора. Потери мощности трансформатора при любом режиме будут определяться по формуле:

$$\Delta P = P_0 + k_3^2 \cdot P_K \quad (7.16)$$

Мощность, передаваемая потребителям  $P_2$ , равна мощности, потребляемой трансформатором из сети  $P_1$  за вычетом потерь  $\Delta P$ :

$$P_2 = P_1 - \Delta P = P_1 - P_0 - k_3^2 \cdot P_K \quad (5.17)$$

Тогда коэффициент полезного действия трансформатора равен:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + k_3^2 \cdot P_K} 100\% \quad (5.18)$$

Трансформаторы относят к статическим не имеющим вращающихся деталей электрическим машинам переменного тока. Основными параметрами силовых трансформаторов используемых

при разработке систем электроснабжения являются: полная номинальная мощность  $S_{1\text{ном}}$ , номинальное напряжение первичной  $U_{1\text{ном}}$  и вторичной  $U_{2\text{ном}}$  обмотки.

### Примеры решения задач

Для трехфазного трансформатора мощностью  $S_{1\text{ном}} = 100$  кВА, соединение обмоток которого Y-Y-0, известно:  $U_{1\text{ном}} = 6000$  В,  $U_{20} = 400$  В,  $u_k = 5,5\%$ ,  $P_k = 2400$  Вт,  $P_0 = 600$  Вт,  $I_0 = 0,07I_{1\text{ном}}$  Вт. Определить:

- 1) Сопротивление обмоток трансформатора  $R_1, X_1, R_2, X_2$ ;
- 2) Эквивалентное сопротивление  $Z_0$  и его составляющие  $R_0, X_0$ ;
- 3) Коэффициент полезного действия при загрузке в 60% и  $\cos\phi_H = 0,87$ .

*Решение.*

Номинальный ток первичной обмотки:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{1\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{ном}}} = \frac{100000}{\sqrt{3} \cdot 6000} = 9,6 \text{ А.}$$

Ток холостого хода:

$$I_0 = 0,7 \cdot I_{1\text{ном}} = 0,7 \cdot 9,6 = 0,67 \text{ А.}$$

Сопротивления короткого замыкания:

$$z_k = U_{k\Phi} / I_{k\Phi} = u_k \cdot U_{1\text{ном}\Phi} / I_{1\text{ном}} = 0,055 \cdot 6000 / \sqrt{3} \cdot 9,6 = 19,6 \text{ Ом.}$$

В знаменателе появляется множитель  $\sqrt{3}$ , т.к. в справочных данных указывается линейное значение  $U_{1\text{ном}}$ , а т.к. схема соединения Y-Y-0, то  $U_{1\text{ном}\Phi} = U_{1\text{ном}} / \sqrt{3}$ .

$r_k = P_k / 3I_k^2 = 2400 / 3 \cdot 9,6^2 = 8,7$  Ом. (В знаменателе появляется множитель 3, т.к. в справочных данных значение  $P_k$  указывается суммарное для трех фаз, а сопротивления вычисляются для одной фазы.)

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{19,6^2 - 8,7^2} = 17,9 \text{ Ом.}$$

Сопротивления первичной обмотки:

$$r_1 = r_2 = 0,5 \cdot r_k = 0,5 \cdot 8,7 = 4,35 \text{ Ом.}$$

$$x_1 = x_2 = 0,5 \cdot x_k = 0,5 \cdot 17,9 = 8,95 \text{ Ом.}$$

Сопротивления вторичной обмотки определим, учитывая коэффициент приведения:

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{20}} = \frac{6000}{400} = 15$$

$$r_2 = r_2' / k^2 = 4,35 / 225 = 0,0193 \text{ Ом.}$$

$$x_2 = x_2' / k^2 = 8,95 / 225 = 0,0398 \text{ Ом.}$$

Сопротивления намагничивающей ветви:

$$z_0 = U_0 / I_0 = 6000 / \sqrt{3} \cdot 0,67 = 5180 \text{ Ом.}$$

$$r_0 = P_0 / I_0^2 = 600 / 3 \cdot 0,67^2 = 447 \text{ Ом.}$$

$$x_0 = \sqrt{5180^2 - 447^2} = 5160 \text{ Ом.}$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{k_3 \cdot S_{1\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{Н}}}{k_3 \cdot S_{1\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{Н}} + P_0 + k_3^2 \cdot P_{\text{К}}} 100\% =$$

$$= \frac{0,6 \cdot 100000 \cdot 0,87}{0,6 \cdot 100000 \cdot 0,87 + 600 + 0,6^2 \cdot 2400} 100\% = 97,3\%.$$

### Контрольные вопросы

1. Что представляет собой трансформатор?
2. Какие режимы работы трансформатора вы знаете?
3. В чем заключается суть опытов холостого хода и короткого замыкания?
4. Какие потери определяют в опытах холостого хода и короткого замыкания?

### Практическая работа №5 Расчет параметров схемы замещения трансформатора

**Цель работы:** Расчет токов и напряжений для номинального режима и опытов холостого хода и короткого замыкания.

- токи и напряжения

$$I_{1\text{Н}} = \frac{S_{\text{Н}}}{U_{1\text{Н}}}, \quad I_{2\text{Н}} = I_{1\text{Н}} \cdot k;$$

$$U_{20} = \frac{U_{1\text{Н}}}{k};$$

$$U_{1\text{к}} = \frac{U_{1\text{Н}}}{100} \cdot u_{1\text{к}}\%, \quad u_{\text{к}\alpha}\% = u_{1\text{к}}\% \cdot \cos \varphi_{\text{к}}; \quad u_{\text{к}\beta}\% = u_{1\text{к}}\% \sin \varphi_{\text{к}}$$

$$\cos \varphi_{\text{к}} = \frac{r_{\text{к}}}{Z_{\text{к}}}.$$

### 2. Параметры схемы замещения

- полная T-образная схема замещения

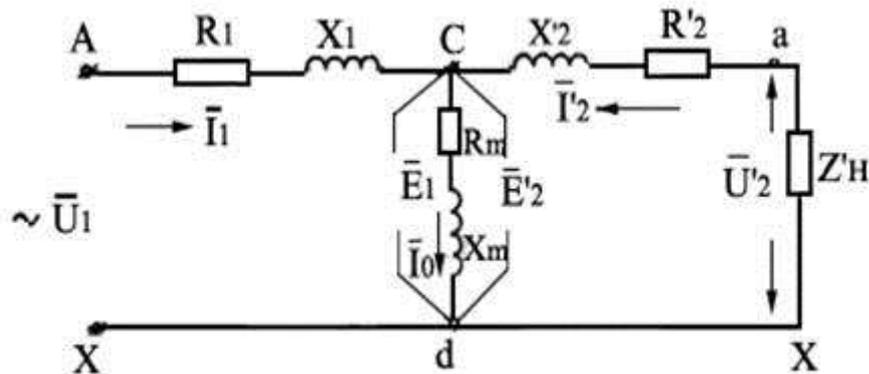


Рисунок 2.1 - Полная электрическая схема замещения приведенного трансформатора

- параметры схемы замещения

$$Z_m = \frac{U_{1\text{Н}}}{I_0}; \quad \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{I_0 U_{1\text{Н}}} \quad (2.1)$$

$$r_m = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2}; \quad (2.2)$$

$$Z_{\text{к}} = \frac{U_{1\text{к}}}{I_{1\text{Н}}}; \quad r_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{I_{1\text{Н}}^2}; \quad x_{\text{к}} = \sqrt{Z_{\text{к}}^2 - r_{\text{к}}^2}; \quad (2.3)$$

$$r_1 \approx r'_2 = \frac{r_k}{2}; \quad x_1 \approx x'_2 = \frac{x_k}{2}; \quad (2.4)$$

$$r_2 = \frac{r'_2}{k^2}; \quad x_2 = \frac{x'_2}{k^2}; \quad (2.5)$$

3. Расчет номинального режима трансформатора по полной схеме замещения символическим методом при заданном  $\varphi_2$

- сопротивления нагрузки

$$\underline{Z}_H = Z_H e^{j\varphi_2}; \quad Z_H = \frac{U_{20}}{I_{2H}}; \quad r_H = Z_H \cos \varphi_2; \quad x_H = Z_H \sin \varphi_2; \quad (2.6)$$

$$r'_H = r_H k^2; \quad x'_H = x_H k^2; \quad (2.7)$$

- сопротивления вторичной цепи

$$Z'_H = \sqrt{(r'_2 + r'_H)^2 + (x'_2 + x'_H)^2}; \quad (2.8)$$

$$\underline{Z}'_H = Z'_H e^{j\psi}; \quad (2.9)$$

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 + x'_H}{r'_2 + r'_H}; \quad (2.10)$$

- общее сопротивление вторичной цепи и ветви намагничивания

$$\underline{Z}_{cd} = \frac{\underline{Z}_m \cdot \underline{Z}'_H}{\underline{Z}_m + \underline{Z}'_H}; \quad \underline{Z}_m = r_m + jx_m; \quad (2.11)$$

- общее сопротивление схемы замещения

$$\underline{Z}_\Sigma = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{cd}; \quad \underline{Z}_1 = r_1 + jx_1; \quad (2.12)$$

- ток первичной обмотки

$$I_{1H} = \frac{U_1}{\underline{Z}_\Sigma} = I_{1H} e^{j\varphi_1}; \quad (2.13)$$

- ЭДС в обмотках

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = U_{1H} - \dot{I}_{1H} \underline{Z}_1; \quad (2.14)$$

- приведенный ток вторичной обмотки

$$\dot{I}'_{2H} = \frac{\dot{E}_2}{\underline{Z}'_H}; \quad (2.15)$$

- приведенное и реальное напряжения на нагрузке

$$\dot{U}'_{2H} = \dot{I}'_{2H} \underline{Z}'_H = U'_{2H} e^{j\varphi_2}; \quad (2.16)$$

$$U_{2H} = \frac{U'_{2H}}{k}; \quad (2.17)$$

- падение напряжения при работе трансформатора в номинальном режиме

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_{2H}}{U_{20}} 100\%. \quad (2.18)$$

4. Построение полной векторной диаграммы (рисунок 2.2)

4.1. В произвольном направлении, например, вправо от точки «0» откладывается вектор магнитного потока  $\bar{\Phi}_0$ .

4.2. С отставанием от вектора  $\bar{\Phi}_0$  на  $90^\circ$  откладываются векторы  $\bar{E}_2'$  и  $\bar{E}_1$ .

4.3. Вектор тока холостого хода  $\bar{I}_0$  опережает вектор  $\bar{\Phi}_0$  на угол потерь  $\delta$

$$\delta = \arctg \frac{r_m}{x_m} \quad (2.19)$$

4.4. Ток во вторичной цепи  $I'_2$  определяется из соотношения

$$I'_2 = \frac{E'_2}{Z'_H} \quad (2.20)$$

где  $Z'_H = \sqrt{(R'_2 + r'_H)^2 + (x'_2 + x'_H)^2}$  (2.21)

и отстает от вектора ЭДС на угол  $\psi_2$

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 + x'_H}{R'_2 + r'_H} \quad (2.22)$$

4.5. Вектор напряжения на нагрузке  $\bar{U}'_2$  определяется геометрической суммой

$$\bar{U}'_2 = \bar{E}'_2 - \bar{I}'_2 x'_2 - \bar{I}'_2 R'_2 \quad (2.23)$$

Таким образом, из конца вектора  $\bar{E}'_2$  перпендикулярно току  $\bar{I}'_2$  и в сторону отставания от него откладывается вектор  $-\bar{I}'_2 \cdot x'_2$ , а из конца этого вектора параллельно току  $\bar{I}'_2$ , но в противофазе с ним проводится вектор  $-\bar{I}'_2 \cdot R'_2$ . В результате получается вектор вторичного напряжения  $\bar{U}'_2$  и его фазовый сдвиг  $\varphi_2$  относительно тока  $\bar{I}'_2$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{x'_H}{r'_H} = \arctg \frac{x_H}{r_H} \quad (2.24)$$

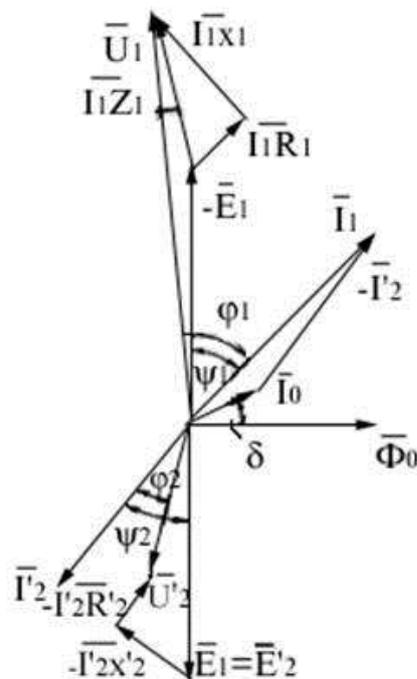


Рисунок 2.2 – Полная векторная диаграмма приведенного трансформатора

4.6. Положение и величину тока  $\bar{I}'_1$  получают в результате графического решения уравнения равновесия токов

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + (-\bar{I}'_2) \quad (2.25)$$

Для этого к концу вектора  $\bar{I}_0$  пристраивается вектор тока  $\bar{I}'_2$ , повернутый на 180 градусов, т.е. вектор  $-\bar{I}'_2$ . Соединив начало координат с концом вектора  $-\bar{I}'_2$ , получают вектор  $\bar{I}_1$ .

4.7. Построение вектора  $\bar{U}_1$  производится в соответствии с уравнением равновесия ЭДС

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \bar{I}_1 x_1 + \bar{I}_1 r_1 \quad (2.26)$$

При этом векторы падения напряжения  $\bar{I}_1 x_1$  и  $\bar{I}_1 r_1$  необходимо ориентировать перпендикулярно и параллельно вектору тока  $\bar{I}_1$ , как показано на рисунке 2.2.

4.8. Угол  $\varphi_1$  определяет фазовый сдвиг между напряжением  $\bar{U}_1$  и током  $\bar{I}_1$ .

5. Построение упрощенной векторной диаграммы трансформатора (рисунок 2.4)

Упрощенная векторная диаграмма является отражением упрощенной схемы замещения (рисунок 2.3) и графическим решением уравнения электрического равновесия

$$\bar{U}'_2 = \bar{U}_1 - \bar{I}'_2 r_k - \bar{I}'_2 x_k = \bar{U}_1 - \bar{I}'_2 Z_k \quad (2.27)$$

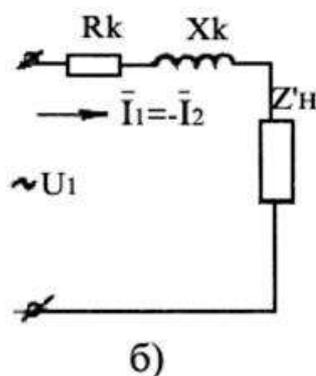


Рисунок 2.3 – Упрощенная схема замещения приведенного трансформатора

### Порядок построения

5.1. От исходной точки «0» в произвольном направлении (например, вверх) откладывается вектор  $\bar{I}_1 = -\bar{I}'_2$ .

5.2. Под углом  $\varphi_2$  вектору тока в сторону опережения (для активно-индуктивной нагрузки) проводится направление вектора напряжения  $-\bar{U}'_2$ .

5.3. В масштабе напряжения строится прямоугольный треугольник ABC со сторонами  $AB = I_1 x_k$ ,  $BC = I_1 r_k$ ,  $AC = I_1 Z_k$ , называемый треугольником короткого замыкания.

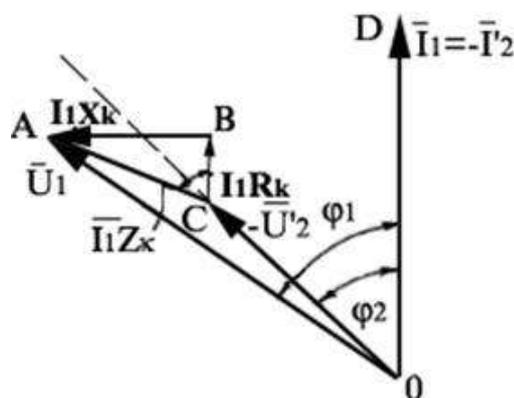


Рисунок 2.4 – Упрощенная векторная диаграмма приведенного трансформатора

Треугольник ABC располагается на линии  $-\bar{U}'_2$  таким образом, чтобы его вершина «С» была на линии  $-\bar{U}'_2$ , а величина OA была равна в принятом масштабе первичному напряжению  $U_1$ . В тоже время треугольник короткого замыкания должен быть ориентирован на векторной диаграмме так, чтобы сторона АВ была перпендикулярна, а сторона ВС – параллельна вектору  $\bar{I}'_1 = -\bar{I}'_2$ , при этом вектор падения напряжения  $\bar{I}'_1 R'_{\Sigma}$  должен опережать вектор  $\bar{I}'_1 = -\bar{I}'_2$  на угол  $90^\circ$ .

5.4. Величина отрезка ОС при таком построении равна напряжению  $U'_{2H}$ , а угол АОД равен  $\varphi_1$ . Действительное напряжение на нагрузке равно

$$U_{2H} = \frac{U'_{2H}}{k} \quad (2.28)$$

5.5. Сравнить значения напряжений  $U_{2H}$ , полученных из расчета полной схемы замещения и из построения упрощенной векторной диаграммы.

6. Построение упрощенных ВД для различных по характеру нагрузок

Повторить описанные выше построения ВД для других углов нагрузки из трех ( $\varphi_2 = 0, \varphi_2 = \pm \frac{\pi}{2}$ ) как показано на рисунок 2.5. Оценить изменение напряжения  $U_{2H}$  по соотношению

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_{2H}}{U_{20}} 100\% \quad (2.29)$$

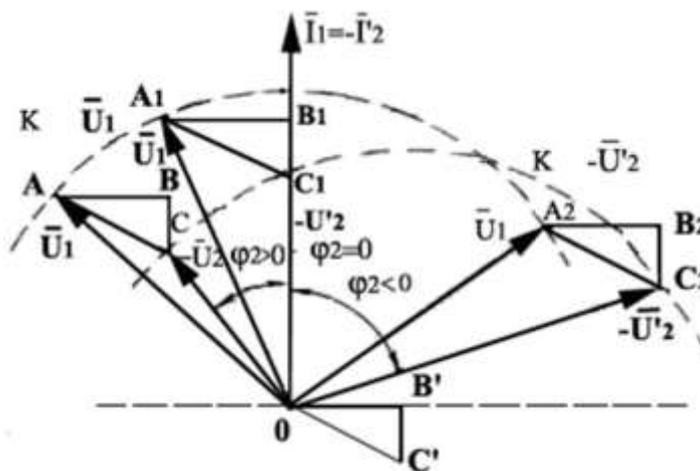


Рисунок 2.5 - Упрощенная векторная диаграмма при различных значениях угла  $\varphi_2$

Порядок построения:

- из точки «О», как из центра проводится дуга окружности радиусом, равным в принятом масштабе величине напряжения  $U_1$ ;
- под углом  $\varphi_2$  проводится направление вектора вторичного напряжения  $-U'_2$  ( $\varphi_2 > 0$  - при активно-индуктивной нагрузке,  $\varphi_2 = 0$  - при чисто активной нагрузке,  $\varphi_2 < 0$  - при активно-ёмкостной нагрузке);
- во всех случаях треугольник к.з. располагается таким образом, чтобы вершина А была на дуге  $U_1$ , вершина С – на направлении вектора  $-\bar{U}'_2$ , а катет ВС совпадал по направлению с вектором  $\bar{I}'_2$ . Точки С,  $C_1$  и  $C_2$  определяют величину  $U'_2$  при соответствующем  $\varphi_2$ .

Если треугольник ABC поместить в положение  $OB'C'$ , то дуга, проведенная из вершины  $C'$  радиусом  $U_1$ , пройдет через точки С,  $C_1$  и  $C_2$  и является, таким образом геометрическим местом конца вектора  $-\bar{U}'_2$ .

Из рисунка 2.5 хорошо видно, что при активно-индуктивной нагрузке и чисто активной нагрузке  $U'_2 < U_1$ . При активно-ёмкостной нагрузке вторичное напряжение  $U'_2$  может стать больше первичного  $U_1$ .

7. Построение зависимости  $\Delta U = f(\beta)$  (рисунок 2.6).

7.1 Проверить величину  $\Delta U_2\%$  по соотношению

$$\Delta U_2\% = \beta U_k\% \cos(\varphi_2 - \varphi_k) \quad (2.30)$$

для указанных выше значений  $\varphi_2$ , принимая коэффициент нагрузки  $\beta = 1$ .

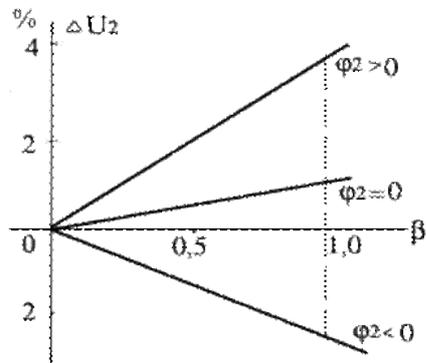


Рисунок 2.6 - Зависимости  $\Delta U_2$  от коэффициента нагрузки  $\beta$  при различных  $\varphi$

8. Для ударного тока короткого замыкания

$$i_{k_{y\vartheta}} = I_{k_m} \left( 1 + e^{-\frac{r_k}{X_k} \pi} \right) = I_{k_m} K_{y\vartheta} \quad (2.31)$$

рассчитать амплитудное значение установившегося тока короткого замыкания

$$I_{k_m} = \frac{U_{1m}}{Z_k} \quad (2.32)$$

и ударный коэффициент

$$K_{y\vartheta} = \left( 1 + e^{-\frac{r_k}{X_k} \pi} \right) \quad (2.33)$$

Таблица 2.1 - Варианты задания

№ п/п	Ном. мощность S, кВА	$U_{1н}$ , кВ	K	$u_{1к}$ , %	$I_0$ , %	$P_0$ , кВт	$P_k$ , кВт	Угол нагрузки $\varphi_2^0$
1				8,0	3,3	29,5	81,5	$45^0, 0, -45^0$
2				9,0	2,8	29,5	81,5	$45^0, 0, -45^0$
3				10,0	2,5	29,5	81,5	$45^0, 0, -45^0$
4				8,0	3,3	29,5	81,5	$45^0, 0, -45^0$
5				9,0	2,8	29,5	81,5	$45^0, 0, -45^0$
6				10,0	2,5	29,5	81,5	$45^0, 0, -45^0$
7				8,0	3,3	47,0	81,5	$45^0, 0, -45^0$
8				9,0	2,8	47,0	81,5	$45^0, 0, -45^0$
9				10,0	2,5	47,0	81,5	$45^0, 0, -45^0$

10				8,0	3,3	47,0	81,5	45 <sup>0</sup> ,0, -45 <sup>0</sup>
11				9,0	2,8	47,0	81,5	45 <sup>0</sup> ,0, -45 <sup>0</sup>
12				10,0	2,5	47,0	81,5	45 <sup>0</sup> ,0, -45 <sup>0</sup>
13				8,0	3,3	47,0	81,5	45 <sup>0</sup> ,0, -45 <sup>0</sup>
14				9,0	2,8	47,0	81,5	45 <sup>0</sup> ,0, -45 <sup>0</sup>
15				10,0	2,5	47,0	81,5	45 <sup>0</sup> ,0, -45 <sup>0</sup>
16				8,0	3,3	47,0	81,5	45 <sup>0</sup> ,0, -45 <sup>0</sup>
17				9,0	2,8	47,0	81,5	45 <sup>0</sup> ,0, -45 <sup>0</sup>
18				10,0	2,5	47,0	81,5	45 <sup>0</sup> ,0, -45 <sup>0</sup>

### Контрольные вопросы

1. Как рассчитать сопротивление первичной и вторичной обмотки по опытам короткого замыкания?
2. Как рассчитать сопротивление ветви намагничивания по опытам холостого хода?
3. Что такое коэффициент трансформации? коэффициент загрузки трансформатора?
4. Для чего параметры вторичной обмотки приводят к первичной обмотке?
5. Как рассчитать КПД трансформатора?

### Практическая работа №6 Расчет параметров обмотки статора машины переменного тока

**Цель:** Научиться определять основные параметры работы трехфазных асинхронных двигателей

#### Задание:

Трехфазный асинхронный двигатель включен в сеть с линейным напряжением  $U_{л}=380$  В, частота тока статора  $f = 50$  Гц, коэффициент полезного действия асинхронного двигателя равен  $\eta$ , коэффициент мощности равен  $\cos \varphi$ . Полезная мощность на валу асинхронного двигателя равна  $P_{2н}$ , скорость вращения ротора равна  $n_{2н}$ . Определить активную мощность  $P_{1н}$ , потребляемую асинхронным двигателем из сети, номинальный ток двигателя  $I_{1н}$ , скорость вращения магнитного поля обмотки статора  $n_{1н}$ , число пар полюсов  $p$ , скольжение  $s$  и частоту ЭДС обмотки ротора  $f_2$ , номинальный вращающий момент на валу  $M_{вр}$ . Данные для своего варианта взять из таблицы 4.3.

Таблица 4.3

Вариант	$P_{2н}$ , кВт	$n_{2н}$ , об/мин	$\eta$ , %	$\cos \varphi$
1.	1,3		87,5	0,84
2.	1,1		87,5	0,74
3.	1,5		87,5	0,9
4.	7,5		87,5	0,86
5.	1,8		87,5	0,79

6.	1,6		89,5	0,86
7.	5,5		89,5	0,80
8.	18,5		89,5	0,88
9.	1,9		89,5	0,76
10.	1,5		89,5	0,83
11.	2,3		89,5	0,84
12.	2,2		89,5	0,74
13.	3,3		89,5	0,9
14.	2,1		87,5	0,86
15.	1,2		87,5	0,79
16.	1,5		87,5	0,86
17.	3,5		87,5	0,80
18.	3,6		89,5	0,88
19.	3,4		89,5	0,76
20.	3,1		89,5	0,83
21.	2,6		89,5	0,84
22.	3,3		89,5	0,74
Вариант	$P_{2н}$ , кВт	$n_{2н}$ , об/мин	$\eta$ , %	$\cos \varphi$
23.	20,5		87,5	0,9
24.	22,5		87,5	0,86
25.	23,1		87,5	0,79
26.	22,8		87,5	0,86
27.	16,5		87,5	0,80
28.	55,5		89,5	0,88

29.	8,6		87,5	0,76
30.	4,5		87,5	0,83

Контрольные вопросы:

1. Дайте определение асинхронному двигателю
2. Какую конструкцию имеет статор трехфазного асинхронного двигателя?
3. Какую конструкцию имеет короткозамкнутый ротор трехфазного асинхронного двигателя?
4. Чем фазный ротор отличается от короткозамкнутого ротора?
5. Какое магнитное поле создает трехфазная обмотка статора асинхронного двигателя?

### Практическая работа №7 Выполнение развернутой схемы обмотки статора машины переменного тока

**Цель работы:** Приобретение навыков в построении обмоток асинхронной машины.

Основные требования, предъявляемые к обмотке статора асинхронной машины:

1. Наименьший расход обмоточного провода (медь);
2. Технологичность (наименьшие затраты) изготовления;
3. Синусоидальность кривой ЭДС.

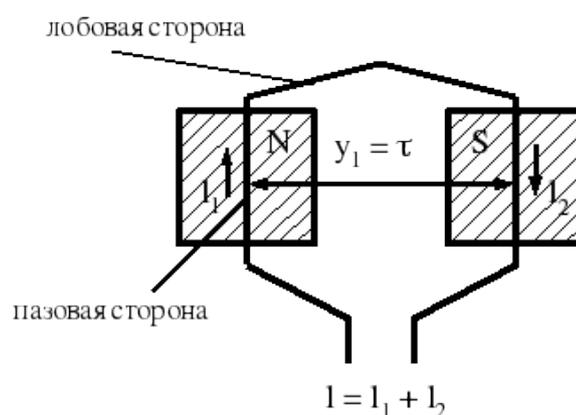
Многофазная обмотка статора состоит из  $m_1$  фазных обмоток (трехфазная обмотка  $M_1 = 3$ ) каждая из которых занимает  $Z_1/m_1$  пазов ( $Z_1$  – общее число пазов сердечника статора). Каждая фазная обмотка представляет разомкнутую систему проводников. Элементом обмотки является катушка (из одного или нескольких витков). Элементы катушки располагаются в пазах (пазовые стороны) и вне пазов (лобовые стороны). Часть дуги внутренней расточки статора, приходящаяся на один полюс – полюсное деление.

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2p}$$

Расстояние, между пазовыми сторонами катушки измеренное по внутренней поверхности расточки статора – шаг обмотки по пазам.

$$y_1 = \frac{Z_1}{2p}$$

Полный шаг  $y_1 = \tau$



Форма кривой ЭДС, при всем желании не синусоидальна и содержит высшие гармоники (3,5,7,9 и т.д.).

С ростом номера гармоники её величина уменьшается в  $V^2$  раз (номер гармоники). Поэтому на практике учитывают гармоники не выше седьмой.

Основным средством борьбы за синусоидальность ЭДС является укорочение шага обмотки ( $y_1$ ), что приводит не только к уничтожению высших гармоник, но и уменьшению (незначительному) первой гармоники ЭДС, что учитывается коэффициентом укорочения обмотки:

$$K_{y\gamma} = \sin(\gamma \beta \cdot 90^\circ)$$

$$\beta = \frac{y_1}{\tau} - \text{относительный шаг обмотки.}$$

Укорочение шага обмотки по пазам возможно только у двухслойных обмоток, однослойные выполняются с диаметральным шагом и поэтому применяются редко.

ЭДС фазной обмотки статора:

$$E_{1\phi} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot K_{об1}$$

$\Phi$  – поток (Вб);

$f_1$  – частота сети (50 Гц)

$W_1$  – число последовательно соединенных витков обмотки статора ( $2p q_1 W_{каб}$ )

$K_{об1}$  – обмоточный коэффициент ( $K_y K_{p1}$ ) для обмоток с диаметральным (полным) шагом  $K_{об1} = K_{p1}$

ЭДС в линии зависит от схемы соединения обмоток.

#### Исходные данные:

Дан асинхронный трехфазный двигатель с двухслойной обмоткой статора, катушки  $W_k$  - одновитковые, соединены последовательно и включены по схеме звезда в сеть с частотой 50 Гц, число пазов  $Z_1=60$ , число полюсов  $2p=4$ , гармоника  $\gamma=7$ .

#### Задание:

Расчитать параметры и построить развернутую схему трехфазной двухслойной обмотки статора с полным шагом при количестве пазов - 24, числе полюсов - 4.

Определить эффективное (действующее) значение фазной и линейной ЭДС – 1<sup>й</sup>, 3<sup>й</sup>, 5<sup>й</sup>, 7<sup>й</sup> гармоник с полным шагом приняв величину потока – 3/число пазов Вб.

Выбрать укорочение шага обмотки чтобы уничтожалась 5<sup>я</sup> гармоника в ЭДС обмотки скорректировать все ЭДС в соответствии с выбранным укорочением.

#### Расчетная часть:

число пазов статора на полюс и фазу:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2p m_1} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$$

Пазовый угол:

$$\gamma = \frac{360p}{Z_1} = \frac{360 \cdot 2}{24} = 30$$

Сдвиг между осями фаз (в пазух) – сдвиг между началами обмоток А, В, С:

$$\lambda = \frac{120}{\gamma} = \frac{120}{30} = 4 \text{ паз}$$

Полный шаг обмотки по пазам:

$$y_1 = \frac{Z_1}{2p} = \frac{24}{4} = 6 \text{ пазов}$$

Построение развернутой схемы обмотки начинается с разметки на плоскости. Начинаем пазы  $Z_1 = 24$  и полюсные деления  $2p = 4$ , и затем размечаем по  $q_1 = 2$  паз для всех фаз, при этом расстояние между зоной какой-либо фазы в одном полюсном делении и зоной этой же фазы в другом полюсном делении должно быть равно шагу обмотки  $y_1 = 6$  паз (диаметральному).

Далее отмечаем расстояние между началами (концами) фазных обмоток  $\lambda = 4$  паз. Для простоты чертежа изображаем только обмотку всех катушек одной фазы А.

Катушки соединяем между собой последовательно - встречно (т.к. противоположные концы катушек одновременно проходят под одинаковыми зонами полюсов). Начала фаз т. с<sub>1</sub> с<sub>2</sub> с<sub>3</sub> концы

$c_4 c_5 c_6$ . После изображения катушек всех фаз (не делать) их концы  $c_4 c_5 c_6$  соединяются в одну точку (звезда по условию задачи).

Полюсное деление в зубцах:

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{24}{4} = 6 \text{ зубцов}$$

Относительный шаг обмотки (диаметральный)

$$B = \frac{y_1}{\tau} = \frac{6}{6} = 1$$

Коэффициент распределения обмотки:

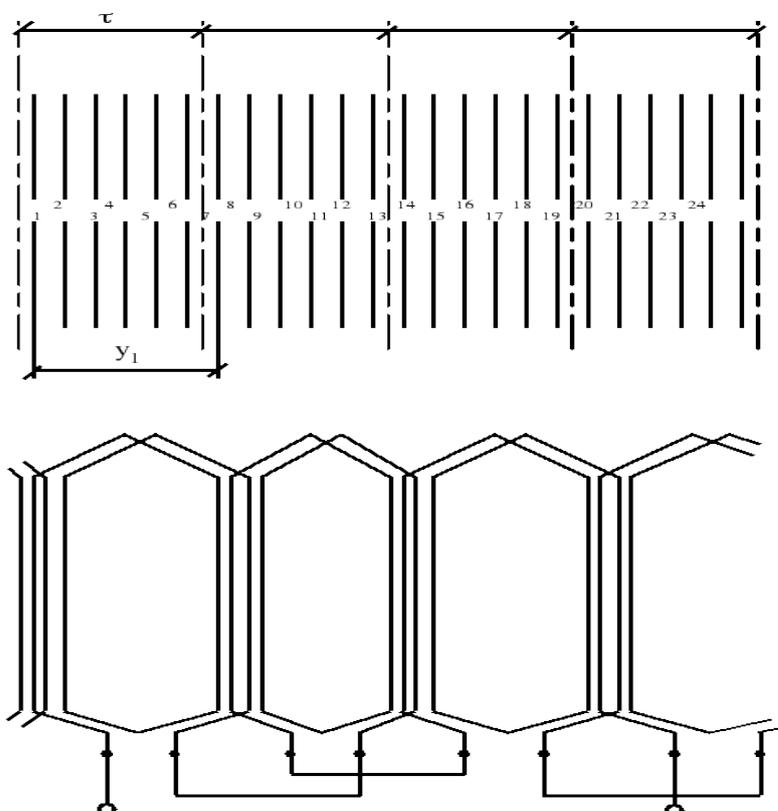
$$K_p = \frac{\sin(0,5 \cdot 2 \cdot 30^\circ)}{2 \sin(0,5 \cdot 30^\circ)} = \frac{0,5}{2 \cdot 0,26} = \frac{0,5}{0,52} = 0,97$$

Обмоточный коэффициент:

$$K_{об} = K_p \cdot K_y = 0,97 \cdot 1 = 0,97$$

Основной магнитный поток:

$$\Phi = \frac{3}{Z_1} = \frac{3}{24} = 0,125 \text{ Вб}$$



Число последовательно соединенных витков катушек в обмотке фазы:

$$W_1 = 2p \cdot q \cdot W_k = 4 \cdot 2 \cdot 1 = 8$$

ЭДС обмотки фазы статора (с полным шагом):

$$E_{1ф} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot K_{об} = 4,44 \cdot 0,125 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 0,97 = 220 \text{ В}$$

ЭДС в линиях при соединении звездой:

$$E_{лн} = \sqrt{3} \cdot E_{1ф} = 1,73 \cdot 220 = 380 \text{ В}$$

Фазные и линейные ЭДС 3<sup>й</sup>, 5<sup>й</sup>, 7<sup>й</sup> гармоник.

$$E_{3\phi} = \frac{220}{\sqrt{3}} = \frac{220}{1,732} = 127,02V \quad E_{3л} = 0$$

$$E_{5\phi} = \frac{220}{2,5} = 88V \quad E_{5л} = \sqrt{3} \cdot 88 = 152,4V$$

$$E_{7\phi} = \frac{220}{2,8} = 78,57V \quad E_{7л} = \sqrt{3} \cdot 78,57 = 135,8V$$

ЭДС в фазах и линиях при выбранном укорочении ( $B=4/5$  – относительный шаг) для уничтожения 5<sup>й</sup> гармоники:

$$E_{1\phi} = 220 \cdot 0,951 = 209,22V \quad E_{1л} = 380 \cdot 0,951 = 361,38V$$

$$E_{5\phi} = E_{5л} = 0$$

$$E_{7\phi} = 78,57 \cdot 0,573 = 45,04V \quad E_{7л} = 135,8 \cdot 0,573 = 77,81V$$

## Практическая работа №8 Расчет режимов работы трехфазного асинхронного двигателя

**Цель:** Научиться определять режимы работы трехфазных асинхронных двигателей

Асинхронные машины наибольшее распространение получили как двигатели. Это основной двигатель, применяемый в промышленности, сельском хозяйстве и в быту. Только асинхронных двигателей единых серий мощностью от 0,6 до 400 кВт в нашей стране ежегодно выпускается около 10 млн. Асинхронных микродвигателей мощностью от 0,6 кВт изготавливается несколько десятков миллионов в год.

Электротехническая промышленность выпускает асинхронные двигатели в большом диапазоне мощностей. Предельная мощность асинхронных двигателей – несколько десятков мегаватт. В индикаторных системах применяются асинхронные двигатели мощностью от долей ватта до сотен ватт. Частота вращения двигателей общего назначения – от 3000 до 500 об/мин.

В генераторном режиме асинхронные машины применяются редко. Для создания поля в зазоре асинхронной машины необходима реактивная мощность, которая забирается из сети или от других источников реактивной мощности. Асинхронные двигатели не могут работать с  $\cos\varphi=1$ . Это существенный недостаток асинхронных машин, ограничивающий их применение в генераторном режиме.

При электромеханическом преобразовании энергии в асинхронных машинах, как и в других машинах, происходит преобразование энергии а тепло. Электрические потери в роторе асинхронной машины пропорциональны скольжению. Чтобы большая часть электрической энергии преобразовывалась в механическую, асинхронные машины используются в электроприводах, где допустимо небольшое скольжение ( $s = 1-4\%$ ). При глубоком скольжении ( $s=10-50\%$ ) асинхронные машины используются редко, так как в это случае большая часть мощности, забираемой из сети, преобразуется в тепло, что приводит к низкому КПД и увеличению габаритов асинхронной машины из-за трудностей, связанных с отводом тепла от активных частей машины.

Наличие в роторе потерь, пропорционально зависящих от скольжения, – одна из особенностей асинхронных машин, обуславливающих их отличие от других типов электрических машин.

Если обмотки ротора представляют собой замкнутые контуры, то при скольжении  $s=1$  вся мощность, поступающая на ротор, преобразуется в тепло. При скольжении  $s=0$  мощность на ротор не поступает. При скольжениях, отличных от 0 и 1, электромагнитная мощность преобразуется в двигательном режиме в механическую мощность и в тепло, а в генераторном режиме – в электрическую и в тепло.

В конструктивном исполнении асинхронные двигатели – наиболее простые, они получили наибольшее распространение.

### Расчёт характеристик трехфазных асинхронных двигателей

1. Рассчитать рабочие характеристики и построить зависимости частоты вращения  $n$ , вращающего момента  $M_2$ , тока обмотки статора  $I_1$ , потребляемой мощности  $P_1$  и коэффициента мощности  $\cos \Psi$  в функции полезной мощности  $P_2$ .

2. Определить значения критического скольжения  $S_k$ , максимального  $M_{\max}$  и пускового  $M_p$  моментов двигателя и их относительных значений  $M_{\max}^*$  и  $M_p^*$ .

3. Рассчитать и построить механическую характеристику двигателя  $M(S)$  для разных величин скольжения  $S$ . Скольжение рекомендуется представлять в процентах (долях единицы значений:  $S = S\%/100$ ). Величину  $c_1$  принять равной  $c_1 = 1 + X_1/X_m$ .

Расчет следует выполнить для значений скольжения  $S = (0,0025; 0,005; 0,01; 0,02; 0,025; 0,03; 0,2; 0,3)$ .

4. Для каждой величины скольжения нужно определить:

– активные  $I_{xха}$ , реактивные  $I_{xхр}$ , действующие  $I_{ххд}$ , величины тока холостого хода, тока статора  $I_{1а}, I_{1р}, I_{1д}$ , тока ротора  $I_{2а}, I_{2р}, I_{2д}$ ;

– мощности: потребляемую  $P_1$ , преобразованную  $P_{пр}$  и полезную  $P_2$ ;

– коэффициент мощности  $\cos \psi_1$ ; к.п.д.  $\zeta$ ;

– угловую скорость  $n$  и момент нагрузки  $M_2$ .

Исходные данные:

Номинальная мощность на валу  $P_{2н} = 30$  кВт

Номинальное линейное напряжение  $U_{1н} = 660$  В

Синхронная угловая скорость  $n_1 = 750$  об/мин

Коэффициент полезного действия  $\eta = 90,5$

Коэффициент мощности  $\cos \Psi = 0,81$

Активное сопротивление цепи намагничивания  $r^* = 0,18$  Ом

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания  $x^* = 2,15$  Ом

Активное сопротивление обмотки статора  $r_1^* = 0,030$  Ом

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора  $r_2^* = 0,022$  Ом

Индуктивное сопротивление обмотки статора  $x_1^* = 0,073$  Ом

Приведенное индуктивное сопротивление обмотки ротора  $x_2^* = 0,17$  Ом

Механические потери  $P_{мех} = 0,37$  кВт

#### Расчёт рабочих характеристик

Для расчёта используем Г-образную схему замещения асинхронного двигателя с вынесенным намагничивающим контуром. При этом определим поправочный коэффициент для заданной схемы:

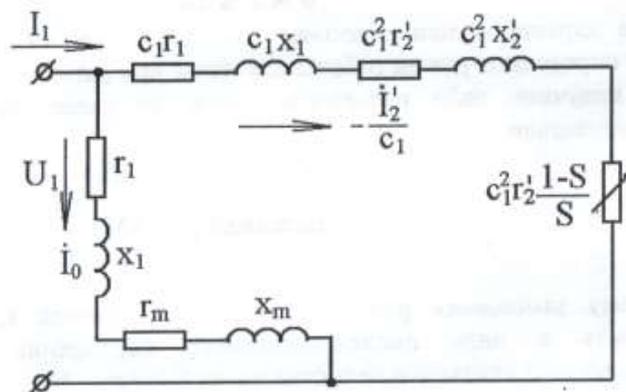


Рисунок 1. Схема замещения асинхронной машины в Г-образной форме

Для схемы соединения обмоток «звездой» определяем номинальные фазные напряжения и фазные (которые являются также и линейными) токи.

Фазное напряжение:

$$U_{1ф} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{3}} = \frac{660}{\sqrt{3}} = 381,05 \text{ В}$$

Приведённая мощность:

$$P_{1H} = \frac{P_{2H}}{\eta_H} = \frac{30000}{0.905} = 33149,17 \text{ Вт}$$

Добавочные потери определяем по формуле:

$$P_{\text{ад}} = 0.005 \cdot P_{1H} = 0.005 \cdot 33149,17 = 165,746 \text{ Вт}$$

Фазный ток обмоток статора:

$$I_{1H} = \frac{P_{1H}}{U_{1\phi} \cdot \cos \phi_1} = \frac{33149,17}{3 \cdot 381,05 \cdot 0,81} = 35,8 \text{ А}$$

Заданные относительные сопротивления переводим в омические.

Коэффициент перевода электрических параметров из относительных единиц в именованные:

$$Z_{\text{г}} = \frac{U_{1\phi}}{I_{1H}} = \frac{381,05}{35,8} = 10,644 \text{ Ом}$$

Найдём найденное сопротивление в именованных единицах. Определим активное сопротивление цепи намагничивания потери в стали:

$$r_M = \Gamma_M^* \times Z = 0,18 \times 10,644 = 1,916 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление взаимоиндукции приведённой первичной и вторичной цепи:

$$x_M = x_M^* \times Z = 2,15 \times 10,644 = 22,884 \text{ Ом}$$

Активное сопротивление обмотки статора в именованных единицах:

$$r_1 = r_{1\phi}^* \times Z = 0,030 \times 10,644 = 0,319 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора в именованных единицах:

$$x_1 = x_{1\phi}^* \times Z = 0,073 \times 10,644 = 0,777 \text{ Ом}$$

Активное приведённое сопротивление обмотки ротора в именованных единицах:

$$r_2 = r_{2\phi}^* \times Z = 0,022 \times 10,644 = 0,234 \text{ Ом}$$

Определим индуктивное приведённое сопротивление обмотки ротора:

$$x_2 = x_{2\phi}^* \times Z = 0,17 \times 10,644 = 1,809 \text{ Ом}$$

Определяем токи холостого хода ротора и статора.

Полное активное сопротивление рабочего контура:

$$r_{\text{эк}} = r_1 + r_m = 0,319 + 1,916 = 2,235 \text{ Ом}$$

Определим полное индуктивное сопротивление рабочего контура:

$$x_{\text{эк}} = x_1 + x_m = 0,777 + 22,884 = 23,661 \text{ Ом}$$

Таким образом полное эквивалентное сопротивление контура намагничивания определяем по формуле:

$$z_{\text{эк}} = \sqrt{(r_{\text{эк}}^2 + x_{\text{эк}}^2)} = \sqrt{(2,235^2 + 23,661^2)} = 23,7667 \text{ Ом}$$

$$\cos \phi = \frac{r_{\text{эк}}}{z_{\text{эк}}} = \frac{2,235}{23,7667} = 0,094$$

Определим

$$\sin \phi = \frac{x_{\text{эк}}}{z_{\text{эк}}} = \frac{23,661}{23,7667} = 0,9956$$

Определим

Определим действующее значение тока холостого хода статора:

$$I_{10} = \frac{U_{1\phi}}{z_{\text{эк}}} = \frac{381,05}{23,7667} = 16,033 \text{ А}$$

Определим активную составляющую тока холостого хода:

$$I_{1a} = I_{10} \times \cos \phi = 16,033 \times 0,094 = 1,508 \text{ А}$$

Определим реактивную составляющую тока холостого хода:

$$I_{1r} = I_{10} \times \sin \phi = 16,033 \times 0,9956 = 15,962 \text{ А}$$

Для заданной схемы определим поправочный коэффициент:

$$C_1 = 1 + \frac{x_1}{x_m} = 1 + \frac{0,777}{22,884} = 1,034$$

## Практическая работа №9 Расчет рабочего процесса трехфазного асинхронного двигателя

**Цель:** изучить расчет рабочего процесса трехфазного асинхронного двигателя.

Решаемая на практическом занятии задача направлена на определение основных параметров асинхронного электродвигателя.

Для ее решения необходимо знать устройство и принцип действия асинхронного двигателя и зависимости между электрическими величинами, характеризующими его работу.

При частоте напряжения питающей сети 50 Гц возможные синхронные частоты вращения магнитного поля статора: 3000, 1500, 1000, 750, 600 об/мин и т.д. Тогда при частоте вращения ротора  $n_2 = 950$  об/мин из приведенного выше ряда выбираем ближайшую к ней частоту вращения поля  $n_1 = 1000$  об/мин. Тогда можно определить скольжение ротора, даже не зная числа пар полюсов двигателя:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0,05;$$

Из формулы для скольжения можно определить частоту вращения ротора

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - S)$$

В настоящее время промышленность выпускает асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором серии 4А мощностью от 0,06 до 400 кВт (табл. 1). Обозначение типа электродвигателя расшифровывается так: 4 — порядковый номер серии; А — асинхронный; Х — алюминиевая оболочка и чугунные щиты (отсутствие буквы Х означает, что корпус полностью выполнен из чугуна); В — двигатель встроен в оборудование; Н — исполнение защищенное IP23, для закрытых двигателей исполнения IP44 обозначение защиты не приводится; Р — двигатель с повышенным пусковым моментом; С — сельскохозяйственного назначения; цифра после буквенного обозначения показывает высоту оси вращения в мм (100, 112 и т. д.); буквы S, M, L — после цифр — установочные размеры по длине корпуса (S — станина самая короткая; M — промежуточная; L — самая длинная); цифра после установочного размера — число полюсов; буква У — Климатическое исполнение (для умеренного климата); последняя цифра — категория размещения: 1 — для работы па открытом воздухе, 3 — для закрытых неотапливаемых помещений.

Необходимо расшифровать условное обозначение двигателя 4А250S4У3.

Это двигатель четвертой серии, асинхронный, корпус полностью чугунный (нет буквы Х), высота оси вращения 250 мм, размеры корпуса по длине S (самый короткий), четырех полюсный, для умеренного климата, третья категория размещения.

**Пример.** Трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором типа 4АР160Б6У3 имеет номинальные данные: мощность  $P_{ном} = 11$  кВт; напряжение  $U_{ном} = 380$  В; частота вращения ротора  $n_2 = 975$  об/мин; к.п.д.  $\eta_{ном} = 0,855$ ; коэффициент мощности  $\cos\varphi_{ном} = 0,83$ ; кратность пускового тока  $I_{п}/I_{ном} = 7$ ; кратность пускового момента  $M_{п}/M_{ном} = 2,0$ ; способность к перегрузке  $M_{max}/M_{ном} = 2,2$ . Частота тока в сети  $f_1 = 50$  Гц.

**Определить:** 1) потребляемую мощность; 2) номинальный, пусковой и максимальный вращающие моменты; 3) номинальный и пусковой токи; 4) номинальное скольжение; 5) частоту тока в роторе. Расшифровать его условное обозначение. Оценить возможность пуска двигателя при номинальной нагрузке, если напряжение в сети при пуске снизилось на 20%?

**Решение.**

Мощность, потребляемая из сети

$$P_1 = \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}} = \frac{11}{0,855} = 12,86 \text{ кВт}$$

Номинальный момент, развиваемый двигателем:

$$M = 9,55 \frac{P_{ном}}{n_2} = \frac{9,55 \cdot 11 \cdot 1000}{975} = 107,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Максимальный и пусковой моменты:

$$M_{\max} = 2,2 \cdot M_{\text{ном}} = 2,2 \cdot 107,7 = 237 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\Pi} = 2 \cdot M_{\text{ном}} = 2 \cdot 107,7 = 215,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номинальный и пусковой токи:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot \cos \phi_{\text{ном}}} = \frac{11 \cdot 1000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,855 \cdot 0,83} = 23,6 \text{ А};$$

$$I_{\Pi} = 7,0 \cdot I_{\text{ном}} = 7,0 \cdot 23,6 = 165 \text{ А}$$

Номинальное скольжение

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1000 - 975}{1000} = 0,025 = 2,5 \%$$

Частота тока в роторе

$$f_2 = f_1 \cdot s = 50 \cdot 0,025 = 1,25 \text{ Гц}$$

Условное обозначение двигателя расшифровываем так: двигатель четвертой серии, асинхронный, с повышенным скольжением (буква Р), высота оси вращения 160 мм, размеры корпуса по длине S (самый короткий), шестиполосный, для умеренного климата, третья категория размещения.

При снижении напряжения в сети на 20% на выводах двигателя остается напряжение  $0,8 U_{\text{ном}}$ .

Так как момент двигателя пропорционален квадрату напряжения, то

$$\frac{M'_{\Pi}}{M_{\Pi}} = \frac{(0,8 U_{\text{ном}})^2}{U_{\text{ном}}^2} = \frac{(0,8 \cdot 380)^2}{380^2} = 0,64$$

Отсюда

$$M'_{\Pi} = 0,64 \cdot M_{\Pi} = 0,64 \cdot 215,4 = 138 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

что больше  $M = 107,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Таким образом, пуск двигателя возможен.

## Лабораторные работы.

### Лабораторная работа №1 Исследование генератора постоянного тока параллельного возбуждения

**Цель:** Изучить устройство генератора постоянного тока параллельного возбуждения и приобрести практические навыки в сборке схемы и опытным исследовании генератора по определению его основных характеристик; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах генераторов постоянного тока параллельного возбуждения.

Студент должен *знать*:

- конструкцию генератора и приводного двигателя,
- условия самовозбуждения генераторов постоянного тока;
- генератор параллельного возбуждения - схема соединений, основные характеристики (самовозбуждения, внешняя, регулировочная).

уметь:

- строить характеристику самовозбуждения, внешнюю характеристику генератора;
- определять номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки.

#### Теоретическое обоснование

**Внешняя характеристика.** Эта характеристика представляет собой зависимость напряжения на выходе  $U$  от тока нагрузки  $I$  при неизменных частоте вращения  $n = n_{ном}$  и сопротивлении цепи возбуждения  $r_{пр} = const$ .

**Характеристика самовозбуждения.** Характеристика самовозбуждения представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора в режиме х.х.  $U_0 = E_0$  от частоты вращения  $n$  при неизменном сопротивлении цепи возбуждения ( $r_{пр} = const$ ).

Анализируя результаты лабораторной работы, устанавливают, соответствуют ли номинальные данные генератора, полученные опытным путем, его паспортным данным. При анализе характеристики самовозбуждения необходимо указать полученное значение критической частоты вращения. Для внешней характеристики генератора нужно перечислить причины, вызывающие уменьшение напряжения на выходе генератора при росте его нагрузки.

#### Ход работы

1) Ознакомиться с конструкцией генератора и приводного двигателя, записать их паспортные данные и данные измерительных приборов.

2) Собрать схему по рисунку 13.1, после проверки ее преподавателем выполнить пробный пуск генератора. Проверить соблюдение условий самовозбуждения, возможность регулировки и нагрузки генератора.

Представленная на рисунке 13.1 схема соединений предусматривает применение двигателя постоянного тока параллельного возбуждения в качестве приводного двигателя.

Обмотка возбуждения исследуемого генератора включена параллельно обмотке якоря, а для регулировки тока возбуждения в цепи этой обмотки имеется регулировочный реостат  $r_{пр}$ . Работа генератора основана на принципе самовозбуждения.

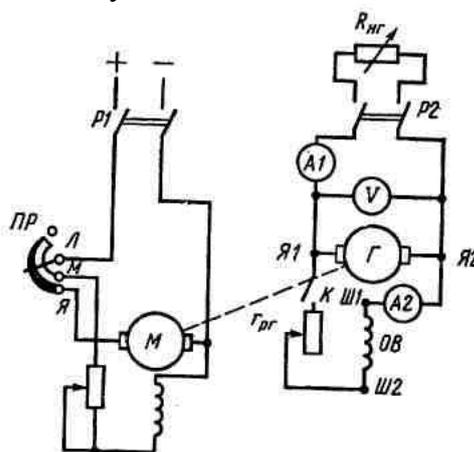


Рисунок 13.1 – Схема включения генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

После сборки схемы и проверки ее преподавателем включают приводной двигатель (замыкают  $P1$ ) и устанавливают номинальную частоту вращения. Затем приступают к проверке условий самовозбуждения. При разомкнутых рубильнике  $P2$  и ключе  $K$  вольтметром измеряют напряжение на выходе генератора. Если вольтметр показывает небольшое напряжение (ЭДС остаточного магнетизма), то это свидетельствует о соблюдении первого условия самовозбуждения – магнитная система генератора обладает остаточным магнетизмом. Если же магнитная система размагнитилась, то ее можно намагнитить, подключив обмотку возбуждения на некоторое время к источнику постоянного тока.

Затем устанавливают на реостате  $r_{рг}$  наибольшее сопротивление, замыкают ключ  $K$ , постепенно уменьшая сопротивление  $r_{рг}$ , наблюдают за показаниями вольтметра  $V$ . При этом возможны три случая:

а) напряжение генератора остается неизменным, что свидетельствует об обрыве в цепи возбуждения (найти место обрыва и устранить его);

б) напряжение генератора уменьшается, что указывает на неправильное подключение обмотки возбуждения к цепи обмотки якоря, при котором МДС обмотки возбуждения действует встречно магнитному потоку остаточного магнетизма и размагничивает машину; устранить этот дефект можно, изменив направление тока в обмотке возбуждения (поменять местами провода, подключенные к зажимам обмотки  $Ш1$  и  $Ш2$ );

в) напряжение генератора увеличивается - начинается процесс самовозбуждения.

3) Снять данные и построить характеристику самовозбуждения генератора. Для чего установив номинальное напряжение генератора при отключенном рубильнике  $P2$  и номинальной частоте вращения, повышают частоту вращения до  $n = 1,2n_{ном}$ . Затем постепенно уменьшают частоту вращения и снимают пять показаний вольтметра  $V$  и тахометра (либо другого измерителя частоты вращения). По этим показаниям строят характеристику самовозбуждения (рисунок 13.2).

Для уменьшения частоты вращения до весьма малых значений необходимо на время этого опыта подключить приводной двигатель к источнику постоянного тока с регулируемым напряжением. На некотором участке характеристики самовозбуждения, соответствующем небольшой частоте вращения, показания вольтметра  $V$  зависят от частоты вращения. Соответствующая этому явлению частота вращения называется критической  $n_{кр}$ . Самовозбуждение генератора возможно лишь при частоте вращения, превышающей критическую. Величина  $n_{кр}$  зависит от сопротивления цепи возбуждения: с увеличением сопротивления  $r_{рг}$  величина  $n_{кр}$  возрастает. В этом можно убедиться при выполнении опыта.

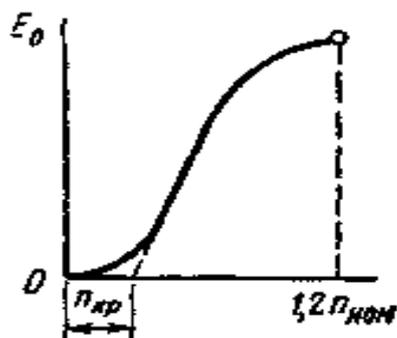


Рисунок 13.2 – Характеристики самовозбуждения генератора постоянного тока.

4) Снять данные и построить внешнюю характеристику генератора и определить номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки.

Включив приводной двигатель, подключают нагрузку (замыкают  $P2$ ) и замыкают цепь возбуждения (включают  $K$ ). Регулируя сопротивление  $R_{нг}$  и сопротивление регулировочного реостата  $r_{рг}$ , устанавливают номинальный режим работы генератора (частота вращения при этом должна быть номинальной и оставаться такой в течение всего опыта). Сняв показания вольтметра  $V$  и амперметра  $A1$ , уменьшают нагрузку (увеличивают сопротивление  $R_{нг}$ ), сопротивление  $r_{рг}$  должно оставаться при этом неизменным. Разгружая генератор вплоть до режима х. х., снимают

не менее пяти показаний приборов и заносят их в таблицу 13.1, а затем строят внешнюю характеристику генератора.

Номинальное изменение напряжения генератора при сбросе нагрузки определяется выражением:

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = \frac{E_0 - U_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}} 100, \quad (13.1)$$

5) Составить отчет и сделать вывод о проделанной работе.

Таблица 13.1 – Результаты измерений и расчетов

$I_B / I_{\text{НОМ}}$	1,0	0,85	0,75	0,50	0
$I_a, A$					
$U, B$					
$I_B, A$					

### Контрольные вопросы

- 1) Каковы условия, необходимые для процесса самовозбуждения генератора постоянного тока?
- 2) Какое условие самовозбуждения нарушено, если при замыкании цепи возбуждения ЭДС генератора уменьшается до нуля?
- 3) Что представляет собой характеристика самовозбуждения? что такое критическая частота вращения?
- 4) Почему внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения имеет более падающий вид, чем внешняя характеристика генератора независимого возбуждения?

### Содержание отчета

- 1) Номер, название и цель работы.
- 2) Рисунок 13.1.
- 3) Паспортные данные измерительных приборов.
- 4) Ход работы.
- 5) Результаты измерений и расчетов таблицы 13.1.
- 6) Характеристики самовозбуждения, внешняя характеристика.
- 7) Ответы на контрольные вопросы.
- 8) Вывод по лабораторной работе.

### Литература

- 1) Кацман М. М. Электрические машины – М.: Высшая школа, 2000, с. 379...383.
- 2) Кацман М.М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу – М.: Высшая школа, 2001, с. 97...100.

### Лабораторная работа №2 Исследование двигателей постоянного тока параллельного и последовательного возбуждения

**Цель:** Изучить устройство двигателя постоянного тока параллельного и последовательного возбуждения и приобрести практические навыки в сбор схемы при опытном исследовании двигателя для получения данных его основных характеристик; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах двигателей постоянного тока параллельного и последовательного возбуждения.

Студент должен *знать*:

- принцип действия и устройство двигателя постоянного тока, способы пуска и регулировки

постоянного тока параллельного возбуждения;

- устройство, принцип действия и характеристики двигателя возбуждения.

*уметь:*

- рассчитывать и строить рабочие и регулировочные характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

- производить пуск двигателя постоянного тока последовательного возбуждения;

- изменять направление вращения;

- регулировать скорость двигателей;

- снимать рабочие и регулировочные характеристики.

### **Исследование двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.**

*Регулировочная характеристика.* Регулировочная характеристика двигателя постоянного тока параллельного возбуждения представляет собой зависимость частоты вращения  $n$  от тока в обмотке возбуждения  $I_b$  при неизменных напряжении питания  $U$  и нагрузке. В данной работе регулировочную характеристику снимают в режиме х.х.

*Рабочие характеристики.* Рабочие характеристики двигателя представляют собой зависимость частоты вращения  $n$ , потребляемого тока  $I$ , полезного (нагрузочного) момента  $M_2$  и КПД  $\eta$  от полезной мощности  $P_2$  при неизменных значениях напряжения  $U$  и тока возбуждения  $I_b$ .

При анализе следует объяснить криволинейный вид регулировочной характеристики двигателя, а также форму рабочих характеристик двигателя. При анализе скоростной характеристики  $n = f(M_2)$  необходимо, кроме того, дать количественную оценку этой характеристике, рассчитав номинальное изменение частоты вращения двигателя при сбросе нагрузки (%):

$$\Delta n_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} \cdot 100 \quad (14.1)$$

### **Ход работы**

1) Ознакомиться с конструкцией двигателя и нагрузочного устройства, записать паспортные данные двигателя и данные измерительных приборов.

2) Собрать схему по рисунку 14.1, после проверки ее преподавателем произвести пробный пуск двигателя.

*Схема соединений и пробный пуск двигателя.* Схема соединений (рисунок 14.1) включает в себя вольтметр  $V$  для контроля за напряжением в сети и два амперметра:  $A1$  - для измерения рабочего тока, потребляемого двигателем из сети, и  $A2$  - для измерения тока в обмотке возбуждения  $I_b$ . Кроме того, в схеме имеется два реостата:  $ПР$  - пусковой реостат для ограничения пускового тока и  $r_{\text{рг}}$  - регулировочный реостат для регулирования величины тока в обмотке возбуждения  $I_b$ . В качестве нагрузочного устройства в схеме предусмотрен электромагнитный тормоз  $ЭМТ$ . Возможно применение и других видов нагрузочных устройств для создания на валу двигателя тормозного момента.

Прежде чем включить двигатель в сеть, необходимо поставить рычаг пускового реостата  $ПР$  в положение «Пуск», соответствующее наибольшему сопротивлению реостата, а движок (рычаг) регулировочного реостата  $r_{\text{рг}}$  поставить в положение минимального сопротивления (в этом случае ток возбуждения, а следовательно, и магнитный поток будут наибольшим, что будет способствовать увеличению электромагнитного момента двигателя).

После замыкания рубильника  $R$  рычаг  $ПР$  переводят на первую ступень и якорь двигателя приходит во вращение. Постепенно рычаг реостата переводят в положение «Работа», а затем с помощью регулировочного реостата устанавливают требуемую частоту вращения.

При сборке схемы необходимо обратить особое внимание на надежность всех соединений в цепи обмотки возбуждения, а при работе двигателя и его регулировке следует следить, чтобы эти соединения не нарушались. Такая предосторожность вызвана опасностью «разноса» двигателя при обрыве в цепи возбуждения.

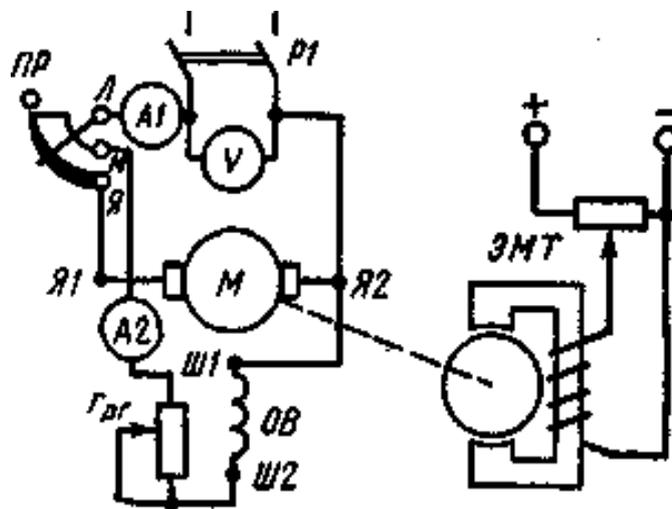


Рисунок 14.1 - Схема включения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

3) Проверить возможность регулировки частоты вращения и реверсирования. Для реверса (изменения направления вращения) двигателя необходимо изменить направление тока либо в обмотке возбуждения, либо в обмотке якоря. Если же одновременно изменить направление тока обеих обмоток, то реверса не произойдет. В этом можно убедиться поменяв местами провода, присоединенные к рубильнику  $P1$ .

4) Снять данные для построения регулировочной характеристики в режиме х.х.

*Регулировочная характеристика.* После пуска двигателя при минимальном сопротивлении реостата  $r_{рг}$  двигатель работает без какой-либо нагрузки. Затем постепенно увеличивают сопротивление  $r_{рг}$  до значения, при котором  $n = 1,2n_{ном}$ . При этом через приблизительно одинаковые интервалы частоты вращения снимают показания измерителя частоты вращения двигателя, например тахогенератора, и амперметра  $A2$  и заносят их в таблицу 14.1.

По данным таблицы 14.1 строят регулировочную характеристику двигателя  $n = f(I_B)$ .

Таблица 14.1 – Результаты измерений

$n/n_{ном}$	0,6	0,8	1,0	1,1	1,2
$n$ , об /мин					
$I_B$ , А					

5) Снять данные для построения рабочих характеристик.

Для получения данных, необходимых для построения рабочих характеристик, включают двигатель и нагружают его до номинального тока нагрузки при номинальной частоте вращения. При этом снимают показания амперметров  $A1$  и  $A2$ , вольтметра  $V$  и ЭМТ. Затем постепенно разгружают двигатель до х. х. и через приблизительно одинаковые интервалы тока нагрузки снимают показания перечисленных приборов и заносят их в таблицу 14.2. Всего снимают не менее пяти показаний.

Таблица 14.2 – Результаты измерений и вычислений

Номер измерения и вычисления	Измерения					Вычисления		
	$U$ , В	$I$ , А	$I_B$ , А	$n$ , об/мин	$M$ , Нм	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\eta$ , %

Рассчитав значение потребляемой мощности (Вт)

$$P_1 = UI \quad (14.2)$$

полезной мощности

$$P_2 = 1,105M_2n \quad (14.3)$$

КПД двигателя (%)

$$\eta = (P_2/P_1) \cdot 100 \quad (14.4)$$

строят рабочие характеристики двигателя в одних осях координат.

б) Составить отчет и сделать вывод о проделанной работе. Определив номинальные данные двигателя по его рабочим характеристикам, их следует сравнить с паспортными данными двигателя и сделать вывод об их соответствии.

#### **Исследование двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.**

**Схема соединений и пробный пуск двигателя.** Схема соединений двигателя последовательного возбуждения (рисунок 15.1) включает в себя двухзажимный пусковой реостат  $ПР$ , регулировочный реостат  $r_{рг}$ , шунтирующий обмотку возбуждения (подключается к обмотке возбуждения ключом  $K$ ) и два амперметра:  $A1$  - для измерения тока якоря  $I_a$  и  $A2$  для измерения тока в обмотке возбуждения (при разомкнутом ключе  $K$  оба амперметра дают одинаковые показания). Напряжение сети контролирует вольтметр  $V$ .

В качестве нагрузочного устройства в схеме предусмотрен электромагнитный тормоз  $ЭМТ$ . Возможно применение и других нагрузочных устройств. Особенностью пуска двигателей последовательного возбуждения является необходимость пуска их под нагрузкой не менее 25% от номинальной. Объясняется это тем, что частота вращения якоря двигателя обратно пропорциональна магнитному потоку  $\Phi$ , который при ненасыщенной магнитной цепи пропорционален току в обмотке возбуждения  $I_b$ , т. е. току якоря  $I_a$ , так как в рассматриваемом двигателе (при разомкнутом  $K$ )  $I_b = I_a$ . Поэтому при отсутствии нагрузки на валу двигателя или при недостаточной ее величине, когда ток в якоре составляет небольшую величину, частота вращения достигает недопустимо больших значений и возникает опасность «разноса» двигателя. Учитывая это обстоятельство, необходимо следить за тем, чтобы двигатель постоянно находился под нагрузкой не менее 25% от номинальной.

Создав нагрузку на двигатель, замыкают рубильник  $PI$  и постепенно выводят сопротивление  $ПР$  (ключ  $K$  при этом должен быть разомкнут). Затем, установив на регулировочном реостате  $r_{рг}$  максимальное сопротивление, замыкают ключ  $K$  и медленно перемещают движок (рычаг)  $r_{рг}$ , наблюдая за изменением частоты вращения двигателя.

**Рабочие характеристики.** Эти характеристики представляют собой зависимость частоты вращения  $n$ , момента на валу  $M_2$  и полезной мощности  $P_2$  от тока в обмотке якоря (тока нагрузки)  $I_a$  при номинальном напряжении питания  $U = U_{ном}$  и при разомкнутом ключе  $K$ .

Включив двигатель, увеличивают нагрузку на его валу до значения, на котором  $I_a = 1,2 I_{ном}$ . Затем двигатель постепенно разгружают до значения тока нагрузки  $I_a = 0,25 I_{ном}$ . При этом через приблизительно одинаковые интервалы тока  $I_a$  снимают показания приборов (не менее пяти показаний) и заносят их в таблицу 15.1.

Полезная мощность двигателя (Вт)

$$P_2 = 0,105M_2n, \quad (15.1)$$

По данным таблицы строят рабочие характеристики двигателя в одних осях координат.

**Характеристика  $n = f(I_b)$ .** После пуска двигателя увеличивают нагрузку на его валу до значения, при котором ток якоря  $I_a = 0,75 I_{ном}$ . Измерив частоту вращения, замыкают ключ  $K$ , предварительно установив на  $r_{рг}$  наибольшее сопротивление. Затем постепенно уменьшают сопротивление  $r_{рг}$  до тех пор, пока ток в обмотке возбуждения не достигнет значения  $I_b = 0,5 I_a$ , что

соответствует коэффициенту регулирования  $k_{\text{пр}} = I_{\text{в}}/I_{\text{а}} = 0,5$ . После этого, не меняя величины сопротивления  $r_{\text{пр}}$ , постепенно разгружают двигатель. При этом измеряют частоту вращения и ток возбуждения  $I_{\text{в}}$  и заносят их в таблицу 17.2. Затем строят график зависимости  $n = f(I_{\text{в}})$ .

Анализируя результаты лабораторной работы, необходимо, в первую очередь, установить соответствие номинальных данных исследуемого двигателя, полученных опытным путем, его паспортным данным. Далее следует проанализировать рабочие характеристики двигателя.

Из теории известно, что в зоне небольших нагрузок, соответствующих ненасыщенному состоянию магнитной системы двигателя, скоростная характеристика  $n = f(I_{\text{а}})$  представляет собой график обратной пропорциональности:

$$n = n_{0,25}/(I_{\text{а}}/I_{0,25}) \quad (15.2)$$

а характеристика полезного момента  $M_{\text{а}} = f(I_{\text{а}})$  - график квадратичной зависимости

$$M_2 = M_{0,25}(I_{\text{а}}/I_{0,25})^2 \quad (15.3)$$

В этих выражениях  $I_{0,25}$  и  $M_{0,25}$  - частота вращения и полезный момент при нагрузке двигателя, соответствующей току якоря  $I_{0,25} = 0,25I_{\text{ном}}$ .

Задавшись рядом значений отношения  $I_{\text{а}}/I_{0,25}$ , например 1,0; 1,6; 2,4; 3,2; 4,0, определяют соответствующие им значения  $n'$  и  $M_2$  и заносят их в таблицу 15.3.

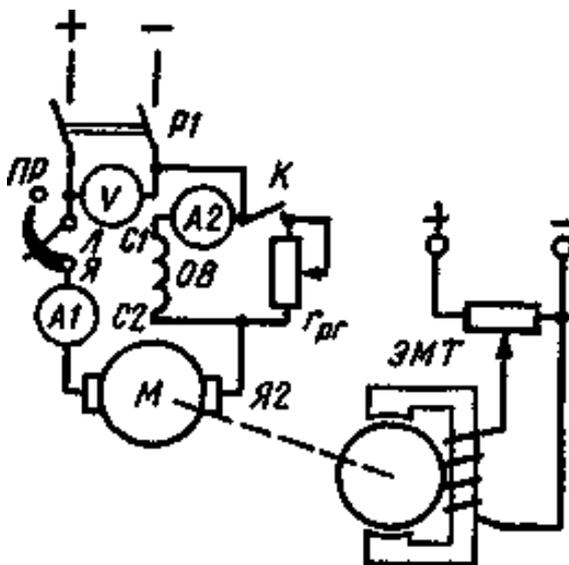


Рисунок 15.1 – Схема включения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

### Ход работы

- 1) Ознакомиться с конструкцией двигателя и нагрузочного устройства; записать паспортные данные двигателя измерительных приборов.
- 2) Собрать схему по рисунку 15.1, и после проверки ее преподавателем произвести пробный пуск двигателя, предварительно нагрузив его.
- 3) При разомкнутом ключе  $K$ , снять данные и построить рабочие характеристики двигателя.
- 4) При замкнутом ключе  $K$ , (шунтирующем обмотку возбуждения) снять данные и построить график зависимости частоты вращения от тока в обмотке возбуждения  $I_{\text{в}}$ .

Таблица 15.1 – Результаты измерений

Номер измерения	$U$ , В	$I_{\text{а}}$ , А	$n$ , об/мин	$M_2$ , Нм	$P_2$ , Вт

--	--	--	--	--	--

Таблица 15.2– Результаты измерений

$n$ , об/мин					
$I_b$ , А					

Таблица 15.3– Результаты измерений

$I_a/I_{0,25}$	1,0	1,6	2,4	3,2	4,0
$I_a$ , А					
$n'$ , об/мин					
$M'_2$ , Нм					

По полученным данным строят графики  $n' = f(I_0)$  и  $M_2 = f(I_a)$  в одних осях координат с рабочими характеристиками (тонкими линиями). Сравнив эти графики с рабочими характеристиками, делают заключение, насколько опытные кривые отличаются от теоретических и при какой нагрузке это отличие становится наиболее значительным.

5) Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

#### Контрольные вопросы

1) С какой целью при пуске двигателя параллельного возбуждения на регулировочном реостате устанавливают минимальное сопротивление?

2) Какие способы регулировки частоты вращения возможны в двигателях параллельного возбуждения?

3) Почему регулировочная характеристика двигателя параллельного возбуждения криволинейна?

4) Какие характеристики двигателя параллельного возбуждения называют рабочими?

5) Почему при увеличении нагрузки двигателя параллельного возбуждения уменьшается частота вращения?

6) Почему не допускается включение двигателя последовательного возбуждения с нагрузкой менее 25% от номинальной?

7) Что представляют собой рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения?

8) Какие способы регулирования частоты вращения возможны в двигателях последовательного возбуждения?

9) Чем объясняются особые свойства двигателей последовательного возбуждения по сравнению с двигателями параллельного возбуждения?

10) Для привода, каких механизмов в основном применяются двигатели последовательного возбуждения?

#### Литература

1) Кацман М. М. Электрические машины – М.: Высшая школа, 2000, с. 66...70.

2) Кацман М. М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу – М.: Высшая школа, 2001, с. 105...109.

### Лабораторная работа №3 Исследование двухобмоточного силового трансформатора методом холостого хода.

**Цель:** Ознакомиться с устройством трансформатора; усвоить практические приемы лабораторного исследования трансформатора методом холостого хода и короткого замыкания.

Студент должен знать:

- принцип действия и устройство силового трансформатора;  
уметь:

- определять опытным путем потери мощности однофазного трансформатора, строить внешние характеристики и графики зависимости трансформатора.

### Теоретическое обоснование

Внешние характеристики. С увеличением нагрузки трансформатора напряжение на клеммах его вторичной обмотки изменяется. Зависимость этого напряжения от нагрузки выражается графически внешними характеристиками трансформатора  $U_2 = f(I_2)$ .

Вид внешней характеристики зависит от характера нагрузки и от величины коэффициента мощности  $\cos\varphi_2$ : при активной и активно-индуктивной нагрузках внешние характеристики имеют падающий вид, причем чем меньше коэффициент мощности  $\cos\varphi_2$ , тем больше наклон характеристики к оси абсцисс; при активно-емкостной нагрузке внешняя характеристика имеет восходящий вид (рис. 1.3, а).

При анализе характеристик х. х. трансформатора следует обратить внимание на их криволинейность, обусловленную магнитным насыщением магнитопровода, наступающим при некотором значении первичного напряжения. Ток х. х.  $i_{0ном}$  и мощность х. х.  $P_{0ном}$ , полученные опытным путем, сравнивают с их значениями по каталогу на исследуемый трансформатор. Значительное превышение опытных значений  $i_{0ном}$  и  $P_{0ном}$  над каталожными указывает на наличие дефектов в трансформаторе: к. з. между частью пластин в магнитопроводе или межвитковое к. з. в небольшой части витков какой-либо из обмоток.

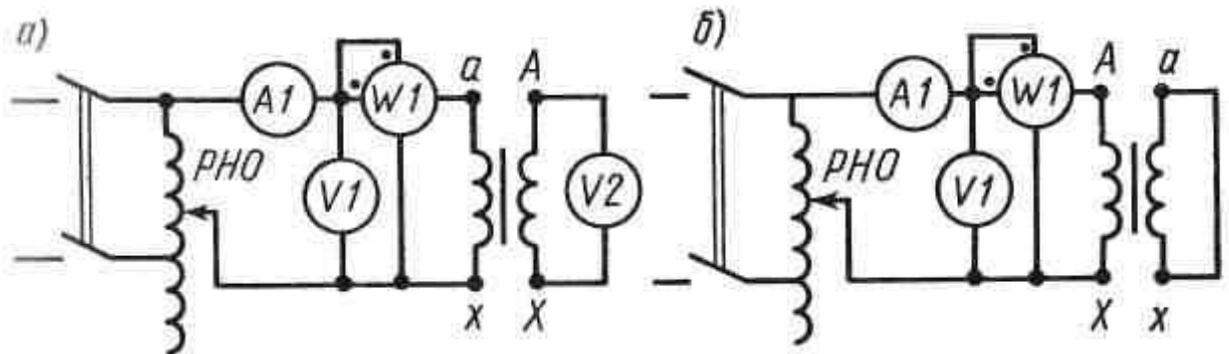


Рисунок 1.1 - Схемы включения однофазного трансформатора при опытах х. х. (а) и к. з.

### Ход работы

#### 1) Опыт холостого хода.

В схеме включения однофазного трансформатора при опыте х. х. применен регулятор напряжения РНО (рисунок 1.1, а), позволяющий плавно регулировать подводимое к первичной обмотке напряжение. В качестве первичной обычно используют обмотку низшего напряжения НН. Всего делают не менее пяти замеров через приблизительно одинаковые интервалы тока х. х., изменяя подводимое к трансформатору напряжение от  $0,5U_{1ном}$  до  $1,15U_{1ном}$ . Показания измерительных приборов заносят в таблицу 1.1.

Затем выполняют расчеты: ток х. х. в процентах от номинального первичного тока,

$$i_0 = (I_0 / I_{1ном})100 \quad (1.1)$$

коэффициент мощности в режиме х. х.

$$\cos\varphi_0 = P_0 / (U_1 I_0); \quad (1.2)$$

коэффициент трансформации

$$k = U_{20} / U_1 \quad (1.3)$$

Полученные значения вычисленных величин занести в таблицу 1.1. Величины, соответствующие номинальному первичному напряжению  $U_{1ном}$ , следует выделить, например, подчеркнув их жирной линией. По данным таблицы строят характеристики х. х. трансформатора (на общей координатной сетке):  $I_0$ ;  $P_0$ ;  $\cos\varphi_0 = f(U_1)$ . На характеристиках отмечают точки  $I_{0.ном}$ ;

$P_{0.ном}$  и  $\cos\varphi_{0.ном}$ , соответствующие номинальному напряжению  $U_{1ном}$  (рисунок 1.2, а).

## 2) Опыт короткого замыкания.

При опыте к. з. трансформатора (рисунок 1.1, б) напряжение обычно подводят к обмотке ВН, номинальное значение тока в которой меньше, чем в обмотке НН. В некоторых случаях это позволяет включать ваттметр в первичную цепь без трансформатора тока.

Вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко медным проводом достаточного поперечного сечения, чтобы не создавать во вторичной цепи трансформатора значительного электрического сопротивления.

Опыт к. з. проводят в такой последовательности: устанавливают рукоятку РНО на нулевую отметку, а затем, включив рубильник, медленно повышают напряжение посредством РНО, изменяя величину тока к. з. от нуля до значения  $1,2I_{1ном}$ . Показания измерительных приборов, снятые через приблизительно одинаковые интервалы тока к. з., а также результаты вычислений заносят в таблицу 1.2. Значения величин, соответствующих значению тока к.з.  $I_{1к} = I_{1ном}$  подчеркивают жирной линией.

Затем выполняют расчеты: напряжение к. з. в процентах от номинального первичного напряжения

$$u_k = (U_k / U_{1ном}) 100 \quad (1.4)$$

коэффициент мощности при опыте к. з.

$$\cos\varphi_k = P_k / (U_k I_k); \quad (1.5)$$

По данным таблицы строят характеристики к. з. (на общей координатной сетке):  $P_k$ ;  $I_k$ ;  $\cos\varphi_k = f(U_k)$ . На характеристиках отмечают точки  $U_{кном}$ ,  $P_{кном}$ , соответствующие току к. з.  $I_{к1} = I_{1ном}$  (рис. 1.2, б).

Полученные из опыта к. з. значения  $P_{к.ном}$  и  $u_{кном}$  следует привести к рабочей температуре  $\theta_2 = 75^\circ\text{C}$ .

Приведенное значение мощности к. з. (Вт)

$$P'_{к.ном} = P_{к.ном} [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)] \quad (1.6)$$

где  $\alpha = 0,004$  - температурный коэффициент для меди и алюминия;

$\theta_1$  = температура обмоток трансформатора при проведении опыта,  $^\circ\text{C}$ . В связи с тем что температура обмоток трансформатора влияет лишь на активную составляющую напряжения к. з.

$$u_{ка} = u_{к.ном} \cdot \cos\varphi_k \quad (1.7)$$

то и приводить к рабочей температуре следует лишь активную составляющую напряжения к. з.

$$u'_{ка} = u_{к.ном} [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)] \quad (1.8)$$

Приведенное к рабочей температуре напряжение к. з.

$$u'_{к.ном} = \sqrt{u'^2_{ка} + u'^2_{к.р}} \quad (1.9)$$

где

$$u_{к.р} = \sqrt{u^2_{к.ном} + u^2_{к.р}} \quad (1.10)$$

$u_{к.р}$  - реактивная составляющая к. з.

При любой нагрузке напряжение на клеммах вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = U_{20}(1 - 0,01 \cdot \Delta U); \quad (1.11)$$

где  $U_{20}$  - напряжение на вторичной обмотке в режиме х. х., принимаемое за номинальное напряжение на выходе трансформатора, В;

$\Delta U$  - изменение вторичного напряжения, вызванное нагрузкой трансформатора.

Для построения внешней характеристики необходимо рассчитать не менее пяти значений напряжения  $U_2$  при разных значениях коэффициента нагрузки  $\beta = I_2/I_{2\text{ном}}$ . например при  $\beta = 0,25; 0,50; 0,75; 1,0$  и  $1,2$ .

Расчет  $\Delta U$  ведут по формуле (%):

$$\Delta U = \beta u'_k (\cos \varphi_k \cos \varphi_2 + \sin \varphi_k \sin \varphi_2) \quad (1.12)$$

Расчеты  $\Delta U$  выполняют три раза: при  $\cos \varphi_2 = 1$ ,  $\cos \varphi_2 = 0,8$  (нагрузка активно-индуктивная) и  $\cos \varphi_2 = 0,8$  (нагрузка активно-емкостная). В последнем случае получают отрицательные значения  $\Delta U$ . Результаты вычислений заносят в таблице 1.3 и строят на общей координатной сетке три внешние характеристики.

Проведя ординату при  $\beta = 1,0$  (номинальная нагрузка), отмечают на характеристиках напряжения, соответствующие номинальной нагрузке трансформатора (рисунок 1.3, а).

Зависимость КПД трансформатора от нагрузки. Для построения графика  $\eta = f(\beta)$  при  $\cos \varphi_2 = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$  определяют КПД трансформатора для ряда значений коэффициента нагрузки  $\beta = 0,25; 0,50; 0,75; 1,0$  и  $1,2$ , воспользовавшись для этого выражением

$$\eta = 1 - \frac{P_{0.\text{ном}} + \beta^2 P_{к.\text{ном}}}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{0.\text{ном}} + \beta^2 P_{к.\text{ном}}} \quad (1.13)$$

где  $S_{\text{ном}}$  - номинальная мощность трансформатора, В·А.

Результаты вычислений заносят в таблицу 1.4.

По этим данным строят графики  $\eta = f(\beta)$  при  $\cos \varphi_2 = 1$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$  (рисунок 1.3, б).

Максимальное значение КПД трансформатора соответствует такой нагрузке, при которой электрические потери трансформатора равны магнитным потерям.

Коэффициент нагрузки, соответствующий максимальному значению КПД,

$$\beta' = \sqrt{P_{0.\text{ном}} / P_{к.\text{ном}}} \quad (1.14)$$

На оси абсцисс отмечают значение  $\beta'$ , и проведя в этой точке ординату, определяют максимальные значения КПД. Максимальное значение КПД можно получить по (1.13), если подставить в это выражение  $\beta'$ :

$$\eta_{\text{макс}} = 1 - \frac{P_{0.\text{ном}}}{0,5 \beta' S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{0.\text{ном}}} \quad (1.15)$$

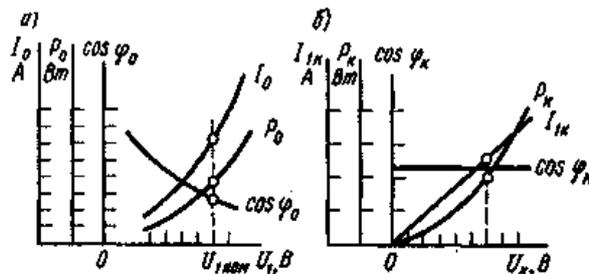


Рисунок 1.2 - Характеристики х. х (а) и к. з. (б) трансформатора

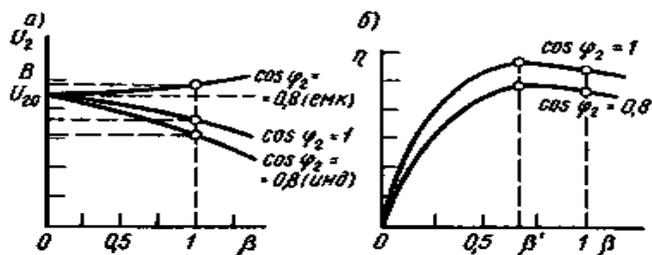


Рисунок 1.3 - Внешние характеристики (а) и графики зависимости КПД трансформатора от нагрузки (б)

Таблица 1.1 – Результаты измерений и вычислений

Номер измерения и вычисления	Измерения					Вычисления		
	$U_1$ , В	$I_0$ , А	$P_0$ , Вт	$U_{20}$ , В	$i_0$ , %	$\cos \varphi_2$	$k$	

Таблица 1.2 – Результаты измерений и вычислений

Номер измерения и вычисления	Измерения			Вычисления	
	$U_k$ , В	$I_{1k}$ , А	$P_k$ , Вт	$u_k$ , %	$\cos \varphi_k$

Таблица 1.3 – Результаты измерений и вычислений

$\cos \varphi_2 = 1$		$\cos \varphi_2 = 0,8$ (инд)		$\cos \varphi_2 = 0,8$ (емк)	
$\Delta U$ , %	$U_2$ , В	$\Delta U$ , %	$U_2$ , В	$\Delta U$ , %	$U_2$ , В

Таблица 1.4 – Результаты измерений и вычислений

$\beta$		0,25	0,50	0,75	1,0	1,2
$\eta$	при $\cos \varphi_2 = 1$					
	при $\cos \varphi_2 = 0,8$					

### Контрольные вопросы

- 1) Объясните устройство и принцип действия трансформатора.
- 2) Что такое коэффициент трансформации и как его определить опытным путем?
- 3) Почему с увеличением первичного напряжения при опыте х. х. уменьшается коэффициент мощности трансформатора?
- 4) Почему мощность х. х. принимают за магнитные потери, а мощность к. з. - за электрические потери?
- 5) Почему при опыте к. з. ток в первичной обмотке достигает номинального значения при напряжении в несколько раз меньшем номинального?
- 6) Почему с ростом напряжения  $U_k$  график  $I_{1k} = f(U_k)$  прямолинеен, а график  $P_k = f(U_k)$  - криволинеен?

### Литература

- 1) Кацман М. М. Электрические машины – М.: Высшая школа, 2000, с. 43...50.

## Лабораторная работа №4 Исследование параллельной работы трехфазных двухобмоточных силовых трансформаторов

**Цель:** Изучить условия включения трансформаторов на параллельную работу и принцип распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами; приобрести практические навыки по включению трехфазных трансформаторов на параллельную работу.

Студент должен *знать*:

- назначение параллельной работы трансформаторов, условия и порядок включения трансформаторов на параллельную работу, конструкцию трансформаторов;

*уметь*:

- распределять нагрузку между параллельно работающими трансформаторами.

### Теоретическое обоснование

**Проверка условий включения трансформаторов на параллельную работу.** Для лучшего использования трансформаторов при их параллельной работе необходимо, чтобы нагрузка между ними распределялась пропорционально их номинальным мощностям. Поэтому включение трансформаторов на параллельную работу допускается лишь при соблюдении следующих условий:

1) трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации, т. е. при одинаковых первичных напряжениях вторичные напряжения трансформаторов должны быть равны;

2) трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения;

3) трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения к. з.;

4) схема соединений при включении трансформаторов должна обеспечивать одинаковый порядок следования фаз как на стороне ВН, так и на стороне НН.

Помимо этого рекомендуется, чтобы отношение номинальных мощностей трансформаторов, включенных для параллельной работы, было не более чем 3:1.

Нарушение первого и второго условий вызывает появление больших уравнивающих токов между обмотками трансформаторов, что ведет к чрезмерному перегреву трансформаторов, т. е. делает их совместную работу невозможной. Что же касается третьего условия, то неравенство напряжений к. з. трансформаторов более чем на 10% от их среднего значения ведет к тому, что распределение нагрузки между трансформаторами становится в значительной степени непропорциональной их номинальным мощностям.

Равенство коэффициентов трансформации и напряжений к.з. обеспечивается подбором трансформаторов по их паспортным данным.

Коэффициенты трансформации  $k_I$  и  $k_{II}$  не должны различаться более чем на  $\pm 0,5\%$  от их среднего значения:

$$\Delta k = \frac{k_I - k_{II}}{k} \cdot 100 \leq \pm 0,5\% \quad (3.1)$$

где  $k = \sqrt{k_I k_{II}}$  - среднее геометрическое значение коэффициентов трансформации.

Напряжения к. з.  $u_{kI}$  и  $u_{kII}$  не должны различаться более чем на  $\pm 10\%$  от их среднего значения:

$$\Delta u_k = \frac{u_{kI} - u_{kII}}{u_k} \cdot 100 \leq \pm 10\% \quad (3.2)$$

где  $u_k = (u_{kI} + u_{kII})/2$  - среднее арифметическое значение напряжений к.з.

При анализе результатов лабораторной работы основное внимание уделяют вопросу распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами.

### Ход работы

1) Прежде чем подключить трансформаторы на параллельную работу, т. е. включить рубильник 3, при замкнутом рубильнике 1 (рисунок 3.1) необходимо провести фазировку трансформаторов, т. е. проверку соответствия фаз вторичных ЭДС трансформаторов  $Tr1$  и  $Tr2$ . Для этого соединяют проводом одну пару противоположных клемм рубильника и вольтметром  $V_0$  измеряют напряжение между двумя несоединенными парами противоположных клемм рубильника 3. Если вторичные напряжения трансформаторов равны, их группы соединения одинаковы и порядок следования фаз у них один и тот же, то показания вольтметра  $V_0$  равны нулю. В этом случае рубильник 3 можно замкнуть, т. е. включить трансформаторы на параллельную

работу. Если же вольтметр  $V_0$  показывает некоторое напряжение, то необходимо выяснить, какое из условий параллельной работы нарушено (обычно это нарушение одинакового порядка следования фаз), устранить его и вновь провести фазировку трансформаторов.

2) Снятие данных и построение внешних характеристик при  $u_{k11} = u_{k1}$ . После включения трансформаторов на параллельную работу подключают нагрузку  $R_n$  включают рубильник 4. Нагрузку постепенно увеличивают, пока нагрузочный ток каждого трансформатора не достигнет значения  $I_{11} = 1,2I_{2ном}$ . При этом приблизительно через одинаковые интервалы тока нагрузки снимают показания приборов и заносят их в таблицу 3.1. Следует снять не менее пяти замеров и одно из них должно соответствовать номинальной нагрузке трансформаторов.

По полученным данным строят внешние характеристики на общей координатной сетке.

3) Снятие данных и построение внешних характеристик при  $u_{k1} \neq u_{k11}$ .

После включения трансформаторов на параллельную работу следует разомкнуть рубильник 2, шунтирующий трехфазный дроссель  $Dr$ . При этом последовательно вторичным обмоткам трансформатора  $Tr2$  оказывается подключенным дроссель, что приводит к увеличению напряжения к. з.  $u_{k11}$  этого трансформатора. В результате нарушается равенство напряжений к.з. параллельно работающих трансформаторов. Затем нагружают трансформаторы (замыкают рубильник 4) и увеличивают нагрузку до тех пор, пока ток нагрузки более нагружаемого трансформатора не достигнет значения  $I_2 = 1,2I_{2ном}$ .

Приблизительно через одинаковые интервалы тока нагрузки этого трансформатора снимают не менее пяти показаний приборов и заносят их в таблицу 3.1. При этом одно из показаний должно соответствовать номинальному значению тока нагрузки наиболее нагружаемого трансформатора. По полученным данным строят внешние характеристики трансформаторов.

Сравнивая данные таблицы 2.1 при  $u_{k1} = u_{k11}$ , и  $u_{k1} < u_{k11}$ , а также внешние характеристики трансформаторов для этих случаев параллельной работы, следует сделать вывод о влиянии неравенства напряжений к. з. на распределение нагрузки между трансформаторами. Известно, что длительная перегрузка трансформаторов недопустима. Поэтому по результатам лабораторной работы необходимо определить, насколько один из трансформаторов окажется недогруженным при номинальной нагрузке другого трансформатора (при неравенстве напряжений к.з.).

Если менее нагружаемым является трансформатор  $Tr2$ , то при номинальной нагрузке трансформатора  $Tr1$  его недогрузка (%)

$$\Delta I_{11} = \frac{I_{21ном} - I_{211}}{I_{211}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

где  $I_{211ном}$  - номинальный ток нагрузки  $Tr2$ , А;

$I_{211}$  - ток нагрузки  $Tr2$  при номинальной нагрузке  $Tr1$ , А.

Таблица 2.1 – Результаты измерений

$I_{21}, A$	$u_{k1} = u_{k11}$					$u_{k1} < u_{k11}$				
$I_{211}, A$										
$I_2, A$										
$U_2, B$										

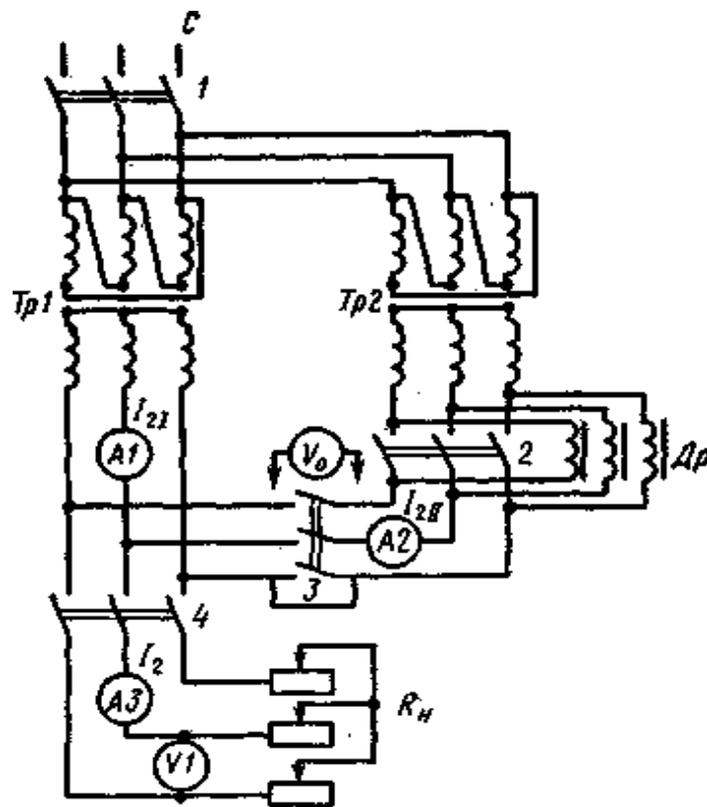


Рисунок 3.1 – Схема включения трехфазных двухобмоточных трансформаторов на параллельную работу

### Контрольные вопросы

- 1) С какой целью применяют параллельную работу трансформаторов?
- 2) Каковы условия включения трансформаторов на параллельную работу?
- 3) Почему не допускается включение на параллельную работу трансформаторов с разными группами соединения, даже при одинаковых вторичных напряжениях?
- 4) Каковы допуски на различие коэффициентов трансформации и напряжений к.з. для трансформаторов, включаемых на параллельную работу?
- 5) Что такое фазировка трансформаторов, для чего и как она выполняется?
- 6) От чего зависит распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами?

### Литература

- 1) Кацман М. М. Электрические машины – М.: Высшая школа, 2000, с. 66...70.

### Лабораторная работа №5 Опытное определение групп соединения трехфазного двухобмоточного силового трансформатора

**Цель:** Экспериментально подтвердить теоретические сведения о группах соединения трансформаторов и приобрести практические навыки по опытному определению групп соединения трехфазных трансформаторов.

Студент должен *знать*

- группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов;
- влияние схемы соединения на отношение линейных напряжений;
- группы соединения трансформаторов - основные и производные;
- группы соединения, предусмотренные ГОСТ;

уметь:

- определять группу соединения трансформатора методами фазометра и вольтметра, строить топографические диаграммы линейных напряжений для разных групп соединения и определять напряжение между точками диаграммы.

## Теоретическое обоснование

При анализе результатов лабораторной работы необходимо иметь в виду следующее:

- 1) Группы соединения трансформаторов определяются не только схемой соединения обмоток ВН и НН, но и маркировкой их выводов (направлением намотки).
- 2) Исследованные в лабораторной работе четыре группы соединения являются основными и каждая из них, может быть преобразована в две производные группы соединения путем круговой перемаркировки выводов обмоток либо на стороне ВН, либо на стороне НН; следует указать, какие производные группы соединения могут быть получены из каждой основной.
- 3) Необходимо отметить, какие из групп соединения, рассмотренных в данной работе, предусмотрены ГОСТ.

В данной работе воспользуемся обоими методами - сначала методом фазометра, а затем методом вольтметра.

Определение группы соединения. При опытным определении группы соединения трансформаторов наибольшее применение получили два метода: метод фазометра, основанный на непосредственном измерении угла фазового сдвига между соответствующими линейными напряжениями обмоток ВН и НН; метод вольтметра, основанный на измерении напряжений между выводами обмоток ВН и НН и сравнением этих напряжений с напряжениями, полученными в результате расчетов.

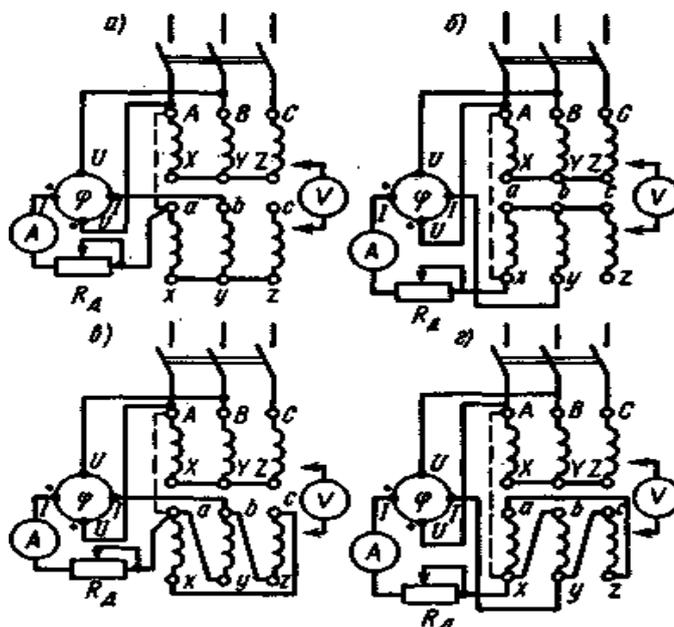


Рисунок 2.1 - Схемы соединения обмоток трехфазного двухобмоточного трансформатора для опытного определения групп соединения

## Ход работы

Собрав схему, показанную на рисунок 2.1 а, включают трансформатор в сеть и измеряют угол  $\alpha$  фазового сдвига между линейными напряжениями  $U_{AB}$  и  $u_{ab}$  (метод фазометра). Затем соединяют проводом клеммы  $A$  и  $a$  (пунктирная линия на рисунке) и вольтметром измеряют напряжения  $U_{bB}$  и  $U_{cC}$  (метод вольтметра), которые должны быть одинаковыми и равными значению

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{ab}(k_l - 1) \quad (2.1)$$

где

$$k_l = U_{AB}/U_{ab} \quad (2.2)$$

Результаты измерений и вычислений заносят в таблицу 2.1.

Построение топографической диаграммы. Выбрав масштаб напряжения  $m_u$  (В/мм), строят топографическую диаграмму линейных напряжений, соответствующих схеме рисунок 2.1, а, с учетом измеренного угла  $\alpha$  фазового сдвига между векторами линейных напряжений  $U_{AB}$

$U_{ab}$ (рисунок 2.2, а). Измерив расстояния между точками диаграммы  $B - b$  и  $C - c$ , определяют напряжения

$$U_{bB} = \overline{Bb} \cdot m_u; \quad U_{cC} = \overline{Cc} \cdot m_u \quad (2.3)$$

где  $m_u$  - масштаб напряжения, принятый при построении топографической диаграммы, В/мм.

Полученные по (2.3) напряжения должны быть одинаковыми и равными измеренным и вычисленным по (2.1) значениям напряжений, что будет свидетельствовать о правильно выполненных измерениях, вычислениях и построениях.

При опытном определении групп соединения, соответствующих схемам рисунок 2.1, б, в и г, следует придерживаться изложенного порядка для схемы по рисунку 2.1, а, но при вычислении напряжений  $U_{bB}$  и  $U_{cC}$  необходимо пользоваться формулами: рисунка 2.1, б

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{xy}(k_n + 1) \quad (2.4)$$

рисунок 2.1, в

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{ab} \sqrt{1 - \sqrt{3}k_n + k_n^2} \quad (2.5)$$

рисунок 2.1, г

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{xy} \sqrt{1 + \sqrt{3}k_n + k_n^2} \quad (2.6)$$

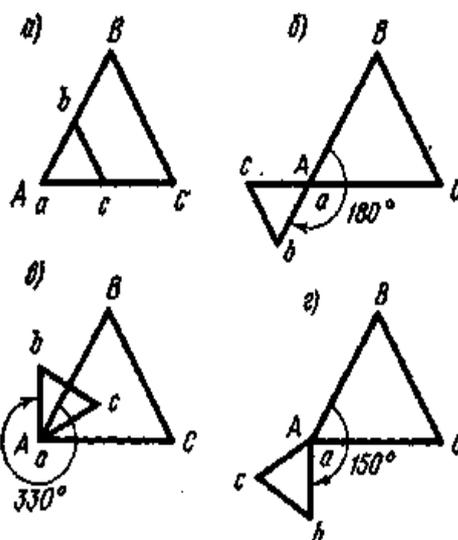


Рисунок 2.2 - Топографические диаграммы линейных напряжений нулевой (а), шестой (б), одиннадцатой (в) и пятой (г) групп соединения

Таблица 2.1 – Результаты измерений

Схемы соединения обмоток	Измерения					Вычисления		Топографическая диаграмма	Группа соединения
	$U_{AB}, B$	$U_{ab}, B$	$\alpha, \text{град}$	$U_{bB}, B$	$U_{cC}, B$	$k_n$	$U_{bB} = U_{cC}, B$		
Рис. 2.1, а Рис. 2.1, б Рис. 2.1, в Рис. 2.1, г								Рис. 2.2, а Рис. 2.2, б Рис. 2.2, в Рис. 2.2, г	

- 1) Чем определяется группа соединения трансформатора?
- 2) Какие группы соединения могут быть получены при одинаковой схеме соединения обмоток ВН и НН?
- 3) Какие группы соединения называют основными, а какие - производными?
- 4) Каким образом из основных групп соединения можно получить производные?
- 5) Перечислите группы соединения, предусмотренные ГОСТ, нарисуйте соответствующие им схемы соединения обмоток и топографические диаграммы.
- 6) В чем состоит метод фазометра при определении группы соединения трансформатора?
- 7) С какой целью при определении группы соединения по методу вольтметра соединяют выводы  $A - a$  (см. рисунок 2.1,  $a$ )?

#### **Литература**

- 1) Кацман М. М. Электрические машины – М.: Высшая школа, 2000, с.61...65.

#### **Лабораторная работа №6 Исследование работы автотрансформаторов**

**Цель:** Экспериментально подтвердить особые свойства автотрансформатора сравнением его параметров с параметрами трансформатора, полученными при исследовании совмещенной модели.

Студент должен *знать*:

- устройство автотрансформаторов, особенности рабочего процесса, достоинства и недостатки по сравнению с обычными двухобмоточными трансформаторами;
- область применения автотрансформаторов;

уметь:

- собирать схемы понижающего трансформатора, понижающего автотрансформатора, повышающего автотрансформатора и выполнять к ним опыты х. х. и номинальной нагрузки.

#### **Теоретическое обоснование**

Совмещенная модель трансформатора и автотрансформатора представляет собой однофазный трехобмоточный трансформатор, состоящий из магнитопровода (стержневого или броневого) и трех одинаковых электрически не связанных между собой обмоток. Различные комбинации соединения этих обмоток дают возможность исследовать все предлагаемые в данной работе варианты. Опытное исследование всех этих вариантов на одной модели позволяет сравнить результаты экспериментов и дать сравнительную оценку свойствам трансформатора и автотрансформатора (повышающего и понижающего). Обычно мощность исследуемой совмещенной модели невелика (300...500 ВА) и поэтому проста в изготовлении. Небольшая мощность модели способствует упрощению электрических схем исследования (включение ваттметров без трансформаторов тока и напряжения).

Задавшись размерами магнитопровода, определим число витков одной обмотки совмещенной модели

$$w = 0,95U / (4,44fB_c S_c k_c) \quad (4.1)$$

где  $U$  - напряжение на выводах обмотки, В;

$f$  - частота тока, Гц;

$B_c$  - магнитная индукция в стержне магнитопровода, Тл;

$S_c$  - площадь поперечного сечения стержня, м<sup>2</sup>;

$k_c$  - коэффициент заполнения магнитопровода сталью (при толщине листов 0,35 мм и  $c = 0,90$ ).

В стержне магнитопровода броневого типа из тонколистовой горячекатаной электротехнической стали марок 1211 или 1511 при частоте тока  $f = 50$  Гц магнитная индукция  $B_c = 1,20...1,35$  Тл, а в магнитопровode из холоднокатаной стали марок 3411, 3412 или 3413 индукция  $B_c = 1,50...1,65$  Тл. При анализе результатов лабораторной работы сравнивают параметры совмещенной модели в различных режимах ее работы. При этом дают объяснение различию одного и того же параметра при работе модели в различных режимах. Рассмотрим сравнение некоторых параметров.

1) Номинальное изменение напряжения при нагрузке  $\Delta U_{\text{ном}}$  у автотрансформатора меньше, чем у трансформатора. Это объясняется тем, что падение напряжения во вторичной цепи автотрансформатора меньше, чем у трансформатора, так как в автотрансформаторе оно вызывается током

$$I_{12} = I_2 - I_1$$

а в трансформаторе током  $I_2$  (сравните величины этих токов по результатам измерений).

2) Сравнивая электрические потери на нагрев обмоток  $P_3$ , следует иметь в виду, что эти потери в автотрансформаторе меньше, чем у трансформатора, так как у автотрансформатора всего лишь одна обмотка, да к тому же на общем участке ее витков, принадлежащих первичной и вторичной цепям, ток  $I_{12}$  намного меньше вторичного тока трансформатора. Этим же, в частности, объясняется и более высокий КПД автотрансформаторов.

3) Ток х. х. повышающего автотрансформатора несколько больше, чем у понижающего. Объясняется это тем, что в понижающем авто трансформаторе первичная МДС создается двумя последовательно соединенными обмотками, а в повышающем - лишь одной.

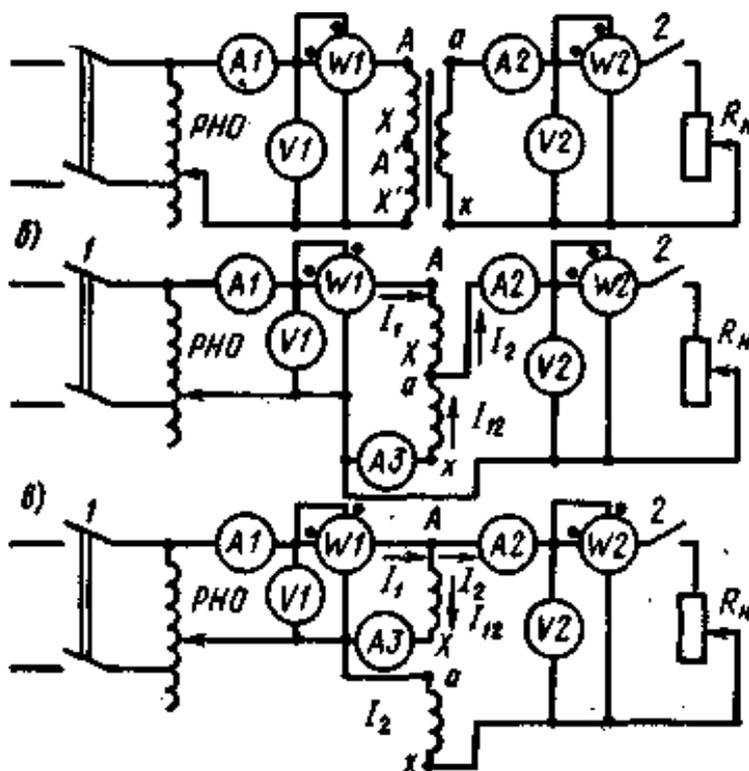


Рисунок 4.1 - Схемы соединений для исследования автотрансформатора:

а - понижающий трансформатор; б - понижающий автотрансформатор; в - повышающий автотрансформатор

### Ход работы

Исследование понижающего трансформатора. После сборки схемы по рисунку 4.1, а провести опыт х. х. трансформатора.

Для этого при разомкнутом рубильнике 2 включить рубильник 1 и регулятором РНО установить номинальное первичное напряжение. Снять показания приборов и занести их в таблицу 4.1.

Затем провести опыт номинальной нагрузки трансформатора. Для этого замкнуть рубильник 2 и при номинальном первичном напряжении нагрузочным реостатом  $R_n$  установить номинальный ток нагрузки во вторичной обмотке трансформатора  $I_{2\text{ном}}$ . При этом снять показания приборов и занести их в таблицу 3.1.

Исследование понижающего автотрансформатора. Понижающий автотрансформатор по схеме, показанной на рисунке 4.1, б, имеет такой же коэффициент трансформации, что и понижающий трансформатор (рисунок 4.1, а). После сборки схемы понижающего автотрансформатора и проверки ее преподавателем провести опыт х. х. (при разомкнутом

рубильнике 2) и опыт номинальной нагрузки (при замкнутом рубильнике 2). Порядок проведения опытов такой же, как и для понижающего трансформатора.

Исследование повышающего автотрансформатора. Собрав схему по рисунку 4.2, в, после проверки ее преподавателем проводят сначала опыт х. х., а затем опыт номинальной нагрузки, где за номинальный ток нагрузки  $I_{2ном}$  принимают такое его значение, при котором ток в первичной обмотке равен допусжаемому значению  $I_{1доп}$ .

После заполнения таблицу 4.1 результатами измерений выполняют расчеты: номинальное изменение вторичного напряжения при нагрузке (%)

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

сумма потерь в трансформаторе (Вт)

$$\sum P = P_1 - P_2 \quad (4.3)$$

электрические потери (Вт)

$$P_3 = \sum P - P_0 \quad (4.4)$$

КПД (%)

$$\eta = (P_2/P_1)100 \quad (4.5)$$

Таблица 4.1 – Снятые характеристики

Режим работы совмещенной	Измерение									Вычисления				
	$U_1, В$	$U_{20}, В$	$I_0, А$	$P_0, Вт$	$I_1, А$	$P_1, Вт$	$I_{2ном}, А$	$U_2, В$	$P_2, Вт$	$I_{12}, А$	$\Delta U_{ном}, В$	$\sum P, Вт$	$P_3, Вт$	$\eta, \%$
Трансформатор понижающий														
Автотрансформатор понижающий														
Автотрансформатор повышающий														

### Контрольные вопросы

- 1) В чем состоит конструктивное различие между трансформатором и автотрансформатором?
- 2) Объясните принцип передачи мощности из первичной цепи во вторичную у трансформатора и у автотрансформатора.
- 3) Каковы достоинства автотрансформатора перед трансформатором?
- 4) При каких значениях коэффициента трансформации применение автотрансформатора наиболее выгодно?
- 5) Каковы недостатки автотрансформатора, ограничивающие его применение?
- 6) Почему токи х. х. у понижающего и повышающего автотрансформаторов неодинаковы?

### Литература

- 1) Кацман М. М. Электрические машины – М.: Высшая школа, 2000, с. 72...75.

## Лабораторная работа №7 Исследование работы трансформаторов с регулированием напряжения

**Цель:** Изучение способов регулирования напряжения на трансформаторах.

**Способы регулирования напряжения.**

Одним из способов регулирования напряжения на шинах подстанции является переключение ответвлений на трансформаторах. С этой целью обмотки (как правило, высшего напряжения, имеющих меньший рабочий ток) трансформаторов предусматриваются регулировочные ответвления специальные переключатели ответвлений, при помощи которых изменяют число включенных в работу витков, увеличивая или уменьшая коэффициент трансформации

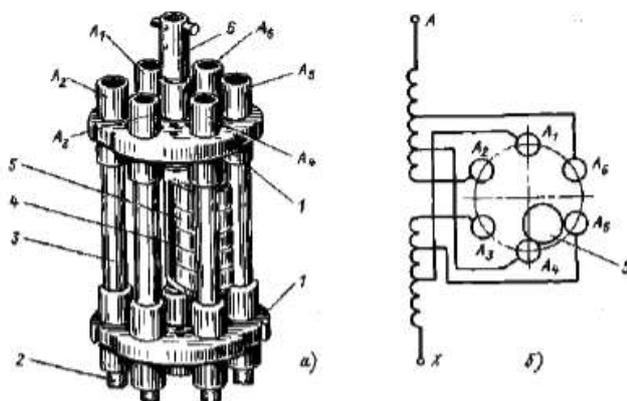
$$K_{ВН-НН} = U_{ВН} / U_{НН} = w_{ВН} / w_{НН}$$

где  $w_{ВН}$  и  $w_{НН}$  — число включенных в работу витков обмоток ВН и НН соответственно.

Изменение коэффициента трансформации между обмотками высшего и низшего напряжений позволяет поддерживать на шинах НН напряжение, близкое к номинальному, когда первичное или вторичное напряжение отклоняется по тем или иным причинам от номинального.

Операции переключения секции витков производят на отключенном от сети трансформаторе устройством ПБВ (переключение без возбуждения) либо на работающем трансформаторе непосредственно под нагрузкой устройством РПН (регулирование под нагрузкой).

Трансформаторы большой мощности с устройствами ПБВ имеют до пяти ответвлений для получения четырехступеней напряжения относительно номинального ( $\pm 2 \times 2,5\%$ )  $U_{ном}$  в зависимости от класса напряжения трансформатора, его исполнения и числа ступеней регулирования применяют различные по конструкции переключатели ответвлений. Они могут быть трехфазными и однофазными.

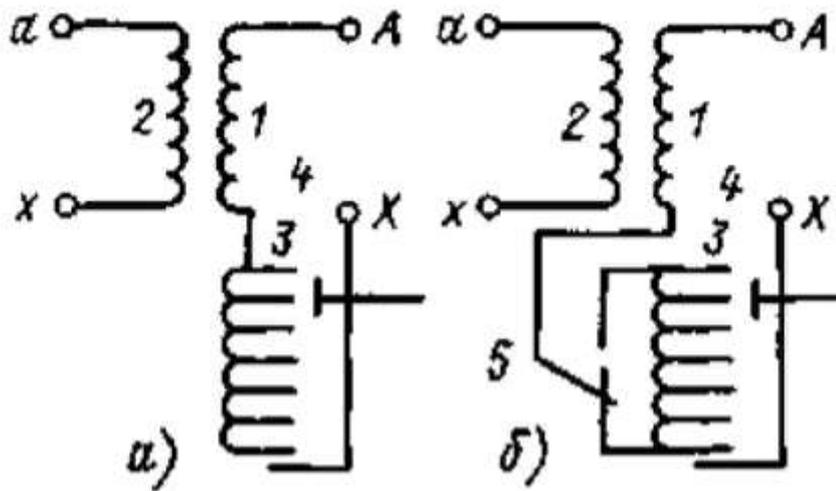


Переключатель ответвлений барабанного типа (а) и схема переключения ответвлений" (б).  
Рис. 4.1 Переключатель барабанного типа.

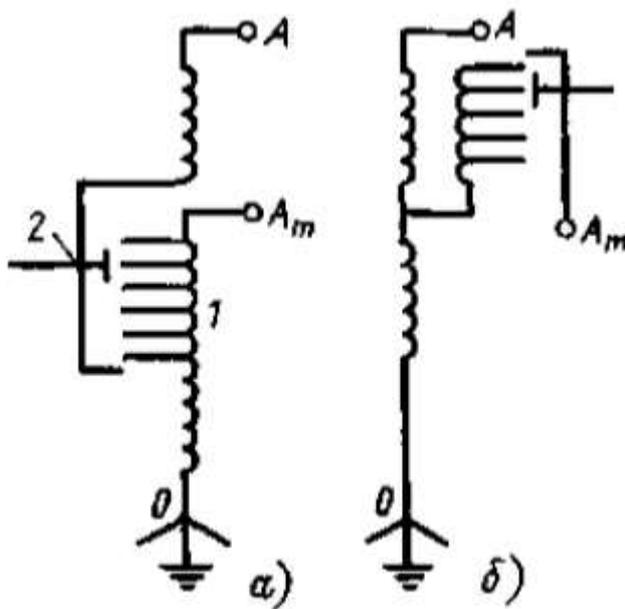
Однофазные переключатели барабанного типа (рис. 4.1) устанавливаются на каждой фазе обмотки ВН. Контактная система состоит из неподвижных контактов — полых токоведущих стержней 3 ( $A_1 \sim A_6$  на рис. 4.1, б), соединенных с ответвлениями 2 от обмоток, и подвижных контактных колец 5, замыкающих между собой различные пары неподвижных контактов. Контактные кольца перемещаются коленчатым валом 4, ось которого при помощи изолирующей штанги 6 соединяется с приводом на крышке трансформатора. Переключатель смонтирован на изолирующих основаниях 1.

Трансформаторы с РПН имеют большее число регулирующих ступеней и более широкий диапазон регулирования ( $\pm 10\% U_{НОМ}$ ), чем трансформаторы с ПБВ. Применяемые схемы регулирования на трансформаторах представлены на рис. 4.2. Регулируемые витки размещены со стороны нейтрали, что позволяет применять устройства РПН с облегченной изоляцией. В схеме

на рис. 4.2, б двухпозиционный переключатель - реверсор 5 позволяет присоединять регулировочную обмотку 3 к основной 1 согласно или встречно, благодаря чему диапазон регулирования удваивается по сравнению со схемой на рис. 4.2, а. На рис. 4.3 даны схемы регулирования на автотрансформаторах на стороне ВН и СН. Класс изоляции устройств РПН соответствует классу изоляции СН трансформатора.



Схемы регулирования на трансформаторах без реверсирования (а) и с реверсированием (б) регулировочной обмотки: 1,2- первичная и вторичная обмотки соответственно; 3 - регулировочная обмотка с ответвлениями; 4 –переключающее устройство; 5 - реверсор  
Рис. 4.2. Регулировочные схемы на трансформаторах.



а — на стороне ВН; б — на стороне СН; 1 — регулировочная обмотка с ответвлениями; 2 - переключающее устройство

Рис. 4.3 Схема регулирования на автотрансформаторах

Помимо указанных способов для регулирования напряжения применяются специальные последовательные регулировочные трансформаторы. Они прибавляют к напряжению не регулируемого трансформатора или автотрансформатора (или вычитают из него) некоторое добавочное напряжение.

Схемы регулирования приведены на рис. 4.5 и 4.6.

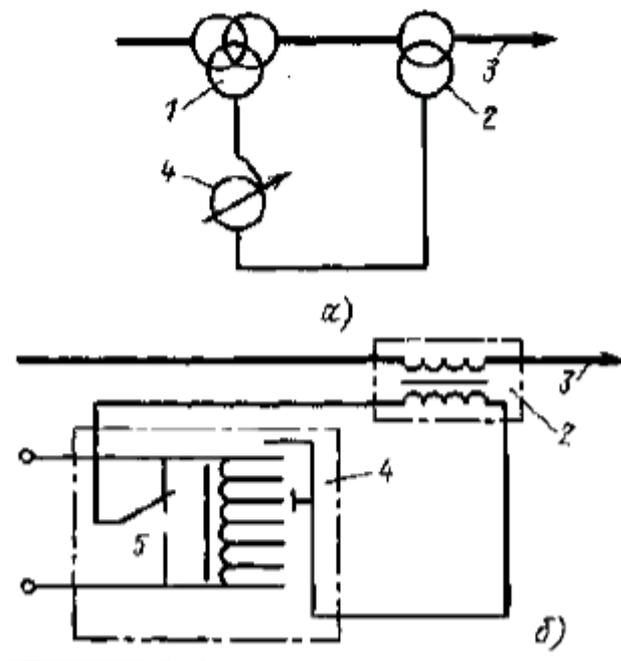


Схема регулирования напряжения при помощи последовательного регулировочного трансформатора (а) и схема регулировочного автотрансформатора (б): 1 - главный трансформатор без РПН; 2-последовательный регулировочный трансформатор; 3 — линия, в которой регулируется напряжение; 4 - регулировочный автотрансформатор; 5 -реверсор  
Рис. 4.5.Схемы регулирования напряжения.

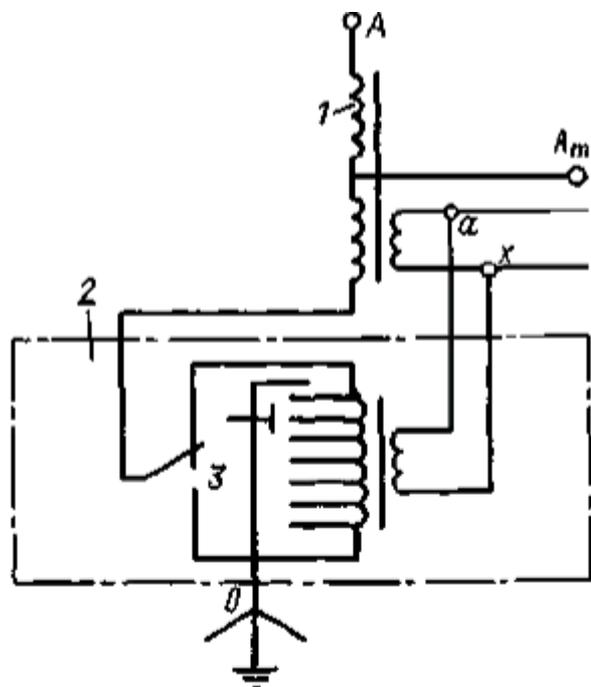


Схема регулирования напряжения на автотрансформаторе при помощи последовательного регулировочного трансформатора в нейтрали: 1 —главный автотрансформатор; 2 — регулировочный трансформатор; 3 —реверсор  
Рис. 4.6

### Контрольные вопросы

- 1 Способы регулирования напряжения.
- 2 Начертить схему регулирования напряжения на трансформаторах без реверсирования и с реверсированием регулировочной обмотки.
- 3 Начертить схему регулирования на автотрансформаторах.
- 4 Начертить схему регулирования на автотрансформаторе при помощи последовательного регулировочного трансформатора в нейтрали

### Литература

2) Кацман М. М. Электрические машины – М.: Высшая школа, 2000, с. 72...75.

### Лабораторная работа №8 Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором

**Цель работы:** Ознакомиться с устройством и принципом действия. Снять рабочие характеристики. Исследовать механические свойства двигателя.

#### Общие сведения

Асинхронный двигатель с фазным ротором предназначен для преобразования электрической энергии 3-х фазного переменного тока в механическую энергию.

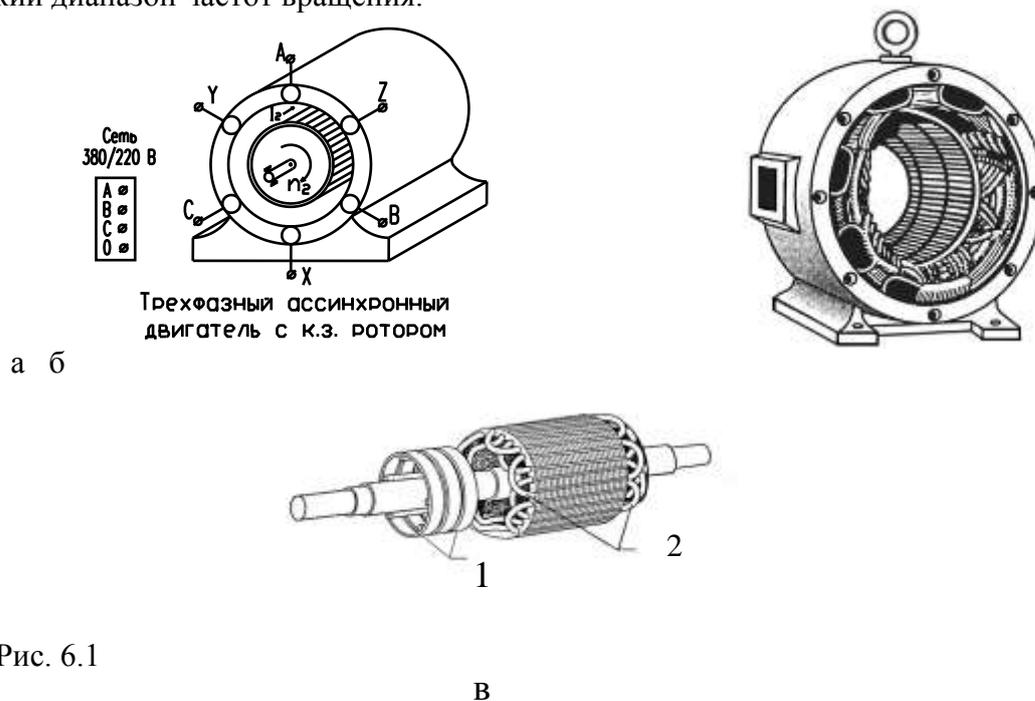
Асинхронный двигатель (рис.6.1а) состоит из двух основных частей: неподвижной - статора и вращающейся - ротора.

Статор (рис.6.1 б) представляет собой полый цилиндр, составленный из изолированных листов электротехнической стали в форме колец, со штампованными пазами с внутренней стороны, в которые укладывается 3-х фазная статорная обмотка, оси которых смещены относительно друг друга на  $120^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $40^\circ$  в зависимости от количества катушек.

Ротор представляет собой также трёхфазную обмотку, составленный из листовой электротехнической стали в форме колец, с пазами на их внешней поверхности, в которые укладывается роторная обмотка. В зависимости от ее устройства различают:

1) фазный ротор (ротор с контактными кольцами) (рис.6.1 в) - обмотка фазного ротора 1 выполняется 3-х фазной, концы которой выводятся на контактные кольца 2 и подключаются к 3-х фазному реостату.

В большинстве случаев используется двигатель с короткозамкнутым ротором, как более простой и компактный. Двигатель с фазным ротором используется в тяжелых пусковых условиях, в частности в подъемных устройствах, а также в исполнительных механизмах, использующих широкий диапазон частот вращения.



### Принцип действия

Обмотки статора соединяются «звездой» или «треугольником» и включаются в сеть 3-х фазного тока. В результате в них потекут 3-х фазные токи, которые создадут вращающееся магнитное поле.

Магнитные линии вращающегося магнитного поля статора пересекают проводники ротора и индуцируют в них ЭДС, а так как обмотка ротора замкнута, то в ее проводниках возникают токи. Взаимодействие вращающегося магнитного потока с токами ротора создает электромагнитный вращающий момент  $M_{вр}$ , вращающий ротор двигателя:

$$M_{вр} = c \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos\psi_2 \quad (6.1)$$

где:  $c$  - постоянный коэффициент двигателя;

$\Phi$  - магнитный поток;

$I_2$  - ток ротора;

$\psi_2$  - коэффициент мощности роторной цепи.

Под действием этого момента ротор начинает вращаться в том же направлении, что и поле  $\Phi$ . Скорость вращения ротора  $n_2$  всегда меньше скорости вращения поля  $n_1$ , так как только в этом случае возможно индуцирование тока в проводниках обмотки ротора и возникновение вращающегося момента.

Скорость вращающегося магнитного поля  $n_1$  определяется как

$$n_1 = \frac{f \cdot 60}{p}$$

где  $p$  - число пар полюсов вращающегося магнитного поля,

$f$  - частота тока статора.

Отношение  $(n_1 - n_2)$  называется скоростью скольжения, а отношение этой скорости к скорости вращения магнитного поля называется скольжением:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{или} \quad S\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 \quad (6.3)$$

где  $n_2$  - скорость вращения ротора.

Скольжение характеризует степень отставания скорости вращения ротора от скорости вращения поля. При номинальной нагрузке скольжение у двигателей в среднем составляет 1,5-5%.

Из формулы (3) определяется скорость вращения ротора

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s) \quad (6.4)$$

Подключение асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором к сети.

Обычно выводы всех фаз обмотки статора двигателя расположены в коробке зажимов.

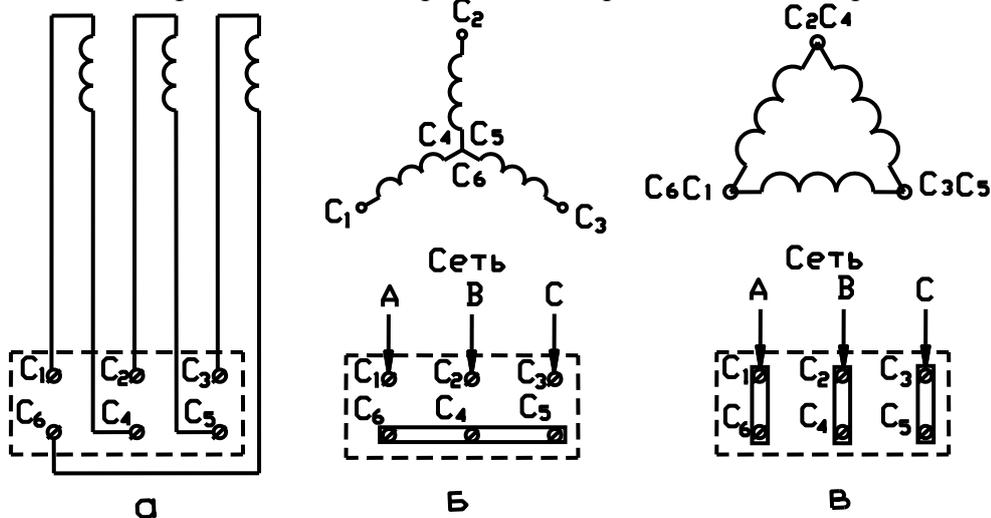


Рис. 6.1

Схема присоединения обмоток к зажимам колодки показана на рис 5а, включение обмоток по схеме «звезда» и соединение выводов зажимов - рис.5б, включение обмоток по схеме «треугольник» и соединение выводов зажимов рис. 5в.

Пуск двигателя в ход. При прямом включении обмоток статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в сеть наблюдается большой скачок тока, в 6-8 раз превышающий его номинальный ток. Это вызывает заметную перегрузку в электрической сети, от которой осуществляется питание двигателя и других близлежащих потребителей.

Для ограничения пускового тока при пуске двигателя с короткозамкнутым ротором применяют 3 способа:

1 способ - переключение обмотки статора со схемы звезда на схему треугольник. Этот способ применим для двигателей, у которых обмотка статора при нормальной работе соединена треугольником. В момент пуска обмотка статора посредством переключающего устройства соединяется по схеме звезда, а после запуска - по схеме треугольник. При этом линейный пусковой ток двигателя уменьшается в 3 раза.

2 способ - пуск посредством автотрансформатора, позволяющий понижать подводимое к двигателю напряжение во время пуска, вследствие чего уменьшается пусковой ток.

3 способ – применение специальных электронных устройств – устройств плавного пуска и частотных преобразователей.

Недостаток первых двух методов - уменьшение пускового напряжения и, как следствие, пускового момента.

Реверсирование двигателя. Для изменения направления вращения двигателя необходимо изменить направление вращения магнитного поля статора. Это достигается переключением двух фаз (двух любых подводющих электрическую энергию проводов на зажимах двигателя).

Рабочие характеристики асинхронного двигателя.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимость

скорости вращения  $n_2$ , коэффициента полезного действия  $\eta$ , коэффициента мощности  $\cos\varphi$ , скольжения  $s$ , вращающего момента  $M$  и тока в цепи статора  $I_1$  от нагрузки (полезной мощности) на валу двигателя  $P_2$  при постоянном номинальном напряжении и неизменной частоте сети (рис.6.2).

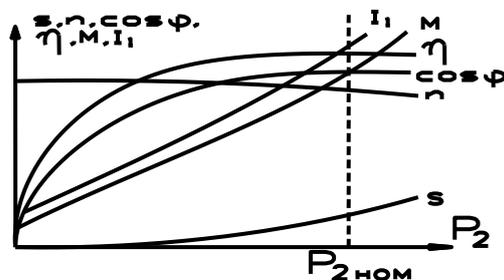


Рис.6.2

У асинхронного двигателя, как и у большинства машин, к.п.д. с ростом нагрузки возрастает  $\eta = f(P_2)$ , ввиду уменьшения доли электрических и магнитных потерь по отношению к развиваемой мощности двигателя. Однако, при достижении нагрузки 75% от номинальной, заметно возрастают и электрические потери (в обмотках статора и ротора), пропорциональные квадрату тока потребляемого двигателем, что ведет в дальнейшем с увеличением нагрузки к некоторому уменьшению к.п.д.

Коэффициент мощности  $\cos\varphi$  зависит от соотношения между активной мощностью  $P_1$ , потребляемой двигателем, и полной мощностью  $S$ , складывающейся из активной  $P_1$  и реактивной  $Q$  составляющих:

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л}}$$

При увеличении нагрузки растет величина активной мощности  $P_1$ , что приводит к росту  $\cos\phi$ , достигающего максимального значения (0,7-0,9) при номинальной нагрузке на двигатель. В дальнейшем возможно уменьшение  $\cos\phi$ , в связи с увеличением реактивной мощности, связанной с усилением потоков рассеяния.

Механическая характеристика и саморегулирование двигателя.

График, связывающий между собой механические величины - скорость и вращающий момент, называется механической характеристикой асинхронного двигателя (рис.7)  $n = f(M)$ . Саморегулирование асинхронного двигателя заключается в следующем. Пусть двигатель работает устойчиво в каком-то режиме, развивая скорость  $n_1$  и вращающий момент  $M_1$ . При равномерном вращении этот момент равен тормозному моменту  $M_{т1}$ , т.е.  $M_1 = M_{т1}$ ,  $n_1 = \text{const}$

Увеличение тормозного момента до  $M_2$ , вызовет уменьшение оборотов машины, так как тормозной момент станет больше вращающего момента.

С уменьшением оборотов увеличивается скольжение, что в свою очередь вызывает возрастание ЭДС и тока в роторе. Благодаря этому увеличивается вращающий момент двигателя. Этот процесс заканчивается тогда, вращающий момент  $M_2$ , развиваемый двигателем, станет равным  $M_{т2}$ .

На лабораторном стенде двигатель нагружается электротормозом, состоящим из электромагнита, в зазоре которого вращается диск, посаженный на вал двигателя. Изменяя ручкой автотрансформатора напряжение, питающее катушку электромагнита, можно менять тормозное усилие, момент которого равен:

$$M_{\text{ТОРМ}} = F \cdot r \quad (\text{Н} \cdot \text{м})$$

где  $F$  - усилие (сила), действующая на окружность шкива, (Н);

$r$  - радиус шкива, равен 0,18 м.

Полезная мощность на валу двигателя:

$$P_2 = M \cdot \omega_2 = \frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot M \quad (\text{Вт}),$$

где  $n$  - скорость вращения двигателя, об/мин.

Скорость вращения двигателя определяется с помощью тахометра.

Скольжение рассчитывают по формуле:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100 \quad n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}$$

где  $f$  - частота сети (равна 50 Гц)

$n_1$  - синхронная скорость вращающего магнитного поля:

$p$  - число пар полюсов обмотки статора (равно 2)

1. Изучить схему (рис.8).

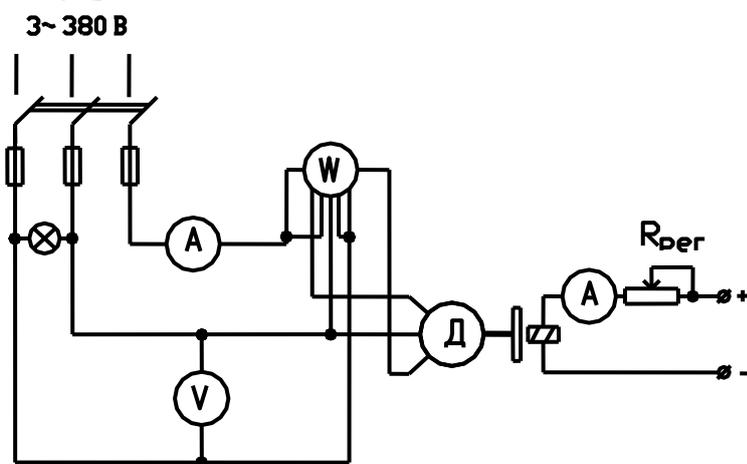


Рис.6.4

2. Пустить двигатель в ход без нагрузки под руководством преподавателя.

3. Снять показания приборов при холостом ходе двигателя.
4. Изменяя нагрузку двигателя  $F_H$  от нуля до номинальной путем увеличения момента торможения, снять показания приборов (5 замеров), полученные данные занести в таблицу.

Таблица

Данные измерений					Результаты вычислений				
U <sub>л</sub>	I <sub>л</sub>	P <sub>1</sub>	F	n	M	P <sub>2</sub>	s	η	cosφ
В	А	Вт	Н	об/мин	Н	Вт	%	%	

В таблице: I<sub>л</sub>, U<sub>л</sub> - линейный ток и линейное напряжение статора,

P<sub>1</sub> - потребляемая активная мощность двигателя,

M - тормозной момент двигателя в Н·м,

P<sub>2</sub> - полезная мощность двигателя,

η - к.п.д. двигателя.

$$M = F \cdot r, \quad P_2 = \frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot M, \quad s\% = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad \cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л}}$$

По данным опыта построить рабочие характеристики:

$$n = f(P_2), \quad \eta = f(P_2), \quad \cos\varphi = f(P_2)$$

и механическую характеристику  $n = f(M)$ .

#### Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия двигателя.
2. Что такое механическая характеристика двигателя?
3. Саморегулирование двигателя.
4. Как создается в двигателе электромагнитная сила?
5. Как изменить направление вращения ротора двигателя?
6. Объяснить электрическую схему установки в условиях снятия характеристик.
7. Как соединяются обмотки статора по схеме «звезда» и «треугольник»?

#### Литература

- 1) Кацман М. М. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2000, с. 100...101; 137...145; 162...175.

#### Лабораторная работа №9 Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

**Цель:** Изучить конструкцию трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Студент должен *знать*:

- принцип действия и устройство трехфазного асинхронного двигателя;
- понятие о скольжении;
- электромагнитный момент асинхронного двигателя;
- зависимость момента от скольжения; перегрузочная способность асинхронного двигателя;
- рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя.

уметь:

- экспериментально проверять обозначение выводов обмотки статора;
- собирать схему, производить пробный пуск двигателя и реверсирование двигателя.

#### Теоретическое обоснование

При анализе результатов лабораторной работы в первую очередь следует сделать заключение о соответствии данных номинального режима, полученных экспериментально, паспортным данным электродвигателя. Затем, анализируя рабочие характеристики, нужно объяснить двигательный вид полученных графиков.

Например, график тока  $I_1 = f(P_2)$  не выходит из начала координат, так как в режиме х. х. ( $P_2 = 0$ ) двигатель потребляет из сети ток х. х.  $I_{10}$ , обусловленный потерями х. х.

Характеристика частоты вращения  $n_2 = f(P_2)$  имеет падающий вид, т. е. с ростом нагрузки частота вращения ротора уменьшается. Это объясняется ростом скольжения  $s$ . При этом чем больше активное сопротивление обмотки ротора  $r'_2$ , тем больше наклон этой характеристики к оси абсцисс, так как увеличение  $r'_2$  вызывает рост электрических потерь в цепи ротора  $P_{\Sigma 2} = m_1 I_2^2 r'_2$ , а следовательно, рост скольжения, величина которого пропорционально электрическим потерям в роторе  $s = P_{\Sigma 2} / P_{\Sigma}$ .

Небольшое значение коэффициента мощности  $\cos\varphi_2$  в зоне малых нагрузок двигателя объясняется тем, что в режиме х. х. и при небольшой нагрузке двигателя ток статора меньше номинального и в значительной части является намагничивающим током, имеющим фазовый сдвиг относительно напряжения сети близкий к  $90^\circ$ .

Значительная величина намагничивающего тока в асинхронных двигателях обусловлена наличием воздушного зазора между статором и ротором. С ростом нагрузки двигателя ток  $I_1$ , потребляемый двигателем из сети, увеличивается в основном за счет активной составляющей, что и способствует росту коэффициента мощности  $\cos\varphi_2$ .

### **Ход работы**

1) Проверка обозначения выводов обмотки статора.

Для правильного соединения обмотки статора в звезду или в треугольник необходимо точно знать маркировку выводов обмотки статора. Это делают следующим образом. Сначала определяют пары выводов каждой фазной обмотки статора. Это можно сделать с помощью «сигнальной» лампы, включенной, как это показано на рисунке 5.2, а. Прикоснувшись концом одного из проводов этой лампы какого-либо вывода обмотки статора, концом другого провода, подключенного к сети, касаются поочередно других выводов обмотки. При прикосновении к одному из выводов лампа загорается. Это свидетельствует о том, что пара выводов, которых касаются в данный момент концы проводов, принадлежат одной фазной обмотке. Эту пару выводов отмечают и переходят к отысканию выводов второй, а затем и третьей фазных обмоток.

Затем определяют начала и концы каждой фазной обмотки. Для этого, обозначив произвольно начала и концы всех трехфазных обмоток соединяют последовательно какие-либо две из них (например, фазные обмотки  $A$  и  $B$ ), как это показано на схеме рисунок 5.2, б, и подключают их к источнику переменного тока. Последовательно в цепь включают резистор такого сопротивления, чтобы ток в цепи этих обмоток превысил номинального значения. К оставшейся третьей фазной обмотке подключают вольтметр (можно воспользоваться «сигнальной» лампой). Если предварительная маркировка выводов обмоток  $A$  и  $B$  была правильной, то вольтметр, подключенный к выводам фазы  $C$ , не покажет напряжения (лампа не загорится). Объясняется это тем что ось результирующего потока фазных обмоток  $A$  и  $B$   $\Phi = \Phi_A + \Phi_B$  направлена под углом  $90^\circ$  к оси фазной обмотки  $C$  и поэтому не наводит в ней ЭДС. Если же предварительная маркировка выводов одной из обмоток, например обмотки  $B$ , оказалась неправильной и схема имела вид, представленный на рисунке 5.2, в, то ось результирующего потока обмоток  $A$  и  $B$  совпадает с осью фазной обмотки  $C$  и наводит в той обмотке некоторую ЭДС, при этом вольтметр на выводах обмотки  $C$  покажет напряжение (лампа загорится).

2) Схема включения и пробный пуск двигателя. Схема включения двигателя (см. рисунок 5.1) содержит двухэлементный ваттметр, предназначенный для измерения активной мощности, потребляемой двигателем из сети. Токовые катушки этого ваттметра включены в сеть через измерительные трансформаторы тока. После проверки схемы преподавателем осуществляют пробный пуск двигателя замыканием рубильника. Предварительно следует замкнуть ключ 2, шунтирующий амперметр  $A$ , с целью предохранения его от чрезмерно большого пускового тока двигателя. Затем двигатель отключают от сети и меняют местами любую пару проводов, соединяющих обмотку статора с сетью. В этом случае вращающееся поле статора при включении

обмотки статора в сеть будет вращаться в направлении, противоположном тому, какое было до переключения проводов. Другими словами, произойдет реверс двигателя, т. е. его ротор будет вращаться в другую сторону.

3) Снятие данных и построение рабочих характеристик. Замкнув рубильник 1 (при замкнутом ключе 2), включают двигатель в сеть (см. рисунок 5.1). Затем, разомкнув ключ 2, с помощью электромагнитного тормоза (ЭМТ) либо другого нагрузочного устройства создают на валу двигателя нагрузочный момент  $M$  и увеличивают его до тех пор, пока ток в цепи статора не достигнет значения  $I_1 = 1,2I_{ном}$ . При этом через приблизительно одинаковые интервалы тока  $I_1$  снимают показания приборов и заносят их в таблицу 5.1. Первый отсчет по приборам делают в режиме х. х. ( $M_2 = 0$ ). Всего необходимо снять не менее пяти показаний, из них одно должно соответствовать номинальному режиму ( $I_1 = I_{ном}$ ).

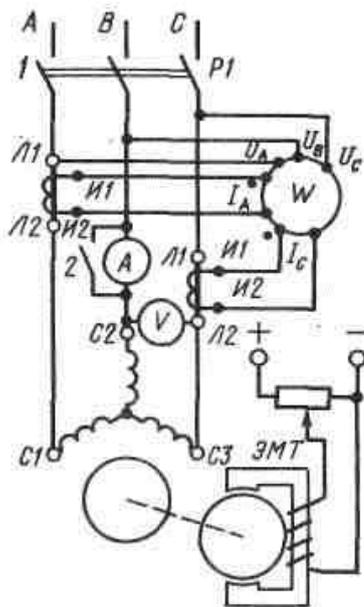


Рисунок 5.1 - Схема включения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором для исследования методом непосредственной нагрузки

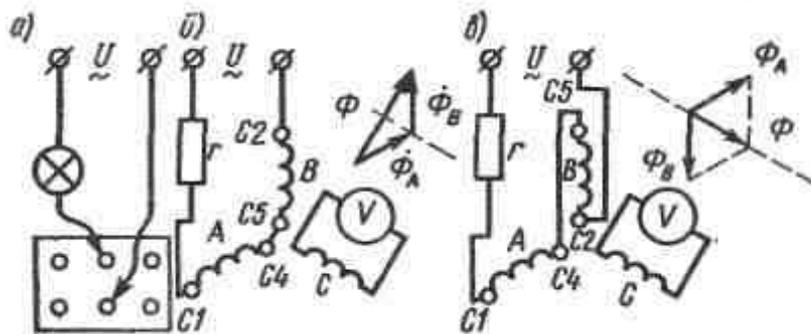


Рисунок 5.2 - Схемы для определения выводов «начало» и «конец» фазных обмоток статора асинхронного двигателя

Затем выполняют расчеты: подводимого к двигателю мощность (Вт)

$$P_1 = P_1' k_T C_w; \quad (5.1)$$

полезная мощность двигателя – мощность на валу (Вт)

$$P_2 = 0,105 M_2 n_2, \quad (5.2)$$

если  $M_a$  измеряется в  $\text{кГ} \cdot \text{М}$ , то

$$P_2 = 1,03M_2 n_2; \quad (5.3)$$

КПД двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \quad (5.4)$$

коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1 I_1} \quad (5.5)$$

Скольжение

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (5.6)$$

где  $k_T$  - коэффициент трансформатора тока;

$M_2$  - нагрузочный момент, Нм;

$n_2$  - частота вращения ротора, об/мин;

$C_w$  - цена деления ваттметра, Вт/дел.

По данным таблицы 5.1 строят рабочие характеристики двигателя (на одной координатной сетке);  $I_1$ ;  $n_2$ ;  $M_2$ ;  $\eta$ ;  $s$ ;  $\cos \varphi = f(P_2)$ , примерный вид которых показан на рисунке 5.3.

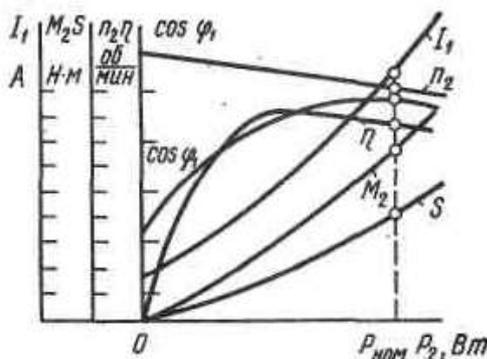


Рисунок 5.3 – Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя

Таблица 5.1 – Результаты измерений и расчетов

Номер измерения	Измерения					Вычисления				
	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$P'_1$ , дел	$n_2$ , об/мин	$M_2$ , Н·м	$P_1$ , Вт	$P_2$ , Вт	$\eta$ , %	$\cos \varphi$	$s$

### Контрольные вопросы

- 1) На чем основан принцип действия асинхронного двигателя?
- 2) Что такое скольжение, и каким, оно обычно бывает у асинхронных двигателей общего применения?
- 3) С какой целью у асинхронного двигателя обычно делают все шесть выводов обмотки статора?
- 4) Как определить начало и конец фазной обмотки статора?
- 5) Что такое реверс и как его осуществить в трехфазном асинхронном двигателе?
- 6) В чем сущность метода непосредственной нагрузки при исследовании асинхронного двигателя

7) Какие характеристики асинхронного двигателя называют рабочими?

### Литература

2) Кацман М. М. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2000, с. 100...101; 137...145; 162...175.

### Лабораторная работа №10 Исследование трехфазного асинхронного двигателя методом холостого хода и методом короткого замыкания

**Цель работы:** приобретение практических навыков по исследованию трехфазного асинхронного двигателя методом холостого хода и методом короткого замыкания.

#### Общие сведения

Работа асинхронной машины основана на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с токами обмотки ротора. Как следует из конструкции и принципа работы асинхронного двигателя, обмотка ротора не имеет электрической связи с обмоткой статора, то есть между обмотками существует только магнитная связь, и энергия из одной обмотки передается в другую посредством магнитного поля.

В процессе работы двигателя ротор вращается в сторону вращения поля с частотой

$$n = n_1 (1 - s)$$

$$n_1 = \frac{60f}{p}$$

Где- скольжение;

$p$ - число пар полюсов;

$f$ - частота сети.

Асинхронные двигатели в настоящее время являются основным типом электродвигателя, применяемым для привода различных механизмов в промышленности, в строительстве, в сельском хозяйстве. Объясняется это тем, что асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором значительно проще по устройству и обслуживанию, а также дешевле и надежнее в работе, чем другие типы двигателей.

#### Порядок выполнения работы

Определение двух зажимов, принадлежащих одной фазе

Часто на практике возможны случаи, когда на зажимах двигателя отсутствует маркировка, что препятствует нормальной его эксплуатации. Для определения принадлежности двух зажимов фазе собирают схему (см.).

Один из зажимов источника питания 220 В подсоединяют к одному из шести выводных зажимов двигателя, другой последовательно подключают через сигнальную лампу, поочередно касаясь к одному из пяти оставшихся зажимов. Лампа загорается в том случае, если эти два зажима принадлежат одной фазе. Аналогично определяют зажимы, принадлежащие двум другим фазам.

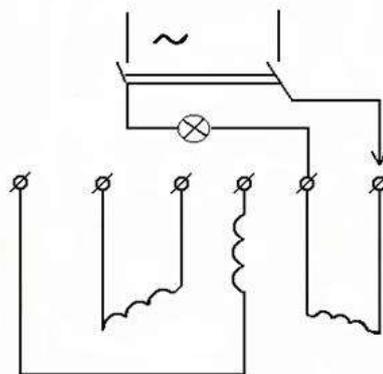


Рисунок 1.1

Для определения начала и концов обмоток фаз двигателя поступают следующим образом: условно принимают один из зажимов фазы за её начало и маркируют  $C_1$ , а во второй  $C_4$  соединяя эту фазу последовательно с любой другой фазой, включают в сеть напряжением 220 В. К зажимам третьей фазы подсоединяют вольтметр. Если вольтметр будет показывать напряжение близкое к нулю, то это означает, что к зажиму первой фазы, принятой условно за конец  $C_4$ , подсоединен конец второй фазы  $C_5$ , т.е. соединены вместе одноименные зажимы (см. рисунок 1.2). Как видно из рисунка 1.2, каждая из обмоток фаз 1 и 2 создает свои потоки  $\Phi_A$  и  $\Phi_B$ . Суммарный (результатирующий) поток  $\sum \Phi$  равен геометрической сумме потоков  $\bar{\Phi}_1 + \bar{\Phi}_2 = \sum \bar{\Phi}$ .  
Результирующий поток  $\sum \bar{\Phi}$  направлен вдоль плоскости 3-ей фазы и не наводит в ней Э.Д.С. ( $E=0$ ).

Если вольтметр будет показывать напряжение значительно больше нуля  $U > 0$ , то это означает, что с концом первой фазы, условно принятой за  $C_4$  подсоединено начало второй фазы  $C_2$ , т.е. соединены вместе разноименные зажимы. В этом случае, как видно из рисунка 1.3, магнитные потоки  $\Phi_A$  и  $\Phi_B$ , геометрически складываясь, создают результирующий поток  $\sum \Phi$ , направленный перпендикулярно плоскости 3-ей фазы, в которой наведётся значительная Э.Д.С. Аналогично находят начало и конец 3-ей фазы.

### Пуск двигателя

В настоящее время существует два основных способа пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором:

- 1) прямой пуск от сети;
- 2) при пониженном напряжении;
  - а) автотранспортный пуск;
  - б) реакторный пуск;
  - в) переключением обмотки статора при пуске с треугольника -  $\Delta$  на звезду -  $Y$ .

Наиболее простым способом пуска короткозамкнутых двигателей является включение обмотки статора непосредственно в сеть на номинальное напряжение. Такой пуск называется прямым. Прямой пуск всегда возможен, когда сеть достаточно мощная и пусковые токи  $I_{\pi} = (4-7)I_{H}$  не вызывают недопустимо больших падений напряжений в сети, (не более 10+15%). Современные энергетические системы, сети и трансформаторные подстанции в подавляющем большинстве позволяют осуществить прямой пуск двигателей большой мощности ( $P \geq 1000 \text{ кВт}$ ). Если по условиям падения напряжения в сети прямой пуск двигателя с короткозамкнутым ротором невозможен, применяются различные способы пуска при пониженном напряжении. Однако при этом пропорционально квадрату напряжения на зажимах обмотки статора снижается пусковой момент. Поэтому такой способ пуска возможен на холостом ходу или при неполной нагрузке ( $P_2 < P_{2H}$ ).

В данной работе выполняется пуск двигателя по способам пунктов 1 и 2а.

### Реверсирование двигателя

Направление вращения магнитного поля, а следовательно, и направление вращения ротора зависит от порядка чередования фаз, питающих обмотку статора (А-В-С). Для изменения направления вращения (реверсирования) двигателя достаточно поменять местами два любых зажима, идущих от трехфазного источника питающей сети (А-В-С).

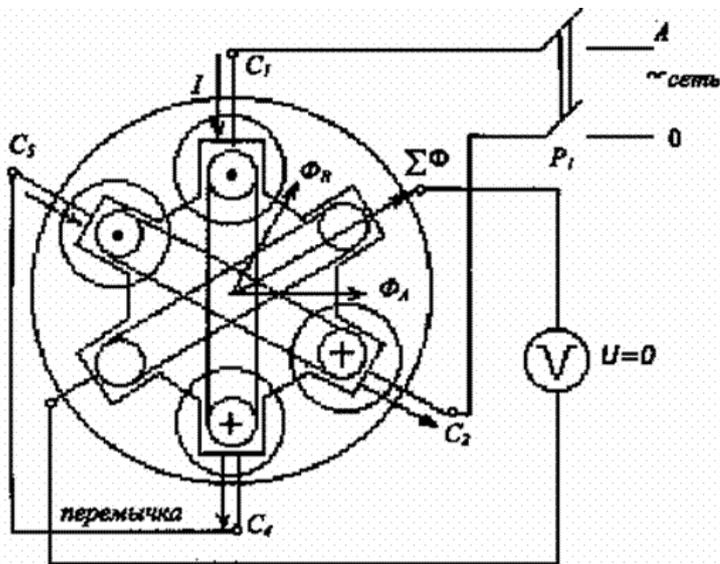


Рисунок 1.2 – К определению начала и концов обмоток фаз двиг (перемычка между концом C4 фазы A и концом C5 фазы B)

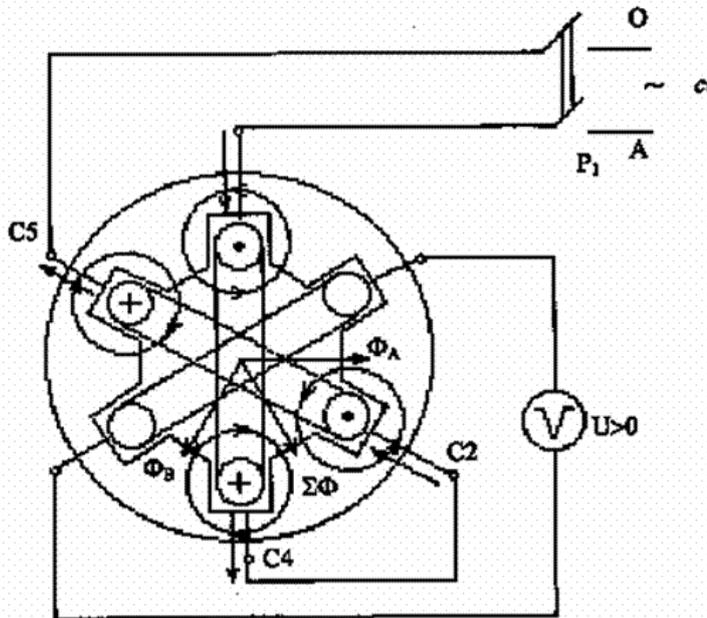


Рисунок 1.3 – К определению начала и концов обмоток фаз двиг (перемычка между началом C2 фазы B и концом C2 фазы A)

### Опыт холостого хода

Характеристики холостого хода представляют собой зависимости  $I_0, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_1)$  при вращении ротора без нагрузки  $M_2 = 0$ . Опыт проводят в следующем порядке:

Собирают схему, изображенную на рисунке 1.4.

На двигатель подают номинальное напряжение от трансформатора или индукционного регулятора. Плавно уменьшая его, записывают 5 ÷ 6 показаний приборов. Напряжение снижают до такой минимальной величины, при которой двигатель работает еще устойчиво. Данные измерения записывают в таблицу 1.1.

Таблица 1.1- Опыт холостого хода

№	Наблюдения			Вычисления			Примечание
	$U_{1\phi}, B$	$I_{0\phi}, A$	$P_0, Вт$	$I_{0\phi}, A$	$\cos \varphi_0$	$\varphi_0, град$	
1.....7.							$M_2 = 0$ $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3U_{1\phi} \cdot I_{0\phi}}$

Примечания:

$I_{0\phi}$  – линейный ток холостого хода;

$$I_{0\phi} = \frac{I_{0Л}}{\sqrt{3}} - \text{фазный ток холостого хода;}$$

$P_0$  – мощность, потребляемая асинхронным двигателем в режиме холостого хода.

По данным таблицы построить зависимости  $I_0, P_0, \cos \varphi_0 = f(U_1)$ .

Из построенных зависимостей определяются  $I_{0н}, P_{0н}, \varphi_{0н}$  при номинальном напряжении  $U_1 = U_{1н\phi}$ .

### Опыт короткого замыкания

Характеристики короткого замыкания представляют собой зависимости  $I_K, P_K, \cos \varphi_K = f(U_K)$  при неподвижном роторе  $n=0$ .

Опыт проводят в следующем порядке:

Собирают схему, изображенную на рисунке 1.5.

Затормозив ротор ленточным тормозом, с помощью автотрансформатора или индукционного регулятора подводят такое пониженное напряжение  $U_K$ , при котором установившийся ток короткого замыкания  $I_K$  в обмотке статора будет равен номинальному  $I_K = I_{1К}$ . Затем, снижая напряжение, подводимое к двигателю до нуля, снимают 5-6 показаний приборов.

Данные приборов заносят таблицу 1.2.

Таблица 1.2 - Опыт короткого замыкания

№	Наблюдения			Вычисления					Примечание
	$U_K, B$	$I_K, A$	$P_K, Вт$	$I_{КН}, A$	$P_{КН}, Вт$	$\cos \varphi_{КН}$	$\varphi_{КН}$	$r_K, Ом$	
1.....7.									$n=0,$ $r_k = \frac{P_{КН}}{3I_{КН}^2}$

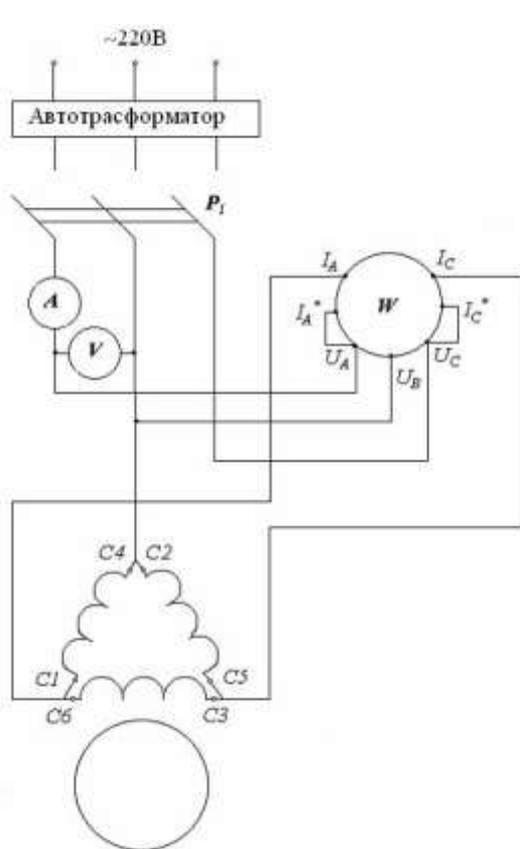


Рисунок 1.4-Электрическая схема для исследования двигателя в режиме холостого хода

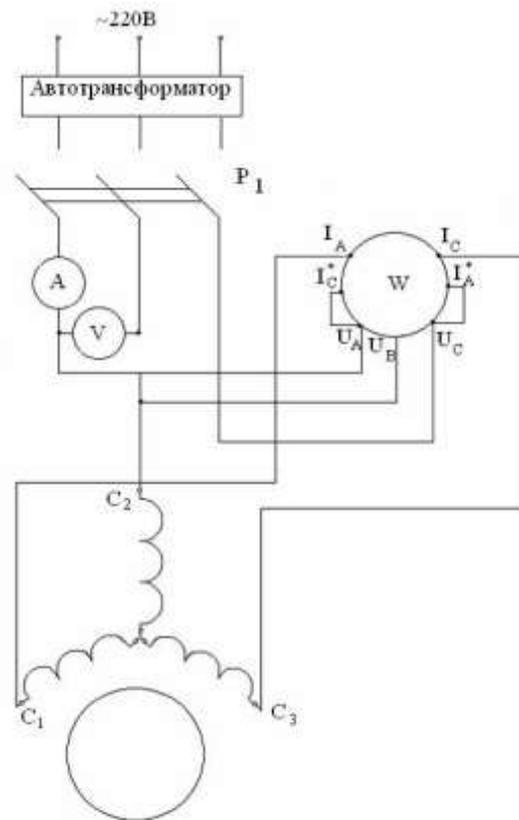


Рисунок 1.5-Электрическая схема экспериментального исследования двигателя в режиме короткого замыкания

Данные, полученные при опыте короткого замыкания при токе  $I_K$ , пересчитывают на номинальное напряжение по выражениям

$$I_{KH} = I_H \frac{U_{HL}}{U_K}, \quad P_{KH} = P_K \left( \frac{U_{HL}}{U_K} \right)^2, \quad \cos \varphi_{KH} = \frac{P_{KH}}{\sqrt{3} \cdot U_{HL}} \cdot I_{KH}$$

где  $U_{HL}$  – номинальное линейное напряжение при соединении обмоток звездой.

По данным таблицы 1.2 построить зависимости

$$I_K, P_K, \cos \varphi_K = f(U_K)$$

### Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия асинхронного двигателя.
2. Как определяются начала и концы обмоток, не имеющих маркировки?
3. Как зависит вращающий момент от подведенного момента?
4. Для чего проводятся опыты холостого хода и короткого замыкания асинхронного двигателя?

### Литература

- 3) Кацман М. М. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2000, с. 100...101; 137...145; 162...175.

## Лабораторная работа №11 Определение начал и концов обмоток статора асинхронного двигателя.

**Цель работы:** Ознакомится с методикой определения «начал» и «концов» фазных обмоток асинхронных электродвигателей. Научиться соединять обмотки асинхронных электродвигателей в "звезду" и "треугольник".

### Общие сведения

#### Определение начал и концов фазных обмоток статора асинхронного электродвигателя

Асинхронные двигатели единой серии 4А (2АО, АИР) изготавливаются на напряжения 220, 380 и 660 В. На выводном щитке этих машин выводы обмоток располагают таким образом, что бы их можно было соединить в "звезду" или в "треугольник" (пример соединения выводов фазных обмоток электродвигателя см. рисунок 7).

Таблица 4.1 - Маркировка обмоток асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Начало фазной обмотки	Конец фазной обмотки
C <sub>1</sub>	C <sub>4</sub>
C <sub>2</sub>	C <sub>5</sub>
C <sub>3</sub>	C <sub>6</sub>

#### Методика определения начал и концов фазных обмоток

В том случае, когда выводы обмоток не имеют маркировок или есть сомнения в ее правильности. Появляется необходимость определить начало и конец каждой фазной обмотки. Существует несколько способов определения начал и концов обмоток двигателей. Наибольшее применение имеет способ установления начал и концов фазных обмоток приведённый на рисунок 8.

Для проведения работы используется источник питания учебного стенда и цифровой мультиметр М832 или контрольная лампа накаливания, приготовленные бумажные ярлычки с надписями С<sub>1</sub>...С<sub>6</sub> для обозначения выводов фазных обмоток. Сначала при помощи мультиметра М832 (работает в режиме омметра) или контрольной лампы определяют оба вывода первой, второй и третьей фазной обмотки электродвигателя. Необходимо определить два вывода фазной обмотки статора асинхронного двигателя, для каждой фазы. Один из выводов первой фазы (1Ф) произвольно принимают за начало и маркируют символами С<sub>1</sub>, а второй - за конец и маркируют С<sub>4</sub>. На выводы второй и третьей фаз вывешивают бирки, указывающие, к какой фазе принадлежат выводы (2Ф, 3Ф). Затем конец первой фазы С<sub>4</sub> соединяют с одним из выводов второй фазы, а к началу первой фазы и оставшемуся свободному выводу второй фазы подключают вольтметр (принципиальная схема рисунок 8). На выводы третьей фазы подключают пониженное напряжение до 20 В от источника питания расположенного на стенде. Величина подаваемого напряжения не должна превышать 10...15% U<sub>ном</sub> (для исключения перегрева обмоток). Если мультиметр (работает в режиме вольтметра) покажет наличие напряжение значит соединение обмоток выполнено «согласно», тогда с концом первой фазы соединено начало второй фазы (маркируется С<sub>2</sub>). Если же измеряемое напряжение будет равно нулю, значит соединение обмоток выполнено «встречно», тогда с концом С<sub>4</sub> первой фазы соединен конец второй фазы. Установленный конец второй фазы маркируется С<sub>5</sub>. Затем таким же образом устанавливаются начало (С<sub>3</sub>) и конец (С<sub>6</sub>) обмотки третьей фазы.

Второй способ приведён на рисунке 9, для проведения понадобится источник постоянного тока расположенный на стенде, его напряжение не должно превышать 5 В. Сначала при помощи мультиметра М832 (работает в режиме омметра) или контрольной лампы определяют оба вывода первой, второй и третьей фазной обмотки электродвигателя. Необходимо определить два вывода фазной обмотки статора асинхронного двигателя, для каждой фазы. Затем к обмотке одной из фаз, принятой за 1Ф приключают через выключатель источник постоянного тока, который выбирают таким, чтобы по обмотке проходил небольшой ток (например, аккумулятор на напряжение 2 В). В момент включения или отключения выключателя в обмотках двух других фаз будет индуцироваться электродвижущая сила. Причем направление этой электродвижущей силы

будет зависеть от полярности концов обмоток фазы, в цепи которой включен аккумулятор. Если к условному "началу" (С1) присоединен плюс батареи, а к условному "концу" (С4) - минус, то при отключении выключателя на других фазах будет плюс на "началах" (С2 и С3) и минус на "концах" (С5 и С6), что можно будет определить по направлению отклонения стрелки милливольтметра, подключаемого поочередно к выводным концам двух других фазных обмоток (2Ф, 3Ф). При включении тока полярности на других фазах будут обратными указанному.

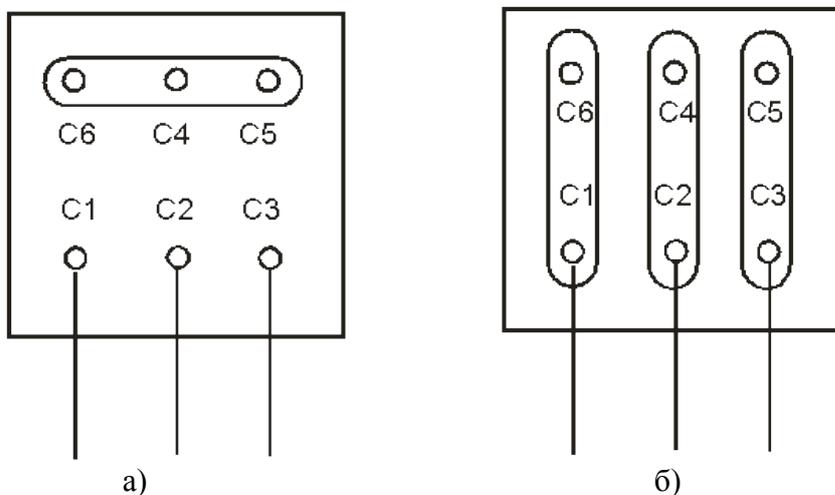


Рисунок 7 - Соединение обмоток в звезду (а) и в треугольник(б) на щитке выводов электродвигателя

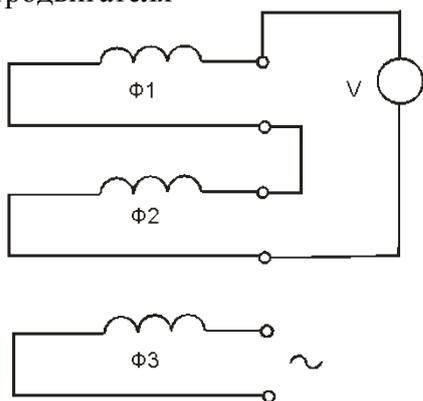


Рисунок 8 - Схема определения начал и концов фаз первый способ (источник переменного тока)

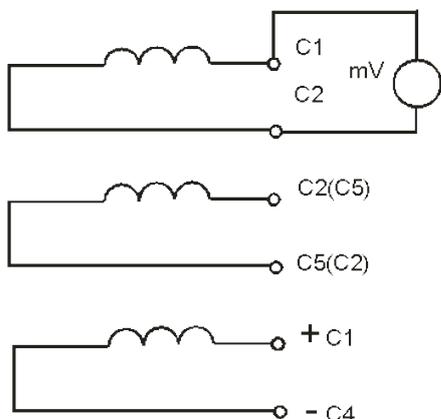


Рисунок 9 - Схема определения начал и концов фаз милливольтметром, второй способ (источник постоянного тока 2...4 В)

### **Задание для выполнения лабораторной работы**

Внимательно прочитайте общие сведения и пользуясь полученной информацией приступите к выполнению лабораторной работы. Определите начало и концы фазных обмоток асинхронного двигателя расположенного на стенде (двумя способами). Источник постоянного и переменного тока находятся на учебном стенде, а в качестве измерительного прибора применять мультиметр М832. Отметить выводы фазных обмоток бирками с номерами. После проверки преподавателем ваших измерений, соединить обмотки электродвигателя в «звезду» и после проверки схемы соединения обмоток, включить напряжение питания. Убедитесь в нормальной работе электродвигателя.

#### **Контрольные вопросы**

- 1) Как маркируются начало и конец фазных обмоток асинхронных двигателей?
- 2) Способы определения начала и конца фазных обмоток.
- 3) Схемы соединения обмоток.

#### **Литература**

- 4) Кацман М. М. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2000, с. 100...101; 137...145; 162...175.

### **Лабораторная работа №12 Исследование параллельной работы синхронных генераторов.**

**Цель:** Приобрести практические навыки в сборке схемы и включении синхронного генератора на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах синхронного генератора, включенного на параллельную работу.

Студент должен *знать*:

- условные характеристики синхронных генераторов,
- средства повышения устойчивости параллельной работы генераторов,
- способы уменьшения колебания ротора,
- условия перехода синхронного генератора в асинхронный режим;

уметь:

- собирать схемы и включать синхронный генератор на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации.

#### **Теоретическое обоснование**

*Схема включения.* В качестве приводного двигателя синхронного генератора (рисунок 9.1) используют двигатель постоянного тока параллельного возбуждения. Для измерения активной мощности генератора в схеме применен трехфазный двухэлементный ваттметр  $W$ , токовые обмотки которого включены в линейные провода через трансформаторы тока.

Для точной синхронизации генератора использован ламповый синхроскоп (возможно включение стрелочного синхроскопа). Лампы этого синхроскопа соединены по схеме «на погасание». Возможно включение ламп синхроскопа и по схеме «на вращение света».

*Включение генератора на параллельную работу.* При включении трехфазного синхронного генератора на параллельную работу с сетью необходимо соблюдение следующих условий:

- а) ЭДС генератора должна быть равна напряжению сети;
- б) частота ЭДС генератора и частота напряжения сети должны быть равны;
- в) ЭДС генератора должна находиться в противофазе с напряжением сети;
- г) чередование фаз генератора должно соответствовать чередованию фаз сети.

Приведение генератора в состояние, удовлетворяющее перечисленным условиям, называется синхронизацией. Соблюдение условий синхронизации проверяется с помощью синхроскопа. Простейший синхроскоп - ламповый, состоящий из трех ламп накаливания, которые могут быть включены по двум схемам: «на погасание» и «на вращение света».

При использовании синхроскопа по схеме «на погасание» каждая лампа включается в разрыв определенной фазы (рисунок 9.1). В этом случае момент синхронизации соответствует одновременному погасанию всех трех ламп. При несоблюдении условий синхронизации лампы

часто вспыхивают и гаснут. Однако по мере приближения генератора к условиям синхронизации вспыхивание ламп становится все реже. Когда вспыхивания ламп становятся настолько редкими, что пауза между ними продолжается не менее 5...7 с, следует в момент погасания ламп замкнуть рубильник  $P2$ , подключающий генератор к сети на параллельную работу.

При включении ламп по схеме «на вращение света» (рисунок 9.2) соблюдению условий по синхронизации соответствует погасание лампы 2 и горение с одинаковой яркостью ламп 1 и 3. При несоблюдении условий синхронизации лампы вспыхивают поочередно, создавая эффект вращения света. По мере приближения к соблюдению условий синхронизации частота «вращения света» замедляется.

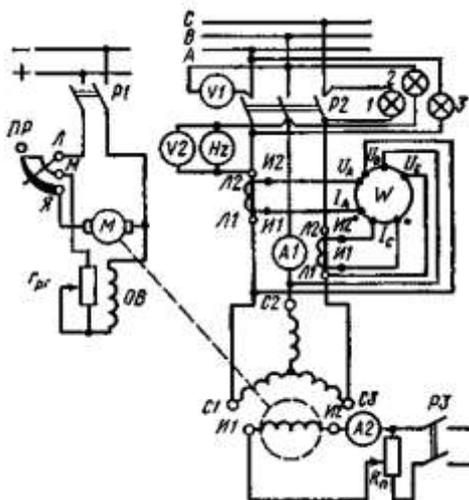


Рисунок 9.1 – Схема включения трехфазного синхронного генератора на параллельную работу с сетью

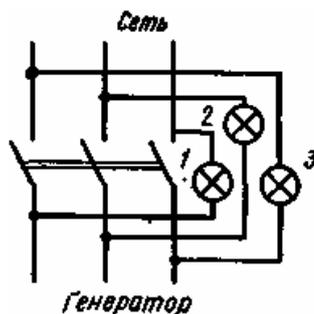


Рисунок 9.2 – Соединение ламп синхроскопа по схеме «вращение света»

Возможен случай, когда лампы, включенные по схеме «на погасание», создают эффект вращения света, и наоборот, включенные по схеме «на вращение света» одновременно гаснут и загораются. Такое явление обусловлено несоответствием чередования фаз на генераторе чередованию фаз сети. В этом случае следует поменять местами провода, соединяющие генератор с зажимами рубильника  $P2$  (см. рисунок 9.1).

После пуска приводного двигателя генератор возбуждают включением  $P3$  и затем по показанию частотомера  $H2$  устанавливают синхронную частоту вращения ( $n_2 = n_1$ ). С помощью потенциометра  $R_n$  устанавливают ЭДС генератора  $E_0 = U_{\text{ном}}$ , равную напряжению сети  $U_c$ . После этого, медленно перемещая движок регулировочного реостата  $r_{рв}$  цепи обмотки возбуждения приводного двигателя, наблюдают за поведением ламп синхроскопа, добиваясь их состояния, соответствующего соблюдению условий синхронизации. Добившись этого, включают рубильник  $P2$ .

*U - образные характеристики генератора.* Эти характеристики представляют собой зависимость тока статора  $I_x$  от тока возбуждения  $I_b$  при неизменной полезной мощности генератора

$P_2$ .  $U$  - образные кривые снимают для трех значений полезной мощности генератора:  $P_2 = 0$  (режим х. х.),  $P_2 = 0,25P_{2ном}$ ,  $P_2 = 0,5P_{2ном}$ .

Включив генератор на параллельную работу с сетью, увеличивают ток возбуждения генератора  $I_B$  до тех пор, пока ток в цепи статора генератора не достигнет приблизительно номинального значения ( $I_1 \approx I_{1ном}$ ). При этом приблизительно через одинаковые интервалы тока возбуждения  $I_B$  измеряют ток статора  $I_1$  показания приборов  $A1$  и  $A2$  заносят в таблицу 9.1. Затем постепенно уменьшают ток возбуждения  $I_B$  до тех пор, пока ток статора  $I_1$ , пройдя через минимум, не возрастет опять до номинального значения. После этого восстанавливают прежнее значение тока возбуждения  $I_B$ , то при котором ток статора имеет минимальное значение и, воздействуя на регулировочный реостат в цепи обмотки возбуждения приводного двигателя, доводят активную нагрузку генератора до значения  $P_2 = 0,25P_{2ном}$ . Данные  $U$ -образной характеристики для этой нагрузки генератора снимают в изложенном выше порядке и заносят их в таблицу 9.1. Опыт повторяют для нагрузки генератора  $P_2 = 0,5 P_{2ном}$ . Особо внимательно измеряют ток статора в зоне его минимальных значений.

На построенном графике следует указать зоны работы генератора с опережающим и отстающим токами статора. Точки на кривых, соответствующие минимальному току статора, соединяют пунктирной линией (рисунок 9.3):

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_2}{\sqrt{3}U_1 I_1} \quad (9.1)$$

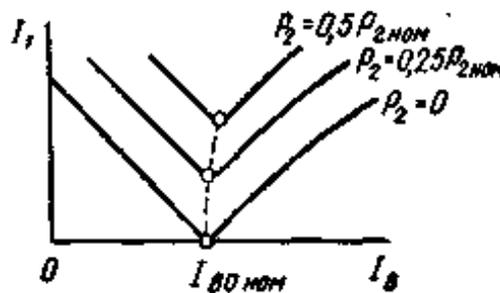


Рисунок 9.3 -  $U$  - образные характеристики синхронного генератора

**Ход работы**

- 1) Ознакомиться с конструкцией синхронного генератора и приводного двигателя; записать их паспортные данные и данные измерительных приборов.
- 2) Собрать схему по рисунку 9.1 и после проверки ее преподавателем произвести пуск генератора, проверить возможность регулировки параметров генератора.
- 3) Включить синхронный генератор на параллельную работу с сетью методом точной синхронизации.
- 4) Снять данные и построить  $U$ -образные характеристики синхронного генератора.

Таблица 9.1 – Результаты измерений и вычислений

Номер измерения	$P_2 = 0$			Номер измерения	$P_2 = 0,25P_{2ном}$			Номер измерения	$P_2 = 0,5P_{2ном}$		
	$I_B$ , А	$I_1$ , А	$\cos \varphi_1$		$I_B$ , А	$I_1$ , А	$\cos \varphi_1$		$I_B$ , А	$I_1$ , А	$\cos \varphi_1$

**Контрольные вопросы**

- 1) Какие условия необходимо соблюдать, прежде чем включить синхронный генератор на параллельную работу?
- 2) Каким прибором контролируется соблюдение условий синхронизации?

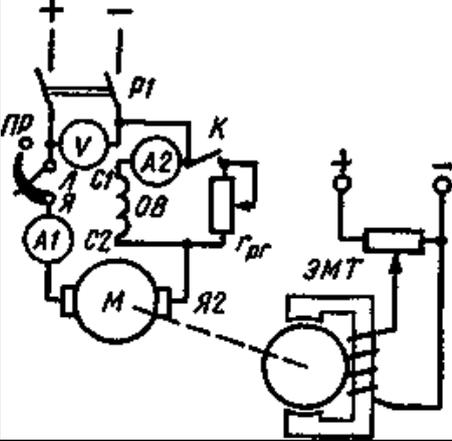
- 3) Как нагрузить синхронный генератор, подключенный на параллельную работу с сетью?
- 4) Изложите порядок действий при снятии данных для построения  $U$ -образных характеристик синхронного генератора.
- 5) Как определить, при какой величине тока возбуждения синхронный генератор, включенный на параллельную работу с сетью, будет работать с коэффициентом мощности  $\cos\varphi_1 = 1$ ?
- 6) Если изменится активная нагрузка этого генератора, то потребуется ли изменить ток возбуждения, чтобы  $\cos\varphi_1$  остался равным единице.

### **Литература**

- 1) Кацман М. М. Электрические машины - М.: Высшая школа, 2000, с. 270...288.

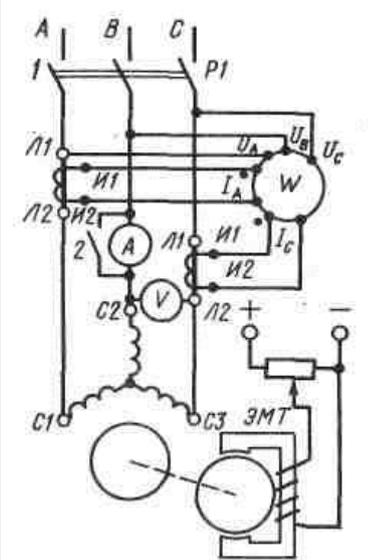
## ДИАГНОСТИКО-КОНТРОЛИРУЮЩИЙ БЛОК

### Описание проверочного испытания

<b>Проверочное испытание № 1, вариант №</b>	
<b>Название:</b>	Определять принцип действия коллекторных электрических машин постоянного тока.
<b>Описание задачи:</b>	Изучить устройство двигателя постоянного тока последовательного возбуждения и приобрести практические навыки в сборке схемы соединений, включений и регулировке двигателя, а также опытным исследованием двигателя для получения данных его основных характеристик; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах двигателей постоянного тока последовательного возбуждения.
	
<b>Нормированное время.</b>	50 мин
<b>Результаты обучения</b>	Выполняет расчет и построение развернутой схемы петлевой и волновой обмоток якоря. Осуществляет сборку схемы, производить пуск и регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока.
<b>Критерии выполнения</b>	Понимает назначение, классификацию, области применения, конструкцию и принцип действия машин постоянного тока.
<b>Порядок задания</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Ознакомиться с конструкцией двигателя и нагрузочного устройства; записать паспортные данные двигателя измерительных приборов.</li> <li>2) Собрать схему по рисунку, и после проверки ее преподавателем произвести пробный пуск двигателя, предварительно нагрузив его.</li> <li>3) При разомкнутом ключе К, снять данные и построить рабочие характеристики двигателя.</li> <li>4) При замкнутом ключе К, (шунтирующем обмотку возбуждения) снять данные и построить график зависимости частоты вращения от тока в обмотке возбуждения <math>I_{\omega}</math>.</li> </ol>
<b>Перечень оборудования и инструментов.</b>	Лабораторный стенд, измерительные приборы, бумага, ручка, линейка, карандаш, калькулятор, нормативная литература.
<b>Место проведения:</b>	Лабораторный корпус № 1 , аудитория № 108

Дата проведения:	«    »    20    г.
------------------	--------------------

## Описание проверочного испытания

Проверочное испытание № 2 , вариант №	
<b>Название:</b>	Применять на практике знания по бесколлекторным электрическим машинам.
<b>Описание задачи:</b>	Изучить конструкцию трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором; освоить приемы опытной проверки обозначений выводов обмотки статора и экспериментального исследования асинхронного двигателя методом непосредственной нагрузки.
	
<b>Нормированное время.</b>	50 мин
<b>Результаты обучения</b>	Осуществляет сборку схемы, производит пуск и регулирование частоты вращения асинхронного двигателя построение характеристик.
<b>Критерии оценки выполнения</b>	Понимает устройство, режимы работы и принцип действия синхронных и асинхронных машин.
<b>Порядок выполнения задания</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Проверка обозначения выводов обмотки статора.</li> <li>2) Схема включения и пробный пуск двигателя. Схема включения двигателя (см. рисунок) содержит двухэлементный ваттметр, предназначенный для измерения активной мощности, потребляемой двигателем из сети.</li> <li>3) Снятие данных и построение рабочих характеристик.</li> </ol>
<b>Перечень необходимого оборудования и инструментов.</b>	Лабораторный стенд, измерительные приборы, бумага, ручка, линейка, карандаш, калькулятор, нормативная литература..
<b>Место проведения:</b>	Лабораторный корпус №1, аудитория № 108
Дата проведения:	«    »    20    г.

## Описание проверочного испытания

Проверочное испытание № 3 , вариант №	
<b>Название:</b>	Применять на практике знания по трансформаторам и автотрансформаторам.
<b>Описание задачи:</b>	Изучить условия включения трансформаторов на параллельную работу и принцип распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами; приобрести практические навыки по включению трехфазных трансформаторов на параллельную работу. Экспериментально подтвердить особые свойства автотрансформатора сравнением его параметров с параметрами трансформатора, полученными при исследовании совмещенной модели.
<b>Нормированное время.</b>	50 мин
<b>Результаты обучения</b>	Осуществляет сборку схемы и исследование работы трансформатора и автотрансформатора в рабочем и номинальном режимах, в режиме холостого хода и режиме короткого замыкания. Производит расчет параметров трансформатора и автотрансформатора.
<b>Критерии оценки выполнения</b>	Понимает особенности конструкции, области применения и принципы работы трансформаторов и автотрансформаторов.
<b>Порядок выполнения задания</b>	1) Прежде чем подключить трансформаторы на параллельную работу, т. е. включить рубильник 3, при замкнутом рубильнике 1 (см. рисунок) необходимо провести фазировку трансформаторов. 2) Снятие данных и построение внешних характеристик при $u_{k11} = u_{k1}$ . 3) Снятие данных и построение внешних характеристик при $u_{k1} \neq u_{k11}$ . 4) Увеличивают нагрузку до тех пор, пока ток нагрузки более нагружаемого трансформатора не достигнет значения $I_2 = 1,2I_{2ном}$ .
<b>Перечень необходимого оборудования и инструментов.</b>	Лабораторный стенд, измерительные приборы, бумага, ручка, линейка, карандаш, калькулятор, нормативная литература.
<b>Место проведения:</b>	Лабораторный корпус №1, аудитория № 108
<b>Дата проведения:</b>	«    »    20    г.

**БАҚЫЛАУ ПАРАҒЫ  
КОНТРОЛЬНЫЙ ЛИСТ**

«Өндірістік жағдайлар үшін электр машиналары мен трансформаторлардың жұмыс режимдерінің санды және сапалы сипаттамасын таңдау» модулінің модуля «Выбор количественных и качественных характеристик режимов работы электрических машин и трансформаторов для производственных условий»

<p align="center"><b>ТЕКСЕРУ СЫНАУ ТҮРІ ТИП ПРОВЕРОЧНОГО ИСПЫТАНИЯ</b></p> <p><b>ОҚЫТУ НӘТИЖЕЛЕРІ/ БАҒАЛАУ КРИТЕРИЙЛЕРІ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ/ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ</b></p>	Тест/ тест	ЗПС қорғау/ защита ЛПЗ	Тапсырма/задание	Техникалық диктант/Технический диктант	Бақылау жұмысы /Контрольная работа	Емтихан /Экзамен
<p><b>Оқыту нәтижелері / Результат обучения:</b></p> <p><b>1) Определять принцип действия коллекторных электрических машин постоянного тока.</b></p>						
<p><b>Бағалау критерийлері / Критерийоценки</b> 1.Понимает назначение, классификацию, области применения, конструкцию и принцип действия машина постоянного тока.</p>	V					
<p><b>Бағалау критерийлері / Критерийоценки</b> 2.Применяет способы возбуждения машин постоянного тока.</p>		V				
<p><b>Бағалау критерийлері / Критерийоценки</b> 3. Использует способы пуска и регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока.</p>		V				
<p><b>Бағалау критерийлері / Критерийоценки</b> 4.Объясняет строение обмоток машин постоянного тока.</p>			V			
<p><b>Бағалау критерийлері / Критерийоценки</b> 5.Использует способы коммутации машин постоянного тока и способы её улучшения.</p>		V				
<p><b>Бағалау критерийлері / Критерийоценки</b> 6. Выполняет расчет и построение развернутой</p>		V				

схемы петлевой и волновой обмоток якоря.						
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 7.Осуществляет сборку схемы, производить пуск и регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока.		√				
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 8.Производит расчет параметров машины постоянного тока.			√			
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 9.Анализирует причины появления реакции якоря и характеризует способы устранения вредного влияния реакции якоря.				√		
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 10.Анализирует причины искрения на коллекторе и способы снижения искрения в машинах постоянного тока.	√					
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 11. Выполняет сборку схем пуска двигателей и снятие характеристик.		√				
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 12.Выполняет расчет развернутых схем обмоток якоря и обмоток статора.			√			
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 13.Применяет на практике знания по коллекторным электрическим машинам постоянного тока		√				
<b>Оқыту нәтижелері / Результат обучения:</b>						
<b>2) Применять на практике знания по бесколлекторным электрическим машинам.</b>						
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 1.Классифицирует бесколлекторные машины переменного тока по областям применения.				√		
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 2.Понимает устройство, режимы работы и принцип действия синхронных и асинхронных машин.		√				
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 3.Объясняет строение обмоток статора машин переменного тока.			√			
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 4.Определяет способы пуска и регулирования частоты вращения асинхронного двигателя.			√			
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 5.Характеризует системы возбуждения синхронных машин.			√			
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 6.Понимает устройство, режимы работы и принцип действия синхронных и асинхронных машин.		√				
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 7.Рассчитывает и строит развернутую схему обмоток статора различного типа.			√			

<b>Бағалау критерийлері / Критерий өлшемі</b> 8. Осуществляет сборку схемы, производит пуск и регулирование частоты вращения асинхронного двигателя построение характеристик.		✓				
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өлшемі</b> 9. Осуществляет пуск синхронного двигателя.		✓				
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өлшемі</b> 10. Производит расчеты параметров машин переменного тока.			✓			
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өлшемі</b> 11. Анализирует устройство, принципы действия, достоинства и недостатки синхронных генераторов различного типа.	✓					
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өлшемі</b> 12. Объясняет возможность использования синхронного двигателя в режиме синхронного компенсатора.				✓		
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өлшемі</b> 13. Выполняет сборку схемы, производит пуск и регулирование частоты вращения асинхронного двигателя построение характеристик.		✓				
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өлшемі</b> 14. Производит расчет параметров машин переменного тока.			✓			
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өлшемі</b> 15. Применяет на практике знания по бесколлекторным электрическим машинам.	✓					
<b>Оқыту нәтижелері / Результат обучения:</b>						
<b>3) Применять на практике знания по трансформаторам и автотрансформаторам.</b>						
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өлшемі</b> 1. Объясняет назначение, классификацию, области применения, конструкцию и принцип действия трансформаторов.	✓					
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өлшемі</b> 2. Классифицирует группы соединения трансформаторов.	✓					
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өлшемі</b> 3. Характеризует условия включения трансформаторов на параллельную работу.	✓			✓		
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өлшемі</b> 4. Понимает особенности конструкции, области применения и принципы работы автотрансформаторов.		✓				
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өлшемі</b> 5. Понимает особенности конструкции и режима работы специальных трансформаторов.		✓				
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өлшемі</b> 6. Осуществляет сборку схемы и исследование работы трансформатора в рабочем и номинальном режимах, в режиме холостого		✓				

хода и режиме короткого замыкания.						
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 7.Выполняет расчет параметров трансформатора.			√			
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 8.Выполняет расчет по распределению нагрузки между параллельно включенными трансформаторами.			√			
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 9.Осуществляет сборку схемы и исследование работы трансформатора в рабочем и номинальном режимах, в режиме холостого хода и режиме короткого замыкания.		√				
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 10.Производит расчет параметров трансформатора.			√			
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 11.Производит расчет по распределению нагрузки между параллельно включенными трансформаторами.			√		√	
<b>Бағалау критерийлері / Критерий өңенки</b> 12.Применяет на практике знания по трансформаторам и автотрансформаторам.	√					
<b>Модуль бойынша қорытынды бақылау:</b>  <b>Итоговый контроль по модулю:</b>						√

**Контрольно-измерительные материалы**  
**Тестовый материал**  
**1 вариант**

1. Две обмотки трансформатора включены последовательно. Каким будет общее напряжение на АВ?

- A. 48 В
- B. 12 В
- C. 24 В
- D. 18 В
- E. 0 В

2. Для чего применяется масло в масляных трансформаторах?

- A для защиты обмоток от короткого замыкания
- B для охлаждения обмоток
- C для защиты от коррозии
- D для изоляции обмоток
- E для защиты обмоток от короткого замыкания и для изоляции

3. Почему вторичную обмотку трансформатора тока нельзя оставлять разомкнутой?

- A перегорит
- B будет короткое замыкание
- C возникает большое сопротивление
- D будет перегрузка
- E на ней возникает высокое напряжение, опасное для персонала и изоляции обмотки

4. Какому режиму работы соответствует работа сварочного трансформатора?

- A холостому ходу
- B рабочему режиму
- C режиму короткого замыкания

D холостому ходу и рабочему режиму

E рабочему режиму и перегрузке

5. Для чего электрод для сварки покрывается обмазкой?

- A чтобы не было дуги
- B от короткого замыкания
- C для уменьшения сопротивления
- D для устойчивого горения дуги
- E для увеличения сварочного тока

6. На сварочном агрегате имеется ручка. Для чего она нужна?

- A для регулирования напряжения
- B для регулирования сопротивления
- C для регулирования сварочного тока
- D для регулирования емкости
- E для регулирования напряжения и для регулирования сопротивления

7. Для чего применяются трансформаторы тока?

- A для уменьшения напряжения
- B для расширения предела измерения переменного тока
- C для увеличения напряжения
- D для регулирования переменного напряжения
- E для сварочного агрегата

8. Где возникают потери энергии в трансформаторе при холостом ходе?

- A в меди
- B в стали
- C в стали и меди
- D нигде не возникают
- E в магнитом поле

9. Где возникают потери энергии в трансформаторе при рабочем режиме?

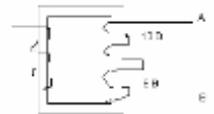
- A в меди
- B в стали
- C в стали и меди
- D нигде не возникают
- E в магнитом поле

10. Почему вторичная обмотка понижающего трансформатора имеет большее сечение?

- A на ней меньшее напряжение
- B в ней больший ток
- C в ней меньший ток
- D в ней большее сопротивление
- E на ней большее напряжение

11. Две обмотки трансформатора включены последовательно. Каким будет напряжение на АВ?

- A 48 В
- B 12 В
- C 24 В
- D 0 В
- E 18 В



12. Автотрансформатор применяется для:

- A повышения постоянного напряжения
- B понижения постоянного напряжения
- C расширения предела измерения вольтметра
- D плавного регулирования напряжения
- E расширения предела измерения амперметра

13. В трансформаторе во вторичной обмотке с увеличением количества витков напряжение:

- A не изменяется
- B уменьшается
- C увеличивается

D может увеличиваться и уменьшаться

E уменьшается незначительно

14. Что означает коэффициент трансформации  $K=10$  для силового трансформатора?

A напряжение понижается в 10 раз

B напряжение повышается в 10 раз

C сила тока понижается в 10 раз

D напряжение во вторичной обмотке

E сила тока во вторичной обмотке

15. Можно ли включать сварочный агрегат в осветительную сеть?

A можно

B можно через автомат

C можно через предохранитель

D нельзя

E можно через УЗО

16. В машинах постоянного тока стальные полюса нужны:

A. Для крепления обмоток статора

B. Для уменьшения нагрева

C. Для лучшей проводимости

D. Для уменьшения вихревых токов

E. Для усиления магнитного поля

17. Для реверсирования двигателя постоянного тока нужно

A. Поменять местами щетки

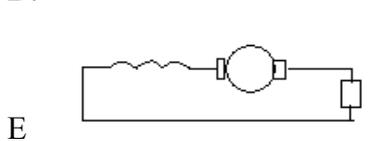
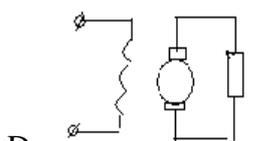
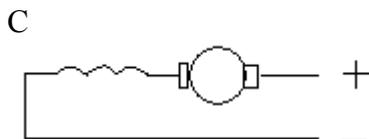
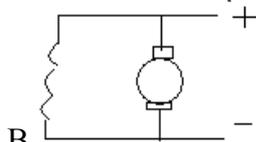
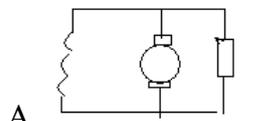
B. Подать переменный ток

C. Концы обмотки статора или якоря

D. Изменить полярность включения в сеть

E. Поменять местами концы обмотки статора и якоря

18. Выбрать схему включения генератора с параллельным возбуждением



19. Машина постоянного тока состоит

A. Статора, якоря, коллектора и щеток

B. Статора, короткозамкнутой обмотки ротора

C. Статора, ротора, коллектора, щеток

D. Статора, якоря, коллектора, щеток

E. Статора, якоря

20. Для чего в генераторах постоянного тока увеличивают число коллекторных пластин?

A. Для лучшего снятия тока

B. Для уменьшения пульсаций тока

C. Для усиления тока

D. Для увеличения напряжения

E. Для лучшего контакта

21. Какой вид тока вырабатывает генератор, если он имеет кольца и щетки?

A. переменный

B. Постоянный

C. Пульсирующий

D. И переменный и постоянный

E. Переменный и пульсирующий

22. Из какого материала изготавливают щетки электрических машин?

A. Алюминия

B. Железа

C. Нихрома

D. Кремния

E. Графита

23. Обмотка якоря изготавливается:

A. Короткозамкнутая медная

B. Типа «белчье колесо»

C. Медная в виде секций

D. Литая

E. Стальная

24. Электродвигатели постоянного тока применяются там, где необходимо:

A. Реверсирование

B. Более экономичное потребление энергии

C. Включение обмоток треугольником

D. Плавное регулирование скорости

E. Включение обмоток звездой

25. Для чего якорь набирается из отдельных стальных пластин, изолированных лаком?

A. Для уменьшения нагрева

- В. Для усиления магнитного поля
- С. Для прочности якоря
- Д. Для помещения обмотки якоря в пазы
- Е. Для простоты конструкции

## 2 вариант

1. Скорость вращения ротора асинхронного двигателя при изменении мощности нагрузки:

- А. не изменяется
- В. уменьшается
- С. увеличивается
- Д. уменьшается до нуля
- Е. изменяется скачкообразно

2. Скорость вращения электромагнитного поля асинхронного двигателя равна:

А.  $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$

В.  $E = BIV$

С.  $n_2 = \frac{60f}{p(1-S)}$

Д.  $V = mc^2/2$

Е.  $n_1 = \frac{60f}{P}$

3. Способность машины работать в режимах генератора и двигателя называется:

- А. инертность
- В. независимость
- С. возбудимость
- Д. обратимость
- Е. устойчивость

4. Скорость вращения ротора с 4 полюсами при частоте 50 Гц:

- А. 1000 об/мин
- В. 500 об/мин
- С. 1500 об/мин
- Д. 3000 об/мин

Е. 750 об/мин

5. Дистанционное управление трехфазным асинхронным двигателем производится:

- А. пакетным выключателем
- В. магнитным пускателем
- С. контроллером
- Д. рубильником
- Е. реостатом

6. Целью предремонтного осмотра электрических машин является:

- А. обеспечение проведения капитального ремонта
- В. подтверждение высокого качества выполнения ремонта
- С. выявление дефектов узлов и частей машин, определение объема работ
- Д. обеспечение проведения среднего ремонта
- Е. обеспечение проведения текущего ремонта

7. С увеличением частоты тока скорость вращения ротора асинхронного двигателя:

- А. уменьшается
- В. не изменяется
- С. падает до нуля
- Д. возрастает
- Е. возрастает, а затем уменьшается

8. В генераторе постоянного тока происходит преобразование...

- А. механической энергии в электрическую энергию;
- В. электрической энергии в тепловую энергию;
- С. тепловой энергии в электрическую энергию;

Д. электрической энергии в механическую энергию;

Е. электрической энергии в химическую энергию.

9. ЭДС  $e$  и ток  $i$  совпадают по направлению в ...

- А. коллекторе;
- В. трансформаторе;
- С. двигателе постоянного тока;
- Д. генераторе постоянного тока;
- Е. автотрансформаторе

10. Якорем машины постоянного тока называется...

- А. невращающаяся часть машины постоянного тока;
- В. неподвижная часть машины постоянного тока;
- С. неподвижная часть машины переменного тока;
- Д. вращающаяся часть машины переменного тока;
- Е. вращающаяся часть машины постоянного тока;

11. Часть генератора постоянного тока, обеспечивающая выпрямление переменного тока это ...

- А. выводные концы.
- В. коллектор;
- С. станина;
- Д. подшипники;
- Е. обмотка возбуждения.

12. Сердечники главных полюсов набирают из отдельных листов, электротехнической стали толщиной 0,35 – 0,5 мм, изолированных друг от друга слоем изоляции, для того, чтобы

- А. повысить потери на индукционные токи;
- В. уменьшить потери на вихревые токи;
- С. уменьшить потери электрической энергии;

Д. преобразовать электрическую энергию в механическую;  
Е. увеличить потери электрической энергии.

13. Часть сердечника главного полюса, обращенная к поверхности якоря выполняется более широкой и называется ...

А. полюсным наконечником;  
В. добавочным полюсом;  
С. обмоткой возбуждения;  
Д. коллектором;  
Е. щёткодержателем.

14. Обмотка якоря машины постоянного тока выполняется из ...

А. из изолированной медной проволоки или медной шины;  
В. из неизолированной стальной проволоки;  
С. из изолированной алюминиевой проволоки или стальной шины.  
Д. из коллекторных пластин.

Е. из изолированной стальной проволоки;

15. Компенсационную обмотку, улучшающую условия работы коллектора и щёток располагают ...

А. на коллекторе машины постоянного тока  
В. в щёткодержателях;  
С. в добавочных полюсах;

Д. на якоре машины постоянного тока;

Е. в полюсных наконечниках главных полюсов;

16. Назначение коллектора в двигателях постоянного тока

А. Для уменьшения потерь мощности от

перемагничивания и вихревых токов

В. Для выпрямления переменного тока

С. Чтобы разрешить току проходить и исключить проблему со спутыванием проводов

Д. Подвод постоянного тока к рабочей обмотке

Е. Для выпрямления постоянного тока

17. Почему сердечник якоря машины постоянного тока набирают из листов электротехнической стали, изолированных между собой?

А. Из конструктивных соображений.

В. Для уменьшения магнитного сопротивления потоку возбуждения.

С. Для уменьшения потерь мощности от перемагничивания и вихревых токов.

Д. Для шумопонижения

Е. Для увеличения потерь

18. Генератор постоянного тока смешанного возбуждения это генератор, имеющий:

А. Параллельную и последовательную обмотки возбуждения.

В. Параллельную обмотку возбуждения.

С. Последовательную обмотку возбуждения.

Д. Имеющий особые обмотки возбуждения.

Е. Имеющий обмотки намагничивания

19. Каково назначение реостата в цепи обмотки возбуждения двигателя постоянного тока?

А. Регулировать напряжение на зажимах.

В. Увеличивать пусковой момент.

С. Ограничить пусковой ток.

Д. Регулировать скорость вращения.

Е. Уменьшить пусковой момент.

20. Пусковой ток двигателя постоянного тока превышает номинальный ток из - за:

А. Отсутствия противоЭДС в момент пуска.

В. Малого сопротивления обмотки якоря.

С. Большого сопротивления обмотки возбуждения.

Д. Малого сопротивления обмотки возбуждения.

Е. Большого сопротивления обмотки якоря.

21. Генератор постоянного тока параллельного возбуждения это генератор, имеющий:

А. Параллельную обмотку возбуждения.

В. Последовательную обмотку возбуждения.

С. Параллельную и последовательную обмотки возбуждения.

Д. Имеющий особые обмотки возбуждения.

Е. Имеющий дополнительные обмотки.

22. Мощность, потребляемая двигателем постоянного тока из сети  $P_1 = 1,5$  кВт. Полезная мощность, отдаваемая двигателем в нагрузку,  $P_2 =$

1,125 кВт. Определить КПД двигателя в %..  
 А. 80%.  
 В. 85%.  
 С. 75%.  
 D. 90%.  
 E. 100%.

23. Часть генератора постоянного тока, обеспечивающая выпрямление переменного тока это ...  
 А. станина;  
 В. подшипники;  
 С. коллектор;  
 D. обмотка возбуждения;  
 E. выводные концы.

24. Часть сердечника главного полюса, обращенная к поверхности якоря выполняется более широкой и называется ...  
 А. добавочным полюсом;  
 В. обмоткой возбуждения;  
 С. коллектором;  
 D. полюсным наконечником;  
 E. щёткодержателем.

25. Компенсационную обмотку, улучшающую условия работы коллектора и щёток располагают ...  
 А. в полюсных наконечниках главных полюсов;  
 В. в щёткодержателях;  
 С. в добавочных полюсах;  
 D. на якоре машины постоянного тока;  
 E. на коллекторе машины постоянного тока.

### 3 вариант

1. Обмотка в статоре асинхронного двигателя?  
 А. Стальная проволочная  
 В. Короткозамкнутая алюминиевая  
 С. Стальная

короткозамкнутая  
 D. Медная проволочная  
 E. Алюминиевая проволочная

2. Для чего статор и ротор набирают из отдельных стальных пластин?  
 А. Для уменьшения вихревых токов  
 В. Для усиления магнитного поля  
 С. Для лучшей магнитной связи между обмотками  
 D. Для прочности  
 E. Чтобы не разорвался при вращении

3. Что произойдет с 3-фазным асинхронным двигателем, если после пуска одну фазу отключить?  
 А. Остановится через некоторое время  
 В. Сгорит обмотка  
 С. Ротор не остановится  
 D. Произойдет короткое замыкание  
 E. Ротор остановится

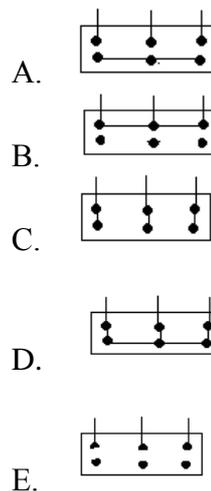
4. Как соединить обмотки статора, если в паспорте двигателя указано  $\Delta/Y - 220/380$ ? Двигатель включается в сеть с напряжением 380 В.  
 А. Треугольником  
 В. Можно треугольником или звездой  
 С. Параллельно  
 D. Звездой  
 E. Последовательно

5. Будет ли работать двигатель на постоянном токе?  
 А. Будет  
 В. Сгорит обмотка  
 С. Будет короткое замыкание обмоток  
 D. Работает на

постоянном и переменном токе  
 E. Нет

7. В паспорте двигателя имеется надпись  $\cos \varphi = 0.67$ . Что она означает?  
 А. Коэффициент мощности  
 В. Погрешность  
 С. Скольжение двигателя  
 D. Коэффициент полезного действия  
 E. Угол сдвига фаз

8. Указать схему включения обмоток статора треугольником



9. Куда подключается нулевой провод в 3-х фазном двигателе?  
 А. На среднюю точку обмоток статора  
 В. Никуда не включается  
 С. На предохранитель  
 D. На корпус двигателя  
 E. На землю

10. Кто изобрел 3-х фазный асинхронный двигатель?  
 А. Доливо Добровольский  
 В. Лодыгин  
 С. Якоби  
 D. Яблочков  
 E. Петров

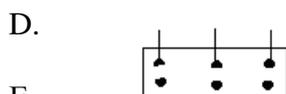
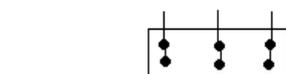
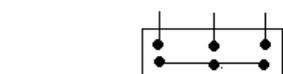
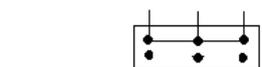
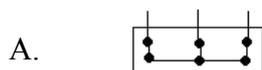
11. Двигатель называется асинхронный, потому что:

- A. вращение только в одну сторону
- B. Скорость ротора больше скорости магнитного поля статора
- C. Ротор может вращаться в любую сторону
- D. Скорость ротора меньше скорости магнитного поля статора
- E. Скорость ротора равна скорости магнитного поля статора

12. Как устроен асинхронный двигатель?

- A. Статор, ротор, коллектор, щетки
- B. Статор, якорь, коллектор, щетки
- C. Статор, якорь
- D. Статор, якорь, кольца, щетки
- E. Статор, ротор. Нет коллектора и щеток

13. Указать схему включения обмоток статора звездой



14. Что называется реверсированием двигателя?

- A. Изменение направления вращения
- B. Изменение скорости

вращения ротора

- C. Изменение полярности включения обмоток
- D. Плавное изменение скорости вращения ротора
- E. Электрическое торможение двигателя

15. Будет ли пуск двигателя без одной фазы?

- A. Будет.
- B. Двигатель сгорит
- C. Запустится и остановится.
- D. Двигатель не запустится
- E. Будет, но не сразу

16. У двигателя с фазным ротором:

- A. Обмотка ротора проволочная и он имеет коллектор и 3 щетки
- B. Обмотка ротора проволочная и он имеет 3 кольца и 3 щетки
- C. Обмотка ротора короткозамкнутая без колец и щеток
- D. Обмотка ротора проволочная и он имеет коллектор и 2 щетки
- E. Обмотка ротора короткозамкнутая с кольцами и щетками

17. При пуске асинхронного 3-х фазного двигателя пусковой ток

A в 5 -7 раз превышает номинальный ток двигателя

B в 10 – 20 раз превышает номинальный ток двигателя

C равен номинальному току

D меньше в 5-7 раз номинального тока двигателя

E равен нулю

18. Скорость вращения ротора асинхронного двигателя можно изменять:

A изменяя напряжение в сети

B трансформатором

C изменяя частоту тока в сети

D.изменяя частоту тока в сети и число пар полюсов двигателя

E скорость нельзя изменить

19. Что означает условный знак в схеме пуска двигателя?

A нагревающий элемент теплового реле

B контакт теплового реле

C магнитный пускатель

D контакт пускателя

E блокировочный контакт

20. На какое напряжение рассчитана катушка пускателя в данной схеме?

A 220 В

B 380 В

C на 220 и 380 В

D на 127 в

E не имеет значения на какое напряжение

21. На какой элемент указывает условный знак?

A нагревающий элемент теплового реле

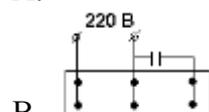
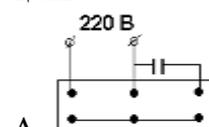
B контакт теплового реле

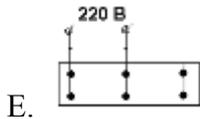
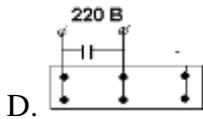
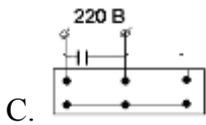
C магнитный пускатель

D контакт пускателя

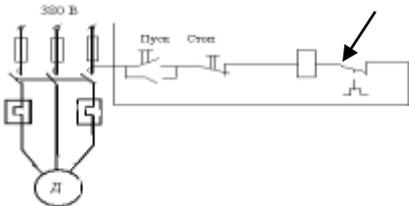
E блокировочный контакт

22. Указать схему включения 3- фазного двигателя в однофазную цепь



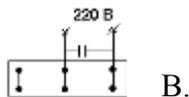
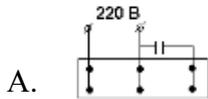


23. Для включения 3-х фазного двигателя в однофазную цепь без нагрузки емкость конденсатора нужно брать, учитывая мощность двигателя



- A. На 1000 Вт – 10 мкф
- B. На 100 т - 100 мкф
- C. На 10 Вт -100 мкф
- D. На 100 Вт - 10 мкф
- E. На 10 Вт – 10 мкф

24. Как выполнить реверсирование двигателя, включенного в однофазную цепь?



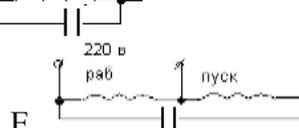
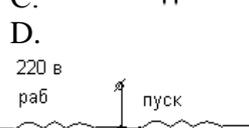
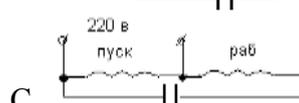
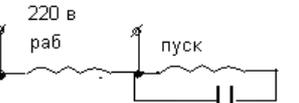
- C. Поменять местами фазу и нулевой провод
- D. Подать меньшее напряжение
- E. Подать большее напряжение

25. При включении 3-фазного двигателя в однофазную цепь он теряет мощность

- A. В 5 раз
- B. Не теряет мощность
- C. В 3 раза
- D. В 1,5 раза
- E. В 10 раз

#### 4 вариант

1. Указать верную схему включения однофазного двигателя



2. В однофазном двигателе рабочая и пусковая обмотки обозначают:

- A. В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub> рабочая, С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub> - пусковая
- B. С<sub>1</sub> и В<sub>1</sub> – рабочая, С<sub>2</sub> и В<sub>2</sub> - пусковая
- C. С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub> - рабочая, В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub> - пусковая
- D. А<sub>1</sub> и А<sub>2</sub> рабочая, В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub> пусковая
- E. С<sub>1</sub> и В<sub>2</sub> рабочая, С<sub>2</sub> и В<sub>1</sub> пусковая

3. Для реверсирования однофазного двигателя нужно:

A. Поменять местами рабочую с пусковой обмоткой

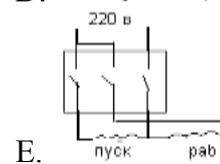
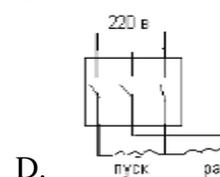
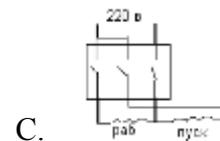
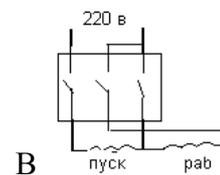
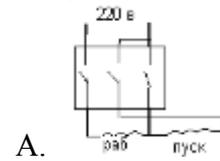
B. Поменять местами клеммы конденсатора

C. Поменять местами концы рабочей или пусковой обмоток

D. Поменять местами концы рабочей и пусковой обмоток

E. Поменять местами фазу с нулевым проводом

4. Указать схему пуска однофазного двигателя с помощью кнопки



5. Для чего служит конденсатор в однофазном асинхронном двигателе?

A. Для пуска двигателя. Сдвиг фаз по току.

B. Для уменьшения помех на радиоаппаратуру

C. Для устранения стробоскопического эффекта

D. Для реверсирования

E. Для снятия заряда с обмоток

6. Если после пуска однофазного двигателя конденсатор отключить, то:

А. Через некоторое время остановится.

В. Произойдет короткое замыкание.

С. Ротор будет двигаться в обратную сторону.

Д. Ротор не остановится

Е. Ротор остановится

7. Почему у синхронных генераторов напряжение снимают не с обмоток ротора, а с обмоток статора?

А щетки быстро стираются

В чтобы получить постоянное напряжение

С для уменьшения трения на коллекторе

Д щетки сторают, т.к напряжение достигает 6 кВ

Е чтобы получить переменное напряжение

8. Двигатель с фазным ротором состоит из:

А статора, ротора короткозамкнутого

В статора, 3 колец и 3 щеток, ротора с медной обмоткой

С статора, ротора короткозамкнутого, коллектора и щеток

Д статора, ротора короткозамкнутого, 3 колец и 3 щеток

Е может быть с кольцами и без них

9. У двигателя с расщепленным полюсом пуск происходит:

А конденсатором

В замыкание пусковой и рабочей обмоток

С за счет медных колец на полюсах статора

Д электролитическими конденсаторами

Е верно А и В

10. У синхронных машин

А скорость ротора < скорости поля статора

В скорость ротора > скорости поля статора

С скорость магнитного поля статора > скорости ротора

Д скорости ротора и магнитного поля статора равны

Е скорость магнитного поля статора < скорости ротора

11. Коллекторные машины переменного тока применяются:

А в станках

В в пылесосах, швейных машинах, полотерах, где нужны высокие скорости вращения

С в магнитофонах

Д в холодильниках

Е в станках и магнитофонах

12. Определить напряжение в первичной обмотке трансформатора, если во вторичной обмотке 36 в, количество витков в первичной обмотке  $W_1=1000$ , во вторичной  $W_2=94$

А. 220 В

В. 127 В

С. 1000 В

Д. 660 В

Е. 380 В

13. Для чего магнитопровод трансформатора

выполняется из

электротехнической стали, а не из другого материала?

А. Для лучшего охлаждения

В. Для уменьшения вихревых токов

С. Для уменьшения стоимости трансформатора

Д. Для лучшей магнитной связи между обмотками

Е. Для прочности

14. Для чего при передаче электроэнергии напряжение повышают до

большой величины (например 35 000 В)?

А. Для уменьшения тока в линии

В. Чтобы хватило всем потребителям

С. Для повышения коэффициента мощности

Д. Для увеличения сопротивления линии

Е. Для уменьшения сопротивления линии

15. Трансформатор – это:

А. Устройство, преобразующее переменный ток в постоянный

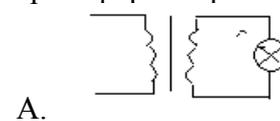
В. Устройство, преобразующее постоянный ток в переменный

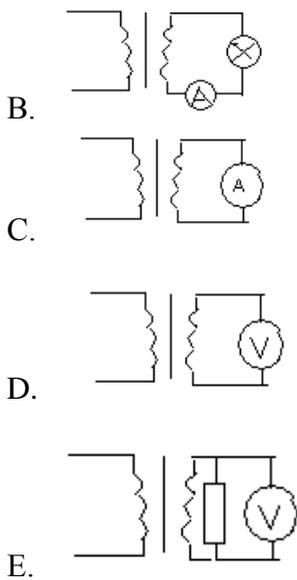
С. Устройство, для повышения или понижения переменного напряжения

Д. Устройство, для повышения или понижения постоянного напряжения

Е. Устройство, для выпрямления переменного тока

16. Какая схема соответствует режиму короткого замыкания трансформатора?





17. Первичная обмотка однофазного трансформатора имеет 1000 витков и включена в сеть постоянного напряжения 220 В. Вторичная обмотка имеет 100 витков. Определить напряжение во вторичной обмотке.

A. 22 В  
B. 12 В  
C. 2,2 В  
D. 36 В  
E. 0 В

18. Для чего магнитопровод трансформатора выполнен из отдельных листов, изолированных друг от друга лаком?

A. Для простоты сборки  
B. Для лучшей магнитной связи между обмотками  
C. Для уменьшения вихревых токов.  
D. Чтобы трансформатор не гудел  
E. Для экономии материала

19. В цепях какого тока применяют трансформаторы?

A. Постоянного  
B. Постоянного и переменного тока

C. Пульсирующего  
D. Переменного тока  
E. Постоянного с напряжением 220 В

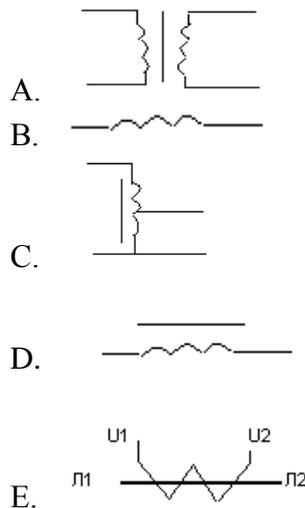
20. Что означает условный знак на схеме?

A. Трансформатор  
B. Трехфазный трансформатор  
C. Трансформатор тока  
D. Трансформатор напряжения  
E. Автотрансформатор

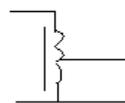
21. Почему вторичная обмотка понижающего трансформатора имеет большее сечение, чем первичная?

A. В ней больше ток  
B. В ней меньше сопротивление  
C. В ней меньше ток  
D. В ней больше сопротивление  
E. В ней меньше напряжение

22. Указать условный знак трансформатора тока..



23. Что означает коэффициент трансформации трансформатора тока 50/5 ?



A. Во сколько раз повышается  
B. 50- первичное 5- вторичное напряжение  
C. 50- ток во вторичной обмотке, 5 –ток в первичной обмотке ток  
D. 50- сопротивление первичной обмотки напряжение, 5- сопротивление вторичной обмотки  
E. 50 – номинальный ток в первичной обмотке, 5- номинальный ток во вторичной обмотке

24. Определить силу тока, если  $K_T=50/5$ . Показание амперметра 20 А

A. 20 А  
B. 100 А  
C. 2000 А  
D. 200 А  
E. 2 А

25. Каким должно быть напряжение во вторичной обмотке сварочного трансформатора?

A. 65 – 70 В  
B. 36 – 40 В  
C. 12 – 15 В  
D. 380 В  
E. 220 В

### 5 вариант

1. Обмотка в статоре асинхронного двигателя?

A. Стальная проволочная  
B. Короткозамкнутая алюминиевая  
C. Стальная короткозамкнутая  
D. Медная проволочная  
E. Алюминиевая проволочная

2. Для чего статор и ротор набирают из отдельных стальных пластин?

A. Для уменьшения вихревых токов

- В.. Для усиления магнитного поля  
 С. Для лучшей магнитной связи между обмотками  
 D. Для прочности  
 E. Чтобы не разорвался при вращении

3. Что произойдет с 3-фазным асинхронным двигателем, если после пуска одну фазу отключить?

- A. Остановится через некоторое время  
 B. Сгорит обмотка  
 C. Ротор не остановится  
 D. Произойдет короткое замыкание  
 E. Ротор остановится

4. Как соединить обмотки статора, если в паспорте двигателя указано

$\Delta / Y - 220 / 380$ ? Двигатель включается в сеть с напряжением 380 В.

- A. Треугольником  
 B. Можно треугольником или звездой  
 C. Параллельно  
 D. Звездой  
 E. Последовательно

5. Будет ли работать двигатель на постоянном токе?

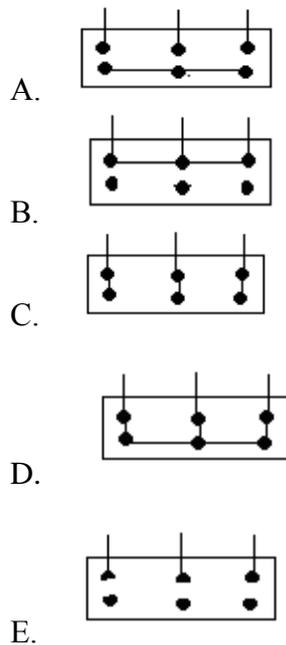
- A. Будет  
 B. Сгорит обмотка  
 C. Будет короткое замыкание обмоток  
 D. Работает на постоянном и переменном токе  
 E. Нет

7. В паспорте двигателя имеется надпись  $\cos \varphi = 0.67$ . Что она означает?

- A. Коэффициент мощности  
 B. Погрешность  
 C. Скольжение двигателя  
 D. Коэффициент полезного

действия  
 E. Угол сдвига фаз

8. Указать схему включения обмоток статора треугольником



9. Куда подключается нулевой провод в 3-х фазном двигателе?

- A. На среднюю точку обмоток статора  
 B. Никуда не включается  
 C. На предохранитель  
 D. На корпус двигателя  
 E. На землю

10. Кто изобрел 3-х фазный асинхронный двигатель?

- A. Доливо Добровольский  
 B. Лодыгин  
 C. Якоби  
 D. Яблочков  
 E. Петров

11. Двигатель называется асинхронный, потому что:

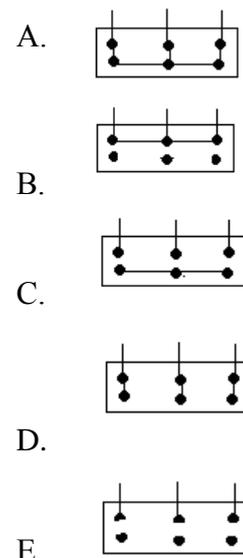
- A. вращение только в одну сторону  
 B. Скорость ротора больше скорости магнитного поля статора  
 C. Ротор может вращаться в любую сторону

D. Скорость ротора меньше скорости магнитного поля статора  
 E. Скорость ротора равна скорости магнитного поля статора

12. Как устроен асинхронный двигатель?

- A. Статор, ротор, коллектор, щетки  
 B. Статор, якорь, коллектор, щетки  
 C. Статор, якорь  
 D. Статор, якорь, кольца, щетки  
 E. Статор, ротор. Нет коллектора и щеток

13. Указать схему включения обмоток статора звездой



14. Что называется реверсированием двигателя?

- A. Изменение направления вращения  
 B. Изменение скорости вращения ротора  
 C. Изменение полярности включения обмоток  
 D. Плавное изменение скорости вращения ротора  
 E. Электрическое торможение двигателя

15. Будет ли пуск

- двигателя без одной фазы?  
 А.. Будет.  
 В. Двигатель сгорит  
 С. Запустится и остановится.  
 D. Двигатель не запустится  
 E. Будет, но не сразу
16. У двигателя с фазным ротором:  
 А. Обмотка ротора проволочная и он имеет коллектор и 3 щетки  
 В. Обмотка ротора проволочная и он имеет 3 кольца и 3 щетки  
 С. Обмотка ротора короткозамкнутая без колец и щеток  
 D. Обмотка ротора проволочная и он имеет коллектор и 2 щетки  
 E. Обмотка ротора короткозамкнутая с кольцами и щетками
17. При пуске асинхронного 3-х фазного двигателя пусковой ток  
 А в 5 -7 раз превышает номинальный ток двигателя  
 В в 10 – 20 раз превышает номинальный ток двигателя  
 С равен номинальному току  
 D меньше в 5-7 раз номинального тока двигателя  
 E равен нулю
18. Скорость вращения ротора асинхронного двигателя можно изменить:  
 А изменяя напряжение в сети  
 В трансформатором  
 С изменяя частоту тока в сети  
 D.изменяя частоту тока в сети и число пар полюсов двигателя  
 E скорость нельзя

- изменить
19. Что означает условный знак в схеме пуска двигателя?  
 А нагревающий элемент теплового реле  
 В контакт теплового реле  
 С магнитный пускатель  
 D контакт пускателя  
 E блокировочный контакт
20. Что происходит в двигателе постоянного тока?  
 А. Электрическая энергия преобразуется в механическую путем воздействия электромагнитных сил на проводники сток, находящиеся в магнитном потоке.  
 В. Индуцируется ЭДС.  
 С. Механическая энергия преобразуется в электрическую путем индуктирования ЭДС и тока в якорной обмотке.  
 D. Возникает электромагнитная сила.  
 E. Индуцируется ЭДС и возникает электромагнитная сила.
21. Какой коллекторный генератор постоянного тока боится короткого замыкания?  
 А. С последовательным возбуждением.  
 В. С независимым возбуждением.  
 С. С параллельным возбуждением.  
 D. Со смешанным возбуждением.
22. Как изменяют направление вращения двигателя постоянного

- тока с электромагнитным возбуждением?  
 А. Изменением полярности питающего напряжения.  
 В. Изменением направления токов в обмотках возбуждения и якоря.  
 С. Изменением полярности питающего напряжения и направления тока в обмотке якоря.  
 D. Изменением направления тока в обмотке возбуждения или в обмотке якоря.  
 E. Изменением полярности питающего напряжения и направления тока в обмотке возбуждения.
23. Что происходит в якоре генератора постоянного тока при нагрузке?  
 А. Индуцируется ЭДС.  
 В. Электрическая энергия преобразуется в механическую путем воздействия электромагнитных сил на проводники сток, находящиеся в магнитном потоке.  
 С. Механическая энергия преобразуется в электрическую путем индуктирования ЭДС и тока в якорной обмотке.  
 D. Возникает электромагнитная сила.  
 E. Индуцируется ЭДС и возникает электромагнитная сила.
24. Из каких основных частей состоит коллекторная машина постоянного тока?  
 А. Индуктор, якорь, коллектор, щеточный узел.

- В. Станина, ярмо, обмотка возбуждения, болты, коллектор, щетки.  
 С. Обмотка возбуждения, якорная обмотка, щетки.  
 Д. Полюсы, ярмо, болты, коллекторные пластины, щетки.

25. Для чего служит коллекторно-щеточный узел в генераторе постоянного тока?

- А. Для механического выпрямления переменного тока в постоянный и электрического соединения якорной обмотки с сетью.  
 В. Для электрического соединения якорной обмотки с сетью.  
 С. Для механического выпрямления переменного тока в постоянный.  
 Д. Для преобразования постоянного тока в переменный ток в проводниках обмотки якоря.  
 Е. Для преобразования постоянного тока в переменный ток в проводниках обмотки якоря и электрического соединения последней с сетью.

### 6 вариант

1. Как изменится частота вращения магнитного поля при увеличении пар полюсов асинхронного трехфазного двигателя?  
 А. увеличится  
 В. останется прежней  
 С. уменьшится  
 Д. не влияет на параметры
2. С какой целью при пуске в цепь обмотки фазного ротора

асинхронного двигателя вводят дополнительное сопротивление?

- А. для получения минимального начального пускового момента.  
 В. для получения максимального начального пускового момента.  
 С. для уменьшения механических потерь и износа колец и щеток.  
 Д. для увеличения износа колец и щеток.

3. Перечислите режимы работы асинхронного электродвигателя

- А. Режим двигателя  
 В. Режим электромагнитного тормоза  
 С. Режим генератора  
 Д. Все перечисленные

4. Для чего сердечники главных полюсов набирают из отдельных листов, электротехнической стали толщиной 0,35 – 0,5 мм, изолированных друг от друга слоем изоляции?

- А. Для уменьшения потерь мощности от перемагничивания и вихревых токов  
 В. Из конструктивных соображений  
 С. Для уменьшения магнитного сопротивления потоку возбуждения  
 Д. Для шумопонижения

5. В генераторе постоянного тока происходит преобразование...

- А. тепловой энергии в электрическую энергию  
 В. механической энергии в электрическую энергию  
 С. электрической энергии в тепловую энергию

Д. электрической энергии в механическую энергию

6. Статор машины постоянного тока предназначен для создания ...

- А. тока  
 В. магнитного потока машины  
 С. вращающего электромагнитного поля  
 Д. мощности тока

7. При последовательном возбуждении машины постоянного тока обмотка возбуждения подключается...

- А. встречно с якорной обмоткой  
 В. последовательно с якорной обмоткой  
 С. параллельно якорной обмотке  
 Д. к отдельному источнику постоянного тока

8. Обмотки добавочных полюсов машины служат для обеспечения...

- А. создания магнитного потока в зоне коммутации  
 В. создания из МДС рабочего потока машины  
 С. компенсации реакции якоря  
 Д. коммутации

9. Какое определение якорной обмотки наиболее близко к реальному представлению?

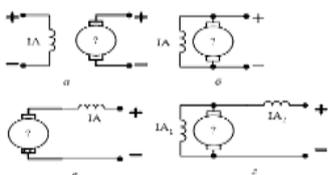
- А. Замкнутая на себя система проводников, уложенных по определенной схеме, соединенная с внешней сетью с помощью коллектора и щеток.  
 В. Разомкнутая система проводников, уложенная по определенной схеме, и соединенная с

коллекторными пластинами и щетками.  
 С. Совокупность секций, коллекторных пластин и щеток.  
 Д. Совокупность проводников, припаянная к коллекторным пластинам, имеющая электрическое соединение со щетками.

10. Как уменьшить искрение щеток в коллекторных машинах постоянного тока малой мощности?

- А. Постановкой дополнительных полюсов.
- В. Сдвигом щеток с геометрической нейтральной.
- С. Постановкой компенсационной обмотки.
- Д. Сдвигом щеток и постановкой дополнительных полюсов.

11. Выберите электрическую схему коллекторной МПТ с параллельным возбуждением ...



- А. б
- В. в
- С. а
- Д. г

12. Что называется электрической машиной?

- А. устройство, предназначенное для электрификации и автоматизации производства;
- В. электрическая машина, частота вращения ротора которой равна частоте вращения магнитного поля в воздушном зазоре.

С. электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования одной системы переменного тока в другую;

Д. электромеханический преобразователь, в котором преобразуется механическая энергия в электрическую и наоборот

13. Сердечники главных полюсов набирают из отдельных листов, электротехнической стали толщиной 0,35 – 0,5 мм, изолированных друг от друга слоем изоляции, для того, чтобы...

- А. уменьшить потери электрической энергии;
- В. уменьшить потери на вихревые токи;
- С. повысить потери на индукционные токи;
- Д. преобразовать электрическую энергию в механическую

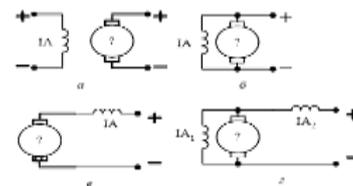
14. Дайте определение двигателя.

- А. машина, преобразующая тепловую энергию в электрическую энергию;
- В. машина, преобразующая электрическую энергию в тепловую энергию;
- С. машина, преобразующая механическую энергию в электрическую энергию;
- Д. машина, преобразующая электрическую энергию в механическую энергию;

15. Что применяют для подавления влияния реакции якоря?

- А. сложно петлевую обмотку
- В. уменьшение ЭДС реактивной
- С. добавочные полюса
- Д. увеличение воздушного зазора под главными полюсами

16. Выберите электрическую схему коллекторной машины постоянного тока с последовательным возбуждением...



- А. в
- В. г
- С. а
- Д. б

17. На каком законе электротехники основан принцип действия трансформатора?

- А. На законе электромагнитных сил.
- В. На законе электромагнитной индукции
- С. На законе Ома.
- Д. На первом законе Кирхгофа.
- Е. На втором законе Кирхгофа.

18. Что произойдет с трансформатором, если его включить в сеть постоянного напряжения той же величины?

- А. Может сгореть.
- В. Ничего не произойдет
- С. Уменьшится основной магнитный поток.
- Д. Уменьшится магнитный поток

рассеяния первичной обмотки.

19. В каком режиме работает измерительный трансформатор напряжения?

- А. В режиме холостого хода.
- В. В режиме близком к режиму холостого хода.
- С. В номинальном режиме.
- Д. В режиме короткого замыкания.
- Е. В режиме близком к режиму короткого замыкания.

20. В каком режиме работает измерительный трансформатор тока?

- А. В режиме холостого хода.
- В. В режиме близком к режиму холостого хода.
- С. В режиме близком к режиму короткого замыкания.
- Д. В номинальном режиме.
- Е. В режиме короткого замыкания.

21. Почему пусковой момент асинхронного двигателя при введении реостата фазный ротор увеличивается?

- А. Увеличивается активная составляющая роторного тока.
- В. Увеличивается индуктивное сопротивление ротора.
- С. Увеличивается активное сопротивление ротора.
- Д. Уменьшается роторный ток.

22. Фазы ротора трехфазного асинхронного двигателя включают:

- А. Параллельно.
- В. Звездой.
- С. Последовательно.
- Д. Параллельно и последовательно.

23. Какой ток компенсирует синхронный компенсатор?

- А. Активно-индуктивный.
- В. Емкостной.
- С. Активный.
- Д. Индуктивный
- Е. Активно-емкостной.

24. Как называется перевозбужденный синхронный двигатель, работающий в режиме холостого хода и подключаемый параллельно активно-индуктивной нагрузке?

- А. Индуктивный компенсатор.
- В. Компенсатор.
- С. Емкостной компенсатор.
- Д. Синхронный компенсатор.

25. Какой ток потребляет из сети перевозбужденный синхронный двигатель, работающий в режиме холостого хода?

- А. Емкостной.
- В. Индуктивный.
- С. Активно-индуктивный.
- Д. Активный.

### 7 вариант

1.Повышающий трансформатор на электростанциях используется для ...

- А. уменьшения потерь энергии на линии электропередач
- В.увеличения частоты передаваемого напряжения
- С.уменьшения частоты передаваемого напряжения

- Д. увеличения силы тока в линиях электропередач
- Е.уменьшения силы тока в линиях электропередач

2.Признак понижающего трансформатора

- А.  $K < 1$
- В.  $K > 1$
- С.  $K = 1$
- Д.  $K \neq 1$
- Е.  $K < 0$

3. Трансформатор будет повышающим, если...

- А.  $U_1 > U_2$
- В.  $U_1 < U_2$
- С.  $E_1 = E_2$
- Д.  $U_1 > E_1$
- Е.  $E_1 < U_1$

4.Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя основан на:

- А. взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с током ротора.
- В.взаимодействии магнитного поля ротора с током статора.
- С.взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с общим магнитным полем ротора.
- Д. взаимодействии тока ротора с магнитным полем якоря.
- Е.взаимодействии магнитного поля якоря с током статора.

5.Укажите типы электрических машин представленных на рисунке.



1



2



3

- А. 1 - асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;  
 2 - асинхронный двигатель с фазным ротором;  
 3 – двигатель постоянного тока.
- В. 1 - асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;  
 2 – двигатель постоянного тока.  
 3 - асинхронный двигатель с фазным ротором.
- С. 1 - асинхронный двигатель с фазным ротором;  
 2 – двигатель постоянного тока.  
 3 - асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

6. Рассчитать и выбрать плавкую вставку для защиты асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором с током двигателя 15А, если кратность пускового тока равна 5,5.

А. 20 А.  
 В. 45 А.  
 С. 25 А.  
 D. 35 А.  
 Е. 75 А.

7. Число пар полюсов асинхронного двигателя увеличили в два раза. Как изменится число оборотов вала двигателя?

А. Увеличится в два раза.  
 В. Не изменится.  
 С. Уменьшится в два раза.  
 D. Уменьшится в три раза.  
 Е. Увеличится в четыре раза.

8. Какое действие нужно предпринять для резкой остановки вращения вала

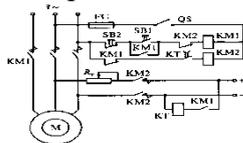
асинхронного двигателя после нажатия на кнопку «Стоп»?

А. Оба действия верны.  
 В. Подать постоянное напряжение на статорные обмотки двигателя.  
 С. Произвести остановку двигателя противовключением.

9. Определите для асинхронного двигателя число  $n$  оборотов в минуту вращающегося поля при частоте тока  $f_1 = 50$  Гц и шестиполюсном статоре.

А. 500 об/мин;  
 В. 1000 об/мин;  
 С. 1500 об/мин.  
 D. 3000 об/мин.  
 Е. 1800 об/мин.

10. Как называется электрическая схема, изображенная на рисунке?



А. Схема нереверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с применением динамического торможения.  
 В. Схема управления пуском трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором;  
 С. Схема пуска трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник»;  
 D. Схема управления трехфазного асинхронного

двигателя с короткозамкнутым ротором переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник».

11. Рассчитать скорость вращения вала асинхронного двигателя, если частота вращения магнитного поля статора равна 3000 об/мин, а скольжение двигателя равно 0,02.

А.  $n = 2940$  об/мин.  
 В.  $n = 2960$  об/мин.  
 С.  $n = 2980$  об/мин.  
 D.  $n = 2890$  об/мин.  
 Е.  $n = 2370$  об/мин.

12. Укажите деталь, не принадлежащую асинхронным машинам?



1 2 3

А. 1  
 В. 2  
 С. 3

13. Укажите основные недостатки трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при прямом пуске в ход.

А. Большой пусковой момент  
 В. Малый пусковой момент и большой пусковой ток.  
 С. Малый пусковой ток.  
 D. Наименьший пусковой ток.  
 Е. Наибольший пусковой момент.

14. Для создания вращающегося магнитного

поля в асинхронных электродвигателях служит:

- А. главный полюс
- В. ротор
- С. статор
- Д. дополнительный полюс
- Е. обмотка возбуждения

15. Величина скольжения асинхронной машины в двигательном режиме определяется по формуле:

А.  $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$  ;

В.  $s = \frac{n_1 + n_2}{n_1}$  ;

С.  $s = \frac{n_1 + n_2}{n_2}$  .

16. Обмотка ротора, выполненная по типу беличьего колеса, называется:

- А. фазной
- В. якорной
- С. короткозамкнутой
- Д. дополнительной
- Е. обмоткой возбуждения

17. Реверсирование асинхронного двигателя осуществляется:

- А. включением пускового реостата.
- В. изменением порядка чередования фаз.
- С. изменением числа пар полюсов магнитного поля статора.
- Д. изменением числа пар полюсов ротора.
- Е. изменением числа пар полюсов статора.

18. Определите скольжение асинхронного двигателя, если частота вращения ротора 950 об/мин., число полюсов  $2P=6$ .

- А. 0,01
- В. 0,95
- С. 0,05
- Д. 0,98

Е. 0,99

19. Какая максимальная скорость вращения магнитного поля статора асинхронного двигателя, включенного в сеть переменного тока промышленной частоты?

- А. 1460 об/мин
- В. 3000 об/мин
- С. 500 об/мин
- Д. 1500 об/мин
- Е. 1800 об/мин

20. С какой целью на роторе синхронного двигателя иногда размещают дополнительную короткозамкнутую обмотку?

- А. Для раскручивания ротора при запуске.
- В. Для уменьшения вращающего момента.
- С. Для увеличения к.п.д.
- Д. Для регулирования скорости вращения.
- Е. Для уменьшения токов.

21. К какому источнику электрической энергии подключается обмотка статора синхронного двигателя?

- А. К источнику однофазного переменного тока.
- В. К источнику постоянного тока.
- С. К источнику двухфазного переменного тока.
- Д. К источнику трехфазного тока
- Е. К источнику трехфазного переменного тока

22. В качестве каких устройств используются синхронные машины?

- А. генераторы

- В. двигатели
- С. синхронные компенсаторы
- Д. всех перечисленных

23. С какой скоростью вращается ротор синхронного генератора?

- А. с той же скоростью, что и круговое магнитное поле токов статора
- В. со скоростью, большей скорости вращения поля токов статора
- С. со скоростью, меньшей скорости вращения поля токов статора
- Д. скорость вращения ротора определяется заводом-изготовителем

24. Укажите неверное утверждение о характеристике синхронной машины:

- А. у синхронной машины частота вращения не зависит от частоты тока с сети
- В. обмотка возбуждения питается постоянным током и расположена на роторе
- С. ротор бывает неявнополюсным и явнополюсным
- Д. скорость вращения ротора совпадает со скоростью вращения поля

25. Дайте определение однофазной обмотке статора синхронной МПТ...

- А. обмотка, выполненная аналогично одной фазе трехфазной обмотки, с той лишь разницей, что катушки этой обмотки занимают 2/3 пазов сердечника статора
- В. обмотка, где каждая сторона катушки

полностью заполняет паз сердечника статора  
 С. обмотка, которая представляет собой несколько простых петель обмоток уложенных на одном якоре и присоединенных к коллектору  
 Д. обмотка, в которой последовательно соединяются секции, находящиеся под разными парами полюсов

### 8 вариант

1. Трансформатор – это устройство ...  
 А. служащее для преобразования силы и напряжения переменного тока при неизменной частоте.  
 В. служащее для преобразования силы и напряжения постоянного тока при неизменной частоте;  
 С. служащее для получения во внешней цепи постоянного по направлению тока;  
 Д. преобразующее механическую энергию в электрическую;  
 Е. преобразующее электрическую энергию в механическую;
2. Если  $N_1 > N_2$ , то трансформатор...  
 А. повышающий  
 В. понижающий  
 С. измерительный  
 Д. двигательный  
 Е. генераторный
3. Работа трансформатора основана на ...  
 А. законе Ома;  
 В. законе Джоуля – Ленца;

С. явлении электромагнитной индукции;  
 Д. законах динамики;  
 Е. законах Кирхгофа.

4. Первичная обмотка:  
 А. подключается к источнику переменного тока.  
 В. соединяется с нагрузкой;  
 С. подключается к источнику постоянного тока;  
 Д. соединяется с потребителем;  
 Е. подключается к вторичной обмотке.
5. Режим работы трансформатора, при котором в цепь его вторичной обмотки включена нагрузка с отличным от нуля сопротивлением называется:  
 А. холостым;  
 В. режимом короткого замыкания;  
 С. рабочим;  
 Д. нерабочим;  
 Е. неисправным.
6. Коэффициент трансформации рассчитывается по формуле...  
 А.  $k = N_1 / N_2$  ;  
 В.  $k = E_2 / E_1$  ;  
 С.  $k = U_2 / U_1$  ;  
 Д.  $k = N_2 / N_1$  ;  
 Е.  $k = P_2 / P_1$  ;
7. У понижающего трансформатора...  
 А.  $k > 1$  ;  
 В.  $k < 1$  ;  
 С.  $k = 1$  ;  
 Д.  $k = 0$  ;  
 Е.  $0 < k$  .
8. Существует рабочий режим трансформатора и режим...  
 А. пустой;  
 В. холостой;  
 С. любой;  
 Д. не рабочий.  
 Е. вторичный
9. Вторичная обмотка:  
 А. подключается к источнику постоянного тока;  
 В. подключается к источнику переменного тока;  
 С. соединяется с нагрузкой.  
 Д. соединяется с потребителем;  
 Е. соединяется с добавочной обмоткой.
10. Первичная обмотка трансформатора содержит 185 витков, вторичная – 65. Какой это трансформатор?  
 А. понижающий;  
 В. повышающий;  
 С. измерительный;  
 Д. разделительный;  
 Е. добавочный
11. Трансформатор будет понижающим, если ...  
 А.  $U_1 > E_1$  ;  
 В.  $E_1 = E_2$  ;  
 С.  $U_1 > U_2$  ;  
 Д.  $U_1 < U_2$  ;  
 Е.  $E_1 > U_1$  .
12. Обмотка трансформатора, которую подключают к приёмнику переменного напряжения, называется:  
 А. первичной;  
 В. вторичной;  
 С. нагрузочной;  
 Д. потребительской;  
 Е. добавочной.

13. Повышающий трансформатор понизит напряжение сети ...  
 А. может;  
 В. не может;  
 С. может, в зависимости от предназначения;  
 D. может, но в определенных условиях;  
 Е. не всегда.
14. Как обозначаются начала первичной обмотки трехфазного трансформатора?  
 А. А, В, С  
 В. x, y, z  
 С. a, b, c  
 D. X, Y, Z  
 Е. А, X, Y
15. На каком законе электротехники основан принцип действия трансформатора?  
 А. На законе электромагнитной индукции.  
 В. На законе электромагнитных сил.  
 С. На законе Ома.  
 D. На первом законе Кирхгофа.  
 Е. На втором законе Кирхгофа.
16. На что влияет ЭДС самоиндукции вторичной обмотки трансформатора?  
 А. Уменьшает ток вторичной обмотки трансформатора.  
 В. Уменьшает активное сопротивление вторичной обмотки.  
 С. Увеличивает активное сопротивление вторичной обмотки.  
 D. Увеличивает ток первичной обмотки трансформатора.  
 Е. Увеличивает реактивное сопротивление вторичной обмотки.
17. Для повышения электрического напряжения при передаче электрической энергии на большие расстояния используется?  
 А. генератор  
 В. аккумулятор  
 С. трансформатор  
 D. стабилизатор  
 Е. двигатель
18. Как называется режим, при котором выводы вторичной обмотки соединены накоротко?  
 А. режим короткого замыкания;  
 В. режим холостого хода;  
 С. работа трансформатора с нагрузкой;  
 D. номинальный режим;  
 Е. рабочий режим.
19. Формула для определения коэффициента трансформации?  
 А.  $P1/P2$   
 В.  $U1/U2$   
 С.  $P2/P1$   
 D.  $U2/U1$   
 Е.  $N2/N1$
20. Трансформаторы нашли широкое применение ...  
 А. в линиях электропередачи;  
 В. в технике связи;  
 С. в автоматике;  
 D. в измерительной технике;  
 Е. во всех перечисленных областях.
21. Основные части трансформатора ...  
 А. обмотки, магнитопровод;  
 В. преобразователь напряжения, обмотки;  
 С. электромагнит, катушки; расширитель;  
 D. обмотки, электроприёмник;  
 Е. электромагнит, расширитель.
22. Сердечник трансформатора собирают, из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга для того, чтобы...  
 А. увеличить потери электрической энергии;  
 В. повысить потери на вихревые токи;  
 С. уменьшить потери на вихревые токи;  
 D. понизить электрическую энергию;  
 Е. повысить электрическую энергию.
23. Как соединены первичная и вторичная обмотки трехфазного трансформатора, если трансформатор имеет 11 группу (Y – звезда, Δ – треугольник)?  
 А. Y/Δ  
 В. Δ/Y  
 С. Y/Y  
 D. Δ/Δ
24. На что влияет ЭДС самоиндукции первичной обмотки трансформатора?  
 А. Увеличивает активное сопротивление первичной обмотки.  
 В. Уменьшает активное сопротивление первичной обмотки.  
 С. Уменьшает ток первичной обмотки трансформатора.  
 D. Увеличивает ток вторичной обмотки трансформатора.  
 Е. Уменьшает реактивное сопротивление первичной обмотки.

25. Что произойдет с трансформатором, если его включить в сеть постоянного напряжения той же величины?  
 А. Может сгореть.  
 В. Ничего не произойдет.  
 С. Уменьшится основной магнитный поток.  
 D. Уменьшится магнитный поток рассеяния первичной обмотки.  
 E. Уменьшится реактивное сопротивление первичной обмотки.

### 9 вариант

1. Куда нужно подключиться в трехфазную цепь на 380 В, чтобы получить 220 В?  
 А к двум фазам  
 В к трем фазам  
 С к нулю и заземлению  
 D к фазе и к нулевому проводу  
 E к двум нулевым проводникам
2. Переменный ток – это ток, который  
 А не изменяется ни по величине, ни по времени  
 В который проходит с интервалом  
 С пульсирует  
 D изменяется по величине и по времени  
 E изменяется по величине и не изменяется по времени
3. Частота тока - это  
 А время, за которое совершается одно колебание  
 В время, за которое совершается два колебания  
 С число колебаний за 1 мин  
 D число колебаний за 1 сек

- Е число колебаний за 2 мин
4. На каком принципе основана работа асинхронного двигателя?  
 А на постоянном магнитном поле статора  
 В на вращающемся магнитном поле статора  
 С на пульсирующем магнитном поле статора  
 D на взаимодействии постоянных магнитных полей статора и ротора  
 E на самоиндукции

5. В паспорте двигателя указана мощность 0,18 кВт. Перевести в ватты.  
 А 18 Вт  
 В 1800 Вт  
 С 18000 Вт  
 D 180 Вт  
 E 1,8 Вт
6. Каково назначение разделительного трансформатора?  
 А применяются для исключения опасности случайного одновременного прикосновения к «земле» и токоведущим частям, которые могут оказаться под напряжением в случае повреждения изоляции.  
 В для повышения напряжения  
 С для понижения напряжения  
 D для сварочного агрегата  
 E для индукционных счетчиков

7. Что означает условный знак в схеме?  
 А нагревающий элемент теплового реле  
 В кнопка «Пуск»  
 С кнопка «Стоп»  
 D контакт реле

- Е контакт теплового реле
8. Что означает условный знак в схеме?  
 А нагревающий элемент теплового реле  
 В кнопка «Пуск»  
 С кнопка «Стоп»  
 D контакт реле  
 E контакт теплового реле
9. Что означает условный знак в схеме?  
 А резистор  
 В щиток  
 С предохранитель  
 D обмотка магнитного пускателя, реле  
 E конденсатор

10. К какой емкости нужно включить конденсатор для включения трехфазного двигателя мощностью 200 Вт в однофазную цепь без нагрузки?  
 А 2 мкФ  
 В 0,2 мкФ  
 С 200 мкФ  
 D 20 мкФ  
 E 2000 мкФ
11. Изоляцию обмоток двигателя считают нормальной, если ее сопротивление:  
 А не  $< 0,5$  мОм  
 В не более 0,5 кОм  
 С не менее 0,5 Ом  
 D не менее 5 мОм  
 E не менее 4 мОм
12. Переменный ток получают:  
 А асинхронным генератором  
 В асинхронным двигателем  
 С синхронным генератором  
 D синхронным генератором и синхронным двигателем  
 E синхронным двигателем

13. Статор асинхронного двигателя состоит из:

- А алюминиевых пластин
- В медных пластин
- С стальных пластин
- Д из кремниевых пластин
- Е из германиевых пластин

14. Две обмотки трансформатора, на 12 В каждая, включены последовательно.

Вольтметр, подключенный к ним показал 0 В. Почему?

- А обмотки включены встречно
- В обмотки включены согласно
- С большое сопротивление обмоток
- Д малое сопротивление обмоток
- Е большое напряжение

15. Почему коэффициент полезного действия машины не достигает 100%?

- А потому, что маленькое напряжение
- В потому, что большое напряжение
- С потому, что возникают потери энергии (нагрев, трение, вихревые токи)
- Д не достаточная мощность машины
- Е малая сила тока

16. В каких единицах измеряется полная мощность?

- А Вт (ватт)
- В Вар (вольт ампер реактивный)
- С ВА (вольт ампер)
- Д Дж (джоуль)
- Е кОм (килоом)

17. Что вызывают вихревые токи в машинах?

- А нагрев обмоток

- В трение в подшипниках
- С нагрев магнитопровода
- Д нагрев обмоток и магнитопровода
- Е короткое замыкание

18. Для чего применяется мегомметр?

- А для измерения сопротивления обмоток
- В для измерения мощности
- С для измерения емкости
- Д для измерения сопротивления изоляции
- Е для проверки напряжения

19. Почему двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением нельзя включать без нагрузки?

- А не запустится
- В двигатель идет в «разнос», т.е набирает большие обороты
- С сгорит обмотка якоря
- Д сгорит обмотка статора
- Е перегреются подшипники

20. Коэффициент мощности синхронного двигателя равен:

- А 0,5
- В 0,7
- С 0,9
- Д 1
- Е 0,2

21. Понижающие трансформаторы устанавливаются:

- А вблизи потребителей
- В в конце линии электропередач
- С в начале линии электропередач
- Д в центре электрических нагрузок
- Е рядом с генератором

22. Трансформатор повышающий, если выполняется условие:

- А  $W_1 > W_2$
- В  $W_1 < W_2$
- С  $W_1 = 0$
- Д  $W_2 = 0$
- Е  $W_1 = W_2$

23. Вращающееся магнитное поле в однофазном асинхронном двигателе образуется:

- А рабочей обмоткой
- В выпрямителем
- С коллектором
- Д фазными обмотками
- Е рабочей и пусковой обмотками

24. Автоматы серии АВ, применяются на токи, величиной:

- А 400-2000 А
- В 32 -80 А
- С 16 – 24 А
- Д 6-16 А
- Е 1- 3 А

25. Время отпускания контактов при отключении контактора равно:

- А 0,02 сек
- В 2 мин
- С 5 сек
- Д 2 сек
- Е время отпускания должно быть равно времени срабатывания

## 10 вариант

1. Трехфазный электродвигатель гудит, но не запускается. Почему?

- А нет двух фаз
- В нет одной фазы
- С большое напряжение в сети
- Д не верно включены обмотки статора
- Е нет одной фазы или неисправны подшипники ротора

2. Трехфазный двигатель быстро нагревается на холостом ходу. Почему?

- А нет фазы
- В не верно включены обмотки статора
- С перегрузка двигателя
- Д малое напряжение в сети
- Е нет двух фаз

3. Двигатель работал нормально, но стал быстро нагреваться. Почему?

- А перегрузка двигателя
- В понизилось напряжение в сети
- С во время работы пропала одна фаза
- Д обрыв нулевого провода
- Е обрыв нулевого провода и заземления

4. Что произойдет с трехфазным двигателем при обрыве нулевого провода?

- А остановится
- В не остановится
- С произойдет короткое замыкание
- Д будет нагрев двигателя
- Е сгорит обмотка статора

5. Трехфазный двигатель не запускается. На клеммах обмоток статора есть 3 фазы. Почему?

- А перегорел предохранитель
- В обрыв нулевого провода
- С нет заземления
- Д обрыв нулевого провода и заземления
- Е не исправны подшипники

6. Однофазный асинхронный двигатель не запускается, но крутанув ротор, запустился. Почему?

А не верно выбрали рабочую и пусковую обмотки

В перегорела рабочая обмотка

С перегорела пусковая обмотка

Д перегорела рабочая и пусковая обмотки

Е сломался пусковой механизм

7. Однофазный асинхронный двигатель не запускается, даже крутанув ротор. Почему?

А не верно выбрали рабочую и пусковую обмотки

В перегорела рабочая обмотка

С перегорела пусковая обмотка

Д перегорела рабочая и пусковая обмотки

Е не исправен конденсатор

8. При включении двигателя срабатывает защита. Какова неисправность?

А короткое замыкание между обмотками или на корпус

В не верно включены обмотки статора

С не исправны подшипники

Д перегрузка двигателя

Е нет одной фазы

9. Ротор вращается в обратную сторону. Как выполнить реверсирование?

А поменять местами фазу и нулевой провод

В поменять обмотки статора

С поменять местами две фазы

Д поменять местами нулевой провод и заземляющий

Е поменять местами три фазы

10. Как проверить исправность предохранителей в трехфазной цепи с помощью лампочки на 220 В?

А подключить между двумя фазами

В подключить к нулевому и заземляющему проводу

С подключить к фазе и

Д подключить к одной фазе

Е подключить к нулевому проводу

11. Какой конструкции это трансформатор?

А стержневой

В броневой

С кольцевой

Д тороидальный

Е параллельной



12. Какая обмотка в трансформаторе называется вторичной и первичной?

А первичная подключается к потребителю, вторичная – к источнику тока

В первичная подключается к источнику тока, вторичная – к потребителю

С первичная и вторичная обмотки подключают к потребителю энергии

Д первичная и вторичная обмотки подключают к источнику тока

Е та, которая намотана первой

13. Для чего применяются автотрансформаторы?

А для плавного регулирования переменного напряжения

В для понижения силы тока  
 С для сварки  
 D для регулирования постоянного напряжения  
 E для плавного регулирования постоянного и переменного напряжения

14. Почему постоянный ток не трансформируется?  
 А не возникает магнитное поле  
 В магнитное поле постоянное  
 С магнитное поле пульсирующее  
 D ток не проходит по первичной обмотке  
 E в первичной обмотке малый ток

15. Почему магнитопровод трансформаторов не изготавливают из алюминия или меди?  
 А т.к. имеют маленькое сопротивление  
 В имеют большое сопротивление  
 С не обладают магнитными свойствами  
 D т.к. это полупроводники  
 E плохо пропускают электрический ток

16. Выбрать верную схему включения счетчика с трансформатором тока.



17. Каково назначение разделительного трансформатора?  
 А применяются для исключения опасности случайного одновременного прикосновения к «земле» и токоведущим частям, которые могут оказаться

под напряжением в случае повреждения изоляции.  
 В для повышения напряжения  
 С для понижения напряжения  
 D для сварочного агрегата  
 E для индукционных счетчиков

18. Где применяются двигатели постоянного тока?  
 А в сверлильных станках  
 В в насосах  
 С там, где нужно плавно регулировать скорость вращения  
 D где нужно выполнять реверсирование  
 E там, где нужно получить постоянный ток

19. Будет ли работать двигатель постоянного тока на переменном токе?  
 А нет  
 В запустится и остановится через некоторое время  
 С будет работать  
 D будет работать, но может сгореть обмотка  
 E не будет, т.к. не возникает магнитное поле

20. Какие обмотки в якоре двигателя постоянного тока?  
 А литая алюминиевая  
 В типа «белые колесо»  
 С нет обмотки  
 D медная проволочная в виде секций  
 E может быть алюминиевая или «белые колесо»

21. Как выполнить реверсирование двигателя постоянного тока?  
 А поменять полярность источника тока

В подключить в сеть переменного тока  
 С поменять местами концы обмоток якоря или статора  
 D уменьшить напряжения  
 E увеличить напряжение

22. Каково назначение нулевого провода в трехфазной цепи?  
 А для уравнивания линейных напряжений  
 В для уравнивания фазных напряжений  
 С для уравнивания токов  
 D для уравнивания нагрузки  
 E для уравнивания сопротивлений

23. Почему нулевой провод в трехфазной цепи имеет меньшее сечение, чем линейные?  
 А в нем меньше напряжение  
 В в нем меньше сопротивление  
 С в нем больше сопротивление  
 D по нему протекает меньший ток  
 E для различия

24. Какая сила тока смертельна для человека?  
 А 100 мкА  
 В 0,1 А  
 С 0,1 мА  
 D 0,1 мкА  
 E 50 мА

25. Кто изобрел трехфазный электродвигатель и трансформатор?  
 А Яблочков  
 В Лодыгин  
 С Попов  
 D Доливо-Добровольский  
 E Якоби

## **Рефераттар мен баяндамалардың тақырыптары. Тематика рефератов и докладов.**

1. Смешанная реакция якоря синхронного генератора.
2. Работа синхронного генератора при нагрузке.
3. Рабочие характеристики синхронного генератора при автономной работе.
4. Внешняя характеристика синхронного генератора.
5. Регулировочная характеристика синхронного генератора.
6. Параллельная работа синхронных машин. Условия включения на параллельную работу.
7. Особенности параллельной работы синхронной машины. Изменение реактивной нагрузки.
8. Особенности параллельной работы синхронной машины. Изменение активной нагрузки.
9. Угловые характеристики синхронной машины.
10. Невозбужденная явнополюсная машина.
11. Статическая устойчивость машины.
12. Статическая перегружаемость.
13. Синхронные двигатели. Преимущества и недостатки. Принцип действия
14. Способы пуска синхронных двигателей.
15. Синхронные компенсаторы.
16. Машины постоянного тока. Способы возбуждения.
17. Реакции якоря машин постоянного тока.
18. Генератор постоянного тока независимого возбуждения. Характеристики.
19. Генератор постоянного тока параллельного возбуждения.
20. Генератор постоянного тока последовательного возбуждения.
21. Генератор постоянного тока смешанного возбуждения.
22. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения.
23. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения.
24. Двигатель постоянного тока смешанного возбуждения.
25. Регулирование скорости вращения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.

## **Қорытынды бақылауға арналған сұрақтар**

### **Вопросы для итогового контроля**

1. Трансформаторы. Конструкция и принцип действия.
2. Типы магнитопроводов трансформаторов.
3. Уравнение трансформаторов в комплексном виде.
4. Приведенный трансформатор.
5. Схемы замещения трансформаторов.
6. Векторная диаграмма трансформатора при различных нагрузках.
7. Опыт холостого хода трансформатора
8. Опыт короткого замыкания трансформатора
9. Система относительных единиц трансформаторов.
10. Опытное определение параметров трансформатора
11. Определение потерь трансформатора.
12. Треугольник к.з. трансформатора.
13. Режим нагрузки трансформатора. Физический смысл
14. Изменение напряжения трансформатора.
15. К. П. Д. трансформатора.
16. Группы трансформаторов.
17. Параллельная работа трансформатора. Условия и требования
18. Параллельная работа трансформатора при неравенстве коэффициентов трансформации. Режим холостого хода
19. Параллельная работа трансформатора при неравенстве коэффициентов трансформации. Режим нагрузки
20. Параллельная работа трансформатора при неравенстве напряжений короткого замыкания
21. Параллельная работа трансформатора при неравенстве групп трансформаторов
22. Асинхронные машины. Конструкция принцип действия
23. Уравнение асинхронного двигателя при неподвижном роторе.
24. Уравнение асинхронного двигателя при вращающемся роторе.
25. Схема замещения и векторная диаграмма в двигательном режиме асинхронных машин.
26. Режим генератора асинхронных машин.
27. Режим электромагнитного тормоза асинхронных машин.
28. Мощности и энергетическая диаграмма асинхронной машины.
29. Зависимость электромагнитного момента от активной составляющей тока ротора.
30. Зависимость электромагнитного момента от скольжения асинхронной машины.
31. Начальный, номинальный и пусковой моменты АД. Кратности моментов
32. Условие устойчивой работы асинхронного двигателя. Перегрузочная способность.
33. Пуск в ход асинхронного двигателя.
34. Регулирование скорости вращения асинхронной машины.
35. Асинхронные двигатели с эффектом вытеснения тока ротора. Глубокопазные двигатели.
36. Асинхронные двигатели с эффектом вытеснения тока ротора. Двухклеточные двигатели.
37. Синхронные машины.
38. Теорема Blondеля
39. Поперечная реакция якоря синхронного генератора.
40. Продольная реакция якоря синхронного генератора.
41. Смешанная реакция якоря синхронного генератора.
42. Индуктивные сопротивления реакции якоря синхронных машин.
43. Диаграмма потоков и Э. Д. С. синхронных машин.
44. Работа синхронного генератора при нагрузке. Уравнения и векторные диаграммы.
45. Векторная диаграмма явнополюсной синхронной машины при RL нагрузке.
46. Векторная диаграмма неявнополюсной синхронной машины при RL нагрузке.
47. Векторная диаграмма неявнополюсной синхронной машины при RC нагрузке.
48. Векторная диаграмма явнополюсной синхронной машины при RC нагрузке.

49. Понятие угла нагрузки  $\Theta$ .
50. Рабочие характеристики синхронного генератора при автономной работе.
51. Характеристика  $x$ ,  $x$  и  $k$ ,  $z$  синхронного генератора.
52. Отношение короткого замыкания синхронного генератора.
53. Внешняя характеристика синхронного генератора.
54. Регулировочная характеристика синхронного генератора.
55. Диаграмма Потье (диаграмма с учётом насыщения).
56. Параллельная работа синхронных машин. Условия включения на параллельную работу.
57. Метод точной синхронизации.
58. Метод грубой синхронизации (метод самосинхронизации).
59. Особенности параллельной работы синхронной машины. Изменение реактивной нагрузки.
60. Особенности параллельной работы синхронной машины. Изменение активной нагрузки.
61. Угловые характеристики синхронной машины.
62. Невозбуждённая явнополюсная машина.
63. Статическая устойчивость машины.
64. Статическая перегружаемость.
65. U-образные характеристики синхронного генератора.
66. Синхронные двигатели. Преимущества и недостатки. Принцип действия
67. Способы пуска синхронных двигателей.
68. Синхронные компенсаторы.
69. Машины постоянного тока. Способы возбуждения.
70. Реакции якоря машин постоянного тока.
71. Генератор постоянного тока независимого возбуждения. Характеристики.
72. Принцип обратимости МПТ.
73. Самовозбуждение ГПТ.
74. Генератор постоянного тока параллельного возбуждения. Характеристики.
75. Генератор постоянного тока последовательного возбуждения. Характеристики.
76. Генератор постоянного тока смешанного возбуждения. Характеристики.
77. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения. Характеристики
78. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения. Характеристики.
79. Двигатель постоянного тока смешанного возбуждения. Характеристики.
80. Регулирование скорости вращения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.
81. Регулирование скорости вращения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

## **Заключение**

Учебно-методический комплекс направлен на повышение профессионального мастерства подготовки преподавателя при подготовке к теоретическим и практическим занятиям по профессиональному модулю « Выбор количественных и качественных характеристик режимов работы электрических машин и трансформаторов для производственных условий».

Данный комплекс дает возможность преподавателю последовательно выстроить процесс подготовки обучающегося по профессиональному модулю на основе системного подхода изложения теоретического и практического материала, а также способен помочь обучающимся правильно понять и закрепить основные вопросы.

## Әдебиеттер / Литература

### Негізгі

#### Основная:

1. Кацман М. М. Электрические машины. М., 2007
2. Арменский Е. В., Фальк Г. Б. Электрические микромашины. М., 2005.
3. Специальные электрические машины/А. И. Бертинов, Д. А Бут, С. Р. Мизюрин и др. М., 2005.
4. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины и микромашины. М., 2009.
5. Важное А. И. Электрические машины. Л., 2006.
6. Вольдек А. И. Электрические машины. Л., 2003.
7. Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А., Сергеев П. с. Проектирование электрических машин. М., 2007.
8. Гольдберг О. Д., Гурин Я. С, Сеириденко И. С. Проектирование электрических машин. М., 2007.
9. Ермолин Н. П. Электрические машины малой мощности. М., 1993.
10. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. М., 2001.
11. Испытание электрических микромашин/ Н. В. Астахов, Б. Л. Крайз, Е. М. Лопухина и др. М., 2009.
12. Кацман М. М., Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств. М., 2008.
13. Алексеев А. Е. Конструкция электрических машин. М., 2001.
14. Проектирование электрических машин /И. П. Копылов, Ф. М. Горяинов, Б. К. Клоков и др. М., 2005.
15. Копылов И. П. Электромеханическое преобразование энергии М., 2011.
16. Кононенко Е. В., Сипайлов Г. А., Хорьков К. А. Электрические машины. М., 2010.
17. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины ч. II П. Л., 2002.

### Қосымша

#### Дополнительная:

1. Электротехнический справочник В 3-х томах, том 2
2. Электротехнические изделия и устройства, под общей редакцией профессоров МЭИ (главный редактор И.Н.Орлов) Энергоатомиздат, 2005г.
3. Рабинович И. Н., Шубов Н. Г. Проектирование машин постоянного тока. Л., 2007.