

ФИЗИКА

10

2-бөлім

Жалпы білім беретін мектептің
жаратылыстану-математика бағытындағы
10-сыныбына арналған оқулық

*Қазақстан Республикасы Білім және
ғылым министрлігі бекіткен*



Алматы «Мектеп» 2019

ӘОЖ 373.167.1
КБЖ 22.3я72
Ф49

Авторлар:

Кронгарт Б. А., Қазақбаева Д. М., Имамбеков О., Қыстаубаев Т.

**Физика: Жалпы білім беретін мектептің жаратылыстану-математика
Ф49 бағытындағы 10-сыныбына арналған оқулық. 2-бөлім / Б.А.Кронгарт,
Д.М.Қазақбаева, О.Имамбеков, Т.Қыстаубаев — Алматы: Мектеп, 2019. —
200 б.**

ISBN 978-601-07-1153-2

Ф $\frac{4306021200-054}{404(05)-19}$ 40(1)-19

ӘОЖ 373.167.1
КБЖ 22.3я72

ISBN 978-601-07-1153-2

© Кронгарт Б. А., Қазақбаева Д. М.,
Имамбеков О., Қыстаубаев Т., 2019
© “Мектеп” баспасы,
көркем безендірілуі, 2019
Барлық құқықтары қорғалған
Басылымның мүлкітік құқықтары
“Мектеп” баспасына тиесілі



III бөлім. ЭЛЕКТР ЖӘНЕ МАГНЕТИЗМ

10-тарау. Электростатика

11-тарау. Тұрақты электр тогы

12-тарау. Өртүрлі ортадағы электр тогы

13-тарау. Магнит өрісі

14-тарау. Электромагниттік индукция



III бөлім. ЭЛЕКТР ЖӘНЕ МАГНИТИЗМ

10-тарау. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

§ 49. Электр заряды. Электрлену. Электр зарядының сақталу заңы



Тірек ұғымдар: электр, электр заряды, оң және теріс зарядтар.

Бүгінгі сабақта: электростатиканың негізгі түсініктерімен танысасыздар.

“Электр”, “электр заряды”, “электр тогы” сөздері сендерге бала кезден белгілі. Бұл сөздерге үйренгеніміз сонша, олардың мағынасын толық түсінетін секілдіміз. “Электр заряды деген не?” сұрағына жауап беріп көріңдерші, сонда оның оңай емес екеніне көздерің жетеді. Себебі “масса”, “заряд” деген ұғымдар іргелі ұғымдарға жатады және оларға айқын анықтама беру мүмкін емес.

Бізге белгілі деректерге сүйеніп, “электр заряды” ұғымының мағынасын ашып көрейік. 9-сыныптың физика курсынан денелердің молекуладан, молекуланың атомнан, атомның өзін айналып жүрген электрондардың түгелге дерлік массасы шоғырланған ядродан тұратыны белгілі. Ядролық физикамен айналысатын ғалымдардың зерттеулері ядроның протондар мен нейтрондардан тұратынын көрсетті. Протондар мен нейтрондар және электрондарды бір сөзбен *субатомдық* бөлшектер деп атайды. Бұл бөлшектердің өзіне тән қасиеттері болғандықтан, олар бір-біріне ұқсайды. Осы қасиеттерді сипаттау үшін көптеген физикалық шамалар енгізілген, солардың бірі — *масса мен электр заряды*. Элементар бөлшектер пайда болысымен-ақ масса мен электр зарядына ие болады. *Электрон зарядына ұқсас зарядтар теріс, ал протон зарядына ұқсас зарядтар оң заряд* деп аталады. *Нейтронның заряды жоқ*. Бөлшектердің заряды олардың бір-бірімен әсерлесуін қамтамасыз етеді. Тәжірибе көрсеткендей, *аттас зарядталған бөлшектер тебіледі де, әр аттас зарядталған бөлшектер бір-біріне тартылады*. Сондықтан электр заряды электромагниттік өзара әсердің қарқындылығын сипаттайды. Электр заряды бөлшектен тыс өмір сүрмейді, бөлшектің массасы мен зарядын бөлшектен бөліп алып қарастыра алмайсың.

“Оң” және “теріс” зарядтар деген терминдердің мағынасын талқылауды ұсынамыз. Осымен байланысты тәжірибеден не белгілі және зерттеулерімізге ыңғайлы болу үшін біз өзіміз не қостық?

Электр зарядына дискреттік қасиет тән, яғни ол белгілі бір ең аз шекті мәнге дейін бөліне алады. Ол шекті мәнді *элементар заряд* деп атайды да, e әрпімен белгілейді. Элементар зарядтың шамасын тәжірибе жүзінде американдық физик Р.Э.Милликен (1868—1953) мен орыс физигі А.Ф. Иоффе (1880—1960) анықтады. Элементар зарядтың сандық мәні $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл тең. Бұл өте аз шама екенін көріп отырсыңдар.

Макроскопиялық денелердің заряды өзін құрайтын бөлшектер зарядының қосындысынан тұрады. Кез келген заттың атомы бейтарап, себебі ядродағы протондар саны электрондар санына тең. Сондықтан макроскопиялық дене электрлік бейтарап.

Макроскопиялық дене электр зарядына ие болу үшін теріс зарядтың белгілі бір бөлігін онымен байланысқан оң зарядтардан бөліп алу керек. Осы процесті электрлеу деп атайды.

Денені мынадай әдістермен электрлеуге болады:

а) *үйкеліс арқылы*. Үйкеліс кезінде денедегі неғұрлым қозғалмалы зарядталған бөлшектер — электрондар бір денеден атомдарды өзіне күштірек тартатын денеге ауысады. Бұл жағдайда бірінші дене оң, ал екінші дене теріс зарядталады;

ә) *зарядталмаған денені зарядталған денеге түйістіру арқылы*. Осы кезде электрондардың бір бөлігі электрон саны көп денеден электрон саны аз денеге ауысады.

Электрлеу кезінде электр зарядының ешқайдан алынбайтыны және ешқайда іс-түссіз жоғалмайтыны түсінікті. Ол бір денеден екінші денеге өтеді, ал тұйық жүйедегі денелердің толық заряды өзгермейді (сақталады). Электр зарядының сақталу заңының мәні, міне, осында. Бұл заңның математикалық өрнегі

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const.} \quad (49.1)$$

Тұйық немесе оқшауланған жүйе деп шекарасы арқылы заряд өте алмайтын жүйені атайды.

Дененің зарядталғанын электроскоптың көмегімен анықтауға болады. Аталған құралдың құрылысы мен жұмыс істеу принципі сендерге 8-сыныптың физика курсынан таныс.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қандай бөлшектер элементар бөлшектер деп аталады?
2. Электр заряды деп нені айтады?
3. Заряд дискреттілігі дегеніміз не?
4. Қандай заряд элементар деп аталады? Неліктен?
5. Электрлендіру дегеніміз не?
6. Денені қалай электрлендіруге болады?
7. Зарядтың сақталу заңын тұжырымдаңдар.
8. Зарядты сақтау туралы заң қай уақытта жарамды?

Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Жіпке қағаз гильзасы ілініп тұр. Егер оны аттас емес зарядтармен зарядталған екі металл дискінің арасына орналастырса не байқалады?

Тәжірибе жасаңдар

1. Газетті терезе әйнегіне қойып, үстін щеткамен сүрткен кезде нені байқауға болады? Неліктен?
2. Шыны бөтелкені газеттің көмегімен электрлеңдер. Газет және бөтелке зарядының таңбасын қалай анықтауға болады?

Түсіндіріңдер

1. $10e$ заряды бар темір шардан $-5e$ зарядты бөліп алды. Шардың заряды қандай болады?
2. Жіпке ілінген шарға теріс зарядталған таяқшаны әкеліңдер, шар таяқшаға тартылады. Шардың заряды қалай өзгереді?
3. Кейде жедел көтерілетін аэростатта өрт шығады және оның себебі өрт қауіпсіздігін сақтамаудан емес. Аэростатта оттың тұтануын қалай түсіндіруге болады?

Шығарыңдар

1. Бірдей көлемдегі бес зарядталған шарлар бір-бірімен түйісіп, соның нәтижесінде осы шарлардың жалпы заряды 10нКл тең болды. Жанасқанға дейін бірінші және екінші шарлардың заряды сәйкесінше 1нКл және -17нКл тең болғанын, ал басқа шарлардың зарядтары бірдей болғандығын ескере отырып, байланыс алдындағы төртінші шардың зарядын анықтаңдар.

Жауабы: 2нКл

2. Заряды $-6,4\text{нКл}$ болатын шар сол өлшемді бейтарап өткізгіш шармен түйіседі. Зарядталған шардан зарядсыз шарға қанша электрон өтеді?

Жауабы: $2 \cdot 10^{10}$

Рефлексия

1. Қандай деңгейде материалды меңгердіңдер?
2. Саған тақырыпты қосымша түсіндіру қажет пе?
3. Тақырыпты меңгеру кезінде қандай қиындықтар туындады?

§ 50. Кулон заңы



Тірек ұғымдар: Кулон заңы, электростатиканың негізгі заңы, электр тұрақтысы, диэлектрлік өтімділік, суперпозиция қасиеті.

Бүгінгі сабақта: электростатиканың негізгі заңы — Кулон заңымен, суперпозиция принципімен танысасыздар; нүктелік зарядтардың вакуумда және қандай да бір ортадағы әсерлесу күшін есептеуді үйренесіздер.

Электр заряды бар денелердің өзара әсерлесетінін, дәлірек айтсақ, заряды бірдей денелер бір-бірінен алыстайтыны, ал заряды әртүрлі денелердің тартылатыны белгілі. Айналым таразы көмегімен француз физигі Ш.О. Кулон қозғалмайтын екі кішкене зарядталған шариктердің бір-бірімен өзара әсерлесу күшін эксперимент жүзінде анықтады. Ол 1785 жылы өзінің Кулон заңы деп аталып кеткен заңын ашты.

Кулон заңы: вакуумдағы қозғалмайтын екі нүктелік зарядтың өзара әсерлесу күші зарядтар модулінің көбейтіндісіне тура пропорционал және олардың арақашықтықтарының квадратына кері пропорционал. Бұл күш осы зарядтарды қосатын түзу бойымен бағытталған.

Бұл күшті *Кулон күші* деп атайды. Кулон заңы — электростатиканың негізгі заңы, оның математикалық өрнегі төмендегідей жазылады:

$$F_{12} = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}. \quad (50.1)$$

(50.1) формуладағы k коэффициенті бірліктер жүйесін таңдап алу арқылы анықталады. Ол вакуумда бірлік қашықтықта тұрған бірлік зарядтар бір-бірімен қандай күшпен әсерлесетінін көрсетеді.

ХБ жүйесінде k коэффициентінің мәні $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$ тең.

ХБ жүйесінде, әдетте, $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ шамасы енетін заңның рационалды жазылуы пайдаланылады. ϵ_0 тұрақтысы *электр тұрақтысы* деп аталады, сан мәні

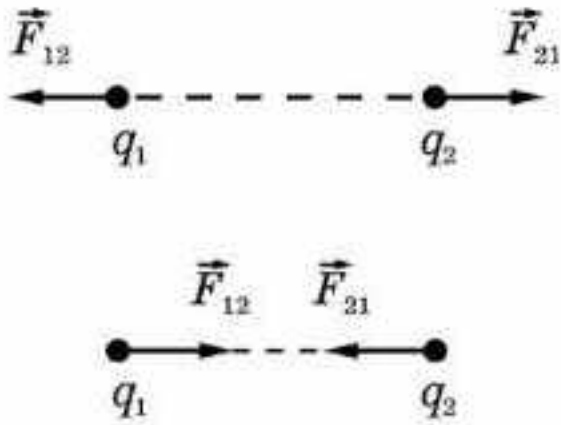
$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / \text{Н} \cdot \text{м}^2.$$

Осыны ескеріп Кулон заңын жазайық, ол

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \quad (50.2)$$

түріне ие болады. 4π көбейтіндісін енгізу Максвелл тағайындаған электродинамиканың негізгі теңдеуінің жазылуын оңтайландырады.

Кулон заңының тек нүктелік зарядтар үшін ғана дұрыс екенін есте ұстау қажет. Шындығында, табиғатта нүктелік зарядтар болмайды, бірақ зарядталған денелер арасындағы қашықтық олардың өлшемдерінен көп үлкен болса, онда бұл денелерді нүктелік деп есептеуге болады.



50.1-сурет

күшіне тең, яғни $\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$. Егер зарядтар таңбасы бірдей болса, онда $q_1 \cdot q_2 > 0$ зарядтар тебіледі. Егер зарядтардың таңбасы қарама-қарсы болса, $q_1 \cdot q_2 < 0$ зарядтар тартылады (50.1-сурет).

Тәжірибе нәтижесінде аттас зарядтар тебіледі, ал әр аттас зарядтар тартылатыны дәлелденді.

ХБ жүйесінде зарядтар бірлігі — туынды бірлік. Оны токтардың өзара әсері негізінде тағайындалатын эталон бойынша 1 А ток күшінің негізгі бірлігін пайдаланып тағайындайды.

Кулон (Кл) — бірлік уақыт ішінде өткізгіштің бірлік көлденең қимасының ауданы арқылы 1 А ток күшіне тең ток жүрген кезде өтетін заряд:

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}.$$

Зарядтарды әртүрлі диэлектриктердің ішінде орналастырып, тәжірибелерді қайталағанда олардың өзара әсерлесу күшінің азаятыны байқалады. Зарядтардың вакуумдағы F_0 өзара әсерлесу күшіне қатынасы зарядтарға да, арақашықтыққа да тәуелді емес екені тағайындалды. Ол тек ортаның қасиеттеріне тәуелді, яғни

$$\frac{F_0}{F} = \varepsilon = \text{const},$$

мұндағы ε — ортаның салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі.

Ортаның диэлектрлік өтімділігі — бұл заттың электрлік қасиетін және зарядтардың берілген ортадағы өзара әсерлесу күші вакуумдағы өзара әсерлесу күшінен неше есе аз болатынын көрсететін физикалық шама. Ол өлшемсіз шама.

Суперпозиция принципі. Тәжірибе арқылы екі зарядтың өзара әсерлесуі басқа зарядтардың бар-жоғына тәуелсіз екенін білдік. Сондықтан зарядтардың санына қарамастан, (50.1) формуланы берілген q_0 зарядқа қалған q_1, q_2, \dots, q_n зарядтардың тарапынан әсер ететін F_1, F_2, \dots, F_n күштерді есептеуге пайдалануға болады. Осыдан берілген зарядқа әсер ететін қорытқы F_0 күші барлық күштердің векторлық қосындысына тең болады:

$$\vec{F}_0 = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n. \tag{50.3}$$

Бұл — *қорытынды суперпозиция қасиеті* деп аталады. Суперпозиция қасиетін электростатикада нүктелік деп санауға болмайтын зарядталған денелердің өзара әсерлесуін қарастырған кезде пайдаланады. Ол үшін әрбір денені ойша нүктелік деп қарастыруға болатын кішкене бөліктерге бөледі. Осыдан кейін Кулон заңын пайдалана отырып, екі дененің кішкене бөліктерінің арасындағы өзара әсерлесу күштерін есептеп шығарып, оларды векторлық түрде қосады. Денелерді ойша шексіз аз бөліктерге бөлсек, денелердің әрбіреуіне әсер ететін күш соғұрлым дәлірек шығады. Біртіндеп шексіз аз көлемдерге ауысып, дәл нәтижеге қол жеткіземіз.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қандай заряд нүктелік деп аталады?
2. Кулон заңын тұжырымдаңдар.
3. Кулон заңы қалай ашылды?
4. Электр заряды қандай бірліктермен өлшенеді?
5. Ортаның диэлектрлік өтімділігінің физикалық мағынасы қандай?
6. Неліктен электрлік тұрақты енгізілді?
7. Суперпозиция принципін тұжырымдаңдар.

Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Жібек жіптерге аттас екі зарядталған қағаз гильзаны бір-біріне қарама-қарсы іліңдер. Сендер не байқадыңдар? Олардың арасына керамика немесе картон парағын орналастырса не болады? Нәтижелерді түсіндіріңдер.

Тәжірибе жасаңдар

1. Зарядталмаған металл денеге зарядталған электроскоптың шарын жақындатыңдар. Электроскоп жапырақтарының ауытқуы қалай өзгереді? Неліктен?

2. Зарядталмаған металл денеге зарядталған электроскоптың шарын жақындатыңдар. Электроскоп жапырақтарының ауытқуы дененің заряд таңбасына байланысты қалай өзгереді? Неліктен?

Түсіндіріңдер

Неге шашты пластмасса тарақпен тарағанда шаш тараққа “жабысады”? Бөлмедегі ауа ылғалдылығы жоғары болған жағдайда нәтиже қалай өзгереді?

Шығарыңдар

1. Толық заряды 2 нКл болатын зарядталған шарлар ауада бір-бірінен 3 м қашықтықта орналасқан және 1 Н күшімен өзара әсерлеседі. Шарлардағы зарядтарды табыңдар.

Жауабы: 1,865 нКл және 0,135 нКл

■2. Екі бірдей металл шарлар алып, біреуінің заряды $n = 5$ есе көп болатындай зарядталды. Шарларды жанастырып, 1,34 есе көп қашықтыққа бөліп ажыратты. Олардың өзара әсерлесу күшінің модулі қанша рет өзгереді, егер ондағы зарядтар: а) аттас; ә) әр аттас болса?

Жауабы: а) өзгермейді; ә) 2,25 есе төмендейді

*3. Ұзындығы бірдей жіпке ілінген радиусы мен массасы бірдей екі зарядталған шарды сұйық диэлектрикке батырады. Ауа және диэлектриктегі жіптердің ауытқу бұрышы бірдей болды. Шарлардың тығыздығы $1,2 \text{ г/см}^3$, ал диэлектрик тығыздығы $0,8 \text{ г/см}^3$. Диэлектриктің өтімділігін анықтаңдар.

Жауабы: 3

4. Бір кулон зарядтың шамасы туралы түсінік болуы үшін вакуумда бір-бірінен 1 м қашықтықта орналасқан шамасы 1 Кл болатын екі нүктелік зарядтың өзара әсерлесу күшін есептеңдер. Суда дәл осындай қашықтықта әсерлесу күші қандай болады?

Жауабы: $9 \cdot 10^9 \text{ Н}$; $0,1 \cdot 10^9 \text{ Н}$

5. Оң $2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$ және $4,5 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$ зарядтары бар екі дене бір-бірінен 1 м қашықтықта орналасқан. Олардың жанына сынақ зарядын алып келгенде мұндай жүйе тепе-теңдікте болса, онда осы сынақ заряды үлкен зарядтан қандай қашықтықта орналасқан?

Жауабы: 0,6 м

6. Теріс екі нүктелік заряд вакуумда бір-бірінен 48 см жерде орналасқан және өзара 10^{-3} Н күшпен әсерлеседі. Әр зарядта қанша электрон бар?

Жауабы: 10^{12} электрон

7. Шамасы және таңбасы жағынан бірдей екі нүктелік заряд вакуумда бір-бірінен 3,0 м қашықтықта орналасқан және 0,40 Н күшпен тебіледі. Әр зарядтың шамасын анықтаңдар.

Жауабы: $2 \cdot 10^{-5}$ Кл

8. Суда бір-бірінен 3,3 см қашықтықта орналасқан $0,66 \cdot 10^{-7}$ Кл және $1,1 \cdot 10^{-3}$ Кл екі заряд өзара қандай күшпен әсерлеседі? Өзара әсерлесу күші өзгеріссіз қалуы үшін вакуумда оларды бір-бірінен қандай қашықтықта орналастыру керек?

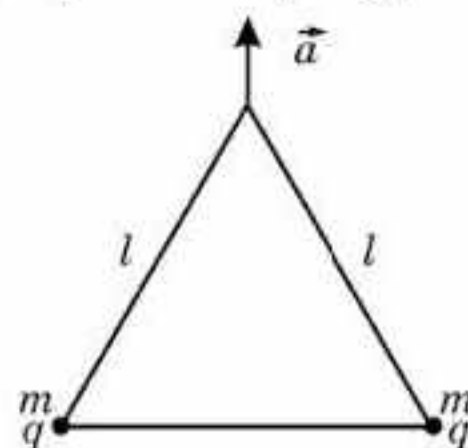
Жауабы: 7,4 Н; 0,297 м

■9. Әрқайсысының заряды $3 \cdot 10^{-8}$ Кл болатын үш заряд теңқабырғалы үшбұрыштың төбелерінде орналасқан. Әрбір зарядқа әсер ететін қорытқы күш нөлге тең болу үшін осы үшбұрыштың центріне қандай зарядты орналастыру керек?

Жауабы: $1,73 \cdot 10^{-8}$ Кл

*10. Массасы m және заряды q екі бөлшек ұзындығы l жеңіл жіптерден тұратын теңқабырғалы үшбұрыштың төбелерінде орналасқан (50.2-сурет). Жүйені модулі g тең \vec{a} үдеумен тік жоғары көтереді. Бөлшектерді қосып тұрған жіптің керілу күшін табыңдар.

Жауабы: $\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 l^2} - \frac{2\sqrt{3}}{3} mg$



50.2-сурет



Рефлексия

1. Қандай деңгейде материалды меңгердіңдер?
2. Саған тақырыпты қосымша түсіндіру қажет пе?
3. Тақырыпты меңгеру кезінде қандай қиындықтар туындады?

§ 51. Электр өрісі. Электр өрісінің кернеулігі. Электр өрісінің күш сызықтары



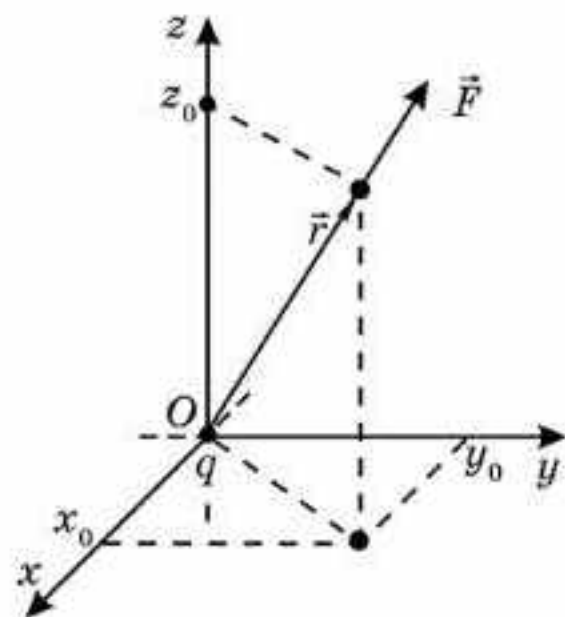
Тірек ұғымдар: электр өрісі, алыстан әсерлесу принципі, электр өрісінің кернеулігі, нүктелік заряд өрісінің кернеулігі, электр өрісінің күш сызықтары, біртекті өріс.

Бүгінгі сабақта: электр өрісі ұғымымен және осы өрістің күштік сипаттамасы — кернеулік ұғымымен танысатын боласындар; зарядтар жүйесінің кернеулігін анықтап және өрістің күш сызықтарын салып үйренесіндер.

Алдыңғы параграфтағы (50.1) теңдеудегі q_2 заряд орнын ауыстырғанда \vec{F}_{12} күштің мәні зарядтар арақашықтығының дәл сол мезеттегі мәнімен анықталатыны шығады, яғни зарядталған бөлшектердің өзара әсерлесуі бос кеңістік арқылы лезде беріледі. Бұл тұжырым *алыстан әсерлесу* принципі деп аталады.

Ағылшынның ұлы физигі М. Фарадей алыстан әсерлесу теориясына қарсы шықты. Ол зарядтардың өзара әсерлесуінің негізгі себебін және оларды тасымалдаушыларды іздеді. Оның ойынша, материя өзі жоқ жерде ешқандай әсер туғыза алмайды. Ол жақыннан әсер ету тұжырымдамасын жақтады, денеде зарядтың болуы оны қоршаған кеңістіктің қасиетін өзгертеді (кеңістікте электр өрісі пайда болады), ал зарядтардың өзара әсерлесуі олардың кеңістікте тудыратын электр өрісі арқылы іске асырылады деген болжамды қолдады. Өрістерді сипаттау үшін Фарадей ХІХ ғасырдың 30-жылдарында зарядтарға әсер ететін күшті сипаттайтын *күш сызықтары* ұғымын енгізді. Өрістердің нақты бар екені жайлы Фарадей идеялары Максвеллдің еңбектерінде дамытылды.

q зарядты координаталар басына орналастырамыз (51.1-сурет) және q_1, q_2, \dots, q_n зарядтарға әсер ететін күштерді өлшейміз. Бұл зарядтарды кеңістіктің координаталары x_0, y_0, z_0 болатын нүктесіне кезекпен орналастырамыз. Нәтижесінде $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ мәндерінің қатарын аламыз. Тәжірибе нәтижелерін өңдеу арқылы біз



51.1-сурет

$\frac{\vec{F}_n}{q_n}$ қатынастарының бірдей және тұрақты

$\frac{\vec{F}_1}{q_1} = \frac{\vec{F}_2}{q_2} = \dots = \vec{E}_0$ векторына тең болатынына

көз жеткіземіз. Енді тәжірибені кеңістіктің жаңа нүктелеріне зарядтарды кезекпен орналастыра отырып қайталайық. Әр нүкте үшін мына өрнекті аламыз:

$$\frac{\vec{F}_1}{q_1} = \frac{\vec{F}_2}{q_2} = \dots = \vec{E}_0(x; y; z). \quad (51.1)$$

Қатынастың оң жағын q_0 зарядқа тәуелсіз, сондықтан $\frac{\vec{F}}{q_0}$ қатынасы берілген нүктеде орналасқан q_0 зарядқа тәуелсіз болатын қандай да бір қасиетті сипаттайды деп айта аламыз, яғни

$$\vec{E}(x; y; z) = \frac{\vec{F}(x; y; z)}{q_0}. \quad (51.2)$$

Осы \vec{E} векторлық шамасын q заряд тудыратын электр өрісінің кернеулігі деп атайды.

Екінші жағынан, егер электр өрісінің кернеулік векторы белгілі десек, онда координаталары $(x; y; z)$ болатын нүктеде орналастырылған зарядқа әсер ететін күш $\vec{F}(x; y; z) = q_0 \vec{E}(x; y; z)$ өрнегімен анықталады. Сонымен, өріс түсінігі электрлік өзара әсерлесуді сипаттаудың басқа тәсіліне көшуге мүмкіндік береді. Енді q заряд q_0 зарядқа \vec{F} күшпен әсер етеді деудің орнына q заряд электр өрісін тудырады, ал ол осы өріс q_0 зарядқа \vec{F} күшпен әсер етеді деуге болады.

Өзара әсерлесуді өріс тілінде сипаттау физиканың дамуының аса сәтті кезеңі болды, себебі электромагниттік құбылыстарды сипаттаған кезде негізгі рөлді өрістің өзінің қасиеттері атқарады. Өріс көздерінің арасындағы айырмашылықты ескермеуге болады.

Енді электр өрісінің неліктен материяның бір түрі және оның өз алдына физикалық ақиқат болып табылатынына тоқталайық.

Егер q зарядтың орнын өзгертсек, онда осы заряд тұрған жерде өрістің кернеулігі өзгереді. q және q_0 зарядтар жүйесінің электр өрісі қайта қалыптасуы тиіс. q заряд орнын ауыстырған кезде өріс әуелі оған жуық маңда өзгереді. Өріс кернеулігінің өсімшесі c жарық жылдамдығымен таралады. Сөйтіп, q_0 зарядқа әсер ететін \vec{F} күш лезде емес, тек біршама уақыт өткен соң ғана өзгереді. Кейінірек біз электр өрісінің бөлшектер тәрізді энергияға да ие болатынына көз жеткіземіз.

Нүктелік зарядтың өріс кернеулігі. (51.2) өрнегіне q зарядқа әсер ететін $F = k \frac{q_0 q}{r^2}$ күштің өрнегін қойып,

$$E = k \frac{q}{r^2} \quad (51.3)$$

өрнегін аламыз. *Тыныштықтағы зарядтардың электр өрісін электростатикалық өріс* деп атайды. (51.3) өрнегі нүктелік заряд өрісінің кернеулігін анықтайды. \vec{E} вектордың бағыты оң нүктелік сынақ зарядына әсер ететін күш бағытымен сәйкес келеді. Сондықтан $q > 0$ болса, онда кернеулік векторы зарядтан, ал егер $q < 0$ болса, онда \vec{E} вектор зарядқа бағытталған. Оқшауланған q зарядтың r қашықтықта тудыратын электр өрісі кернеулігінің шамасы $E = k \frac{q}{r^2}$.

ХБ жүйесінде кернеуліктің өлшем бірлігі — $1 \text{ Н/Кл} = 1 \text{ В/м}$.

Зарядтар жүйесінің өріс кернеулігі. Тыныштықтағы дискретті q_1, q_2, \dots, q_n зарядтардың жүйесін қарастырып, жүйенің кеңістіктің қайсыбір нүктесінде тудыратын өрісінің кернеулігін табайық. Осы нүктеге q_0 зарядты қойып, (51.2) өрнегі бойынша оларға әсер ететін \vec{F}_0 күшті анықтайық. Одан әрі зарядтар жүйесінің қарастырылып отырған нүктедегі \vec{E} кернеулігін

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_0} \quad (51.4)$$

қатынасы бойынша табамыз. (51.3) өрнегін (51.4) өрнегіне қойып,

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n \quad (51.5)$$

теңдеуін аламыз. Демек, кернеулік векторларының да q_0 зарядқа әсер ететін күштер тәрізді *суперпозициялық* қасиеті (принципі) болады екен. Осыдан, *зарядтар жүйесі тудыратын өрістің кернеулігі әрбір жеке зарядтар тудыратын өріс кернеуліктерінің векторлық қосындысына тең* деген қорытынды жасаймыз.

Кернеулігі \vec{E} болатын кез келген электростатикалық өрісте q зарядқа әсер ететін күш

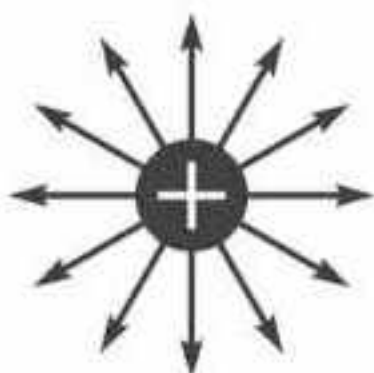
$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (51.6)$$

шамасына тең.

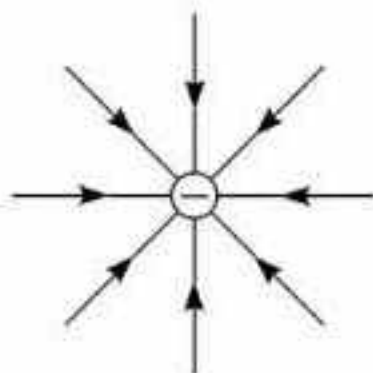
Зарядқа әсер ететін \vec{F} күш векторлық шама болып табылады. Демек, \vec{E} электр өрісінің кернеулігі де векторлық шама: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$.

Нүктелік емес, шектелген өлшемді зарядталған денелердің электр өрісін анықтауға суперпозиция принципін қалай қолдануға болатыны жөнінде ойланьңдар.

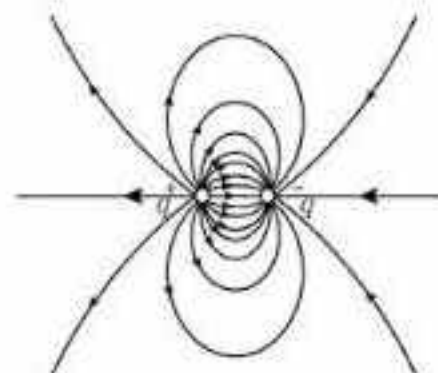
Күш сызықтары. Жалпы жағдайда \vec{E} электр өрісінің құрылымы күрделі. Көрнекі болу үшін өрісті күш сызықтары көмегімен графикалік түрде кескіндеуге болады. *Күш сызығы деп әрбір нүктесіне жүргізілген жанама сол нүктедегі электр өрісінің кернеулігінің бағытымен сәйкес келетін сызықты айтады.* Сондықтан күш сызықтары оң зарядтардан теріс зарядтарға қарай бағытталады. Осылай өрнектеген кезде өрістің кернеулігінің шамасы күш сызықтарына көлденең орналасқан бірлік



51.2-сурет



51.3-сурет



51.4-сурет

ауданды кесіп өтетін күш сызықтарының санына пропорционал болады.

Күш сызықтарының мынадай қасиеттері белгілі:

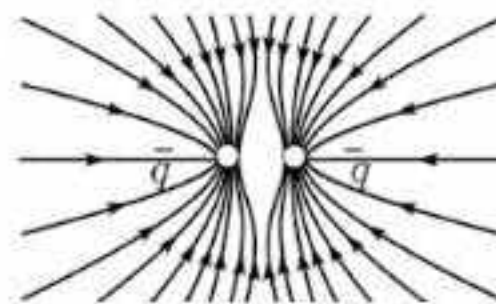
1. *Күш сызықтары үздіксіз.* Олар оң зарядтан шығады және теріс зарядқа кіреді немесе оң зарядтан шығып, шексіздікке кетеді, болмаса шексіздіктен теріс зарядқа келіп кіреді.

2. *Күш сызықтары еш жерде қиылыспайды.* Егер олар қиылысса, онда қиылысу нүктесінде кернеулік векторының әртүрлі екі бағыты болар еді.

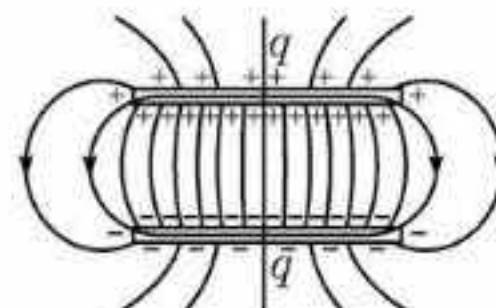
Өрісті графикалік түрде өрнектеген кезде күш сызықтарының қоюлығы кернеулік векторының шамасын анықтайды. Күш сызығына перпендикуляр бірлік ауданға келетін бір күш сызығы бірлік кернеулікке сәйкес болады (51.2—51.7-суреттер).

Біртекті өріс. Бірдей екі металл пластиналарды алып, оларды 51.6-суретте көрсетілгендей, бір-біріне параллель орналастырайық. Осы пластиналардың біреуіне $+q$ заряд, ал екіншісіне $-q$ заряд берсек, онда олардың арасында электр өрісі пайда болады. Егер пластиналардың арақашықтығы олардың сызықтық өлшемдерімен салыстырғанда аз болса, онда бұл өрістің кернеулік сызықтары параллель болып шығады. Пластиналар арасындағы өрісте кернеулік сызықтарының тығыздығы барлық жерде бірдей, демек, $\vec{E} = \text{const}$.

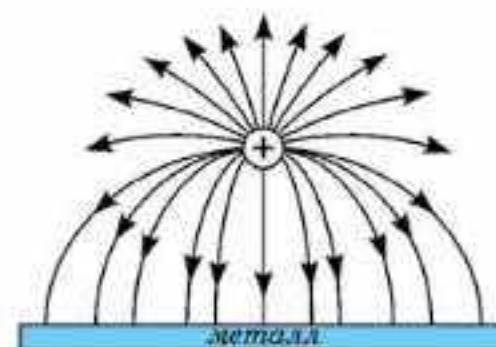
Кернеулік векторлары барлық нүктелерде бірдей электр өрісі біртекті өріс деп аталады. Пластиналар арасындағы кеңістіктің ортасындағы өрісті ғана біртекті деп атауға болады, себебі пластиналардың шетінде \vec{E} векторлары өрістің түрліше нүктелерінде бірдей болмайды.



51.5-сурет



51.6-сурет



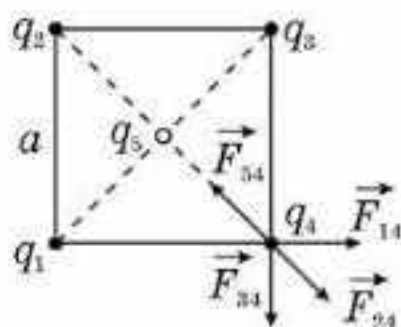
51.7-сурет



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Алыстан және жақыннан әсерлесу теориясы электр зарядтарының өзара әсерлесуін қалайша түсіндіреді?
2. Электр өрісінің негізгі қасиеті қандай?
3. Электр өрісінің кернеулігі деп нені түсінеміз?
4. Электростатикалық деп қандай өріс аталады?
5. 51.4—51.7-суреттердегі күш сызықтарын түсіндіріңдер.
6. Күш сызықтарының көрінісіне қарап, берілген нүктедегі электр өрісі кернеулігінің модулі мен бағыты туралы не айтуға болады?

Есеп шығару үлгісі



51.8-сурет

1-есеп. Шаршының төбесінде бірдей q заряд орналасқан (51.8-сурет). Әр зарядқа әсер ететін күшті анықтаңдар. Шаршының қабырғасы a . Жүйе теңдікте болу үшін шаршы орталығына қандай заряд орналастыру қажет?

Шешуі. а) Әр заряд басқа зарядтардың өрісінде болғандықтан, оған зарядтар тарапынан кулондық тебілу күші әсер етеді. Әр зарядқа әсер ететін

күш барлық күштердің векторлық қосындысы түрінде анықталады:

$$\vec{F} = \vec{F}_{14} + \vec{F}_{24} + \vec{F}_{34}.$$

Күштің модулі Кулон заңы бойынша анықталады:

$$F_{14} = F_{34} \frac{kq^2}{a^2}; \quad \vec{F}_{24} = \frac{kq^2}{2a^2}; \quad \vec{F} = F_{24} + \sqrt{F_{14}^2 + F_{34}^2}; \quad F = \frac{kq^2}{2a^2}(1 + 2\sqrt{2}).$$

ә) Жүйе тепе-теңдікте болу үшін барлық күштер бірін-бірі теңестіруі қажет, демек, $F = F_{54}; \frac{kq^2}{2a^2}(1 + 2\sqrt{2}) = \frac{kq|q_5|}{\left(\frac{a\sqrt{2}}{2}\right)^2}; |q_5| = \frac{q}{4}(1 + 2\sqrt{2});$

$$q_5 = -\frac{q}{4}(1 + 2\sqrt{2}).$$

Жауабы: а) $F = \frac{kq^2}{2a^2}(1 + 2\sqrt{2});$ ә) $q_5 = -\frac{q}{4}(1 + 2\sqrt{2})$

2-есеп. Екі бірдей кішкентай металл шариктер шамалары әр аттас $+q$ және $-5q$ болатындай етіп зарядталған. Шариктер түйістіріліп, кейіннен бастапқы орнына апарып қойылды. Шариктердің әсерлесу күшінің шамасы қалай өзгерді?

Берілгені:

$$q_1 = +q$$

$$q_2 = -5q$$

$$\frac{F_1}{F_2} = ?$$

Шешуі. Екі әр аттас зарядталған шариктердің арасында кулондық тарту күші әсер етеді:

$F_1 = \frac{kq \cdot |-5q|}{r^2} = \frac{5kq^2}{r^2}.$ Шариктерді түйістіргенде зарядтардың қайта бөлінуі жүзеге асады. Шариктер бірдей болғандықтан, олардың зарядтары теңеседі:

$$q_1' = q_2' = \frac{q + (-5q)}{2} = -2q \text{ және сонда}$$

$$F_2 = \frac{k \cdot |-2q| \cdot |-2q|}{r^2} = \frac{4kq^2}{r^2}; \quad \frac{F_1}{F_2} = \frac{5}{4}; \quad F_2 = \frac{F_1}{1,25}.$$

3-есеп. Заряды 1 нКл, диаметрі 0,1 см мыс шарик майға орналастырылған. Егер барлық жүйе біртекті, тік жоғары бағытталған

10 кН/Кл өрісте болса, онда шарик қозғала отырып, 1 с қандай қашықтықты және қандай бағытта өтеді? Ортаның кедергісі ескерілмейді. Шариктің бастапқы жылдамдығы нөлге тең.

Берілгені:

$$d = 0,1 \text{ см} = 10^{-3} \text{ м}$$

$$q = 1 \text{ нКл} = 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$\rho_c = 0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_d = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$E = 10 \text{ кН/Кл} = 10^4 \text{ Н/Кл}$$

$$v_0 = 0$$

$s = ?$

$$\text{Шешуі. } s = v_0 t + \frac{at^2}{2} = \frac{at^2}{2}.$$

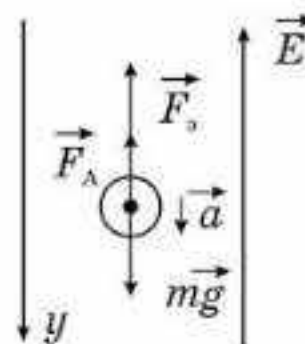
s анықтау үшін \vec{a} үдеу керек, оны динамиканың негізгі теңдеуінен анықтауға болады: $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{F}_s + \vec{F}_A$ (51.9-сурет). Оу осіне проекциясы $ma = mg - F_s - F_A$; $F_s = qE$; $F_A = \rho_c g V = \rho_c g \frac{4}{3} \pi r^3$; $m = \rho_d V = \rho_d \frac{4}{3} \pi r^3$.

Барлық күштің мәнін скалярлық теңдеуге қойып, үдеуді өрнектесек,

$$ma = mg - F_s - F_A = \rho_d g \frac{4}{3} \pi r^3 - qE - \rho_c g \frac{4}{3} \pi r^3. \text{ Онда}$$

$$a = \frac{\frac{4}{3} \pi \rho_d g r^3 - qE - \frac{4}{3} \pi \rho_c g r^3}{\frac{4}{3} \pi \rho_d r^3} = 0,68 \text{ м/с}^2;$$

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2} = \frac{0,68}{2} = 0,34 \text{ м.}$$



51.9-сурет

Жауабы: $s = 0,34$ м, төмен қарай

4-есеп. Ұзындығы бірдей жіпке ілінген шамалары бірдей аттас зарядталған екі шарик керосинге батырылады. Бұл кезде жіптердің алшақтау бұрышы өзгермейді. Шарик материалының тығыздығы қандай?

Берілгені:

$$\varepsilon_1 = 1$$

$$\rho_k = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

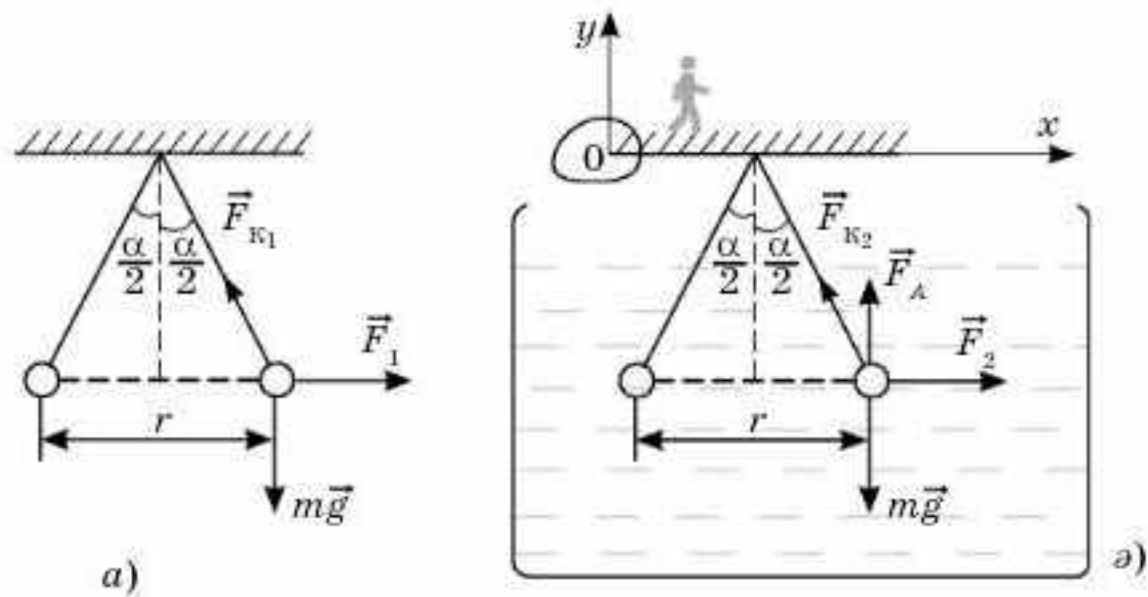
$$\varepsilon_2 = 2$$

$\rho = ?$

Шешуі. Санақ жүйесін жермен байланыстырамыз. Координаталар осін 51.10, а-суреттегідей бағыттауымыз.

Шариктер бірдей және бірдей жағдайда болатындықтан, олардың кез келген біреуінің тепе-теңдігін зерттеу жеткілікті.

Екі жағдайда да, мысалы, оң жақтағы шарикке әсер ететін күштер: $m\vec{g}$ — ауырлық күші; $\vec{F}_{K_1}, \vec{F}_{K_2}$ — жіптің керілу күші; \vec{F}_1, \vec{F}_2 — электростатикалық тебу күші (кулондық күштер); \vec{F}_A — сұйық тарапынан әсер ететін Архимед күші. Ауадағы Архимед күшін ескермейміз, өйткені $\rho_{\text{ауа}} \ll \rho_{\text{ш}}$.



51.10-сурет

Шариктердің таңдалған осьтерге проекциясының бірінші және екінші жағдай үшін тепе-теңдік шарттарын жазамыз (51.10, а-сурет).

1-жағдай.

$$F_1 - F_{к1} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 0 \text{ (Ox бойынша); } F_{к1} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - mg = 0 \text{ (Oy бойынша).}$$

2-жағдай.

$$F_2 - F_{к2} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 0 \text{ (Ox бойынша); } F_{к2} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + F_A - mg = 0 \text{ (Oy бойынша).}$$

Теңдеулер жүйесін жазайық:

$$\left. \begin{aligned} F_{к1} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) &= F_1, \\ F_{к1} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) &= mg, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{к2} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) &= F_2, \\ F_{к2} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) &= mg - F_A. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Әр жүйедегі бірінші теңдеуді екіншіге бөлеміз:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{F_1}{mg} = \frac{F_2}{mg - F_A}, \quad (3)$$

$F_1 = \frac{kq_1 q_2}{\epsilon_1 r^2}$ болғандықтан, $F_2 = \frac{kq \cdot q_2}{\epsilon_2 r^2}$ және $F_{A2} = \rho_k gV$, ал $m = \rho V$, (3) былай

жазылады: $\frac{kq_1 q_2}{\epsilon_1 r^2 mg} = \frac{kq_1 q_2}{\epsilon_2 r^2 (mg - F_A)}$ немесе $1 - \frac{F_A}{mg} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$, онда $\frac{\rho_k gV}{\rho V} = 1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$.

Бұдан $\rho = \frac{\rho_k}{1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} = 1600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Үйкеліс арқылы денелердің электрленуі. Жібек жіпке жеңіл қағаз гильза іліндер. Жібек шүберекке шыны таяқшаны үйкеп, оны қағаз гильзаға жақындатыңдар. Не болатынын бақылаңдар.

Тәжірибе жасаңдар

Электроскопты зарядтап, оның жапырақшаларының қалай тұрғанын естеріңе сақтап алып, оны өткізгіш арқылы екінші электроскоппен жалғап, жапырақшалардың орнының қалай өзгергенін бақылаңдар. Электроскоптың бірін разрядтап, тәжірибені тағы қайталаңдар. Бақылаудың нәтижелері жөнінде қорытындылар жасаңдар.

Зерттеңдер

Зарядталған шардың электр өрісінің арақашықтықтан тәуелділігін зерттеңдер. Ол үшін зарядталған шардың өрісіне жіпке ілінген, аттас зарядпен зарядталған кішкентай шарды алып келіңдер. Бұдан әрі кішкене шар ілінген жіптің вертикаль ауытқу бұрышының шарлар арақашықтығынан тәуелділігін жазыңдар. Тәуелділіктің графигін салыңдар. Сәйкес теориялық есептеулер жүргізіңдер. $E = E(r)$ тәуелділігінің түрін анықтаңдар.

Түсіндіріңдер

1. Біртекті зарядталған сфераның центріндегі электр өрісінің кернеулігі неге тең?
2. Кей кезде электр өрісінің күш сызықтары деп осы өріске әкеліп қойылып, бос жіберген оң зарядтың қозғалу траекториясы деп айтады. Бұл тұжырым орынды ма?

Талдаңдар

1. Шамасы жағынан бірдей екі заряд бір-бірінен белгілі бір арақашықтықта орналасқан. Осы зарядтардың дәл ортасындағы нүктеде кернеулігі қай кезде басым: олар аттас зарядталғанда ма, жоқ әлде әр аттас зарядталса ма? Нақты есептеулер жасаңдар.

2. Егер екі бірдей металл кішкене шарды шамалары әртүрлі аттас зарядтармен зарядтап, бір-бірімен түйістіріп, содан соң ажыратса, онда олардың әсерлесу күші қалай өзгереді? Өз қорытындыларыңды нақты есептеулермен бекітіңдер.

3. Зарядталған екі жазықтықтың арасындағы біртекті өрістің кернеулігі, егер олардың арасын екі есе алыстатсақ, өзгере ме?

Ойлап табыңдар

Электр өрісінің суперпозициялық (қабаттасуына) қасиетіне есеп ойлап табыңдар.

Шығарындар

1. а) $q_1 = q_2$ әр аттас зарядталған жазықтықтардың; ә) $q_1 = -2q_2$ екі нүктелік зарядтың электр өрісіндегі күш сызықтарын салындар.

2. Кернеулігі $0,2 \text{ МВ/м}$ электр өрісіне түскен электрон қандай үдеу алады?

3. Шамасы 8 мкКл зарядтан қандай қашықтықта өрістің кернеулігі 800 кВ/м болады?

4. Вакуумдағы біртекті электр өрісінде массасы 400 нг , заряды 16 пКл шаң-тозаң бөлшегі бар. Ол бөлшек тепе-теңдікте қалу үшін өрістің кернеулігі қандай және қайда бағытталуы керек?

5. Сұйық диэлектрикте тұрған шамасы 4 нКл зарядтан 3 см қашықтықтағы өрістің кернеулігі 20 кВ/м . Диэлектриктің диэлектрлік өтімділігі қандай?

■6. Сутек атомы оң зарядталған ядродан және оның маңында қозғалып жүрген электроннан тұрады. Егер электрон орбитасының радиусы $3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ болса, ядроға құлап түспес үшін ол қандай жиілікпен айналуы керек? Электрон массасы $9 \cdot 10^{-28} \text{ г}$.

Жауабы: $5 \cdot 10^{17} \text{ Гц}$

7. Судың екі бірдей тамшысында бір-бір артық электроннан бар және олардың электр күшінің әсерінен тебілуі гравитациялық күштердің салдарынан тартылуымен теңесіп тұр. Тамшылардың радиусы қандай болғаны?

Жауабы: 76 мкм

8. $9 \cdot 10^{-6}$ және 10^{-6} Кл нүктелік зарядтардың арақашықтығы 8 см . Бірінші зарядтан қандай қашықтықта өрістің кернеулігі нөлге тең болады?

Жауабы: 6 см

■9. Радиусы 10 см шеңберде үш $q_1 = q_2 = 10^{-8} \text{ Кл}$ және $q_3 = -10^{-8} \text{ Кл}$ нүктелік зарядтар бір-бірінен бірдей қашықтықтарда орналасқан. Шеңбердің центріндегі өріс кернеулігін анықтаңдар.

Жауабы: $1,8 \cdot 10^4 \text{ В/м}$

10. Глицериндегі өрісті $7,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ нүктелік заряд тудырған. Зарядтан $7,0 \text{ см}$ қашықтықта орналасқан нүктедегі өріс кернеулігі неге тең болады?

Жауабы: $3,0 \text{ кВ/м}$

11. Егер нүктелік $4,5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ электр зарядынан $5,0 \text{ см}$ қашықтықтағы өріс кернеулігі $2,0 \cdot 10^4 \text{ В/м}$ болса, онда заряд қандай ортада орналасқан?

Жауабы: суда

■12. Үш бірдей аттас q заряд бір-бірінен бірдей a қашықтықта орналасқан. Үшбұрыштың центрінде осы зарядтар тудыратын өрістің кернеулігі қандай болады? Егер осы зарядтардың біреуінің таңбасы қарама-қарсы болса, онда кернеулік неге тең?

Жауабы: $0; \frac{3q}{2\pi\epsilon_0 a^2}$



Рефлексия

1. Қандай деңгейде материалды меңгердіңдер?
2. Саған тақырыпты қосымша түсіндіру қажет пе?
3. Тақырыпты меңгеру кезінде қандай қиындықтар туындады?

§ 52. Электр өрісі кернеулігі векторының ағыны. Гаусс теоремасы



Тірек ұғымдар: кернеулік векторының ағыны, Гаусс теоремасы, зарядтың беттік, сызықтық және көлемдік тығыздығы.

Бүгінгі сабақта: электр өрісі кернеулігі векторларының ағыны түсініктерімен танысасыздар; Гаусс теоремасын қолданып шар мен жазықтықтың электр өрісінің кернеулігін анықтауды үйренесіздер.

Қозғалмайтын, оқшауланған нүктелік зарядтың электр өрісінің күш сызықтарын толығырақ қарастырайық. Олар зарядтың тұрған орнынан шығатын симметриялы орналасқан радиал сызықтар (52.1-сурет).

Бұл сызықтардың саны N дейік. Сонда радиусы r сфера бетінің бірлік ауданын қиып өтетін сызықтар саны (зарядтан қашықтықтағы күш сызықтарының қоюлығы) $\frac{N}{4\pi r^2}$ тең.

Осы қатынасты нүктелік заряд өрісінің

$$E = \frac{kq}{r^2}$$

кернеулігімен салыстырсақ, күш сызықтарының қоюлығы электр өрісі кернеулігіне пропорционал екенін байқаймыз. Сонда күш сызықтарының толық санын алып, осы екі өрнекті теңестіруге болады:

$$\frac{N}{4\pi r^2} = k \frac{kq}{r^2},$$

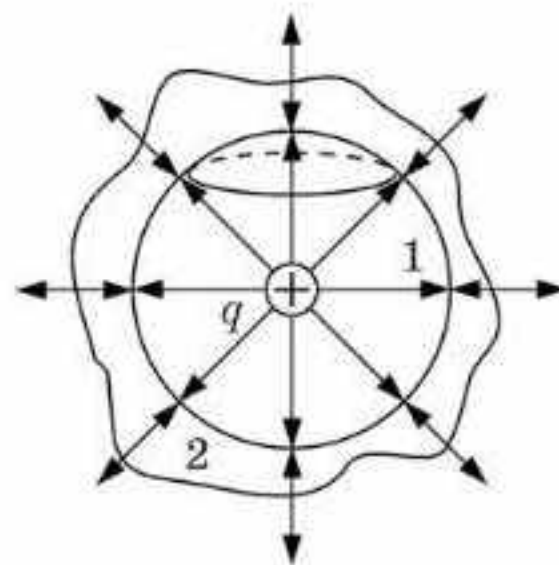
осыдан

$$N = 4\pi kq \quad (52.1)$$

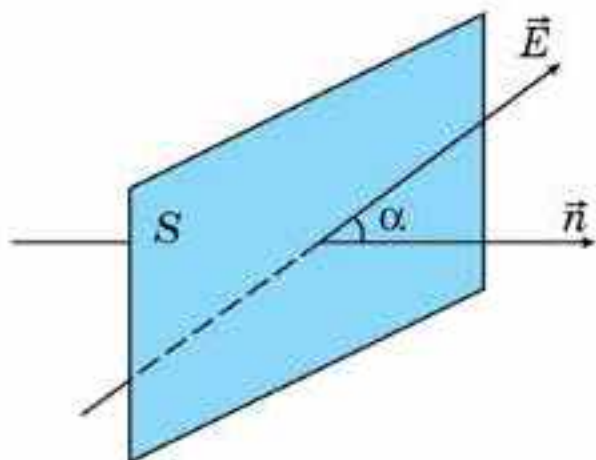
теңдігін аламыз.

Соңғы өрнектен нүктелік зарядты қоршайтын кез келген радиусты сфераның бетінен өтетін күш сызықтарының саны бірдей екенін көреміз. Демек, күш сызықтары үзіліссіз. Сонда зарядты қоршайтын кез келген 2 түйық беттен өтетін күш сызықтарының саны дәл сондай (52.1-сурет). Осылайша жаңа физикалық шама — *электр өрісі кернеулігінің ағынын* енгізудің қажеттілігі пайда болады. Электр өрісінің кернеулік ағыны берілген нүктедегі электр өрісінің кернеулігіне емес, аудан беті бойынша өрістің таралуына тәуелді.

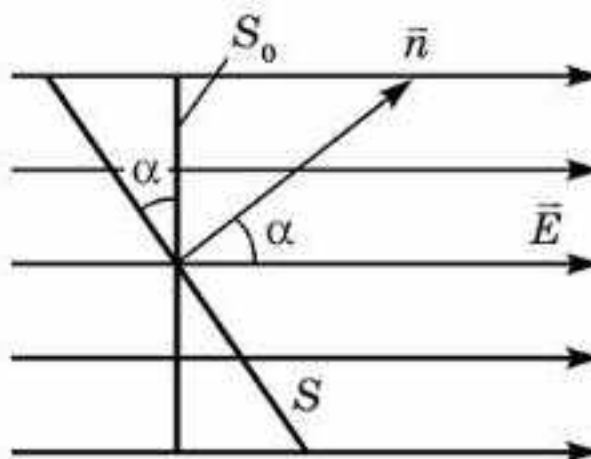
Әрбір нүктедегі электр өрісінің кернеулігі бірдей болатын ауданның кішкене S элементін бөліп алып, сол элементке \vec{n} нормаль тұрғызайық



52.1-сурет



52.2-сурет



52.3-сурет

(52.2-сурет). \vec{E} векторы мен \vec{n} арасындағы бұрышты α деп белгілесек, S ауданды қиып өтетін N күш сызықтары мына теңдікпен анықталады:

$$N = E_n S = E S \cos \alpha. \quad (52.2)$$

Осыдан *электр өрісінің кернеулік ағыны берілген бет элементінен қанша күш сызықтарының өтетінін көрсететін шама* екені шығады. S элементтен өтетін күш сызықтары сол элементтің кернеулік \vec{E} векторына перпендикуляр жазықтықтағы S_0 проекциясын да тесіп өтеді (52.3-сурет). Өрістің кернеулік векторының ағыны скаляр шама. Ол оң да, теріс те болуы мүмкін.

Қалауымызша алынған еркін беттен өтетін өріс кернеулігінің ағыны сол беттің элементар аудандарынан өтетін ағындардың қосындысына тең. Сондықтан нүктелік q зарядтың электр өрісі кернеулігінің ағыны сол зарядты қоршаған кез келген тұйық беттен өтетін күш сызықтарының санына тең, яғни $4\pi kq$. Егер осы беттің ішіндегі заряд оң болса, онда элементар ауданға тұрғызылған нормаль сыртқа қарай, егер теріс болса, ішке қарай бағытталады.

Егер тұйық контур ішінде бірнеше заряд болса, онда суперпозиция принципіне сәйкес олардың өріс кернеуліктерінің ағыны қосылады да, толық ағын $4\pi kq$ тең болады, мұндағы q — сол бет ішіндегі барлық зарядтардың алгебралық қосындысы.

Егер тұйық контурдың ішінде электр заряды жоқ болса, онда сол беттен өтетін электр өрісі кернеулігінің ағыны нөлге тең, яғни берілген көлемге қанша күш сызықтары кірсе, сонша күш сызықтары сыртқа шығады.

Гаусс теоремасы: вакуумда кез келген тұйық беттен өтетін электр өрісі кернеулік векторының ағыны сол бет ішіндегі толық зарядқа пропорционал.

Гаусс теоремасының математикалық өрнегі былай жазылады:

$$N = 4\pi kq. \quad (52.3)$$

ХБ жүйесінде $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ екені белгілі, олай болса, тұйық беттен өтетін электр өрісі кернеулігінің ағыны

$$N = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} \quad (52.4)$$

формуласынан табылады, мұндағы ϵ — ортаның диэлектрлік өтімділігі.

Еркін таңдап алынған пішіндегі зарядталған денелердің электр өрісі кернеулігін Гаусс теоремасын пайдаланып жеңіл есептеуге болады.

Зарядталған металл шардың өрісі. Металл шарды радиусы өріс кернеулігін есептейтін нүктеден шардың центріне дейінгі қашықтыққа тең шеңбер бетпен қоршайық. Кернеулік ағынының анықтамасына сәйкес

$$N = E_n S = 4\pi r^2 E .$$

Екінші жағынан, Гаусс теоремасы бойынша ол ағын $N = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0}$ тең.

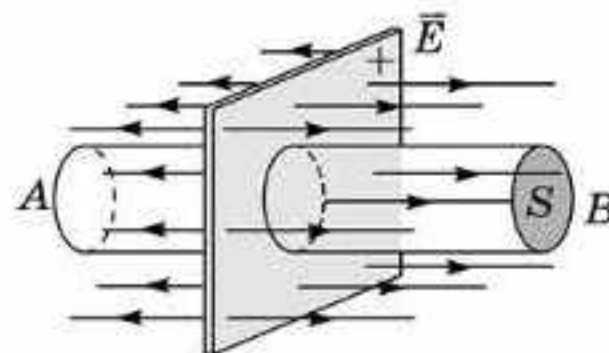
Сонда бізге керек шар сыртындағы ($r > R$) электр өрісінің кернеулігі

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \quad (52.5)$$

формуласымен есептеледі.

Демек, шар сыртындағы өріс кернеулігі шар центріне орналас-тырылған нүктелік заряд өрісінің кернеулігімен бірдей. Шардың ішіндегі өріс кернеулігі нөлге тең, себебі шардың барлық заряды оның бетінде, біздің ойша жүргізген сферамыздың сыртында ($r < R$) орналасқан.

Бірқалыпты зарядталған шексіз жазықтық өрісі. Зарядталған шексіз жазықтықтың күш сызықтары жазықтықтан басталатын оған перпендикуляр түзулер болғандықтан, жазықтықтың өрісі біртекті (52.4-сурет).



52.4-сурет

Гаусс теоремасын қолдану үшін тұйық бет ретінде табандары зарядталған жазықтықтың екі жағынан беті күш сызықтарына параллель цилиндр аламыз. Бұл жағдайда бүйір бетінен өтетін өріс кернеулігінің ағыны нөлге тең. Тұйық беттен өтетін толық ағын цилиндрдің табандарынан өтетін ағындардың қосындысына тең:

$$N = 2ES.$$

Гаусс теоремасы бойынша осы ағын $N = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0}$ тең.

Осыны ескерсек, зарядталған жазықтық өрісінің кернеулігі мына формуламен есептеледі:

$$E = \frac{q}{2\epsilon\epsilon_0 S}. \quad (52.6)$$

Электростатикада есеп шығаруды жеңілдету үшін зарядтың беттік тығыздығы ұғымы енгізілген. Ол беттің бірлік ауданына келетін зарядпен анықталады:

$$\sigma = \frac{q}{S}. \quad (52.7)$$

(52.7) формуласын ескерсек, (52.6) формула мына түрге ие болады:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}. \quad (52.8)$$



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Электр өрісінің кернеулік ағыны шамасының мағынасы қандай?
2. Өрістің кернеулік векторының ағыны оң да, теріс те болуы мүмкін. Мұны қалай түсінуге болады?
3. Гаусс теоремасының мәні неде?
4. Гаусс теоремасы кез келген пішіндегі дененің өріс кернеулігін есептеуге мүмкіндік береді ме?



Рефлексия

1. Қандай деңгейде материалды меңгердіңдер?
2. Саған тақырыпты қосымша түсіндіру қажет пе?
3. Тақырыпты меңгеру кезінде қандай қиындықтар туындады?

§ 53. Электр өрісі күштерінің жұмысы



Тірек ұғымдар: электр өрісінің потенциалы, потенциалдар айырымы, эквипотенциалдық беттер, зарядтың сызықтық тығыздығы, зарядтың беттік тығыздығы, зарядтың көлемдік тығыздығы.

Бүгінгі сабақта: электр өрісінің кернеулігі мен кернеу арасындағы байланысты анықтайсыңдар; электр өрісі күшінің жұмысын есептеп үйренесіңдер.

Біртекті электр өрісінде q заряд орын ауыстырған кезде электр күштерінің атқаратын жұмысын анықтайық ($\vec{E} = \text{const}$). q заряд біртекті электр өрісінің B нүктесінде болсын (53.1-сурет). Жұмыс оған жұмсалатын күштің орын ауыстыруға және олардың арасындағы бұрыштың косинусының көбейтіндісіне тең болатынын механика курсынан білеміз. Сондықтан q заряды C нүктесінен BnC түзуі бойынша орын ауыстырса, онда күш жұмысы

$$A_{BnC} = F \cdot BC \cdot \cos \alpha = qE \cdot BC \cdot \cos \alpha$$

өрнегімен анықталады. $BC \cdot \cos \alpha = BD$, сонда $A_{BnC} = qE \cdot BD$ немесе $A_{BnC} = qE \cdot L$.

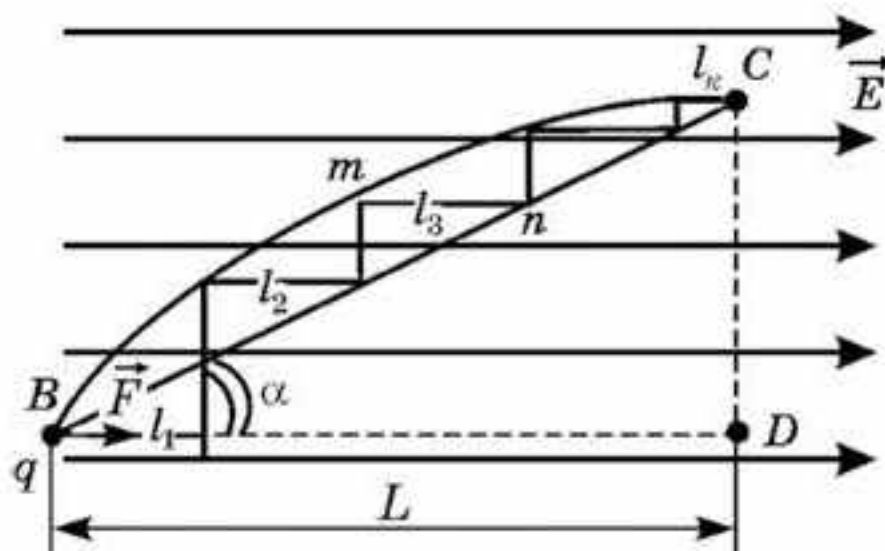
q зарядының C нүктесіне BDC траекториясымен орын ауыстырған кездегі өріс күштерінің жасаған жұмысы BD және DC кесінділерінде атқарылған жұмыстардың қосындысына тең, яғни

$$A_{BDC} = A_{BD} + A_{DC} = qE \cdot BD + qE \cdot DC \cos 90^\circ.$$

$\cos 90^\circ = 0$ болғандықтан, өріс күштерінің DC бөлігіндегі жұмысы нөлге тең. Сондықтан

$$A_{BDC} = qE \cdot BD = qEL.$$

Демек, заряд кернеулік сызығы бойымен, содан кейін оған перпендикуляр орын ауыстырған кезде өріс күштері тек өрістің кернеулік сызығы бойымен орын ауыстыруы кезінде ғана жұмыс атқарады.



53.1-сурет

Енді өріс күштерінің қисық сызықты BmC бөлігінде атқаратын жұмысын анықтайық. Бұл бөліктің әрбіреуін түзу сызық деп қарастыруға болатындай кішкене кесінділерге бөлеміз (53.1-сурет). Жоғарыда дәлелденгендей, әрбір осындай бөліктегі жұмыс кернеулік сызығының сәйкес l_i кесіндісіндегі жұмысқа тең. Сонда BmC жолдағы толық жұмыс l_1, l_2, l_3 және т.б. кесінділердегі жұмыстардың қосындысына тең болады:

$$A_{BmC} = qE(l_1 + l_2 + \dots + l_k).$$

Жақша ішіндегі қосынды BD ұзындығына тең, яғни

$$A_{BmC} = qE \cdot BD = qE \cdot L. \quad (53.1)$$

Сонымен, біртекті электр өрісінде электр күштерінің жұмысы жолдың пішініне тәуелсіз. Бұл қорытынды біртекті емес өріс үшін де орындалады. Демек, электр өрісін тудыратын электр зарядтарының кеңістіктегі таралуы уақыт бойынша өзгермесе, онда өріс күштері консервативтік болып табылады.

BmC және BnC бөліктердегі өріс күштері жұмысының бірдей болуынан (53.1-сурет) тұйық контурда өріс күштерінің жұмысы нөлге тең. Шынында, егер BmC бөлікте өріс күштерінің жұмысы оң болса, онда CnB бөлікте ол теріс. Сонымен, тұйықталған контур бойында электр өрісі күштерінің жұмысы әрқашан нөлге тең.

Тек консервативтік күштер әсер ететін кезде ғана жұмыс энергия өзгерісінің бірден-бір мөлшері болып табылады. Консервативтік күш өрісі, яғни жұмысы жолдың пішініне тәуелсіз болатын өріс потенциалдық деп аталады. Тартылыс және электр өрісі — потенциалдық өрістер.

Зарядтың потенциалдық энергиясы. Электр өрісінің күштері потенциалдық, яғни зарядты B нүктесінен C нүктесіне (53.1-сурет) алып өткенде осы өріс күштерінің атқаратын жұмысы зарядтың электр өрісіндегі потенциалдық энергиясының өзгерісінің мөлшері бола алады. Егер зарядтың B нүктесіндегі потенциалдық энергиясын W_B арқылы, ал C нүктесінде W_C арқылы белгілесек, онда

$$A_{BC} = W_B - W_C. \quad (53.2)$$

Жалпы жағдайда егер заряд электр өрісінде потенциалдық энергиясы W_1 болатын 1-нүктеден потенциалдық энергиясы W_2 болатын 2-нүктеге өтетін болса, онда өріс күштерінің жұмысы

$$A_{12} = W_1 - W_2 = -(W_2 - W_1) = -\Delta W_{21}, \quad (53.3)$$

мұндағы $\Delta W_{21} = W_2 - W_1$ — заряд 1-нүктеден 2-нүктеге орын ауыстырғандағы потенциалдық энергиясының өсімшесі.

(53.2) формуладан көріп отырғанымыздай, жұмыстың өзгерісі арқылы q зарядтың потенциалдық энергиясының өрістің B және C

нүктелерінің арасындағы өзгерісіне тең екенін ғана біле аламыз, бірақ оның потенциалдық энергиясын өрістің қайсыбір нүктесінде бағалауға мүмкіндік беретін ешбір тәсіл жоқ. Осы анықталмағандықтан құтылу үшін қалауымызша алған өрістің бір нүктесінде потенциалдық энергияны шартты түрде нөл деп аламыз. Сонда қалған барлық нүктелерде потенциалдық энергия енді бірімәнділікпен анықталатын болады. *Өріс тудыратын зарядталған денеден шексіз алыста орналасқан нүктедегі зарядтың потенциалдық энергиясын нөлге тең деп санау келісілген:*

$$W_{\infty} = 0.$$

Сонда q зарядты B нүктесінен шексіздікке апарғандағы жұмыс

$$A_{B\infty} = W_B - W_{\infty} = W_B$$

болады. Демек, мұндай шарт кезінде *өрістің қайсыбір нүктесіндегі зарядтың потенциалдық энергиясы осы зарядты өрістің берілген нүктесінен шексіздікке алып барғанда өріс күштері атқаратын жұмысқа тең.*



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Біртекті өрістегі зарядтың орын ауыстыруы кезіндегі электр өрісі күшінің жасайтын жұмысын қандай формуламен анықтайды?
2. Потенциалдық өріс деп қандай өрісті атайды?
3. Электр өрісінің потенциалдық өріс екенін дәлелдендер.
4. Тұйық контур бойымен заряд орын ауыстырған кездегі электростатикалық өріс күшінің жұмысы неге тең?
5. Біртекті электр өрісіндегі зарядтың потенциалдық энергиясын қалай есептеуге болады?
6. Электр өрісіндегі зарядтың потенциалдық энергиясы заряд орын ауыстырған кездегі электр күшінің жұмысымен қалай байланысқан?

Шығармашылық шеберхана

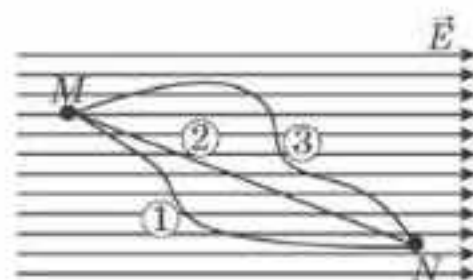
Түсіндіріңдер

Зарядтардың потенциал өзара әсерлесуі: а) өзгермеуі; ә) азаюы; б) артуы үшін нүктелік зарядты басқа қозғалыссыз заряд өрісіне қалай орын ауыстыру керек?

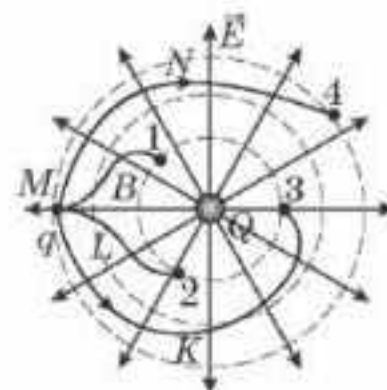
Талдаңдар

1. Біртекті электростатикалық өрісте q заряд M нүктесінен N нүктесіне әртүрлі траекториямен орын ауыстырды (53.2-сурет). Осы траектория бойынша қозғалған зарядтың жасаған жұмысының қатынасын талдаңдар.

2. $+Q$ зарядының әсерінен электростатикалық өріс туындады. q теріс заряд M нүктесінен әртүрлі бағытқа орын ауыстырды (53.3-сурет). Осы траектория бойынша орын ауыстырған кезде жасалатын жұмыс модулінің қатынасын анықтаңдар.



53.2-сурет



53.3-сурет

Шығарыңдар

1. Екі параллель пластиналар арасындағы бірыңғай электр өрісінің кернеулігі 10 кВ/м , олардың арасындағы қашықтық 5 см . 5 мкКл заряд бір жазықтықтан екіншісіне орын ауыстырғанда қандай жұмыс жасайтынын анықтаңдар.

Жауабы: $2,5 \text{ мДж}$

2. $q_1 = 10 \text{ нКл}$ және $q_2 = -1 \text{ нКл}$ зарядтардың арақашықтығы $1,1 \text{ м}$. Потенциалы нөлге тең түзудің бойында орналасқан зарядтардың өріс кернеулігін есептеңдер.

Жауабы: 990 В/м

3. A нүктесінен 2 м , ал B нүктесінен 1 м арақашықтықта 100 нКл нүктелік заряд орналасқан. A және B нүктелерінің потенциалдар айырмасын табыңдар.

Жауабы: 450 В/м

■4. 10 мкКл нүктелік зарядтың кернеулігі A нүктесінде $2,5 \text{ кВ/м}$, B нүктесінде $3,6 \text{ кВ/м}$ тең. A нүктесінен B нүктесіне 200 нКл зарядты орын ауыстыру үшін қандай жұмыс жасалу керек?

Жауабы: $0,6 \text{ мДж}$

■5. Потенциалы 600 В , жылдамдығы 12 Мм/с тең электрон күш сызықтарының бойымен нүктелік өрістен ұшып шықты. Электронның жылдамдығы нөлге тең болатын нүктенің потенциалын есептеңдер.

Жауабы: $190,5 \text{ В}$

Рефлексия

1. Қандай деңгейде материалды меңгердіңдер?
2. Саған тақырыпты қосымша түсіндіру қажет пе?
3. Тақырыпты меңгеру кезінде қандай қиындықтар туындады?

§ 54. Электр өрісінің потенциалы



Тірек ұғымдар: потенциал, эквипотенциалдық беттер.

Бүгінгі сабақта: электр өрісінің потенциалын есептеуді, электр өрісін және күштерін сипаттап, байланыстыратын формуланы қолдануды үйренесіңдер.

Біз электр зарядының потенциалдық энергиясының оның электр өрісіндегі орнына тәуелді болатынын тағайындадық. Сондықтан электр өрісі нүктелерінің энергетикалық сипаттамасын енгізген дұрыс.

Электр өрісінде q зарядқа әсер ететін күш q зарядтың өзіне тура пропорционал, сондықтан заряд орын ауыстырған кездегі атқаратын өріс күштерінің жұмысы да q зарядқа тура пропорционал. Демек, электр өрісінің кез келген бір B нүктесіндегі потенциалдық энергиясы да осы зарядқа тура пропорционал, яғни

$$W_B = \Phi_B q. \quad (54.1)$$

Φ_B пропорционалдық коэффициенті өрістің әрбір берілген нүктесі үшін тұрақты және өрістің осы нүктедегі энергетикалық сипаттамасы бола алады.

Электр өрісінің берілген нүктедегі энергетикалық сипаттамасы Φ өрістің осы нүктедегі потенциалы деп аталады. Потенциал өрістің берілген нүктесіндегі бірлік оң зарядтың потенциалдық энергиясы мен өлшенеді:

$$\Phi_B = \frac{W_B}{q}. \quad (54.2)$$

Жұмыстың жоғарыда келтірілген анықтамасынан *электр өрісі нүктесінің потенциалы сан мәні жағынан бірлік оң зарядты осы нүктеден шексіздікке алып өткенде электр өрісі күштерінің атқаратын жұмысына тең болатыны шығады.*

Электр өрісі мен гравитациялық өрістің (ауырлық күші өрісі) бір-біріне ұқсастығы және айырмашылығы қандай?

Егер өрісті туғызатын Q зарядтан потенциалы ізделініп отырған 1-нүктеге дейінгі қашықтықты r_1 деп белгілесек, онда бұл нүктедегі потенциал

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_1} \quad (54.3)$$

болады. (54.3) формула бойынша шардың бетінде біркелкі таралған q зарядтың шардан тыс орналасқан барлық нүктелерде тудыратын өрістерінің потенциалы да есептелінетінін айта кетейік. Бұл жағдайда r_1 шардың центрінен белгілі бір нүктеге дейінгі қашықтықты білдіреді. Оң зарядтың потенциалы зарядтан алыстаған кезде кемиді, ал теріс зарядтың потенциалы керісінше артады. Потенциал скаляр шама, сондықтан егер өрісті көп заряд тудырса, онда *өрістің кез келген*

нүктесіндегі потенциалы осы нүктеде әрбір жеке зарядтар тудыратын потенциалдарының алгебралық қосындысына тең болады.

Потенциалдар айырымы. Өріс күштерінің жұмысын потенциалдар айырымының көмегімен өрнектеуге болады. q_c заряды 1- және 2-нүктелердің арасында орын ауыстырғанда электр өрісі күштерінің атқаратын жұмысы мына формуламен анықталады:

$$A_{12} = -\Delta W_{21} = -(W_2 - W_1).$$

W_p шамасын оның (54.1) формуласындағы мәнімен алмастырып,

$$A_{12} = -(\phi_2 q_c - \phi_1 q_c) = -q_c(\phi_2 - \phi_1) = -q_c \Delta \phi$$

екенін табамыз. $\Delta \phi = \phi_2 - \phi_1$ потенциалдар айырымының орнына траекторияның бастапқы және соңғы нүктелеріндегі $(\phi_1 - \phi_2)$ потенциалдар айырымын алсақ, $A_{12} = q_c(\phi_1 - \phi_2)$ шығады. $(\phi_1 - \phi_2)$ потенциалдар айырымы 1- және 2-нүктелердің арасындағы кернеу деп аталады және U_{12} түрінде белгіленеді. Сонымен, $A_{12} = q_c U_{12}$. Индекстерін алып тастасақ, $A = qU$.

Демек, q заряд өрістің екі нүктесінің арасында орын ауыстырғанда өріс күштерінің жасайтын жұмысы осы нүктелер арасындағы кернеуге тура пропорционал. U кернеудің ХБ жүйесіндегі өлшем бірлігі:

$$[U] = \left[\frac{A}{q} \right] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = 1 \text{ В.}$$

1 В деп 1 Кл зарядты өрістің бір нүктесінен екінші нүктесіне орын ауыстыру үшін өріс күштері 1 Дж жұмыс атқаратын кезде өрістің екі нүктесі арасындағы кернеуін (потенциалдар айырымын) айтады.

Эквипотенциалдық беттер. (54.3) формуладан көріп отырғанымыздай, өрістің Q нүктелік зарядтан r_1 қашықтықта жатқан барлық нүктелерінде ϕ_1 потенциал бірдей. Бұл барлық нүктелер q нүктелік заряд орналасқан нүктеден r_1 радиуспен сырттай сызылған сфераның бетінде жатады.

Барлық нүктелерінің потенциалдары бірдей болатын бет **эквипотенциалдық бет** деп аталады (латынша “экви” — “тең”). Эквипотенциалдық бет үшін $\phi = \text{const}$ қатынасы орындалады.

Электр өрісінің кернеулік сызықтары эквипотенциал беттерге перпендикуляр, яғни заряд эквипотенциал бетпен орын ауыстырғанда өріс күштерінің жұмысы нөлге тең.

q заряд орын ауыстырған кезде атқарылатын өріс күштерінің жұмысы тек траекторияның басы мен соңындағы потенциалдардың айырымымен ғана анықталады, сондықтан q зарядтың бір эквипотенциалдық беттен екіншісіне (олардың потенциалдары ϕ_1 және ϕ_2) өткен кездегі жұмысы траекторияның пішініне тәуелсіз және $A = q(\phi_1 - \phi_2)$ болады.

Өріс күштерінің әсерінен оң зарядтардың үлкен потенциалдан кіші потенциалға қарай, ал теріс зарядтардың, керісінше кіші потенциалдан үлкен потенциалға орын ауыстыратынын есте ұстау керек.

Өткізгіштің потенциалын оның зарядын өзгертпей және оған қолдарыңды тигізбей қалай өзгертуге болатыны жөнінде ойланғандар.

Өрістің кернеулігі мен кернеуі арасындағы байланыс. Біртекті өрістің кернеулігі мен потенциалдар айырымы арасындағы байланысты тағайындайық. Пластиналардың арасындағы кернеу $U = \phi_1 - \phi_2$ болсын. Сонда q_c сынақ заряды бір пластинадан екінші пластинаға орын ауыстырғанда атқарылатын жұмыс $A = q_c U$.

Осы жұмысты F электрлік күштің d жолға көбейтіндісі түрінде де өрнектеуге болады, яғни $A = Fd = q_c Ed$. Соңғы екі формуланың оң жақтарын теңестіріп, $E = \frac{U}{d} = \frac{(\phi_1 - \phi_2)}{d}$ аламыз.

Біртекті өрістің кернеулігі сан мәні жағынан кернеулік сызығының бірлік ұзындығына келетін потенциалдар айырымына тең.

ХБ жүйесінде кернеуліктің өлшем бірлігі ретінде *вольт бөлінген метр* алынады (метрге вольт): $[E] = \left[\frac{U}{d} \right] = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Электр өрісінің кернеулігі зарядтың шамасына және таралуына тәуелді. Денедегі электр зарядының таралуын анықтау үшін *заряд тығыздығы* деген шама енгізілді.

Заряд тығыздығы — бірлік аудан, көлем, ұзындық арқылы өтетін электр зарядының шамасы. Осылай зарядтың беттік, сызықтық, көлемдік тығыздығы анықталады. Заттың тығыздығының өзгешелігі, заряд тығыздығы оң және теріс болуы мүмкін. Төменде заряд тығыздығының формулаларын келтірейік:

1. Зарядтық сызықтық тығыздығы $\tau = \frac{q}{l}$, $[\tau] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}}$.

2. Зарядтың беттік тығыздығы $\sigma = \frac{q}{S}$, $[\sigma] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$.

3. Зарядтың көлемдік тығыздығы $\rho = \frac{q}{V}$, $[\rho] = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^3}$.

Еркін таңдап алынған пішіндегі зарядталған денелердің электр өрісінің кернеулігін Гаусс теоремасын пайдаланып есептеуге болады.

1. Біртекті жазықтық өрісінің кернеулігі $E = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0 2S} = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}$.

2. Біртекті ұзын сым өрісінің кернеулігі $E = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0 2\pi r l} = \frac{\tau}{\epsilon\epsilon_0 2\pi r}$.

3. Жазық конденсатор өрісінің кернеулігі $E = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0 S} = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Потенциалдың физикалық мағынасы қандай?
2. Нүктелік заряд өрісінің потенциалы қандай формуламен табылады?
3. Потенциалдар айырымының физикалық мағынасы қандай?
4. Кернеулік деп нені түсінесіңдер?
5. Қандай беттер эквипотенциалдық деп аталады?
6. Эквипотенциалдық беттердің күш сызықтарын сызыңдар: а) біртекті өрісте; ә) нүктелік заряд өрісінде; б) зарядталған цилиндр өрісінде.

Есеп шығару үлгілері

1-есеп. Әрқайсысының заряды q үш кішкентай шарик вакуумда бір түзудің бойында бір-бірінен a қашықтықта екі жіппен байланысқан. Екі жіпті де бір мезгілде күйдіргенде шеткі шарик қандай максимал кинетикалық энергияға ие бола алады?

Шешуі. Энергияның сақталу заңы бойынша екі зарядталған шариктер жүйесінің потенциалдық энергиясы олардың кинетикалық энергиясына түрленеді: $W_{\text{п}} = 2W_{\text{к}}$, бұдан

$$W_{\text{к}} = \frac{W_{\text{п}}}{2}, W_{\text{п}} = \frac{kq^2}{a} + \frac{kq^2}{2a} + \frac{kq^2}{a} = \frac{5kq^2}{2a} = \frac{5q^2}{8\pi\epsilon_0 a}$$

болғандықтан,

$$W_{\text{к}} = \frac{5q^2}{8\pi\epsilon_0 a \cdot 2} = \frac{5q^2}{16\pi\epsilon_0 a}$$

2-есеп. Потенциалы 615 В нүктеден $12 \cdot 10^6$ м/с жылдамдықпен ұшып шығады. а) Электрон тоқтайтын; ә) электронның жылдамдығы екі есе артатын нүктелердің потенциалын анықтаңдар.

Берілгені:

$$\phi_1 = 615 \text{ В}$$

$$v_1 = 12 \cdot 10^6 \text{ м/с}$$

$$v_2 = 0$$

$$v_2' = 2v_1$$

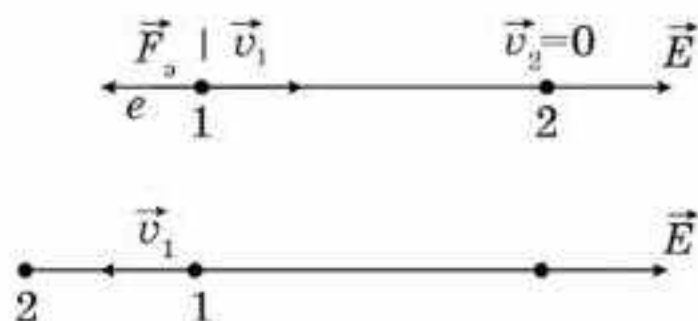
$$\phi_2 = ?$$

Шешуі. Потенциалы 1-нүктеден потенциалы 2-нүктеге өткенде электрон жасайтын жұмыс шамасы $A = e(\phi_1 - \phi_2)$ (54.1-сурет). Бұл кезде оның кинетикалық энергиясы өзгереді, өйткені жылдамдық өзгереді. Сондықтан $A = \Delta W$;

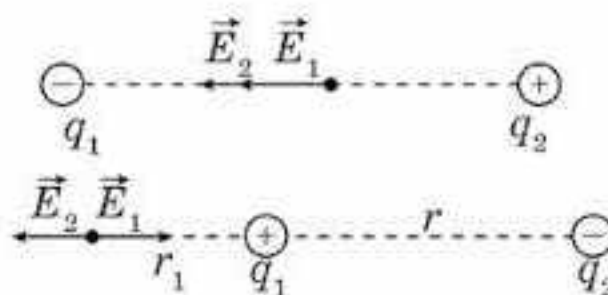
$$\text{а) } e(\phi_1 - \phi_2) = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_2^2}{2};$$

$$\phi_2 = \phi_1 - \frac{mv_1^2}{2|e|} = 205,5 \text{ В.}$$

3-есеп. Екі нүктелік заряд $-1 \cdot 10^{-8}$ Кл және $4 \cdot 10^{-8}$ Кл бір-бірінен 0,2 м қашықтықта вакуумда орналасқан. Зарядтардың ортасындағы нүктедегі өрістің кернеулігі мен потенциалын есептеңдер. Оң зарядтан қандай қашықтықта өріс кернеулігі нөлге тең болады?



54.1-сурет



54.2-сурет

Берілгені:

$$q_1 = -1 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$q_2 = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$r = 0,2 \text{ м}$$

$$E = ? \quad \phi = ?$$

$$r' = ?$$

Шешуі. а) Өрістердің суперпозиция принципі бо-

йынша нүктедегі кернеулігі $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ (54.2-сурет).

Векторларды қосу ережесі бойынша

$$E = E_1 + E_2 = \frac{4k}{r^2} (|q_1| + q_2) = 45000 \text{ В/м.}$$

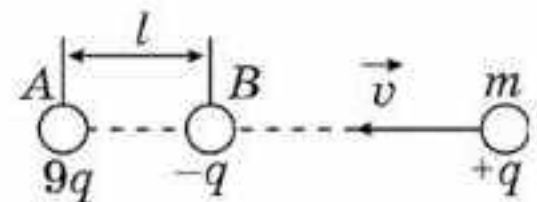
$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = \frac{2k}{r} \cdot (q_1 + q_2) = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot (4 - 1) \cdot 10^{-8}}{0,2} = 2700 \text{ В.}$$

$$\text{ә) } E_1 = E_2; \frac{k|q_1|}{r_1^2} = \frac{kq_2}{(r+r_1)^2}; \frac{r+r_1}{r_1} = \sqrt{\frac{q_2}{q_1}}, \text{ яғни } r_1 = r = 0,2 \text{ м.}$$

$$r' = r_1 + r = 0,4 \text{ м.}$$

Жауабы: 45000 В/м; 2700 В; 0,4 м

4-есеп. А және В нүктелерінде (54.3-сурет) $AB = l$ қашықтықта $9q$ және $-q$ зарядтар орналасқан. АВ түзуінің бойымен оларға қарай массасы m , заряды $+q$ бөлшек қозғалып келеді. Өте үлкен қашықтығы бөлшек В нүктесіне жету үшін қандай ең аз жылдамдыққа ие болу қажет?

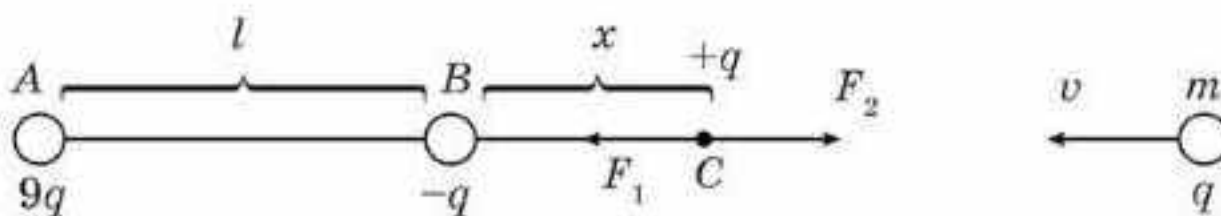


54.3-сурет

Шешуі. Бөлшек В нүктесіне жету үшін оның кинетикалық энергиясы x қашықтықта тұрған С нүктесіне жетуі қажет (54.4-сурет). Бұл нүктеде тебілу күші тартылу күшіне ауысады. Осы қашықтықты табайық. С нүктесінде $F_1 = F_2$, яғни $\frac{k9qq}{(x+l)^2} = \frac{kqq}{x^2}$, бұдан $x = \frac{l}{2}$.

Онда энергияның сақталу заңы бойынша $\frac{mv^2}{2} = \frac{k9qq}{x+l} - \frac{kqq}{x}$ немесе $\frac{mv^2}{2} = \frac{4kq^2}{l}$, бұдан $v = 2q\sqrt{\frac{2k}{ml}}$.

Жауабы: $2q\sqrt{\frac{2k}{ml}}$



54.4-сурет

Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Электрометрге жалғанған сымның ұшын зарядталған өткізгіштің беті арқылы жылжытса, электрометрдің көрсетуі (жапырақшаларының орналасуы) қалай өзгередінін бақылаңдар. Бақыланған нәтижені түсіндіріңдер.

Зерттеңдер

Оң зарядталған шардың күш сызықтары мен эквипотенциалдық сызықтары өзара қалай орналасқанын қарастырыңдар.

Талдаңдар

Әртүрлі эквипотенциалдық беттер бір-бірімен қиылысуы мүмкін бе?

Ойлап табыңдар

Жер бетіне жақын орналасқан оң нүктелік заряд үшін күш сызықтары мен эквипотенциалдық бетті сызып көрсетіңдер.

Шығарыңдар

1. Берілген O нүктесі 10^{-6} Кл нүктелік заряд A нүктесінен 2 м, ал B нүктесінен 1 м қашықтықта орналасқан. A және B нүктелерінің потенциалдар айырымы неге тең? Ол OA және OB түзулерінің арасындағы бұрышқа қалай тәуелді?

■2. Бір-бірінен $2d$ арақашықтықта орналасқан екі нүктелік заряд арқылы өтетін түзудің бойында өрістің потенциалы мен кернеуліктің өзгеру графигін тұрғызыңдар. Зарядтардың шамалары мынадай: а) $+q$ және $-q$; ә) $+q$ және $+q$; б) $+q$ және $-3q$.

■3. Радиусы R жіңішке сақина сымда q заряды біркелкі таралған. Сақина жазықтығына перпендикуляр, сақинаның центрі арқылы өтетін перпендикулярдың қандай да бір нүктесіндегі электр өрісінің потенциалы мен кернеулігін анықтаңдар.

4. Электрон вакуумдағы біртекті электр өрісінде күш сызықтары бағытында қозғалады. Егер электронның бастапқы жылдамдығы $1,8 \cdot 10^3$ км/с, ал өрістің кернеулігі 90 В/м болса, онда электрон қанша уақыттан кейін тоқтайды?

Жауабы: $1,14 \cdot 10^{-7}$ с

5. Өрістің екі нүктесінің арасында шамасы 0,012 Кл заряд орын ауыстырғанда өріс 0,36 Дж жұмыс жасаса, өрістің сол нүктелердің потенциалдар айырымы неге тең?

Жауабы: 30 В

6. Ауадағы өткізгіш шардың потенциалы 300 В. Радиусы 20 см өткізгіш шар бетінен 28 см жерге шексіздіктен нүктелік $2,0 \cdot 10^{-8}$ Кл зарядты орналастырғанда қандай жұмыс жасау керек?

Жауабы: 2,5 мкДж

7. Бір-бірінен 0,6 м қашықтықтағы екі $3,0 \cdot 10^{-6}$ Кл зарядты 0,2 м дейін жақындату үшін қандай жұмыс жасау керек?

Жауабы: 0,27 Дж

*8. Әрқайсысының потенциалы 3 В болатын бірдей 100 тамшыны бір үлкен тамшыға біріктірген. Оның потенциалы неге тең болады?

Жауабы: 65 В

9. Массасы $1,0 \cdot 10^{-11}$ г тозаңның заряды 20 элементар зарядқа тең. Ол потенциалдар айырымы 153 В екі пластинаның арасында тепе-теңдікте тұр. Пластиналардың арақашықтығы неге тең?

Жауабы: 0,005 м

10. Шар бетінен $5 \cdot 10^{-2}$ м қашықтықтағы нүктенің потенциалы 600 В, ал 10^{-1} м жерде 420 В. Шар қандай потенциалға дейін зарядталған?

Жауабы: 1,07 кВ

*11. Кернеуі 200 В болатын конденсатордың екі пластинасының арасында массасы 400 нг тең теріс зарядты тозаң орналасқан. Пластинаның арақашықтығы 8 см.
а) Конденсатордағы электр өрісінің кернеулігін табыңдар. ә) Тоzaңның заряды қандай? Тоzaңды ультракүлгін жарықпен сәулелендіргенде, ол электрондарын жоғалтады. Тоzaң тепе-теңдікте қалу үшін, конденсатордың кернеуін 600 В дейін жоғарлатады.
б) Жарықтың әсерінен ұшып шыққан электрондардың санын есептеңдер.

Жауабы: $E = 2,5$ кВ/м; $q = 1,6$ пКл; $\Delta N = 66875000$

12. Радиусы 10 см болатын зарядталған сфералық беттен 20 см қашықтықта орналасқан нүктенің потенциалын және кернеулігін анықтаңдар. Сфераның потенциалы 240 В тең.

Жауабы: 267 В/м; 80 В

*13. Екі аттас зарядталған және шамалары бірдей шариктер ұзындығы 4 см, қатаңдығы 20 Н/м тең серіппемен жалғанған. Шариктердің тербелісінен олардың арақашықтығы шамамен 3 — 6 см аралығында орналасқан. Шариктердің зарядтарының шамасын табыңдар.

Жауабы: 140 нКл



Рефлексия

1. Қандай деңгейде материалды меңгердіңдер?
2. Саған тақырыпты қосымша түсіндіру қажет пе?
3. Тақырыпты меңгеру кезінде қандай қиындықтар туындады?

§ 55. Электр өрісіндегі өткізгіштер



Тірек ұғымдар: өткізгіштер, диэлектриктер, электростатикалық индукция, поляризация.

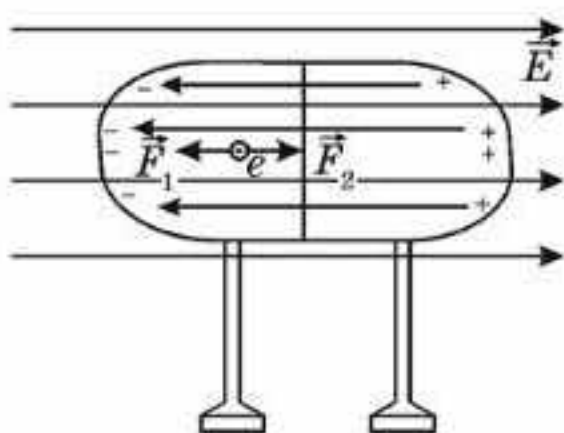
Бүгінгі сабақта: өткізгіштер мен диэлектриктердің электрлік қасиеттерімен танысыңдар; өткізгіштер мен диэлектриктердің ішіндегі өріс кернеулігін есептеуді үйренесіңдер.

Электр өткізгіштер — бұл электр тогын жақсы өткізетін заттар. Өткізгіштер әрқашан еркін заряд тасымалдаушылардың, яғни электрондар немесе иондар санының көп болатынымен ерекшеленеді.

Өткізгіштердің ішінде заряд тасымалдаушы бөлшектер хаосты түрде қозғалып жүреді. Егер өткізгіш электр өрісіне түссе, онда тасымалдаушылардың хаостық қозғалысына электр өрісі күштерінің әсер ету бағытында реттелген орын ауыстыруы үстемеленіп қосылады. Бұл заряд тасымалдаушылардың өріс әсерінен бағытталған орын ауыстыруы әрдайым өткізгіш ішіндегі өрісті әлсіретеді. Өткізгіш ішіндегі заряд тасымалдаушылар санының орасан зор болуынан (1 см^3 металда шамамен 10^{22} еркін электрондар бар) олардың өріс әсерінен болатын қозғалысы өткізгіш ішінде өріс әбден жоғалғанша созылады. Осы процестің қалай жүретінін қарастырайық.

Бір-біріне тығыз жанасқан екі бөліктен тұратын металл өткізгіш сыртқы \vec{E} электр өрісінде орналасқан (55.1-сурет). Бұл өткізгіштегі еркін электрондарға солға қарай бағытталған, яғни кернеулік векторына қарсы бағытталған өрістің \vec{F}_1 күші әсер етеді. Осы күштердің әсерінен электрондардың ығысуы нәтижесінде өткізгіштің оң жақ шетінде артық оң зарядтар, ал сол жақ шетінде артық электрондар пайда болады. Сондықтан өткізгіштің ұштарының арасында *ішкі өріс* пайда болады (*ығыстырылған зарядтардың өрісі*), ол солға қарай бағытталған. Өткізгіштің ішінде бұл өріс сыртқы өріске қарсы бағытталған және өткізгіш ішінде қалған әрбір еркін электронға оңға қарай бағытталған \vec{F}_2 күш әсер етеді.

Бастапқыда \vec{F}_1 күші \vec{F}_2 күшінен үлкен және олардың қорытқы күші солға қарай бағытталған. Сондықтан электрондар өткізгіштің ішінде



55.1-сурет

солға қарай ығыса береді, ал өріс бірте-бірте артады. Өткізгіштің сол жақ шетінде еркін электрондар көп жинақталған кезде, \vec{F}_2 күші мен \vec{F}_1 күштері теңеседі және олардың тең әсерлі күші нөлге тең. Осыдан кейін өткізгіш ішінде қалған еркін электрондар хаосты қозғалысқа келеді. Бұл — өткізгіш ішіндегі өрістің кернеулігі нөлге тең дегенді білдіреді, яғни өткізгіш ішінде өріс жойылады.

Сонымен, *өткізгіш электр өрісіне тап болған кезде ол бір жақ шетінде оң заряд, ал екінші жақ шетінде шамасы жағынан дәл осындай теріс заряд пайда болатындай түрде электрленеді. Мұндай электрлену электростатикалық индукция немесе әсер арқылы электрлену* деп аталады. Бұл жерде тек өткізгіштің меншікті зарядтарының ғана қайта таралатынын айта кетейік. Сондықтан мұндай өткізгішті өрістен алшақтатса, онда оның оң және теріс зарядтары қайтадан өткізгіштің өне бойында біркелкі таралады да, оның барлық бөліктері электрлік бейтарап күйге келеді. Әсер арқылы электрленген өткізгіштің қарама-қарсы жақтарында таңбалары қарама-қарсы зарядтардың бірдей мөлшері болатынына жеңіл көз жеткізуге болады. Бұл өткізгішті екі бөлікке бөліп, одан кейін оларды өрістен алып кетейік. Өткізгіштің әрбір бөлігін жеке электроскопқа жалғап, біз олардың зарядталғанына көз жеткіземіз. Енді олардың екі бөлігін қайтадан бір өткізгіш болатындай етіп қоссақ, онда біз зарядтардың бейтараптанғанын көрер едік. Демек, қосылғанға дейін өткізгіштің екі жағындағы зарядтардың шамалары тең және таңбалары жағынан қарама-қарсы болған.

Өткізгіштің әсер арқылы электрлену уақыты соншалықты аз болуынан оны лезде өтеді деп айта аламыз. Осы кезде өткізгіш ішіндегі кернеулік, демек, потенциалдар айырымы да оның барлық нүктелерінде нөлге тең. Сонда өткізгіштің ішіндегі кез келген екі нүкте үшін

$$\phi_1 - \phi_2 = 0, \text{ яғни } \phi_1 = \phi_2$$

қатынасы орындалады.

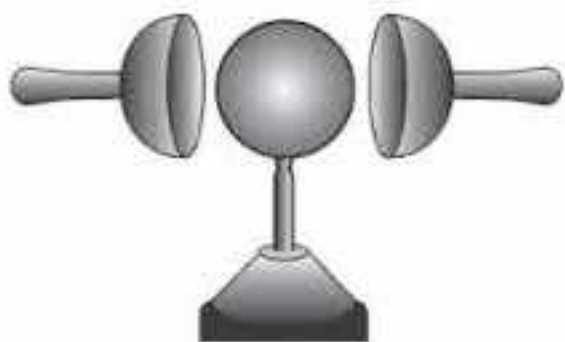
Демек, *өткізгіштегі зарядтардың тепе-теңдігі кезінде оның барлық нүктелерінің потенциалдары бірдей*. Зарядталған денемен жанасу арқылы зарядталған өткізгіш үшін де осы заңдылық орындалады.

Сонымен, өткізгіштің қандай жолмен электрленгеніне тәуелсіз, *зарядтардың тепе-теңдігі кезінде өткізгіштің ішінде өріс болмайды, ал өткізгіштің барлық нүктелерінің потенциалдары бірдей (өткізгіштің ішінде де, бетінде де)*. Бірақ осы кезде электрленген өткізгіштің сыртында өріс бар және оның кернеулік сызықтары өткізгіштің бетіне перпендикуляр. Демек, *өткізгіштегі зарядтардың тепе-теңдігі орныққан бет эквипотенциалдық бет болып табылады*.

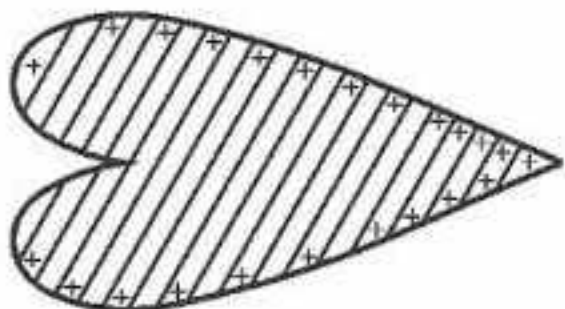
Тұтас өткізгішке берілген зарядтың таралатынын қалай анықтайды?

Электр индукциясы құбылысын XVIII ғасырда орыс ғалымы Ф.У. Элинус (1724—1802) зерттеген.

Электр зарядтарының өткізгіштің сыртқы бетінде орналасатынын тұңғыш рет ағылшын физигі Кавендиш дәлелдеді. Ол оқшауланған жез шарды зарядтайды да, электр өткізбейтін қолсаппен ұстап тұрып, оған екі қуыс металл жарты шарларды кигізеді. Жарты шарларды қайтадан алып кеткеннен кейін ол ішкі шардың зарядталмағанын, ал жарты шарлардың зарядталғанын анықтады (55.2-сурет).



55.2-сурет



55.3-сурет

Кейінірек Фарадей мұндай зерттеуді фольгамен қапталған, қабырғасы 4 м болатын кубпен жасады. Тәжірибе кезінде ол қолына өте сезгіш электроскоп алып, осы кубтың ішіне орналастырды, бірақ кубтың ішінен ол ешқандай электр зарядтарын таппады, ал осы кезде кубтың қабырғаларының электрленгені сондай, сыртқы бетіне жақындаған кезде кішігірім найзағай ойнайтындай күйде тұрды.

Егер өлшемдері бірдей оқшауланған, біреуі тұтас, ал екіншісі қуыс екі шарды алып, бірдей электрлесе, онда шарлардың төңірегіндегі өрістер бірдей болады. Мұны тұңғыш рет Фарадей дәлелдеді.

Сонымен, қуыс өткізгішті электр өрісіне қойса немесе оны зарядталған денемен жанастырып электрлесе, онда зарядтардың тепе-теңдігі кезінде қуыстың ішінде өріс болмайды. *Электростатикалық қорғаныс*, міне, осыған негізделген. Егер қандай да бір аспапты металл қорапқа салса, онда сыртқы электр өрісі қораптың ішіне енбейді, яғни мұндай аспаптың жұмысы мен көрсетулері сыртқы электр өрісіне де, оның өзгерістеріне де тәуелсіз.

Өткізгіштің беті эквипотенциал болғанмен, зарядтардың бетте орналасуы біркелкі емес. Ол беттің тегістігіне қарай, мысалы, дөңес болған сайын артып, керісінше ойыс кезде кемиді. Зарядтық беттегі орналасуын сипаттау үшін зарядтық беттік тығыздығы ұғымы енгізілді. Яғни, заряд пен беттің ауданына қатынасымен анықтауға болады:

$$\sigma = \frac{q}{S}.$$

Зарядтың беттік тығыздығының өлшем бірлігі: $[\sigma] = \text{Кл/м}^2$.

Егер заряд үзіліссіз көлеміне қарай орналасса, зарядтың көлемдік тығыздығы ұғымы енгізіледі. Оны зарядтың беттік тығыздығы сияқты зарядтың бірлік көлемдегі таралуы арқылы сипатталады:

$$\rho = \frac{q}{V}.$$

Зарядтың көлемдік тығыздығының өлшем бірлігі: $[\rho] = \text{Кл/м}^3$.

Сонымен қатар зарядтың тек сфералық пішіндегі өткізгіштің бетінде ғана біркелкі таралатыны тағайындалған. Өткізгіштің пішіні кез келген түрде болса, зарядтардың тығыздығы, демек, *өткізгіштің бетіне жуық жерлердегі өрістің кернеулігі беттің қисықтығы көбірек жерде күштірек* болады. Әсіресе *өткізгіштің шығыңқы және сүйір*

жерлерінде зарядтың тығыздығы жоғары (55.3-сурет). Сүйір немесе сүйірленген өткізгіштер зарядтан тез айырылып қалады. Сондықтан зарядты ұзақ сақтауға арналған өткізгіштің пішіні сүйір болмауы тиіс.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Өткізгіш деп нені түсінесіңдер?
2. Сыртқы электр өрісі жоқ болғанда өткізгіштегі еркін зарядтар қандай күйде болады?
3. Сыртқы электр өрісіне түскенде өткізгіштерде қандай өзгеріс болады?
4. а) Зарядталған; ә) зарядталмаған, бірақ сыртқы электр өрісінде тұрған өткізгіштің ішіндегі электр өрісінің кернеулігі неге тең болады?
5. Электростатикалық индукция қандай құбылыс?
6. Өткізгіш бетіндегі зарядтардың таралу сипаты қандай? Оның сипаты неге тәуелді?



Рефлексия

1. Қандай деңгейде материалды меңгердіңдер?
2. Саған тақырыпты қосымша түсіндіру қажет пе?
3. Тақырыпты меңгеру кезінде қандай қиындықтар туындады?

§ 56. Электр өрісіндегі диэлектриктер



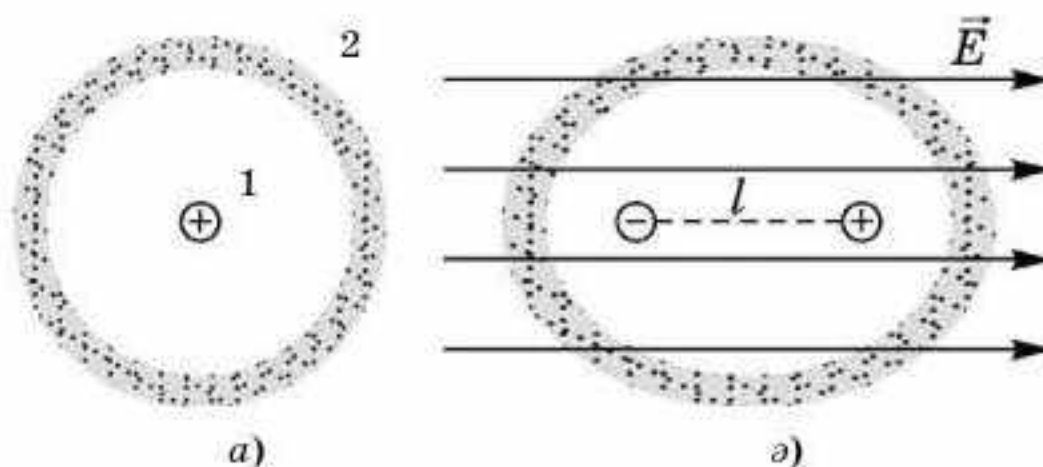
Тірек ұғымдар: диэлектрик, дипольдің электрлік моменті, молекуланың электрондық поляриланғыштығы, поляриланған заряд.

Бүгінгі сабақта: электр өрісінде диэлектрик қалай орналасатынын, поляризация ұғымымен, ортаның диэлектрлік өтімділігінің физикалық мағынасымен танысасыздар.

Диэлектрик электр өрісіне енгізілген кезде қандай өзгерістер болатынын қарастырайық. *Диэлектрик деп электр тогын өткізбейтін затты* атайтынын еске түсіре кетейік. Диэлектрикте еркін заряд тасымалдаушылар жоқ. Диэлектриктің барлық электр зарядтары оның молекулаларының құрамына кіреді және олар тек аз қашықтықтарға, атом немесе молекулалардың аумағында ғана ығыса алады.

Диэлектрик зарядтардың өзара әсерлесу күшін, яғни электр өрісін әлсіретеді, сондықтан диэлектрик молекулаларының ішінде зарядтар ығысады деген қорытынды жасауға болады. Осы құбылыстың механизмін анықтайық.

Атом 1 ядросының диаметрі 10^{-15} м шамалас болатынын және оң зарядталғанын білеміз (56.1-сурет). Атомның 2 электрондық бұлттың радиусы жуықтап 10^{-10} м. Ядро мен электрондық бұлттың өлшемін салыстырып, атомның ядросын бұлттың ортасында орналасқан нүкте деп алуға болады. Сыртқы электр өрісі жоқ кезде оң және теріс зарядтардың центрі сәйкес келеді (56.1, а-сурет). Егер осы атом кернеулігі \vec{E} электр өрісіне түссе, онда бұлт \vec{E} өрістің бағытына қарсы бағытта ядроға қатысты қайсыбір l қашықтыққа ығысады (56.1, ә-сурет). Бұлттың барлық теріс зарядын оның эллипсінің фокусында жинақталған деп, ал электр өрісіндегі тұтас атомды шамалары жағынан өзара тең, ал таңбалары қарама-қарсы екі $q = Ze$ зарядтың жүйесі деп қарастыруға болады, олар бір-бірінен l қашықтықта орналасқан (56.1-сурет). Мұндай жүйені *диполь* деп атайды. Демек, атом сыртқы электр өрісіне тап болған кезде ол электрлік дипольге айналады, ал диполь диэлектриктегі сыртқы электр өрісін әлсірететін өзінің меншікті электр өрісін тудырады.



56.1-сурет

$p_{эл} = lq$ көбейтіндісі *дипольдің электрлік моменті* деп аталады. Электрлік момент $p_{эл}$ дегеніміз — l бойымен теріс зарядтан оң зарядқа қарай бағытталатын вектор (56.2-сурет), оның модулі

$$p_{эл} = lq$$

көбейтіндісімен анықталады.

Электрондық бұлттардың ядроларға қатысты ығысуынан туатын молекуланың электрлік моменті өрістің \vec{E} кернеулігіне тура пропорционал, яғни

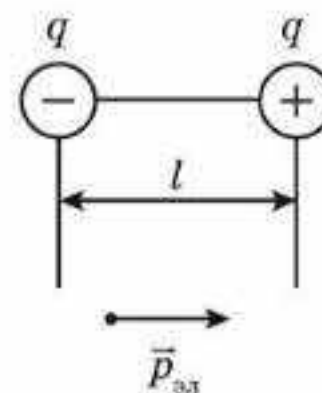
$$p_{эл} = \alpha \vec{E},$$

мұндағы α — *молекуланың электрондық полярланғыштығы* деп аталады. Сонда сыртқы өрістің \vec{E} кернеулігі неғұрлым жоғарылаған сайын диэлектриктегі молекулалардың дипольдік моменттері де артады. Осы кезде диэлектрик молекулаларының электрлік дипольдерінің барлық векторлары \vec{E} өріске параллель бағытталады. Мұндай диэлектрик *полярланған* деп аталады.

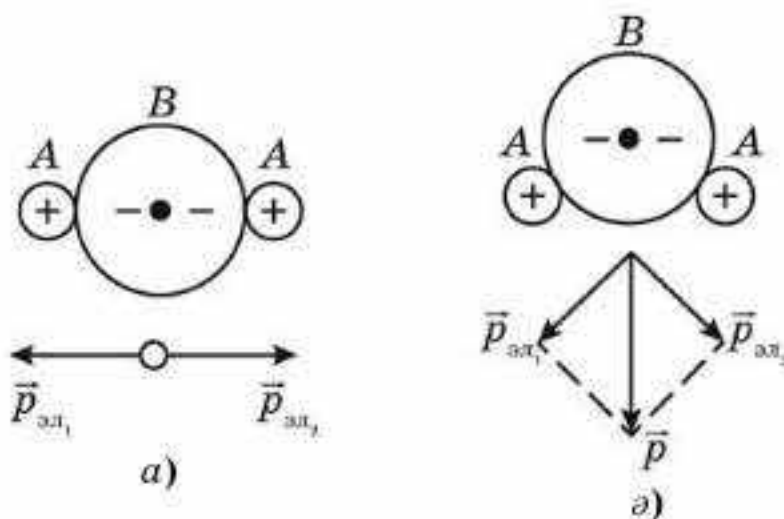
Егер молекулада симметрия центрі болмаса, онда диэлектрикте өріс болмаған кездің өзінде оның меншікті электрлік моменті болады. Мұндай молекулада атомдар қатаң байланысқан, оның электрлік моменті диэлектриктегі сыртқы өріске тәуелсіз деп санауға болады. 56.3-суретте A_2B түріндегі молекуланың мүмкін болатын екі конфигурациясы көрсетілген: а) *полярлы емес молекула*, оның қорытқы дипольдік моменті нөлге тең (56.3, а-сурет); ә) *полярлы молекула*, оның қорытқы дипольдік моменті жеке байланыстардың дипольдік моменттерінің векторлық қосындысымен анықталады (56.3, ә-сурет). Табиғи дипольдерге, мысалы, су молекулалары жатады, оның атомдары 56.3, ә-суреттегі тәрізді орналасқан.

Сыртқы өріс жоқ кезде табиғи дипольдер хаосты түрде орналасады, сондықтан олардың өрістері өзара бейтараптанған. Бірақ осындай диэлектрикті сыртқы өріске қойса, онда әрбір дипольге қос күш әсер ете бастайды (56.4, а-сурет). Сондықтан қатқыл дипольдер бұрыла бастайды, ал күшті өрістерде өрістің кернеулік сызықтарының бойында тізіліп қалады (56.4, б-сурет). Дипольдер осы кезде өздерінің меншікті өрісін тудырып, ол диэлектриктегі сыртқы өрісті әлсіретеді (56.4, б-сурет).

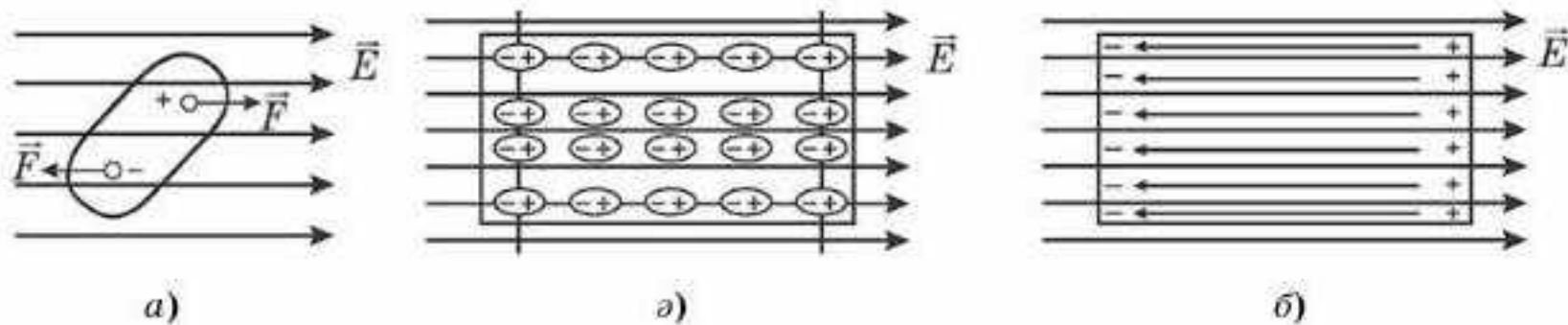
56.4, ә-суреттен көріп отырғанымыздай, көршілес диполь-



56.2-сурет



56.3-сурет

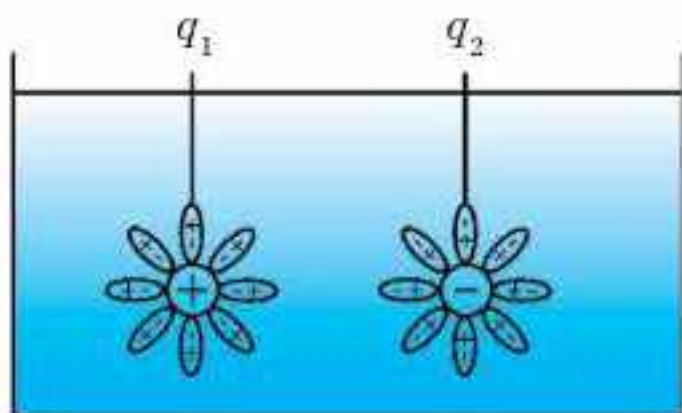


56.4-сурет

дердің әр аттас зарядталған ұштары өздерінің басқа зарядтарға әсерінен өзара бейтараптауы тиіс. Бейтараптанбаған зарядтар тек диэлектриктің бетіне шығатын диполь ұштарындағы зарядтар ғана. Әрі осы кезде диэлектрикке сыртқы өрістің кернеулік сызықтары кіретін жақта дипольдердің теріс зарядтары, ал қарсы шетте оң зарядтар орналасады. Полярланған диэлектриктің бетіндегі *барлық зарядтар байланысқан*, яғни олар молекулалардың құрамына кіреді. Оларды *полярланған зарядтар* деп атайды. Полярланған диэлектриктің электр өрісіне әсері тек оның поляризациялағыш зарядтарының әсеріне келіп тіреледі. Бұл поляризацияның барлық түрлеріне тән.

Диэлектриктің ішінде оның поляризациялағыш зарядтары тудыратын өрісі сыртқы өріске қарсы бағытталған (56.4, б-сурет), яғни сыртқы өрісті әлсіретеді, бірақ оны толық жоя алмайды. Сонымен, олардың өткізгіштен айырмашылығы мынадан білінеді: полярланған диэлектрикті екіге бөлу арқылы оң зарядтарды теріс зарядтардан ажыратуға болмайды. Полярланған диэлектриктің әрбір бөлігінің қарсы жақтарында әрқашан әртүрлі таңбалы зарядтар қалады.

Поляризация салдарынан диэлектрик ішіндегі өрістің әлсіреуі электрленген денелердің өзара әсерлесу күштеріне диэлектриктің тигізетін әсерінен деп түсіндіріледі. Шынында, егер q_1 және q_2 зарядтарды диэлектрикке орналастырса, онда ол полярланады да, q_1 және q_2 зарядтардың айналасында поляризациялағыш зарядтар пайда болады, ал бұл q_1 және q_2 зарядтардың азаюымен парапар (56.5-сурет), демек, өзара әсерлесу күші әлсірейді. Егер электр өрісінің кернеулігі вакуумда E_0 , ал берілген диэлектриктегі өріс кернеулігі E болса, онда



56.5-сурет

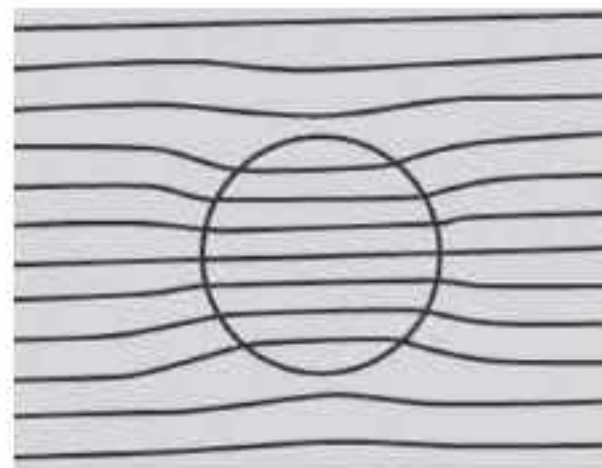
$\frac{E_0}{E}$ қатынасының шамасы диэлектриктің полярланғыштығын немесе диэлектрик затының ϵ салыстырмалы өтімділігін сипаттайды, олай болса,

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}, \quad (56.1)$$

яғни *диэлектриктің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі берілген за-*

рядтардың вакуумдағы өріс кернеулігінің берілген диэлектриктегі өріс кернеулігіне қарағанда неше есе артық екенін көрсететін шама болып табылады.

56.6-суретте біртекті өріске диэлектрик шарды орналастырғанда өрістің қалай өзгеретіні көрсетілген. Өріс бар орта мен шардың диэлектрлік өтімділігі бір-бірімен салыстырғанда қалай өзгеретінін түсіндіріңдер.



56.6-сурет

Кулон заңын енді кез келген диэлектрлік орта үшін

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$$

деп жазамыз.

Қозғалмайтын екі нүктелік зарядтың кез келген диэлектрлік ортадағы өзара әсерлесу күші зарядтардың көбейтіндісіне тура пропорционал және ортаның салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі мен зарядтардың арақашықтығының квадратына кері пропорционал болады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қандай заттар диэлектриктер деп аталады?
2. Диполь дегеніміз не?
3. Электр өрісіндегі дипольде қандай құбылыстар болады?
4. Электр өрісіндегі диэлектрикте не болады?
5. Поляризация деген қандай құбылыс?
6. Полярлы диэлектриктің полярлы емес диэлектриктен айырмашылығы неде?
7. Ортаның диэлектрлік өтімділігінің физикалық мағынасы қандай?

Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

Сырығына кішкене сфера бекітілген электрметрді алыңдар. Оған зарядталған әйнек пластинаны жақындатыңдар. Электрметр көрсеткішін жазып алыңдар. Содан кейін сфераны калориметрмен қоршаңдар да, зарядталған пластинаны тағы жақындатыңдар. Нені байқауға болады? Тәжірибені түсіндіріңдер.

Түсіндіріңдер

Екі электрметрді алыңдар. Оларды электр оқшауланған тұтқасы бар өткізгішпен жалғаңдар. Бірінші электрметрге теріс зарядталған эбонит таяқшасын жақындатыңдар. Екі электрметрдің де тілі ауытқиды. Осы қалпында электрметрлерді жалғаған өткізгішті алып тастаңдар. Электрметрлер зарядталған күйін сақтағанын тексеріңдер. Олардың зарядтарының таңбасын анықтаңдар. Қайтадан өткізгішпен жалғаңдар. Қандай нәтижені көруге болады? Тәжірибе нәтижесін түсіндіріңдер.

Зерттеңдер

Электрлік өріске өткізгіш пен диэлектрик орнататын болсақ, онда өткізгіш ішінде электрлік өріс болмайды, ал диэлектрик ішінде өріс әлсірейді. Осы құбылысты зерттеңдер және оны түсіндіріңдер.

Ойлап табыңдар

Зерттелетін электростатикалық өрістің эквипотенциалдық сызықтарын анықтайтын тәжірибе ойлап табыңдар.

Шығарыңдар

1. Сұйық диэлектриктегі 4 нКл зарядтан 3 см қашықтықтағы өрістің кернеуі 20 кВ/м. Диэлектриктің диэлектрлік өтімділігі қандай?

Жауабы: 2

2. Оң зарядталған металл шар диэлектрик ($\epsilon = 2$) қалың сфералық қабатымен қоршалған. Өрістің күш сызықтарының суретін салыңдар. Неліктен өріс диэлектрик жиегінен өткен кезде секірмелі өзгерістерге ие болады?

3. Диаметрі 4 см металл шар керосинмен толтырылған үлкен ыдысқа салынған. Шардың центрінен 1 және 8 см қашықтықтағы нүктелердің электр өрісінің кернеуі мен потенциалын табыңдар. Шар заряды 100 нКл.

Жауабы: $E_1 = 0,28 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$; $\phi_1 = 1,125 \text{ В}$; $E_2 = 70 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$; $\phi_2 = 5,625 \text{ кВ}$

Рефлексия

1. Қандай деңгейде материалды меңгердіңдер?
2. Саған тақырыпты қосымша түсіндіру қажет пе?
3. Тақырыпты меңгеру кезінде қандай қиындықтар туындады?

§ 57. Электрсыйымдылық



Тірек ұғымдар: электрсыйымдылық, конденсатор, энергияның көлемдік тығыздығы.

Бүгінгі сабақта: электрсыйымдылық ұғымымен, құралдармен және конденсатор түрлерімен танысасыздар; конденсаторлар жүйесінің сыйымдылығын есептеуді үйренесіздер.

Жерден оқшауланған өткізгішті алып, оны басқа өткізгіштерге қатысты орнын өзгертпей электрлейміз. Өткізгішке q заряд беріп, ϕ потенциалын өлшейміз. Егер өткізгішке $q_2 = 2q$ заряд берсек, потенциал сәйкесінше $\phi_2 = 2\phi$, ал $q_3 = 3q$, яғни $\phi_3 = 3\phi$ болады. Тәжірибе мұндай өткізгіштің q зарядының өткізгіштің ϕ потенциалына тура пропорционал өзгертетінін көрсетеді:

$$q = C\phi. \quad (57.1)$$

Бұл жерде пропорционалдық C коэффициенті тек қарастырылып отырған тәжірибе жағдайында ғана өзгеріссіз қалады. Егер осындай тәжірибені басқа өткізгішпен өткізсе немесе бірінші тәжірибедегі сыртқы жағдайларды өзгертсек, онда C коэффициентінің сан мәні өзгереді.

C коэффициентінің физикалық мағынасы: *өткізгіштің потенциалы 1В болу үшін оған қандай заряд беру қажеттігін көрсетеді*. Оны өткізгіштің электрсыйымдылығы деп атайды:

$$C = \frac{q}{\phi}. \quad (57.2)$$

Зерттеулер өткізгіштің электрсыйымдылығы өткізгіштің өлшемі мен пішініне және сыртқы жағдайларға тәуелді екенін көрсетеді.

Электрсыйымдылықтың өлшем бірлігі ретінде *фарад* алынған:

$$[C] = [q/\phi] = 1\text{Кл/В} = 1\text{ Ф}.$$

1 фарад дегеніміз — потенциалын 1 В арттыру үшін 1 Кл заряд керек болатын өткізгіштің электрсыйымдылығы. Фарад өте үлкен шама, практикада электрсыйымдылықты көбіне микрофарадпен (мкФ) және пикофарадпен (пФ) өлшейді: $1\text{ мкФ} = 10^{-6}\text{ Ф}$, $1\text{ пФ} = 10^{-12}\text{ Ф}$.

Шардың электрсыйымдылығын есептейік:

$$C_{\text{ш}} = \frac{q_{\text{ш}}}{\phi_{\text{ш}}}. \quad (57.3)$$

Зарядталған шардың потенциалы

$$\phi_{\text{ш}} = \frac{q_{\text{ш}}}{4\pi\epsilon_0 r_{\text{ш}}} \quad (57.4)$$

формуласымен анықталады. $\phi_{\text{ш}}$ мәнін (57.2) өрнегіне қойып,

$$C_{\text{ш}} = q_{\text{ш}} \frac{4\pi\epsilon_0 r_{\text{ш}}}{q_{\text{ш}}} \text{ немесе } C_{\text{ш}} = 4\pi\epsilon_0 \epsilon r_{\text{ш}} \quad (57.5)$$

өрнегін аламыз. Сонымен, *оқшауланған өткізгіш шардың электрсыйымдылығы оның радиусына тура пропорционал.*

(57.5) өрнегін қолданып, радиусы 1 м болатын шардың электрсыйымдылығын есептейік:

$$C_{\text{ш}} = 4\pi\epsilon_0 R_{\text{ш}} = 4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \text{ Ф} = 0,111 \text{ нФ}.$$

Сәйкесінше, Жер шарының сыйымдылығы мынаған тең:

$$C_{\text{ш}} = 4\pi\epsilon_0 R_{\text{ж}} = 4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ Ф} = 711 \text{ мкФ}.$$

Осыдан, жеке денелердің сыйымдылығы аз екенін байқауға болады. Ал, дененің сыйымдылығын қалай өзгертуге болады? — деген сұрақ туындайды. Осы сұрақтың жауабы негізінде ғалымдар екі дененің жүйесін қолдану мүмкіндігіне алып келді.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Өткізгіштің электрсыйымдылығы деп нені түсінеміз?
2. 1 фарад электрсыйымдылық деп нені түсінеміз?
3. Диэлектрик денелердің электрсыйымдылығы туралы не айтуға болады?
4. Шардың электрсыйымдылығы ондағы заряд мөлшеріне қалай тәуелді?
5. Жекеленген шардың электрсыйымдылығы оның өлшеміне қалай тәуелді?
6. Шарды ауадан дистилденген суға салғанда оның электрсыйымдылығы өзгере ме?



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

1. Әртүрлі диаметрдегі зарядталған қуыс шарларын бір-біріне тигізіңдер. Олардың арасында заряд қалай бөлінеді? Неліктен?
2. Бірінің іші қуыс, екіншісінің тұтас, екі бірдей шарларға бірдей шамадағы заряд беріледі. Олардың потенциалы қалай өзгереді? Неліктен?
3. Диаметрі тең, бірі — қуыс, екіншісі — тұтас шарларға бірдей заряд берілді. Олардың потенциалдары тең бе? Неге?

Түсіндіріңдер

1. Металл шарды керосинге салып, оны және электрофорлық машинаның көмегімен зарядталды. Осыдан кейін шарды керосиннен алып, суға салады. Шардың электрсыйымдылығы өзгерді ме? Егер өзгерсе, қалай? Егер жоқ болса, неге?
2. Диаметрі әртүрлі екі металл шар шамасы жағынан бірдей, әрі аттас зарядтармен зарядталған. Шарларды өткізгішпен қосса, зарядтар бір шардан екіншісіне ауысады ма? Неліктен?

Шығарыңдар

1. Сыйымдылығы 1 Ф тең болу үшін шардың радиусы қандай болуы тиіс? Оны Күннің радиусымен салыстырыңдар?

Жауабы: $9 \cdot 10^9$ км

2. Радиусы 3 см шарға 20 нКл заряд берілсе, шардың потенциалы қаншалықты артады? Егер шар ауамен емес, керосинмен толтырылған болса, жауабы қандай болады?

Жауабы: 6 кВ, 3 кВ

- *3. 10 кВ потенциалға дейін зарядталған радиусы 10 см шар 14 кВ зарядталған радиусы 6 см шармен ұзын сыммен қосылған. Осыдан кейін қай шарда потенциал артық болады және қандай шамаға?

Жауабы: біріншіде 6,7 нКл

Рефлексия

1. Қандай деңгейде материалды меңгердіңдер?
2. Саған тақырыпты қосымша түсіндіру қажет пе?
3. Тақырыпты меңгеру кезінде қандай қиындықтар туындады?

§ 58. Конденсаторлардың құрылысы және түрлері



Тірек ұғымдар: конденсатор, конденсаторларды жалғау, электрсыйымдылық, конденсаторларды тізбектей және параллель жалғау.

Бүгінгі сабақта: конденсаторларды параллель және тізбектей жалғауға арналған формулаларды қолдануды, конденсатордың электрсыйымдылығының параметрлерге тәуелділігін зерттеуді үйренесіңдер.

Өткізгіштің электрсыйымдылығы түрліше физикалық факторлардың әсерінен өзгеруі мүмкін. Мынадай тәжірибелік деректер бар.

1. Егер жуық маңда басқа өткізгіштер болмаса, онда оқшауланған өткізгіштің сыйымдылығы былай жазылады:

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

2. Зарядталған пластина түріндегі өткізгішке екінші зарядталған өткізгішті жақындатсақ, зарядталған өткізгіш потенциалының біршама кемігенін байқаймыз. Екінші өткізгішті алып кетсек, бірінші өткізгіш потенциалының бұрынғы мәніне қайта оралғанын көреміз. Бұл бізге бірінші өткізгіштегі зарядтың өзгеріссіз қалғанын көрсетеді.

Егер заряд өзгеріссіз қалып, ал тәжірибе кезінде потенциал кемісе, онда $C = \frac{q}{\varphi}$ формуласынан бірінші өткізгіштің сыйымдылығының артқанын көреміз, яғни *өткізгіштің электрсыйымдылығы оған екінші зарядталмаған өткізгішті жақындатқанда артады.*

3. Екінші өткізгішті жерге қосамыз, сонда бірінші өткізгіштің потенциалының бұрынғыдан да азайып, ал сыйымдылығының артқанын көреміз. Екінші өткізгішті алып кетсек, онда бірінші өткізгіштің потенциалының бұрынғы қалпына келгенін байқаймыз, демек, оның заряды өзгеріссіз қалды, яғни *екінші өткізгішті жерге жалғау бірінші өткізгіштің электрсыйымдылығын арттырады.*

4. Өткізгіштердің арасына қатты диэлектрик (шыны, слюда және т.б.) орналастырамыз. Осы кезде бірінші өткізгіштің потенциалы бұрынғыдан да азаяды (нөлге дейін дерлік жетеді), ал диэлектрикті және екінші өткізгішті алып кетсек, онда өткізгіштің бастапқы потенциалы қалпына келеді. Демек, бұл жағдайда да заряд өзгеріссіз қалады. Потенциалдың төмендеуі электрсыйымдылықтың артқанын көрсетеді, яғни екі өткізгіштің арасында *қатты диэлектриктің болуы жүйенің электрсыйымдылығын арттырады.*

5. Диэлектриктің қалыңдығын азайтайық, мысалы, үш шыны пластиналардан тұратын диэлектрикті екі пластинадан тұратын диэлектрикпен, одан кейін оны бір пластинамен алмастырамыз. Осы кезде біз потенциалдың азайып отыратынын байқаймыз, демек,

электрсыйымдылықтың артқаны ғой, яғни *диэлектриктің қалыңдығын азайтса, өткізгіштер жүйесінің сыйымдылығы артады.*

6. Диэлектриктің затын өзгертеміз. Осы кезде біз осыған дейінгі шарттарды өзгертпей, потенциалдың кемігенін көреміз, демек, *диэлектриктің диэлектрлік өтімділігі артқанда, жүйенің электрсыйымдылығы артады.*

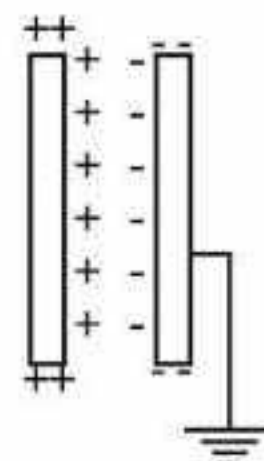
7. Екі пластинаны айқасу ауданын өзгерте отырып, айқасу ауданы артқан сайын потенциалдың кемітінін және жүйе электрсыйымдылығының артатынын байқаймыз, яғни *өткізгіштердің бірібірімен айқасу ауданын арттырғанда, жүйенің электрсыйымдылығы артады.*

Жұқа диэлектрик қабатымен бөлінген екі өткізгіштен тұратын жүйе конденсатор (латынша “condenso” — “қоюлату” (жинақтау)) деп аталады.

Оқшауланған, зарядталған өткізгіштің маңына зарядталмаған дене орналастырса, зарядталған өткізгіштің потенциалы қалай өзгертінін талдаңдар.

Егер өткізгіштер жазық болса және параллель орналасса, онда конденсатор жазық деп аталады (58.1-сурет).

Мынадай белгілеулерді енгіземіз: C — электрсыйымдылық, S — пластинаның бір жағының ауданы, ϵ_0 — электрлік тұрақты, ϵ — диэлектриктің салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі, d — диэлектриктің қалыңдығы, n — пластиналар саны.



58.1-сурет

ХБ жүйесінде жазық конденсатордың сыйымдылығын

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} \tag{58.1}$$

формуласы бойынша есептеуге болады, ал n пластинкалары бар конденсатор үшін

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S (n - 1)}{d} \tag{58.2}$$

(58.1) формуласын қорытып шығарайық.

Конденсатор пластиналарының арасында (оларды конденсатордың *астары* деп атайды) кернеулігі $\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$ болатын электр өрісі пайда болады, мұндағы \vec{E}_+ , \vec{E}_- — сәйкесінше оң және теріс зарядталған пластиналардың кернеулігі. Бұл кернеуліктердің модульдері өзара тең және бағыттас болғандықтан, конденсатордағы қорытқы өріс модулі

$$E = 2E_+ = 2 \frac{q}{\epsilon \epsilon_0 2S} = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0 S}.$$

Кернеу мен кернеулік бір-бірімен $U = Ed$ қатынасы арқылы байланысқан, сондықтан

$$U = E \cdot d,$$

осыдан

$$U = \frac{dq}{\epsilon\epsilon_0 S},$$

осыдан

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q\epsilon\epsilon_0 S}{qd} = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}.$$

Осылай сфералық конденсатордың сыйымдылығын есептеуге арналған формуланы да қорытып шығаруға болады, ол

$$C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1},$$

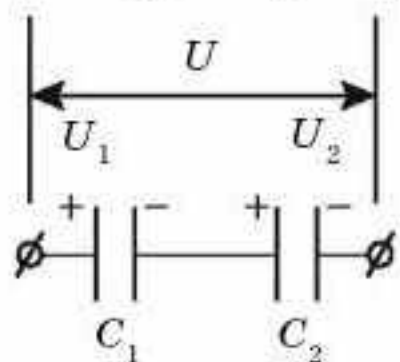
мұндағы R_1, R_2 — сәйкесінше ішкі және сыртқы сфералардың радиустары.

Сонымен, *екі пластинкадан тұратын жазық конденсатордың сыйымдылығы пластинканың ауданына, диэлектрлік өтімділік шамасына тура пропорционал және диэлектриктің қалыңдығына кері пропорционал.*

Практикалық мақсатта көбіне конденсаторларды батареяларға біріктіреді. Конденсаторларды батареяларға біріктіруді тізбектей және параллель қосу арқылы іске асырады.

Конденсаторларды тізбектей жалғау. Конденсаторларды тізбектей жалғаған кезде барлық конденсаторлардағы заряд бірдей болады (және олар барлық батареяның зарядына тең). 58.2-суреттен көріп тұрғанымыздай, оң q зарядты C_1 конденсатордың сол жақ астарына орналастырса, онда оң жақтағы астарда индукция салдарынан теріс заряд жинақталады. C_2 конденсатордың сол жақ астарында $+q$ оң заряд, оң жақ астарында $-q$ теріс заряд пайда болады. Тізбектей жалғанған конденсатордың әрқайсысындағы заряд q тең, оны былай жаза аламыз: $q_1 = q_2 = q$.

Сонда осы тізбектей жалғанған әрбір конденсатордың кернеуі $U_1 = \frac{q}{C_1}; U_2 = \frac{q}{C_2}$ болады. Конденсаторлардың жалпы кернеуі



58.2-сурет

$U = U_1 + U_2$ немесе $\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2}$ өрнегімен анықталды.

Осыдан конденсаторлардың жалпы сыйымдылығы $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$.

Жоғарыда айтылғандардан, конденсаторларды тізбектей жалғаудың белгілері шығады:

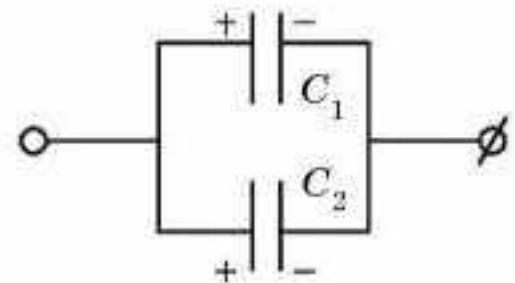
$$\left. \begin{aligned} 1. & q = q_1 = q_2 = \dots = q_n; \\ 2. & U = U_1 + U_2 + \dots + U_n; \\ 3. & \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}; \\ 4. & U_1 : U_2 : U_3 : \dots = \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2} : \frac{1}{C_3} : \dots \end{aligned} \right\} \quad (58.3)$$

58.3-суреттегі сұлбаны қарастырайық. Суреттен C_1 конденсатордың сол жақ астары, ал C_2 конденсатордың оң жақ астары зарядталатынын көреміз. Конденсатордың басқа астарларында қарама-қарсы таңбамен индукциялық заряд пайда болады, сонда $q_2 + (-q_1) = 0$. Сәйкесінше $q_1 = q_2$.



58.3-сурет

Көріп отырғанымыздай, тізбектей жалғаған кезде конденсаторлардың заряды тең болады.



58.4-сурет

Конденсаторларды параллель жалғау. Конденсаторларды параллель жалғаған кезде C_1, C_2 конденсаторларының сол жақ астарларындағы потенциалдар бірдей және олардың таңбасы оң (58.4-сурет). Сол секілді оң жақ астарлардың да потенциалы бірдей (теріс таңбалы). Демек, конденсаторлардағы кернеу бірдей және тізбектің кернеуіне тең, яғни

$$U = U_1 = U_2.$$

Параллель қосу кезінде конденсаторларда жинақталатын зарядтың шамасы әртүрлі (ол конденсатордың сыйымдылығына тәуелді). Конденсаторлардағы заряд $q_1 = C_1 U, q_2 = C_2 U$.

Конденсатор батареяларының толық заряды

$$q = q_1 + q_2 = C_1 U + C_2 U = U(C_1 + C_2)$$

және $q = CU$ болғандықтан, $C = C_1 + C_2$, яғни параллель жалғанған конденсаторлардың сыйымдылығы жекеленген конденсатор сыйымдылықтарының қосындысына тең. Осыдан конденсаторлардың параллель жалғануының белгілері шығады:

$$\left. \begin{aligned} 1. & q = q_1 + q_2 + \dots + q_n; \\ 2. & U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n; \\ 3. & C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n; \\ 4. & q_1 : q_2 : q_3 : \dots = C_1 : C_2 : C_3 : \dots \end{aligned} \right\} \quad (58.4)$$



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Конденсатор деген не?
2. Конденсатордың қандай түрлерін білесіңдер?
3. Конденсатор түрлерінің құрылысы қандай?
4. Қандай жағдайда зарядталған металл өткізгіштер конденсатор бола алады, ал қандай жағдайда бола алмайды?
5. Конденсатордың электрсійымдылығының анықтамасын беріңдер.
6. Конденсатор заряды дегенді қалай түсінесіңдер?
7. Конденсатордың электрсійымдылығы: а) астарларындағы зарядқа; ә) оның геометриялық өлшеміне; б) оның астарлары арасындағы ортаның диэлектрлік өтімділігіне қалай тәуелді?
8. а) Жазық конденсатордың екі астарындағы зарядтар 2 есе артса; ә) бір астарындағы заряд бастапқы күйінде қалып, ал екіншісіндегі заряд 3 есе артса, оның сыйымдылығы қалай өзгереді?
9. Конденсаторларды тізбектей және параллель қосудың белгісін тұжырымдаңдар.



Рефлексия

1. Қандай деңгейде материалды меңгердіңдер?
2. Саған тақырыпты қосымша түсіндіру қажет пе?
3. Тақырыпты меңгеру кезінде қандай қиындықтар туындады?

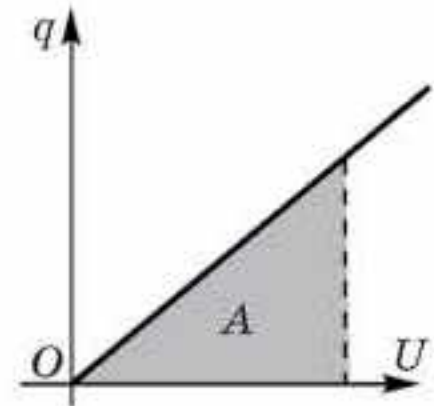
§ 59. Электр өрісінің энергиясы



Тірек ұғымдар: электр өрісінің энергиясы, энергияның тығыздығы.

Бүгінгі сабақта: электр өрісінің энергиясын анықтауды үйренесіңдер.

q заряд өрістің екі нүктесінің арасында орын ауыстырғанда электр өрісі күштерінің атқаратын жұмысы, U кернеу тұрақты қалса, $A = qU$ болады. Бірақ конденсаторды зарядтағанда оның астарларындағы кернеу нөлден U шамасына дейін артады (59.1-сурет), сондықтан өрістің атқаратын жұмысын есептегенде кернеу үшін оның орташа мәнін алу керек.



59.1-сурет

$$\text{Сонымен, } A = qU_{\text{орт}} = \frac{q(U + 0)}{2} = \frac{qU}{2}.$$

Бұл A жұмыс зарядталған конденсатордың $W_{\text{эл}}$ энергиясын арттыруға кетеді де, $W_{\text{эл}} = A$ болады. Осыдан зарядталған конденсатордың энергиясы

$$W_{\text{эл}} = \frac{qU}{2} \quad (59.1)$$

формуласымен беріледі. $q = CU$ болғандықтан, конденсатордың энергиясы үшін тағы бір формула аламыз:

$$W_{\text{эл}} = \frac{CU^2}{2}. \quad (59.2)$$

$$U = \frac{q}{C}, \text{ сондықтан}$$

$$W_{\text{эл}} = \frac{q^2}{2C}. \quad (59.3)$$

$W_{\text{эл}}$ энергиясы конденсатордың астарларындағы зарядтың энергиясы ма, әлде бұл осы заряд тудыратын электр өрісінің энергиясы ма? Жақыннан әсерлесу теориясы бойынша өріс мұндай энергияға ие болады. Конденсатордың өрісі оның астарларының арасында жинақталуы себепті, бұл өрістің энергиясы осы кеңістікте біркелкі таралған.

Зарядын өзгертпей, мектептегі зарядталған астарлары жылжымалы конденсатордың энергиясын арттыру мүмкін бе? Ойланып көріңдер.

Біртекті электр өрісі энергиясының көлемдік тығыздығы $\omega_{\text{эл}}$ деп

бірлік көлемде жинақталған өріс энергиясымен өлшенетін $\omega_{\text{эл}} = \frac{W_{\text{эл}}}{V}$ шамасын айтады.

Энергияның (59.2) формуласындағы C шамасын оның (58.1) өрнегінің мәнімен алмастырсақ,

$$W_{эл} = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S U^2}{2d} \quad (59.4)$$

шығады. (59.4) теңдіктің оң жағының алымын және бөлімін d шамасына көбейтсек,

$$W_{эл} = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{2} \cdot \frac{U^2}{d^2} Sd$$

теңдігін аламыз. $Sd = V$, ал $E = \frac{U}{d}$, олай болса, $W_{эл} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} V$, ал бұдан алатынымыз:

$$\omega_{эл} = \frac{W_{эл}}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}. \quad (59.5)$$

Электр өрісі энергиясының тығыздығы осы өріс кернеулігінің квадратына тура пропорционал болады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Неліктен зарядталған конденсаторда энергия болады? Сол энергияны қандай формуламен есептеуге болады? Ол қалай аталады?
2. Конденсатордағы энергия көзінің әдеттегі ток көзі энергиясынан айырмашылығы қандай?
3. Зарядталып ток көзінен ажыратылған конденсатордың электр өрісінің энергиясы қалай өзгереді, егер: а) оның астарларының арақашықтығын азайтса; ә) астарлары арасындағы ортаның диэлектрлік өтімділігін кемітсе; б) конденсатор астарларының ауданын арттырса?
4. Ток көзіне қосылып зарядталған конденсатордың электр өрісінің энергиясы қалай өзгереді, егер: а) оның астарларының арасын жақындатса; ә) астарларының арасындағы ортаның диэлектрлік өтімділігін азайтса; б) конденсатор астарларының ауданын ұлғайтса?
5. Электр өрісі энергиясының көлемдік тығыздығы деп нені айтады? Электр өрісі энергиясының көлемдік тығыздығын қандай формуламен есептейді?
6. Электр өрісі энергиясының көлемдік тығыздығының өлшем бірлігі қандай?

Есеп шығару үлгілері

1-есеп. Диэлектрлік өтімділігі $\varepsilon = 7$ слюда пластинасы аккумуляторға қосылған жазық конденсаторлардың астарларының аралығында орналасқан. Кондесатордың заряды 14 мкКл. Пластинаны алып тастағанда аккумулятор арқылы қандай заряд өтеді?

Берілгені:

$$\varepsilon_1 = 7$$

$$\varepsilon_2 = 1$$

$$q_1 = 14 \text{ мкКл} = 14 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$\Delta q = ?$$

Шешуі. $U = \frac{q}{C}$. $U = \text{const}$ болғандық-

$$\text{тан, } \frac{q_1}{C_1} = \frac{q_2}{C_2}; C_1 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 S}{d}; C_2 = \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_0 S}{d} = \frac{\varepsilon_0 S}{d},$$

$$\text{бұдан } C_1 = \varepsilon_1 C_2; \frac{q_1}{\varepsilon_1 C_2} = \frac{q_2}{C_2}; q_1 = \varepsilon_1 q_2.$$

$$\text{Онда } q_2 = \frac{q_1}{\varepsilon_1} \cdot \Delta q = q_1 - q_2 = q_1 - \frac{q_1}{\varepsilon_1} = \frac{q_1 (\varepsilon_1 - 1)}{\varepsilon_1};$$

$$\Delta q = 14 \cdot \frac{6}{7} = 12 \text{ мкКл.}$$

2-есеп. Сыйымдылығы $C_1 = 3$ мкФ конденсатор $U_1 = 300$ В кернеуге дейін зарядталған, ал сыйымдылығы $C_2 = 2$ мкФ конденсатор $U_2 = 200$ В дейін зарядталған. Конденсаторлардың астарларын: а) біртекті зарядталған астарлармен; ә) әртүрлі зарядталған астарлармен жалғаннан кейінгі астарлар арасындағы кернеуді анықтаңдар. Конденсаторларды бірінші жағдайда жалғанғанда қанша жылу мөлшері бөлінеді?

Берілгені:

$$C_1 = 3 \text{ мкФ} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$C_2 = 2 \text{ мкФ} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$U_1 = 300 \text{ В}, U_2 = 200 \text{ В}$$

$$U_3 = ? U_4 = ? Q = ?$$

Шешуі. Егер конденсаторлар параллель жалғанса, онда олардың жалпы сыйымдылығы $C = C_1 + C_2$. Біртекті зарядталған пластиналар жалғанғандықтан, олардың ізделінді кернеуі

$$U_3 = \frac{q}{C} = \frac{q_1 + q_2}{C_1 + C_2}, \text{ мұндағы } q_1 \text{ және}$$

q_2 — жалғанғанға дейінгі конденсаторлар заряды.

$$q_1 = C_1 U_1 \text{ және } q_2 = C_2 U_2 \text{ ескерсек, онда } U_3 = \frac{C_1 U_1 + C_2 U_2}{C_1 + C_2} = 260 \text{ В.}$$

Егер конденсаторлар әртүрлі зарядталған пластиналарымен жалғанса, онда олардың аралығындағы кернеу $U_4 = \frac{C_1 U_1 - C_2 U_2}{C_1 + C_2} = 100 \text{ В.}$

Бөлінген жылу мөлшерін энергияның сақталу және айналу заңын қолданып анықтаймыз. Жалғанғанға дейінгі конденсатор энергиясы

$$W_1 = \frac{C_1 U_1^2}{2} + \frac{C_2 U_2^2}{2} = 175 \text{ мДж. Параллель жалғанғаннан кейінгі кон-}$$

$$\text{денсатор энергиясы } W_2 = \frac{C U^2}{2} = \left(\frac{C_1 + C_2}{2} \right) \cdot U^2 = 169 \text{ мДж.}$$

Сол себепті қажетті жылу мөлшері: а) $Q = (175 - 169) \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 6 \text{ мДж}$; ә) $Q = (175 - 25) \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 150 \text{ мДж}$.

3-есеп. Сыйымдылығы $C = 20 \text{ мкФ}$ конденсатор $U_0 = 400 \text{ В}$ кернеуге дейін зарядталған, оған сыйымдылығы $C_1 = 1 \text{ мкФ}$ конденсаторды қосады, нәтижесінде соңғы конденсатор зарядталады. Кейіннен бұл конденсаторды ажыратып, осындай жолмен сыйымдылығы сондай ($C_1 = 1 \text{ мкФ}$) екінші конденсаторды зарядтайды, содан соң үшінші және т.с.с. Соңынан конденсаторларды параллель жалғайды. Осындай жолмен қандай максимал кернеу алуға болады?

Берілгені:

$$C = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$U_0 = 400 \text{ В}$$

$$C_1 = 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$U_{\text{max}} - ?$$

Шешуі. Конденсатордың бастапқы заряды $q = CU_0$, мұндағы U_0 — бастапқы кернеу.

Сыйымдылығы C_1 конденсаторды жалғағаннан кейін заряд C және C_1 конденсаторлары арасында қайта бөлінеді, нәтижесінде C конденсаторында q_1 заряд қалады.

q_1 табайық. Конденсаторларды параллель жалғағанда C және C_1 астарлары арасындағы потенциалдар айырымы U_1 бірдей болады. Сол себепті $q = U_1(C + C_1)$.

C_1 конденсаторын C конденсаторынан ажыратқаннан кейін екі конденсаторда да бірдей потенциалдар айырымы болады:

$$U_1 = \frac{q}{C + C_1} = \frac{CU_0}{C + C_1}.$$

C конденсаторында қалған заряд

$$q_1 = CU_1 = \frac{C^2U_0}{C + C_1}. \quad (1)$$

Зарядталмаған C_1 конденсаторды жалғағаннан кейін заряд q_1 қайтадан C және C_1 бөлінеді және C конденсаторында қалатын заряд q_2

$$q_2 = U_2(C + C_1).$$

C және C_1 конденсаторларын ажыратқаннан кейінгі кернеу

$$U_2 = \frac{q_1}{C + C_1} = \frac{C^2U_0}{(C + C_1)^2}. \quad (2)$$

Қалған заряд $q_2 = CU_2 \frac{C^3U_0}{(C + C_1)^2}$.

Осы операцияны қайталап, $U_1, U_2, U_3, U_4, \dots, U_n$ зарядталған конденсаторлар жиынын аламыз, U_1 және U_2 кернеулері (1) және (2) өрнегімен анықталады, ал U_3, U_4, \dots, U_n шамаларын математикалық индукция тәсілін қолданып анықтауға болады:

$$U_3 = U_0 \left(\frac{C}{C + C_1} \right)^3, U_4 = U_0 \left(\frac{C}{C + C_1} \right)^4, \dots, U_n = U_0 \left(\frac{C}{C + C_1} \right)^n.$$

Тізбектей жалғанған конденсаторлардан тұратын батареядағы жалпы кернеу

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n = \frac{CU_0}{C + C_1} \left(1 + \frac{C}{C + C_1} + \frac{C^2}{(C + C_1)^2} + \dots + \frac{C^{n-1}}{(C + C_1)^{n-1}} \right).$$

Бөлімі $\frac{C}{C + C_1}$ болатын шексіз кемитін геометриялық прогрессияның мүшелерін қосу нәтижесінде максимал кернеуді анықтауға болады:

$$U_{\max} = \frac{CU_0}{C + C_1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{C}{C + C_1}} = \frac{CU_0}{C_1} = \frac{20 \cdot 10^{-6} \cdot 400}{10^{-6}} = 8000 \text{ В.}$$

4-есеп. Ұзындығы 5 см жазық конденсатор астарларына 15° бұрыш жасай электрон ұшып кіреді. Электронның энергиясы 1500 эВ, астарлардың арақашықтығы 10 мм. Конденсаторға қандай кернеу бергенде электрон конденсатор астарларына параллель ұшып шығады? Конденсаторды ұзындығын 10 см ұзартсақ, жауап қандай болады (59.2-сурет)?

Берілгені:

$$l_1 = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$\alpha = 15^\circ$$

$$W_k = 1500 \text{ эВ} = 2,4 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}$$

$$d = 10 \text{ мм} = 10^{-2} \text{ м}$$

$$l_2 = 10 \text{ см} = 10 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$q_0 = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$U_1 = ? \quad U_2 = ?$$

Шешуі. Есепте сипатталған жағдайды кескіндейік. 59.2-суретте есептің бірінші бөлігін қарастырайық. $l_1 = v_0 t \cos \alpha$, мұндағы t_1 — электронның Oy осінде бастапқы жылдамдық проекциясының нөлге тең болатын уақыт аралығы, яғни $0 = v_0 \sin \alpha - at_1$ және $t_1 = \frac{v_0 \sin \alpha}{a}$; онда $l_1 = \frac{v_0^2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{a}$.

Үдеудің шамасын Ньютонның екінші заңын пайдаланып анықтаймыз:

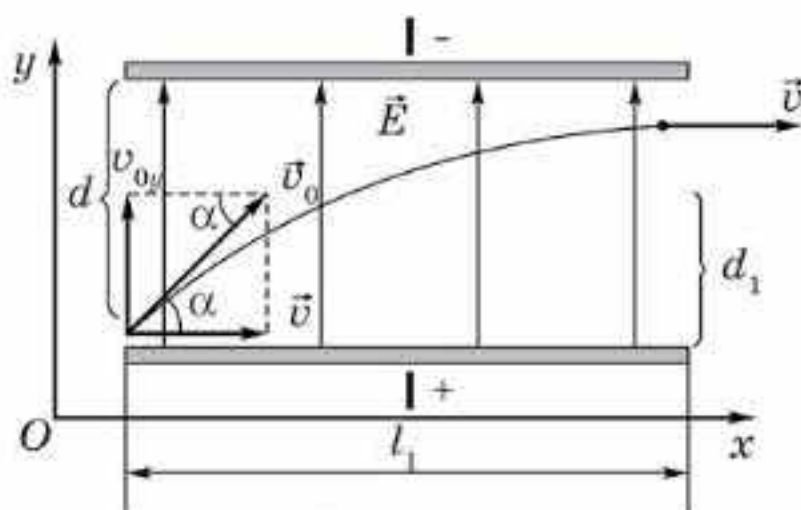
$$a = \frac{F_y}{m} = \frac{E \cdot q_0}{m} = \frac{U_1 q_0}{dm}; \text{ онда } l_1 = \frac{mv_0^2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot d}{U_1 q_0}, \text{ бұдан } \frac{mv_0^2}{2} = q_0 W_k, \text{ демек,}$$

$$l_1 = \frac{2q_0 W_k \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot d}{U_1 q_0} = \frac{W_k d \cdot \sin 2\alpha}{U_1 q_0},$$

$$\text{бұдан } U_1 = \frac{W_k d \cdot \sin 2\alpha}{l_1}; \text{ онда}$$

$$U_1 = \frac{2,4 \cdot 10^{-16} \cdot 10 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5}{5 \cdot 10^{-2} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 150 \text{ В.}$$

Егер конденсатор ұзындығын екі есе арттырсақ (есептің шарты бойынша), онда электрон одан ұшып шықпайды (симметрияға сәйкес).



59.2-сурет

Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

1. Металл пластина, жалғағыш сым, штатив тәрізді қолда бар материалдарды қолданып, қарапайым жазық конденсатор құрыңдар. Пластинаның бірін сырықпен, екіншісін электрометр денесімен жалғаңдар. Пластинаның біреуін эбонит таяқшасымен зарядтап, пластиналарды жылжытқан кездегі электрометр көрсеткіштерін бақылаңдар.

2. Бірін-бірі жабатын аудандары әртүрлі пластиналардан конденсатор құрастырып, олардың орындарын ауыстырған кезде конденсатордың сыйымдылығы қалай өзгередінін анықтаңдар. Нәтижесін түсіндіріңдер.

Түсіндіріңдер

1. Параллель емес қоршауы бар зарядталған конденсатордың қандай нүктесінде зарядтың беттік тығыздығы үлкен?

2. Жазық ауа конденсаторының біреуін жерге қосатын болсақ, пластиналардың потенциалдар айырымы өзгере ме?

Зерттеңдер

Өздерің жасаған конденсатордың көмегімен әртүрлі (ауа, қағаз, әйнек) материалдардың диэлектрлік өткізгіштігін зерттеңдер.

Талдаңдар

Зарядталған конденсатордың пластиналарының арақашықтығын азайтсақ, пластиналардағы потенциалдар айырымы қалай өзгереді?

Ойлап табыңдар

Екі өткізгіштің, мысалы, екі жекеленген зарядталған металл шарлардың потенциалдар айырымын өлшеу тәсілін ойлап табыңдар. Осыған қажетті аспапты көрсетіп, бұл аспапты қалай қолдану керек екенін сызбада көрсетіңдер.

Шығарыңдар

*1. Сынаптың бірдей кішкене тамшыларының әрқайсысы φ потенциалымен зарядталған. Осындай n тамшының бірігуінен пайда болған үлкен тамшының потенциалын табыңдар.

$$\text{Жауабы: } \varphi = \sqrt[3]{n^2} \cdot \varphi_0$$

2. Сыйымдылығы 12 мкФ үш конденсатор 600 В кернеуге есептелген олардың көмегімен. Қандай сыйымдылықтар алуға болады және әр жағдайдағы мүмкін болатын ең үлкен мүмкін кернеу қандай?

3. Зарядталған конденсаторды дәл сондай зарядталмаған конденсаторға параллель жалғаған. Өріс энергиясы қанша есе өзгереді?

■4. Сыйымдылықтары $6,0$ және $9,0$ пФ болатын шардың потенциалдары сәйкесінше $2,0 \cdot 10^2$ В және $8,0 \cdot 10^2$ В. Екі шардың қосынды заряды қандай? Шарлардың соқтығысқаннан кейінгі потенциалын табыңдар.

Жауабы: $8,4 \cdot 10^{-9}$ Кл; 560 В

5. Слюдалы конденсатордың пластинасының ауданы 36 см², диэлектрик қабатының қалыңдығы $0,14$ см. Егер астарлардағы потенциалдар айырымы $3,0 \cdot 10^2$ В, ал слюданың диэлектрлік өтімділігі 6 тең болса, онда конденсатордың сыйымдылығын, зарядын және энергиясын есептеңдер.

Жауабы: $136,5$ пФ; 41 нКл; $6,14$ мкДж

■6. Сыйымдылығы 60 мкФ және астарындағы кернеуі $4,0 \cdot 10^2$ В конденсаторды сыйымдылығы 100 мкФ зарядталмаған конденсатормен параллель қосады. Екі конденсатордың астарларында қандай кернеу орнайды? Зарядтар қалай бөлінеді?

Жауабы: 150 В; 150 В; біріншіде $9 \cdot 10^{-3}$ Кл; екіншіде $15 \cdot 10^{-3}$ Кл

7. Диаметрі $2,0$ см, потенциалы $90\,000$ В өткізгіш шарды Жерге өткізгіш сыммен қосады. Өткізгіш сымда бөлініп шығатын энергия қандай?

Жауабы: $4,5 \cdot 10^{-3}$ Дж

8. Бір миллион сфералық пішіндегі тамшылар бір тамшыға жиналады. Әрбір тамшының радиусы $5,0 \cdot 10^{-4}$ см, заряды $1,6 \cdot 10^{-14}$ Кл. Тамшыларды біріктірген кезде электр тебілу күштерін жеңу үшін қанша энергия жұмсалады?

Жауабы: $2,3$ мДж

*9. Сыйымдылықтары $4,0$ және $1,0$ мкФ конденсаторлар өзара тізбектей жалғанған және 220 В тұрақты кернеу көзіне қосылған. Жалпы сыйымдылықты табыңдар. Кернеу конденсаторлар арасында қалай бөлінеді?

Жауабы: $0,8$ мкФ; 44 В; 176 В



Рефлексия

1. Қандай деңгейде материалды меңгердіңдер?
2. Саған тақырыпты қосымша түсіндіру қажет пе?
3. Тақырыпты меңгеру кезінде қандай қиындықтар туындады?



Электростатика — қозғалмайтын зарядтардың өзара әсерлесуін зерттейтін физиканың бөлімі.

Дененің электрленуі — электрлік бейтарап дененің зарядталу құбылысы. Тұйық жүйеде **зарядтардың сақталу заңы** орындалады: зарядтар ешқайдан алынбайды және ешқайда жоғалмайды; ол бір денеден екінші денеге беріледі; зарядтардың жүйедегі алгебралық қосындысы өзгеріссіз сақталып қалады: $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = q = \text{const}$.

Қозғалмайтын нүктелік зарядтар бір-бірімен әсерлеседі және өзара әсер күші Кулон заңымен анықталады:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\varepsilon r^2}.$$

Зарядтардың өзара әсері **электр өрісі** деп аталатын материяның ерекше түрі арқылы жүзеге асады. Электр өрісі кеңістікте үзіліссіз және ол біздің санамыздан тыс өмір сүреді.

Өрісті сипаттау үшін екі шама енгізілген: күштік сипаттама — **кернеулік** $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ және энергетикалық сипаттама — **потенциал** $\varphi = \frac{W_p}{q}$.

Электр өрісінің кернеулігі белгілі болса, өрістің зарядқа әсер ететін күшін $\vec{F} = \vec{E}q$ формуласы бойынша есептеп табуға болады. Кернеуліктің өзі өрісті тудыратын зарядтың пішініне тәуелді. Айталық, нүктелік заряд пен шардың кернеулігі $E = k \frac{q}{\varepsilon r^2}$, жазықтықтың өріс кернеулігі $E = \frac{q}{2\varepsilon\varepsilon_0 S}$, ал жазық конденсатордың кернеулігі $E = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 S}$ формуласы арқылы табылады.

Өткізгіштің ішіндегі өріс кернеулігі мен электр заряды нөлге тең, ал диэлектрикте электр өрісі әлсірейді.

Потенциалдық электр өрісі оның жасайтын жұмысы траектория пішініне тәуелсіз және өрістегі зарядтың потенциалдық энергиясының кемуіне сәйкес келеді: $A = -\Delta W_p$.

Зарядтың біртекті электр өрісіндегі орын ауыстыру жұмысы $A = Eq\Delta d$ немесе $A = qU$ (мұндағы $U = \varphi_1 - \varphi_2$ — потенциалдар айырымы) формуласы бойынша анықталады. Кернеулік пен кернеу $U = E\Delta d$, (мұндағы U — бір-бірімен Δd қашықтықта тұрған нүктелердің арасындағы потенциалдар айырымы (кернеу)) формуласымен байланысқан.

Нүктелік зарядтың потенциалы $\varphi = k \frac{q}{\varepsilon r}$ формуласымен табылса, екі нүктелік зарядтан тұратын жүйенің потенциалдық энергиясы мынаған тең:



$$W_p = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r}.$$

q нүктелік зарядының өрісіндегі q_0 зарядының орын ауыстыруының жұмысы

$$A = - \left(k \frac{q_0 q}{\epsilon r_2} - k \frac{q_0 q}{\epsilon r_1} \right)$$

формуласы арқылы анықталады.

Әрбір өткізгіш электр зарядын жинақтау қабілетіне ие. Бұл қабілеттілік *электрсыйымдылық* деп аталады. Өткізгіштің электрсыйымдылығы былай анықталады:

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Конденсатордың электрсыйымдылығының формуласы $C = \frac{q}{U}$.

Электрсыйымдылықтың өлшем бірлігі — фарад: $1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}$.

Өткізгіштер мен конденсаторлардың сыйымдылығы ондағы зарядтарға тәуелді емес. Электрсыйымдылық өткізгіштер мен конденсаторлардың геометриялық өлшемімен анықталады. Шардың электрсыйымдылығы $C = \frac{\epsilon R}{k}$, мұндағы R — шардың радиусы; жазық конденсатордың электрсыйымдылығы $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$, мұндағы S — конденсатор астарларының ауданы; d — конденсаторлардың арақашықтығы.

Зарядталған конденсатордың энергиясы

$$W_c = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}.$$

Конденсаторларды тізбектей және параллель жалғау.

Тізбектей жалғаудың белгілері	Параллель жалғаудың белгілері
1) $q = q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n$;	1) $q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$;
2) $U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$;	2) $U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n$;
3) $\frac{1}{c} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \dots + \frac{1}{c_n}$.	3) $C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$.

11-тарау. ТҰРАҚТЫ ЭЛЕКТР ТОГЫ

§ 60. Электр тогы. Тізбек бөлігіне арналған Ом заңы



Тірек ұғымдар: электр тогы, ток күші, ток тығыздығы, ЭҚК, тізбек бөлігіне арналған Ом заңы, өткізгіш кедергісі, меншікті кедергі.

Бүгінгі сабақта: электр тогының пайда болуының қажетті шарттарын білесіңдер; ток күші, ЭҚК, кедергі ұғымдарымен таныса-сыңдар, тізбек бөлігіне арналған Ом заңын қолдануды үйренесіңдер.

Біз зарядталған бөлшектің электр өрісінде өзін қалай ұстайтынын жеткілікті қарастырдық. Зарядталған бөлшек электр өрісінің әсерінен белгілі бір бағытта қозғала бастайды.

Еркін зарядталған бөлшектердің біртекті электр өрісіндегі күйін қарастырайық. Осы өріс күшінің әсерінен зарядталған бөлшектер бір бағытта реттеле қозғала бастайды. Бірақ қозғалыс кезінде зарядталған бөлшек өзінің температураға тәуелді бейберекет жылулық қозғалысын сақтайды.

Электр зарядтарының кез келген реттелген қозғалысы электр тогы деп аталады.

Ток өткізетін орталарда (өткізгіш орта) электр өрісі әсерінен еркін зарядтардың реттелген қозғалысынан пайда болатын электр тогы өткізгіштік ток деп аталады. Металдардағы және жартылай өткізгіштердегі “еркін” электрондардың реттелген қозғалысынан және электролиттердегі қарама-қарсы таңбалы иондардың реттелген орын ауыстыруынан туатын ток өткізгіштік токқа жатады. Электр тогының пайда болуының қажетті шарттары:

а) берілген ортада еркін ток тасымалдаушылардың, яғни ортада реттеліп қозғала алатын зарядталған бөлшектердің болуы. Ондай бөлшектерге металдар мен жартылай өткізгіштерде өткізгіштің электрондары мен кемтіктері, сұйық өткізгіштерде (электролиттерде) оң және теріс зарядталған иондар; газдарда қарама-қарсы зарядталған иондар мен электрондар жатады;

ә) берілген ортада энергиясы электр зарядтарының реттелген қозғалысына жұмсалатын сыртқы электр өрісінің болуы. Электр тогын ұстап отыру үшін электр өрісінің энергиясын үздіксіз толықтыру керек. Ол үшін электр энергиясының көзі, яғни энергияның қандай да бір түрін электр өрісінің энергиясына айналдырып отыратын қондырғы керек.

Бұл екі шартты орындау үшін электр тізбегін құрады. Электр тізбегінің негізгі бөлігіне ток көзі (энергияның кез келген түрін электр энергиясына түрлендіретін құрал), жалпағыш сымдар, тізбекті қосып-ажырататын элементтер, ток тұтынушылар (электр энергиясын

жылулық, механикалық энергияға айналдыратын құрал) жатады. Осы бөліктің әрбіреуін электр сұлбасында арнайы таңбамен көрсетеді.

Тізбек элементінің бойымен өткен токтың жылулық, химиялық және магниттік әсері болады.

Токтың әсерін бағалау үшін *ток күші* деп аталатын физикалық шама енгізілген. *I ток күші деп өткізгіштің көлденең қимасы арқылы бірлік уақыт ішінде қандай Δq заряд өтетінін көрсететін физикалық шаманы* айтады, яғни

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}, \quad (60.1)$$

мұндағы q — t уақыт аралығында өткізгіштің көлденең қимасы арқылы өтетін электр заряды.

Ток күші *ампермен* өлшенеді: $[I] = \text{A}$.

Егер ток күші мен оның бағыты уақыт бойынша өзгеріссіз қалса, онда электр тогы *тұрақты электр тогы* деп аталады. Электр тогын толық сипаттау үшін өткізгіштің бірлік қимасынан қандай ток өтетінін көрсететін шама — *j ток тығыздығы* енгізіледі:

$$j = \frac{I}{S}. \quad (60.2)$$

Ток тығыздығының өлшем бірлігі: $[j] = \frac{\text{A}}{\text{м}^2}$.

Егер электр тогы тұрақты болса, онда өткізгіштің ешқандай бөлігінде заряд не жиналмайды, не азаймайды. Тұрақты ток тізбегі тұйықталған болу керек және $q_{S_1} = q_{S_2}$ шарты орындалуы тиіс, мұндағы q_{S_1} — S_1 және S_2 қималарының арасындағы өткізгіштің көлеміне бірлік уақытта S_1 бет арқылы өтетін қосынды заряд, ал q_{S_2} — осы көлемнен бірлік уақытта S_2 бет арқылы шығатын қосынды заряд.

Алдыңғы тараудан заряд орын ауыстырғанда электр өрісінің жасайтын жұмысы

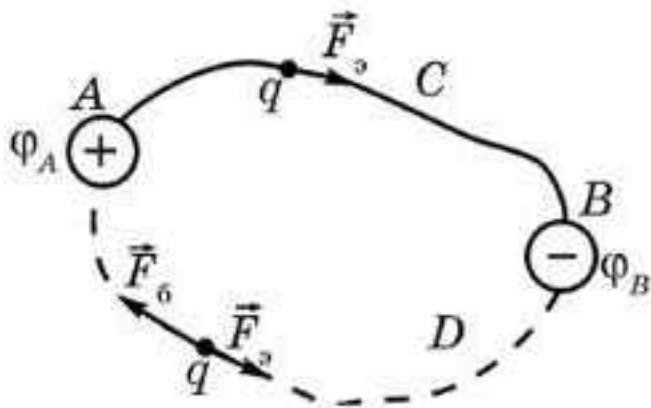
$$A_{\text{э.ө}} = q \cdot U$$

өрнегімен анықталатынын білеміз, мұндағы q — орын ауыстыратын зарядтың шамасы, U — кернеу (потенциалдар айырымы). Демек, *электр кернеуі дегеніміз — бірлік электр заряды орын ауыстырғанда электр өрісінің атқаратын жұмысы арқылы анықталатын физикалық шама ($A_{\text{э.ө}}$)*, яғни

$$U = \frac{A_{\text{э.ө}}}{q}, \quad (60.3)$$

мұндағы q — электр заряды, $A_{\text{э.ө}}$ — электр өрісінің атқаратын жұмысы.

Заряд тұйықталған контур бойымен өткен кезде электр өрісі күштерінің жұмысы нөлге тең болады. Бұл егер тұйық тізбекте зарядтарға тек қана электрлік күштер әсер етсе, онда токтың көмегімен жұмыс жасау мүмкін емес дегенді білдіреді. Демек, электр тізбегінде қозғалыстағы заряд тасымалдаушыларға электр өрісі күштерімен



60.1-сурет

қатар, осы зарядтарды тасымалдау бойынша жұмыс атқара алатын, табиғаты электростатикалық болмайтын күштер әсер ететін тағы бөлік болу керек. Мұндай күштерді *бөгде күштер* (тосын күштер) деп атайды.

Зарядталған екі A және B өткізгіштер аламыз (60.1-сурет). A өткізгіштің потенциалы B өткізгіштің потенциалынан

артық болсын. Егер оларды ACD өткізгішпен жалғасақ, онда оң зарядтар $\vec{F}_{эл}$ электр өрісі күштерінің әсерінен A -дан B -ға қарай ACB өткізгіші бойымен өте бастайды. Бірақ бұл қозғалыс тез арада тоқтайды, себебі A және B өткізгіштерінің потенциалдары теңеседі. Бұлай болмас үшін және ток тасымалдаушылардың қозғалысы ұзаққа созылу үшін оң зарядтарды B нүктесінен қандай да бір тәсілмен қайтадан A нүктесіне, мысалы, BDA өткізгішпен алып өту керек. Бірақ зарядтардың мұндай тасымалдануы өз бетінше жүрмейді, себебі онда электр өрісі күштері қарама-қарсы жаққа әсер етеді.

Демек, BDA өткізгіште зарядтарға электр өрісі күштеріне қарсы бағытталған және олардан шама жағынан артық \vec{F}_6 бөгде күштер әсер етуі тиіс. Сонда ACB бөлігінде ток тасымалдаушылар электр өрісі күштерінің әсерінен A -дан B -ға қарай, ал BDA бөлігінде тосын күштердің әсерінен B -дан A -ға қарай қозғалады. Бұл жағдайда тұйықталған тізбекте зарядтар ағыны тоқтаусыз өтіп жатады, яғни электр тогы болады, ал A және B өткізгіштердің потенциалдары теңесе алмайды.

Бөгде күштер BDA бөлігінде электр өрісінің және BDA өткізгіші жасалған зат бөлшектерінің қарсылығын жеңе отырып, қозғалыстағы заряд тасымалдаушылардың орын ауыстыруы үшін жұмыс атқарады. Электр тогы бөгде күштердің электр өрісі күштеріне қарсы атқаратын жұмысы есебінен тізбектің ACB бөлігінде жұмыс жасайды.

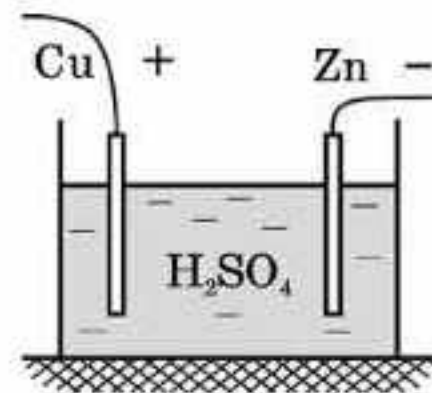
Сонымен, BDA бөлігінде электр энергиясы энергияның басқа түрлері есебінен алынады да, ал ACB бөлігінде керісінше электр энергиясы энергияның басқа түрлеріне, мысалы, өткізгіштің ішкі энергиясына айналады. Сондықтан зарядтардың тізбектің бөгде күштер бағытында қозғалатын бөлігін *электр энергиясының көздері* деп атайды (BDA бөлігі).

Зарядтың ток көзінен алған электр энергиясының ток көзінің ішкі құрылысына тәуелділігін сипаттайтын шама ток көзінің электр қозғаушы күші деп аталады және ЭҚК болып белгіленеді. Ток көзінің электр қозғаушы күшін бірлік оң зарядты тасымалдау кезінде бөгде күштердің атқаратын жұмысымен өлшейді:

$$E = \frac{A_6}{q}. \quad (60.4)$$

Халықаралық бірліктер жүйесінде ЭҚК өлшем бірлігіне 1В (вольт) алынады: $1\text{В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$.

Жоғарыда айтылғаннан байқағанымыздай, бөгде күштің табиғаты электрлік емес. Ток көздерінде бөгде күштер химиялық реакция кезінде бөлінетін энергияның есебінен (*аккумуляторлар, гальвани элементтері*), жылу (*термопара*) немесе жарықтың энергиясы есебінен (*күн батареялары*) және т.б. жолдармен пайда болатын күштер болуы мүмкін.



60.2-сурет

Ток көздері түрлерінің біреуін химиялық реакцияның энергиясын пайдалануда (*Вольт элементін*) қарастырайық. Күкірт қышқылының H_2SO_4 ерітіндісі құйылған ыдыс ішіне мырыш және мыс электродтар (60.2-сурет) салынған. Мырыш атомдары күкірт қышқылымен өзара белсенді (активті) әсерлеседі де, мырыш электродтан мырыш иондарын жұлып алып, H_2SO_4 молекуласындағы H_2 алмасады. Мыс (H_2SO_4) молекуласымен әсерлеспейді. Сондықтан мырыш электрод оң ионынан айырылып, теріс зарядталады. Осылайша мыс пен мырыш электродтардың арасында потенциалдар айырымы пайда болады. Егер ток көзі тұйықталмаса, мыс электроды мен электролит арасындағы потенциалдар айырымы 0,5 В, ал мырыш электрод пен электролит арасында 0,7 В шамасына тең. Нәтижесінде осындай ток көзінің ЭҚК 1,2 В шамасындай болады және ол электродтардың арақашықтығына да, олардың ауданына да тәуелсіз, тек элемент дайындалған заттардың химиялық қасиеттерімен анықталады.

Металл өткізгіштің ab бөлігін қарастырайық, оның бойымен a нүктесінен b нүктесіне қарай ток жүріп жатсын. Бұл нүктелердің потенциалдары сәйкесінше ϕ_a және ϕ_b (60.3-сурет).

Өткізгішті бір температурада ұстап тұра алсақ, онда оның бойымен өтіп жатқан ток күші $I = \phi_a - \phi_b$ потенциалдар айырымына пропорционал болатыны тәжірибеден белгілі, яғни $I = kU$.

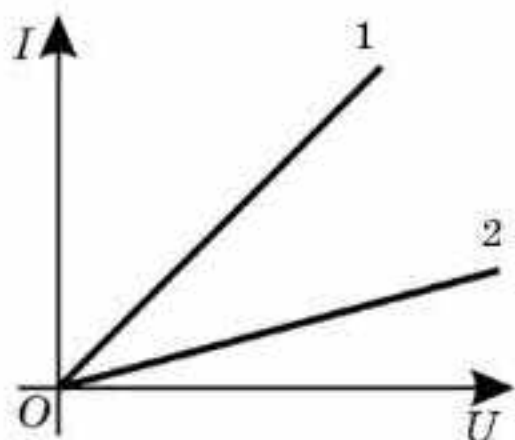


60.3-сурет

Пропорционалдық k коэффициенті өткізгіш материалының тегіне және оның өлшеміне тәуелді. Неміс физигі Г. Ом 1827 жылы бірқатар тәжірибелер нәтижесінде осы тәуелділікті ашып, k коэффициентінің орнына оған кері $R = \frac{1}{k}$ шамасын алды да, оны *өткізгіш кедергісі* деп атады. Г. Омның құрметіне кедергінің өлшем бірлігі ом (Ом).

1 Ом — *үштарының арасындағы кернеу 1 В болғанда бойынан 1 А ток өтетін өткізгіштің кедергісі. Енді жоғарыда айтқандарды ескеріп,*

$$I = \frac{U}{R} \quad (60.5)$$



60.4-сурет

өрнегін аламыз. Бұл — тізбек бөлігі үшін Ом заңының математикалық өрнегі. Заңның мәні мынада: тізбек бөлігі арқылы өтетін ток күші тізбек ұштарындағы кернеуге тура пропорционал және оның кедергісіне кері пропорционал. Өткізгіштегі ток күшінің кернеуге тәуелділігі *вольт-амперлік сипаттама* деп аталады (60.4-сурет).

2-өткізгіштің (60.4-сурет) кедергісі 1-өткізгіштің кедергісінен үлкен екенін дәлелдендер.

Өткізгіштің кедергісі деп берілген өткізгіштің өз бойымен өтетін токқа жасайтын қарсылығын көрсететін физикалық шаманы айтады.

Өткізгіштің кедергісі оның l ұзындығына, S көлденең қимасының ауданына және жасалынған материалдың қасиеттеріне тәуелді:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (60.6)$$

мұндағы ρ — өткізгіш материалының *меншікті кедергісі*. Меншікті кедергі бірлік ұзындықтың және көлденең қимасының ауданы бірге тең болатын өткізгіш кедергісімен анықталатын физикалық шама. Оны 0°C температурада есептеп, кестеге енгізеді. Тәжірибеде *меншікті кедергінің температураға сызықтық тәуелділігі байқалады:*

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (60.7)$$

мұндағы α — кедергінің температуралық коэффициенті, ол өткізгіштің пішініне және олардың ішкі құрылымына тәуелді. (60.7) теңдеудің мәнін кедергінің (60.6) формуласына қойып,

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho_0(1 + \alpha t) \frac{l}{S} = R_0(1 + \alpha t) \quad (60.8)$$

өрнегін аламыз, мұндағы $R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$ — осы өткізгіштің 0°C температурадағы кедергісі.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Тізбектен электр тогы өтуі үшін қандай шарттар орындалуы қажет?
2. Ток тығыздығы деп қандай физикалық шаманы айтады?
3. Қандай күштер бөгде (тосын) деп аталады?
4. Ток көзінің электр қозғаушы күшінің физикалық мағынасы қандай?
5. Ток көзінің ішкі кедергісі деп нені түсінесіңдер?
6. Тізбек бөлігіне арналған Ом заңын тұжырымдаңдар.
7. Электр кедергісінің пайда болу табиғатын электрондық теория негізінде түсіндіріңдер. Неге әртүрлі заттар электр кедергісімен ерекшеленеді?
8. Меншікті кедергінің физикалық мағынасы қандай?
9. Егер өткізгіштің ұзындығын екі есе арттырып, ал диаметрін үш есе азайтса, оның кедергісі қалай өзгереді?
10. Температураның жоғарылауына қарай өткізгіш кедергісі қалай өзгереді? Неге?
11. Кедергінің температуралық коэффициенті деп нені атайды?



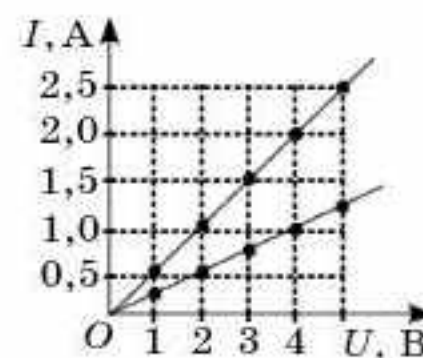
Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Электроскоптың кондукторын әртүрлі зарядтармен зарядтаңдар. Оларды металл өткізгіш арқылы жалғап, кіші кедергіге және кернеуге арналған шамды өткізгіштерді жалғанған бөлігіне қосыңдар. Тәжірибені бақылап, түсіндіріңдер.

Түсіндіріңдер

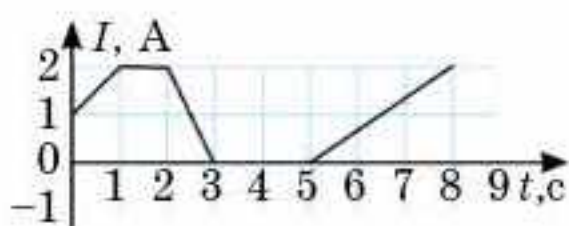
1. Неліктен әйнек токты өткізбейді, ал мыс өткізеді?
2. Екі шам бір ток көзіне қосылған, бірақ әртүрлі жарық береді. Неліктен? Әртүрлі қосылыстарды қарастырыңдар.
3. Ток күшінің кернеуге тәуелділік графигіндегі екі түзудің көлбеулігін түсіндіріңдер (60.5-сурет).
4. Металл өткізгіштегі электр тогы — бұл металдың кристалдық торы салынған иондармен соқтығысатын еркін электрондардың қозғалысы. Неліктен ток жүретін металл өткізгішке электрондардың қозғалысы бағытында ешбір металдық әсер берілмейді?



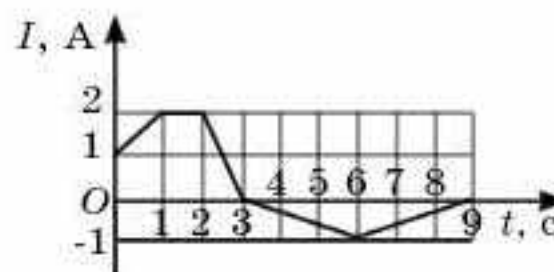
60.5-сурет

Зерттеңдер

1. Өткізгіш бойынша қозғалатын зарядтың уақыттан тәуелділік графигі берілген (60.6-сурет). Ток күшінің өзгеруін зерттеңдер. Өткізгіш бойынша тұрақты ток жүргендегі уақыт аралығын көрсетіңдер. Өткізгіштегі ток күшінің шамасын анықтаңдар. 8 с уақытта өткізгіш бойымен қандай заряд жүріп өтті?



60.6-сурет

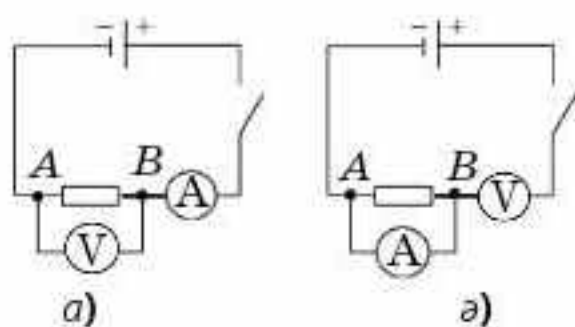


60.7 -сурет

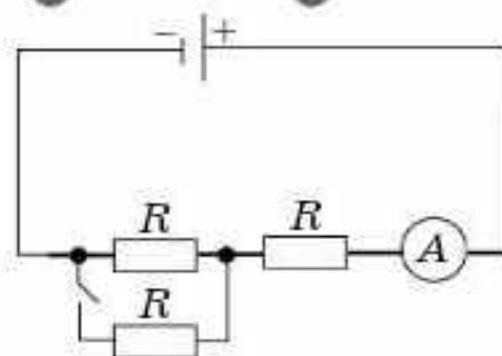
2. Ток күшінің уақытқа тәуелділік $I(t)$ графигі берілген (60.7-сурет). Ток күшін сипаттаңдар. 3 с және 6 с уақытта өткізгіштің бойымен қанша заряд өтетінін анықтаңдар.

Талдаңдар

1. 60.8, а, ә-суреттердің қайсысында амперметр мен вольтметр тізбекке дұрыс жалғанған?
2. Тізбектегі кілтті тұйықтаған кезде амперметрден өтетін ток күші қалай өзгереді (60.9-сурет)? $U_{AB} = \text{const}$. Амперметрдегі кедергіні ескермеңдер.



60.8-сурет



60.9-сурет

Ойлап табыңдар

1. Әрқайсысын бір-бірінен тәуелсіз қосуға болатындай етіп батарея мен екі шамнан тұратын электр тізбегінің сұлбасын салыңдар.
2. Пәтердегі ұзын дәлізде бір ғана шам бар. Пәтерге кірген кезде шамды жағып, бөлмеге кірген кезде өшіретіндей, және керісінше бөлмеге кірген кезде жағып, пәтерден шыққанда өшіретіндей етіп екі ауыстырып-қосқыш пен шамды жалғайтын тізбектің сұлбасын ойлап табыңдар.

Шығарыңдар

1. Егер A және B нүктелерінің арасындағы кернеу 24 В болса, амперметрдің көрсеткішін анықтаңдар (60.8, a -сурет).

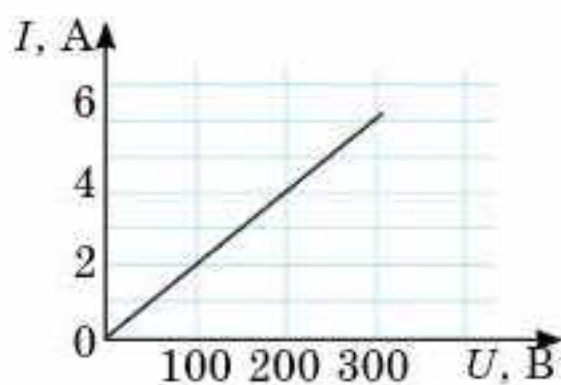
Жауабы: 4 А

2. Ұзындығы $51,5\text{ м}$ және массасы 200 г алюминий сымның кедергісін есептеңдер.

Жауабы: 1 Ом

3. Қималары және массалары бірдей болат және алюминий өткізгіштердің ұштарына бірдей кернеу түсірілген. Қай өткізгіште ток күші артық және неше есе?

Жауабы: $\frac{I_{\text{ал}}}{I_{\text{б}}} \approx 1,5$



60.10-сурет

4. Тізбек бөлігіндегі кернеудің ток күшінің тәуелділік графигінің көмегімен осы бөліктің кедергісін анықтаңдар (60.10-сурет).

Жауабы: 50 Ом

5. Кернеуі 220 В ток көзіне қосылған электрқайнатқыш спираліндегі ток күші 4 А . Егер қимасы $0,1\text{ мм}^2$ болса, онда спираль жасалған нихром сымның ұзындығы қандай?

Жауабы: 40 см

Рефлексия

1. Ұғымдарды таңда: бәрін түсіндім, басқаларға көмектесе аламын; әліде көмек керек; ештеңе түсінбедім; қызықты; жақсы; өте жақсы; қызық емес.
2. Оқылған материалға өз көзқарасыңды білдір: қызықты, пайдалы, қажет т.б.

§ 61. Электр тізбегіне өткізгіштерді тізбектей және параллель жалғау. Толық тізбек үшін Ом заңы



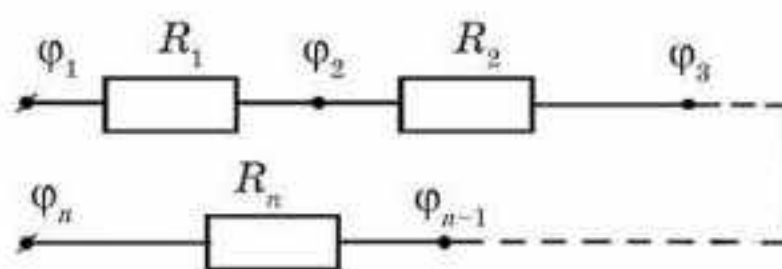
Тірек ұғымдар: өткізгіштерді тізбектей және параллель жалғау және олардың белгілері, толық тізбек үшін Ом заңы, қысқа тұйықталу.

Бүгінгі сабақта: өткізгіштерді тізбектей және параллель жалғауды, оларды ажырата білуді үйренесіңдер; толық тізбек үшін Ом заңымен танысасыңдар.

Өткізгіштерді тізбектей жалғау. Түйіндері және ток көзі жоқ тізбек бөлігін қарастырайық.

Түйін деп үштен кем емес өткізгіштердің тоғысқан нүктесін атайды.

Бұл бөлікте n өткізгіш бар (61.1-сурет). Біз оларды тізбектей жалғайық. Осылай жалғаған кезде әр өткізгіштің бойынан бірдей ток өтеді, себебі ток тармақталмайды.



61.1-сурет

Бөліктің ұштарындағы потенциалдар айырымы

$$\phi_1 - \phi_n = (\phi_1 - \phi_2) + (\phi_2 - \phi_3) + \dots + (\phi_{n-1} - \phi_n)$$

немесе

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n.$$

Бөлік тізбегі үшін Ом заңынан $U = IR$, $U_1 = IR_1$, т.с.с. аламыз.

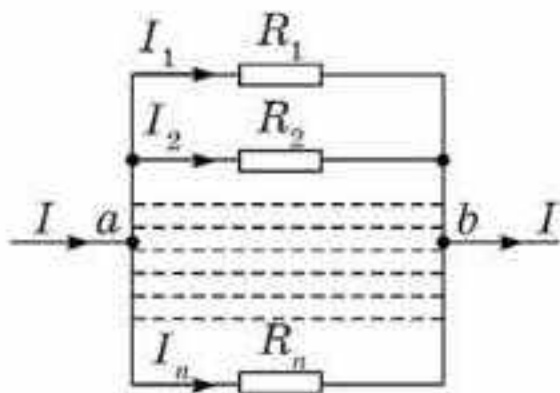
Сонда бөліктегі эквиваленттік (балама) кедергі $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ болады. Осыдан өткізгіштерді тізбектей жалғануының белгілерін аламыз:

1. $I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$.
2. $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$.
3. $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$.
4. $U_1 : U_2 : \dots : U_n = R_1 : R_2 : \dots : R_n$. (61.1)

Сонымен, өткізгіштерді тізбектей қосқанда :

- 1) барлық өткізгіштердегі ток күші бірдей;
- 2) тізбектің жалпы кернеуі жеке өткізгіштердің кернеулерінің қосындысына тең;
- 3) тізбектің жалпы кедергісі жеке өткізгіштердің кедергілерінің қосындысына тең;
- 4) өткізгіштердегі кернеу түсуі өткізгіш кедергісінің шамасына тура пропорционал.

Өткізгіштерді параллель жалғау. Параллель қосылған кезде өткізгіштердің ұштары мен шеттері екі түйінде жинақталады (61.2-сурет).



61.2-сурет

a түйінде тоғысатын ток күші одан шығатын токтардың қосындысына тең болады:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad (61.2)$$

Кернеу $U = \phi_a - \phi_b$ әрбір өткізгіште бірдей, олай болса, Ом заңына сәйкес $I = \frac{U}{R}$; $I_1 = \frac{U}{R_1}$.

Токтың мәндерін (61.2) теңдеуге қойып, мынаны аламыз:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}, \quad (61.3)$$

мұндағы R — тізбек бөлігіндегі балама (эквивалентті) кедергі.

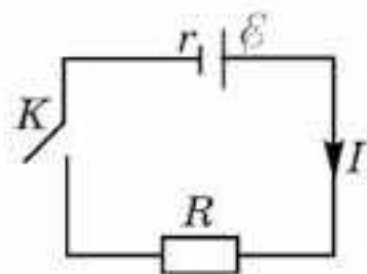
Алынған тұжырымдарды біріктіре отырып, өткізгіштердің параллель жалғануының белгілерін жазамыз:

1. $U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$.
2. $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$.
3. $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$.
4. $I_1 : I_2 : \dots : I_n = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \dots : \frac{1}{R_n}$. (61.4)

Қорыта айтсақ, өткізгіштерді параллель қосқанда:

- 1) әр өткізгіштегі кернеу түсуі бірдей және тізбектің берілген бөлігіндегі жалпы кернеуге тең;
- 2) тізбектің тармақталмаған бөлігіндегі ток күші өткізгіштердегі токтардың қосындысына тең;
- 3) жалпы кедергіге кері шама өткізгіштердің кедергілерінің кері шамаларының қосындысына тең;
- 4) өткізгіштердегі ток күштерінің қатынасы осы өткізгіштердің кедергілерінің кері шамаларының қатынасына тең.

Толық тізбек үшін Ом заңы. Е ЭҚК бар ток күшінен және r ішкі кедергіден, кедергісі R болатын тұтынушыдан, K кілттен тұратын тұйық тізбекте (61.3-сурет) өтетін процестерді қарастырайық. K кілт-



61.3-сурет

тің көмегімен тізбекті тұйықтағанда оның бойынан ток күші I болатын ток өтеді. Ток көзінде $A_6 = qE$ бөгде күштердің жұмысы есебінен электр өрісі пайда болады. Бұл өріс сыртқы тізбекте де (тұтынушы) $A_{эл1} = U_R \cdot q$, ішкі тізбекте де (ток көзінің ішінде) $A_{эл2} = U_r \cdot q$ зарядтың орын ауыстыруы бойынша жұмыс атқарады. Энергияның сақталу заңына сәйкес

$$A_6 = A_{эл1} + A_{эл2} \text{ немесе } Eq = U_R q + U_r q, \text{ яғни} \\ E = U_R + U_r. \quad (61.5)$$

(61.5) формуладан ЭҚК тізбектің сыртқы және ішкі бөлігіндегі кернеу түсуінің қосындысына тең деген қорытындыға келеміз.

$U_R = I \cdot R$ және $U_r = I \cdot r$ болғандықтан, (61.5) өрнектен

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} \quad (61.6)$$

шығады. Бұл — қатынас толық (тұйық) тізбек үшін Ом заңының математикалық өрнегі. Ал заң былай оқылады: **тұйық тізбектегі ток күші ток көзінің электрқозғаушы күшінің шамасына тура пропорционал және тізбектің ішкі, сыртқы кедергілерінің қосындысымен анықталатын толық кедергісіне кері пропорционал.**

Толық тізбек үшін Ом заңының екі шекті жағдайын қарастырайық.

1. Сыртқы тізбектің R кедергісі ток көзінің кедергісінен көп үлкен болсын, яғни $R \gg r$, сонда

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} \text{ немесе } E = IR, \text{ яғни } E = U \quad (61.7)$$

аламыз. Бұдан сыртқы тізбектегі кернеу шамамен ток көзінің ЭҚК тең екенін көреміз.

2. Сыртқы тізбектің кедергісі нөлге тең $R = 0$ болсын. Сонда (61.6) теңдеуге сәйкес

$$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{r} \quad (61.8)$$

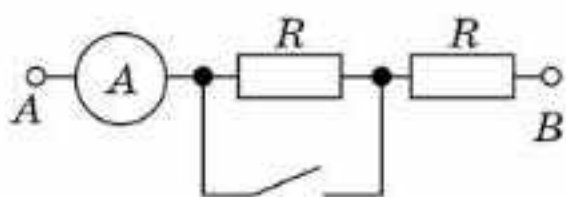
болады. Бұл құбылыс *қысқа тұйықталу* деп аталады. Қысқа тұйықталу кезінде тізбектегі ток күші ең үлкен мәнге жетеді, ал сыртқы тізбектегі кернеудің түсуі нөлге ұмтылады ($R \rightarrow 0$). Демек, электр өрісінің жұмысы ішкі тізбекте (ток көзінің ішінде) жасалады. Қысқа тұйықталу кезінде ток күші өте үлкен, сондықтан оның ток көзінің істен шығуына қауіп тудыратынын есте ұстау керек.



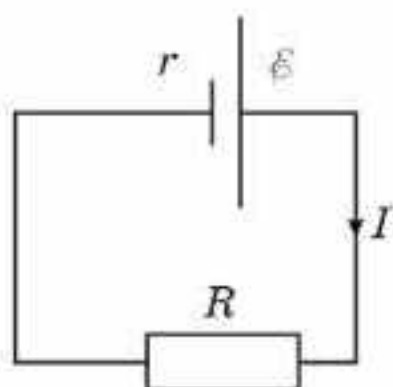
Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Өткізгішті тізбектей жалғау дегеніміз не?
2. Өткізгіштерді тізбектей жалғануының белгілерін атаңдар.
3. Өткізгіштерді тізбектей жалғау кезінде жалпы кедергіні қалай табуға болады?
4. Өткізгішті параллель жалғау дегеніміз не?
5. Өткізгіштердің параллель жалғануының белгілерін атаңдар.
6. Өткізгішті параллель жалғаған кезінде жалпы кедергіні қалай табуға болады?
7. Өткізгішті ортасынан майыстырып беттестірсе, оның кедергісі қалай өзгереді?
8. Қандай тізбек тұйық немесе толық деп аталады?
9. Тұйық тізбек бойынша өтетін ток қандай заңға бағынады?
10. Толық тізбекке арналған Ом заңын екі жағдайда жазыңдар: а) жүктеменің кедергісі ток көзінің кедергісінен көп үлкен; ө) ток көзінің клеммасы қысқа тұйықталған.
11. Қысқа тұйықталу кезінде үйдегі электр шамдары сөніп қалады. Неге?

Есеп шығару үлгілері



61.4-сурет



61.5-сурет

1-есеп. Кілтті тұйықтағанда амперметр арқылы өтетін ток шамасы қалай өзгереді (61.4-сурет)? $U_{AB} = \text{const}$. Амперметр кедергісін ескермеуге болады.

Шешуі. Кілтті тұйықтағанға дейін ток екі резистор арқылы жүреді, олардың жалпы кедергісі $R_1 = 2R$ (тізбектей жалғау) және ток күші $I_1 = \frac{U_{AB}}{2R}$.

Кілтті тұйықтағаннан кейін ток тек бір резистор арқылы өтеді (бірінші резистор тұйықталған). Сол себепті ток күші $I_2 = \frac{U_{AB}}{R}$. Онда $I_2 = 2I_1$, яғни екі есе артады.

2-есеп. Тізбектің сыртқы кедергісі ток көзінің ішкі кедергісінен 3 есе артық болса, ЭҚК 4В болатын ток көзінің полюстеріндегі кернеу шамасы қандай?

Шешуі. Тізбектегі ток күшінің шамасын тізбек бөлігіне арналған Ом заңы бойынша $I = \frac{U}{R}$ және толық тізбекке арналған Ом заңы арқылы анықтауға болады: $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$ (61.5-сурет). Бұл токтар бірдей $\frac{U}{3r} = \frac{\varepsilon}{4r}$,

бұдан $U = \frac{3}{4} \varepsilon = 3\text{В}$.

3-есеп. Мыс және алюминий сымдарының массалары және кедергілері бірдей. Қай сым ұзынырақ және қанша есе?

Шешуі. Сымдардың массасы мен кедергілерін мынадай формулалар арқылы анықтаймыз: $m_1 = \rho_1 S_1 l_1$ және $m_2 = \rho_2 S_2 l_2$; $R_1 = \rho_{\alpha_1} \frac{l_1}{S_1}$

және $R_2 = \rho_{\alpha_2} \frac{l_2}{S_2}$ немесе $m_1 R_1 = \rho_1 \rho_{\alpha_1} l_1^2$ және $m_2 R_2 = \rho_2 \rho_{\alpha_2} l_2^2$, өйткені

$m_1 R_1 = m_2 R_2$, онда $\frac{l_2}{l_1} = \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_{\alpha_1}}{\rho_2 \rho_{\alpha_2}}} = 1,45$. Алюминий сымы 1,45 есе ұзынырақ.

4-есеп. Электр шәйнегінің екі орамы бар. Оның біріншісі қосылғанда су 12 мин соң қайнайды, екіншісі қосылғанда 24 мин соң қайнайды. Екі орамды тізбектей қосқанда шәйнектегі су қанша минутта қайнайды?

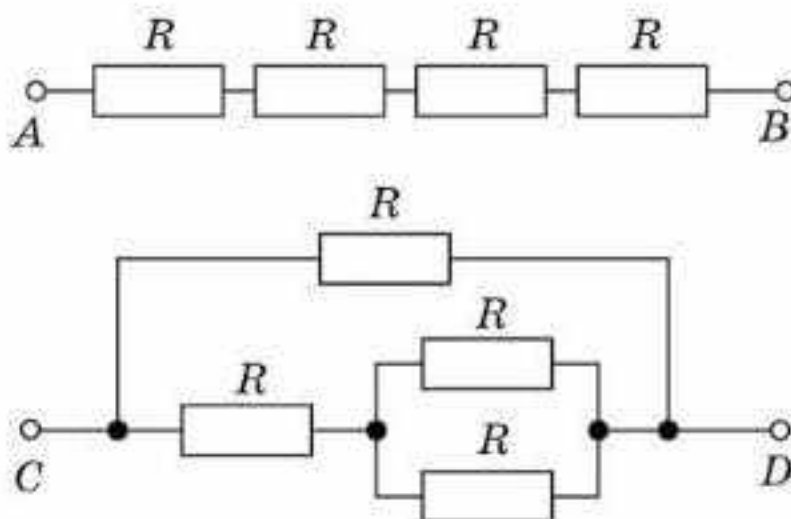
Шешуі. Әр жағдайда бірдей жылу мөлшері бөлінеді: $Q_1 = Q_2$;

$Q_1 = \frac{U^2}{R_1} t_1$ және $Q_2 = \frac{U^2}{R_2} t_2$, онда $R_2 = R_1 \frac{t_2}{t_1}$, $Q_3 = \frac{U^2 t_3}{R_1 + R_2} =$

$$= \frac{U^2 t_3}{R_1 + R_1 \frac{t_2}{t_1}} = \frac{U^2 t_1 t_3}{R_1 (t_1 + t_2)}, \text{ өйткені } Q_3 = Q_1, \text{ онда } \frac{U^2 t_3 t_1}{R_1 (t_1 + t_2)} = \frac{U^2 t_1}{R_1}, \text{ бұдан}$$

$$t_3 = t_1 + t_2 = 36 \text{ мин.}$$

5-есеп. Төрт бірдей кедергі екі түрлі жолмен жалғанған (61.6-сурет). Тізбектің AB бөлігінің кедергісі тізбектің CD бөлігінің кедергісінен қанша есе артық?



61.6-сурет

Шешуі. $R_{AB} = 4R,$

$$R_{CD} = \frac{R \cdot \left(R + \frac{R}{2}\right)}{R + R + \frac{R}{2}} = \frac{R \cdot 3R}{5R} = \frac{3}{5}R,$$

онда $\frac{R_{AB}}{R_{CD}} = \frac{4R \cdot 5}{3R} = 6,67.$

6-есеп. Кедергілері $R_1 = 6$ Ом және $R_2 = 1,5$ Ом шамдар қандай да бір ток көзіне қосылғанда бірдей қуат тұтынады. Ток көзінің ішкі кедергісін анықтаңдар.

Шешуі. Шамдар тұтынатын қуат мына формула арқылы анықталады: $P = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2}$ болғандықтан, $P_1 = P_2$, демек, $\frac{\mathcal{E}^2 R_1}{(R_1 + r)^2} = \frac{\mathcal{E}^2 R_2}{(R_2 + r)^2}$

бұдан $\frac{R_2 + r}{R_1 + r} = \frac{\sqrt{R_2}}{\sqrt{R_1}}$; онда $R_2 \sqrt{R_1} + r \sqrt{R_1} = R_1 \sqrt{R_2} + r \sqrt{R_2}$;

$$r(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2}) = \sqrt{R_1 R_2}(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2}), \text{ яғни } r = \sqrt{R_1 R_2} = 3 \text{ Ом.}$$

7-есеп. Сыйымдылығы C конденсатор $4\mathcal{E}$ кернеуге дейін зарядталады, кедергісі үлкен R резистор мен ЭҚК \mathcal{E} батарея арқылы разрядталады (61.7-сурет). Конденсатордың разрядталуы кезінде бөлініп шыққан жылу мөлшерін анықтаңдар.

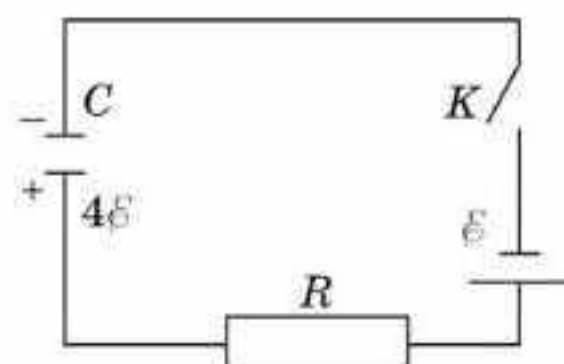
Шешуі. Ток көзінің ішіндегі тосын (сыртқы) күштердің жұмысы есебінен конденсатордың энергиясы өзгереді және R резисторда жылу бөлініп шығады, яғни $A_T = \Delta W_c + Q,$

$$A_T = \Delta q \mathcal{E} = (q_2 - q_1) \mathcal{E} = (C\mathcal{E} - C4\mathcal{E}) \mathcal{E} = -3C\mathcal{E}^2.$$

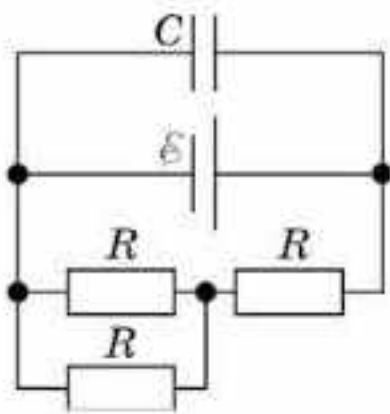
$$\Delta W_c = W_{c_2} - W_{c_1} = \frac{C\mathcal{E}^2}{2} - \frac{C16\mathcal{E}^2}{2} = -\frac{15}{2}C\mathcal{E}^2,$$

онда

$$Q = A_T - \Delta W_c = -3C\mathcal{E}^2 + 7,5C\mathcal{E}^2 = 4,5C\mathcal{E}^2.$$



61.7-сурет



61.8-сурет

8-есеп. Сыйымдылығы 2000 мкФ конденсатордың заряды 15 мКл болса, ток көзінің ЭҚК неге тең (61.8-сурет)? Әр резистордың кедергісі 1 Ом, ток көзінің ішкі кедергісі 0,5 Ом.

Шешуі. Сыртқы тізбектің жалпы кедергісін табамыз: $R_{\text{ж}} = \frac{3}{2}R$. Тізбектің сыртқы бөлігіндегі кер-

неудің түсуін анықтаймыз: $U = I \cdot \frac{3}{2}R$ болғандықтан,

$$I = \frac{\mathcal{E}}{\frac{3}{2}R + r}, \quad \mathcal{E} = \left(\frac{3}{2}R + r \right) \cdot \frac{U}{\frac{3}{2}R} = \frac{(3R + 2r)U}{3R}.$$

Конденсатор сыртқы тізбекке параллель қосылған, яғни $U_c = U$,

$$\text{ал } U_c = \frac{q}{C}, \text{ онда } \mathcal{E} = \frac{3R + 2r}{3R} \cdot \frac{q}{C}; \quad \mathcal{E} = \frac{(3 + 1) \text{ Ом}}{3 \text{ Ом}} \cdot \frac{15 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}}{0,2 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}} \cdot 100 \text{ В}.$$

9-есеп. Қозғалтқышының тарту күші 25 кН және ПӘК 90% болатын трамвай 10 м/с жылдамдықпен бірқалыпты қозғалады, желідегі кернеу 550 В болса, ток күші неге тең?

Шешуі. Механизмнің ПӘК ескерілетін есепті ПӘК анықтаудан бастау ыңғайлы:

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{т}}} \text{ болғандықтан, } A_{\text{п}} = F_{\text{т}} \cdot s \text{ — пайдалы жұмыс, ал } A_{\text{т}} = UIt \text{ —}$$

трамвай қозғалатын токтың жұмысы. $\eta = \frac{F_{\text{т}} \cdot s}{UIt} = \frac{F_{\text{т}} \cdot v}{UI}$, бұдан

$$I = \frac{F_{\text{т}} \cdot v}{U\eta} \approx 500 \text{ А}.$$



Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

1. Тізбектей жалғанған ток көзі, шам және реостаттан электр тізбегін құрыңдар. Реостат сырғағының орнын ауыстыру арқылы шамның қызуын бақылаңдар. Қорытынды жасаңдар.
2. Өткізгіштің меншікті кедергісін анықтауға қажетті тәжірибенің жоспарын дайындаңдар. Ол үшін қандай құрал қажет? Қандай өлшемдер жүргізу керек?

Түсіндіріңдер

1. Неліктен екі бірдей өткізгіштерді параллель жалғаған кезде тізбектің тармақталмаған бөлігіндегі ток күш бұл өткізгіштер тізбектей жалғанған тізбектен өтетін ток күшіне қарағанда артады?
2. Неліктен қысқа тұйықталу кезінде ток көзі клеммасындағы кернеу нөлге жақын, ал тізбектегі ток күші максимал мәнге жетеді?
3. Вольтметр ЭҚК 9 В ток көзінің қысқышына қосылған. а) Клеммаға жүктеме; ә) ток көзі клеммасы өте қысқа сыммен тұйықталған; б) ток көзі клеммасы кедергісі ішкі кедергіге тең сыммен тұйықталғанда вольтметр көрсеткіші қалай өзгереді?

Талдаңдар

1. Шыршаның гүл алқасы (гирлянда) 3 В шамдардан тұрады, ол біріктіріп, кернеуі 220 В ток көзіне қосылған. Бір шам істен шығып, оны 127 В шаммен алмастырды. Басқа шамдардың күйі қалай өзгереді? Неліктен?
2. Сендерде аккумулятор және ішкі кедергісі, ЭҚК белгілі; амперметр, жалғағыш сымдар, біреуінің кедергісі белгілі және белгісіз резисторлар бар. Белгісіз кедергіні қандай тәсілмен анықтауға болады?

Ойлап табыңдар

Өткізгіштерді аралас жалғаған кезде кедергіні анықтауға арналған практикалық есеп құрастырыңдар.

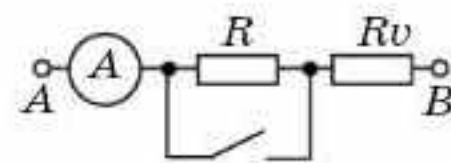
Шығарыңдар

1. Кілті тұйықталғанда амперметр арқылы өтетін ток күші қалай өзгереді (61.9-сурет)? $U_{AB} = \text{const}$. Амперметр кедергісі ескерілмейді.

Жауабы: 2 есе артады

2. Егер ішкі кедергісі 20 Ом болатын элемент қысқышының кернеуі 1,37 В болса, ал элемент кедергісі 10 Ом резисторда тұйықталған кезде 0,132 А ток алатын болсақ, элементтің ЭҚК қандай?

Жауабы: 1,4 В



61.9-сурет

■3. Гальваникалық элемент 4 Ом сыртқы кедергіге 0,2 А ток береді. Егер сыртқы кедергі 7 Ом болса, онда элемент 0,14 А ток береді. Қысқа тұйықталу кезінде элемент қандай ток береді?

Жауабы: 0,47 А

■4. 5 В кернеу және 0,25 А ток күшіне есептелген шам 12 В кернеуі тұрақты ток көзіне реостатпен тізбектей қосылған. Егер реостат ұзындығы 10 м және қимасының ауданы 0,1 мм² никель сымнан жасалған болса, реостат сырғағын шам қалыпты жарық беретіндей орналастыруға бола ма?

Жауабы: болады, реостаттың 2/3 бөлігінде қоса

5. $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 40$ Ом, $R_3 = 60$ Ом, ал ток көзі кернеуі 132 В болса, әрбір резистордағы ток күшін табыңдар (61.10-сурет).

Жауабы: $I_1 = 3$ А, $I_2 = 1,8$ А, $I_3 = 1,2$ А

6. Кернеуі 36 В және тогы 2 А шам қимасы 2 мм² константан сымынан жасалған реостат арқылы кернеуі 127 В ток көзіне қосылған. Оны жасауға қажетті сым ұзындығын және реостат кедергісін анықтау қажет.

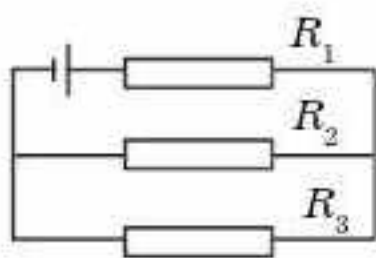
Жауабы: $R = 45,5$ Ом; 182 м

7. $R_1 = 6$ Ом, $R_2 = 3$ Ом, $R_3 = 6$ Ом, $R_4 = 24$ Ом болса, тізбек бөлігінің жалпы кедергісі неге тең (61.11-сурет)? Тізбектің барлық бөлігіндегі кернеу 120 В болса, R_4 бойынша қандай ток жүреді?

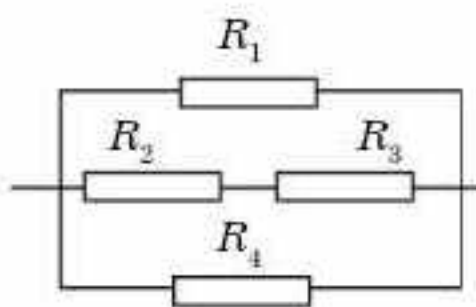
Жауабы: 1,41 Ом, 5 А

*9. Сыйымдылығы $C = 200$ мкФ конденсатордың заряды $q = 15$ мКл болса, ток көзінің ЭҚК неге тең (61.12-сурет)? Әрбір резистордың кедергісі $R = 1$ Ом, ішкі кедергісі $r = 0,5$ Ом.

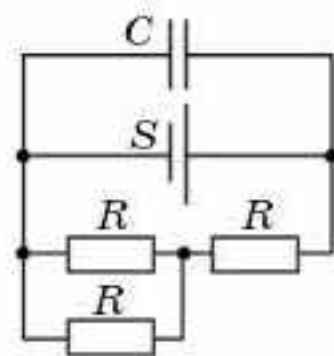
Жауабы: 10 В



61.10-сурет



61.11-сурет



61.12-сурет



Рефлексия

1. Ұғымдарды таңда: бәрін түсіндім, басқаларға көмектесе аламын; әлі де көмек керек; ештеңе түсінбедім; қызықты; жақсы; өте жақсы; қызық емес.
2. Оқылған материалға өз көзқарасыңды білдір: қызықты, пайдалы, қажет т.б.

§ 62. Кирхгоф ережелері



Тірек ұғымдар: Кирхгоф ережелері.

Бүгінгі сабақта: тармақталған электр тізбегінде Кирхгоф ережелерін қолдануды үйренесіңдер.

Тізбектерге есептеулер жүргізгенде Кирхгоф ережелерін пайдаланған ыңғайлы, олар Ом заңының күрделі емес жалпылануы болып табылады.

Жалпы жағдайда тізбекте кем дегенде үш өткізгіш тоғысатын нүктелерді табуға болады. Мұндай нүктелер *түйіндер* деп аталады. Тізбектің бір элементін тастап шыққан кез келген зарядтың тізбектің басқа бір элементіне келіп кіруі тиіс екені анық. Түйінде токтар тармақталады да, зарядтың сақталу заңынан токтардың үзіліссіздік шарты шығады: *түйінге кіріп жатқан ток күштерінің қосындысы түйіннен шығып жатқан ток күштерінің қосындысына тең:*

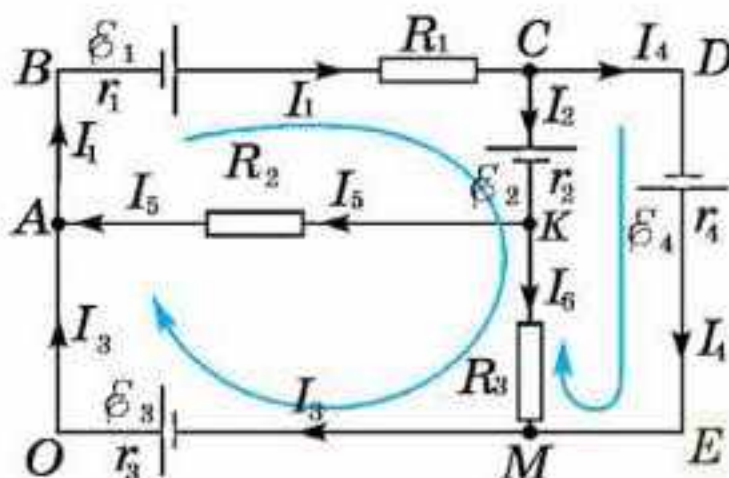
$$\sum_{\text{кіріс}} I_i = \sum_{\text{шығыс}} I_j. \quad (62.1)$$

Токтардың бағытын біз алдын ала білмейміз. Сондықтан токтардың оң бағытын қалауымызша аламыз және оң бағытта таралатын ток үшін I_k деген белгілеу енгіземіз. Егер есептеу кезінде қайсыбір I_k ток үшін теріс мән шықса, онда бұл берілген бөлікте ток қабылданған бағытқа қарама-қарсы қозғалады дегенді білдіреді.

(62.1) қатынасы *Кирхгофтың бірінші ережесі* деп аталады.

Кирхгофтың екінші ережесі берілген тізбекте бөліп қарастыруға болатын кез келген тұйықталған контурға арналған. *Кез келген тұйықталған контурда кедергілердегі кернеу тңсулерінің қосындысы осы контурдағы ЭҚК қосындысына тең болады:*

$$\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i = \sum_{i=1}^n U_i. \quad (62.2)$$



62.1-сурет

Егер берілген бөлікте контурды айналып өту бағыты токтың оң бағытымен бағыттас болса, онда ток көзінің ішкі кедергісіндегі және өткізгіштердегі кернеудің түсуі оң деп есептеледі. Егер ток көзін айналып өту бағыты теріс полюстен басталып, оң полюсте аяқталатын болса, онда ЭҚК оң таңбамен алынады. Ток көзін оң полюстен бастап, теріс полюске қарай айналып өтетін болса, онда ЭҚК теріс таңбамен алынады.

Мысалы, 62.1-суретте көрсетілген сұлба үшін

$$A \text{ түйінінде. } I_1 = I_3 + I_5;$$

$$C \text{ түйінінде. } I_1 = I_2 + I_4;$$

$$M \text{ түйінінде. } I_3 = I_4 + I_6.$$

BCKMOAB (сағат тілі бағытымен айналып өту) контуры үшін

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = I_1 r_1 + I_1 R_1 + I_2 r_2 + I_6 R_3 + I_3 r_3;$$

CDEMC контуры үшін

$$\mathcal{E}_4 + \mathcal{E}_2 = I_4 r_4 - I_6 R_3 - I_2 r_2.$$

Кирхгофтың бірінші ережесіне теңдеу құрған кезде схеманың түйін санынан құрылатын теңдеу саны бірге кем болуы керек. Қалған теңдеулер Кирхгофтың екінші ережесін қолданып құрылады. Содан кейін алынған теңдеулер жүйесінен белгісіз шамалар анықталады.

Есеп шығарған кезде тұрақты токтың тармақталған тізбегін келесі ретпен есептеген дұрыс:

1. Тізбектің барлық бөлігі үшін токтың бағытын кездейсоқ таңдаңдар. Бірінші Кирхгоф ережесіне сәйкес теңдеулерді құрастырғанда, тармақталған электр тізбегіндегі токтың кез келген бағытын таңдауға болады.

2. Тізбектегі n түйіндердің санын есептеңдер. Кирхгоф заңын $(n - 1)$ түйіндері үшін жазыңдар.

3. Тармақталған тізбектегі барлық ықтимал тұйықталған контурларды таңдап, айналып өту бағытын келісіп, контурға арналған Кирхгофтың екінші заңын жазыңдар. Ол барлық контур үшін емес тек кейбіреулері үшін жазылған, себебі бұл контурлардың теңдеуі басқа контурлар үшін бірдей теңдеулердің салдары болып табылады. Осы теңдеулерді құрастырған кезде контурлар әр жаңа контурда қарастырылған контурлардың бөлігі болмаған тізбектің кем дегенде бір бөлігін қамтуы керек.

4. Егер есептеулердің нәтижесінде тізбектің кез келген бөлігінде теріс ток пайда болса, онда электр тогы есептеудің басында таңдалған бағытқа қарама-қарсы бағытта өтеді.

Осылайша, бірінші және екінші Кирхгоф ережелеріне сәйкес жасалған тәуелсіз теңдеулер саны тармақталған тізбекте өтіп жатқан түрлі токтардың мәніне тең болады. Сондықтан, барлық ЭҚК және тармақталған бөліктегі кедергілер белгілі болса, онда тізбек бөлігіндегі токтарды анықтауға болады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қандай тізбек тармақталған деп аталады?
2. Тармақталған тізбектегі кедергіні қалай есептеуге болады?
3. Кирхгофтың бірінші ережесін тұжырымдаңдар.
4. Кирхгофтың екінші ережесін тұжырымдаңдар.
5. Кирхгофтың екінші ережесіне сәйкес ток көзінің ЭҚК және кедергідегі кернеудің бағытын қалай анықтауға болады?

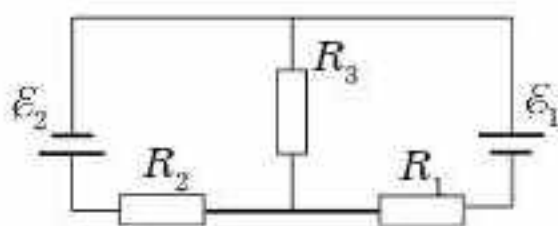
Шығармашылық шеберхана

Шығарыңдар

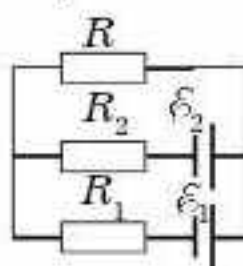
*1. Егер ток көздерінің ЭҚК $\mathcal{E}_1 = 4$ В және $\mathcal{E}_2 = 3$ В және ішкі кедергісі $r_1 = 1$ Ом және $r_2 = 0,5$ Ом, ал резисторлар кедергілері $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 1$ Ом, $R_3 = 6$ Ом болса, R_2 (62.2-сурет) резистор және R_2 резисторындағы кернеу арқылы ток күшін анықтаңдар.

*2. Егер $\mathcal{E}_1 = 1,5$ В, $\mathcal{E}_2 = 3,7$ В, $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 20$ Ом, $R = 5$ Ом болса, сызбадағы R резистор (62.3-сурет) және оның бағыты арқылы ток күшін табыңдар. Ток көздерінің ішкі кедергісін ескермеңдер.

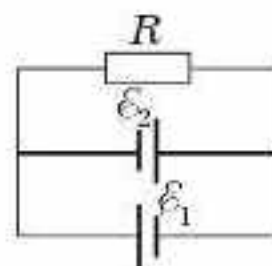
*3. $\mathcal{E}_1 = 10$ В және $\mathcal{E}_2 = 8$ В ЭҚК екі батареялар және ішкі кедергілері $r_1 = 1$ Ом, $r_2 = 2$ Ом болатын 62.4-суретте көрсетілгендей кедергісі $R = 6$ Ом резистормен қосылған. R резистор арқылы өтетін ток күшін табыңдар.



62.2-сурет



62.3-сурет



62.4-сурет

4. Ұзындығы l өткізгіш 4 бөлікке бөлінген. Өткізгіштің 3 бөлігі параллель, ал бір бөлігі оларға тізбектей жалғанған. Өткізгіштің кедергісі қалай өзгереді?

Жауабы: 3 есе азаяды

5. Реостатқа тізбектей кернеуі тұрақты 26 В болатын ток көзіне кернеуі 5 В және ток күші 0,25 А тең шам қосылған. Ұзындығы 1,0 м мен қимасының ауданы $0,1 \text{ мм}^2$ болатын никель өткізгішінен жасалған реостаттың сырғымасын шам жанып тұру үшін қалай қою керек? Никельдің меншікті кедергісі $42 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

Жауабы: болады, сырғыманы реостаттың ортасына қою керек

Рефлексия

1. Ұғымдарды таңда: бәрін түсіндім, басқаларға көмектесе аламын; әліде көмек керек; ештеңе түсінбедім; қызықты; жақсы; өте жақсы; қызық емес.
2. Оқылған материалға өз көзқарасыңды білдір: қызықты, пайдалы, қажет т.б.

§ 63. Токтың жұмысы мен қуаты. Электр тогының жылулық әсері. Джоуль—Ленц заңы



Тірек ұғымдар: ток жұмысы, токтың жылулық әсері, Джоуль—Ленц заңы.

Бүгінгі сабақта: токтың жұмысы мен қуатын есептеуді, токтың жылулық әсерін есептеу кезінде Джоуль—Ленц заңын қолдануды үйренесіңдер.

Электр тогының жұмысы. Тізбек бөлігіндегі токтың толық жұмысын

$$A = Uq$$

формуласымен табуға болады, мұндағы U — тізбек бөлігіндегі кернеу, ал q — өткізгіштің көлденең қимасы арқылы t уақыт аралығында өтетін заряд мөлшері. $q = It$ ескеріп,

$$A = UIt \quad (63.1)$$

аламыз. Бұл формула бойынша тізбектің қарастырылып отырған бөлігіндегі жұмысты энергияның қандай түрінің электр энергиясына айналатынына тәуелсіз есептеп шығаруға болады.

Электр энергиясы ішкі энергияға айналған кезде (яғни, тізбектің бөлігін қыздыруға кеткенде) $I = \frac{U}{R}$ өрнегі орындалады. Осы өрнекті (63.1) формуласына қойып, тізбектің ЭҚК жоқ бөлігі үшін токтың жұмысын есептейтін басқа формуланы аламыз:

$$A = \frac{U^2}{R} \cdot t. \quad (63.2)$$

$U = IR$ ескеріп, (63.1) формуланы былай да жазуға болады:

$$A = I^2Rt. \quad (63.3)$$

Сонымен, тізбектің ЭҚК болмайтын бөлігі үшін токтың жұмысын есептеген кезде (63.1)—(63.3) формулалардың кез келгенін пайдалануға болады.

ХБ жүйесінде жұмыс *джоульмен* өлшенеді:

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}.$$

Көбіне жұмыс ватт-сағатпен немесе киловатт-сағатпен өрнектеледі:

$$1 \text{ Вт} \cdot \text{сағ} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Дж}; 1 \text{ кВт} \cdot \text{сағ} = 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{сағ} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Электр тогының қуаты. *Қуат деп жұмысты атқару шапшаңдығын сипаттайтын шама аталады.* Тізбектің бөлігіндегі токтың қуатын бірлік уақытта атқарылған жұмыспен өлшейді. Тізбектің ЭҚК жоқ бөлігінде токтың қуатын мына формулалардың кез келгенімен есептеуге болады:

$$P = \frac{A}{t}; P = UI; P = \frac{U^2}{R}; P = I^2R. \quad (63.4)$$

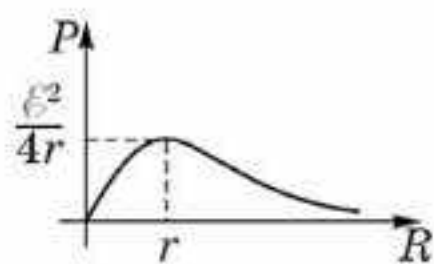
$P = UI$ формуласы токтың барлық әсерін (химиялық, магниттік, жылулық) ескеретін *токтың толық қуатын*, ал $P_{ж} = I^2R$ формуласы *жылулық әсерге кететін ток қуатын* анықтауға мүмкіндік береді.

Бірлік уақыт ішінде сыртқы (бөгде) күштердің жасайтын жұмысы *толық қуат* деп аталады, яғни

$$P_{\text{тол}} = \frac{A_{\text{в}}}{t} = \mathcal{E}I. \quad (63.5)$$

Толық және пайдалы қуаттың сыртқы кедергіге тәуелділігін анықтайық:

$$P_{\text{тол}} = \mathcal{E}I = \frac{\mathcal{E}^2}{R+r}; \quad P_{\text{пай}} = I^2R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2}.$$



63.1-сурет

Соңғы тәуелділіктің графигі 63.1-суретте көрсетілген.

Ток көзінің разрядталу кезіндегі істеген жұмысын қарастырайық және тізбектің сыртқы бөлігіндегі ток қуатын анықтайық. Бұл жағдайда $P = UI$, себебі $U = \mathcal{E} - Ir$, олай болса, $P = \mathcal{E}I - I^2r$. Осыдан $\mathcal{E}I = P + I^2r$ аламыз. Ток көзі разрядталған кезде ол сыртқы тізбекке P қуат береді және бұл қуаттың бір бөлігі жылу түрінде ток көзінен бөлінеді, яғни $\mathcal{E}I = P_{\text{тол}}$ шамасы бірлік уақытында ток көзінен бөлінген толық энергияны сипаттайды. Ток көзі зарядталған кезде сырттан энергия алады, сондықтан ток қуатын мына түрде анықтауға болады: $P = U \cdot I$. Мұндағы $U = \mathcal{E} + Ir$, онда

$$P = \mathcal{E}I + I^2r.$$

Ток қуатының, яғни бірлік уақытта тұтынатын энергияның бір бөлігі (I^2r) жылу түрінде бөлінеді де, қалған бөлігі ток көзі энергиясының артуына жұмсалады.

Әр ток көзінің пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК) бар. *ПӘК деп сыртқы күш жұмысының қандай бөлігін ток көзі пайдалы жұмысқа (әсерге) айналдырғанын көрсететін η шамасын атайды:*

$$\eta = \frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{т}}} = \frac{UI t}{\mathcal{E}I t} = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{IR}{I(R+r)} = \frac{R}{R+r} = \frac{1}{1 + \frac{r}{R}}. \quad (63.6)$$

Соңғы формуланы талдай келе $r \ll R$ болғанда ток көзінің ПӘК максимал, ал $r = R$ болғанда ПӘК 50% болатынына көз жеткіземіз.

Электр тогының жылулық әсері. Электр тогының жылулық әсерін ағылшын ғалымы Дж. Джоуль мен орыс физигі Э. Ленц тәжірибе жүзінде зерттеген. Тогы бар өткізгіште бөлініп шығатын жылу мөлшері электр өрісінің өткізгіш кедергісін жеңуге жұмсаған жұмысына тең:

$$Q = A_{\text{ж}} = I^2Rt. \quad (63.7)$$

(63.7) формула *Джоуль—Ленц заңының* математикалық өрнегі болып табылады және ол былай оқылады: **өткізгіштегі токтың бөліп шығаратын жылу мөлшері өткізгіштің кедергісіне, ток күшінің квадратына және оның өту уақытына тура пропорционал.**

Кедергілері R_1 және R_2 болатын өткізгіштерді тізбектей жалғаған кезде (63.2, а-сурет) оларда бөлініп шыққан жылуды былай өрнектеуге болады: $Q_1 = I^2 R_1 t$, $Q_2 = I^2 R_2 t$, осыдан

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (63.8)$$

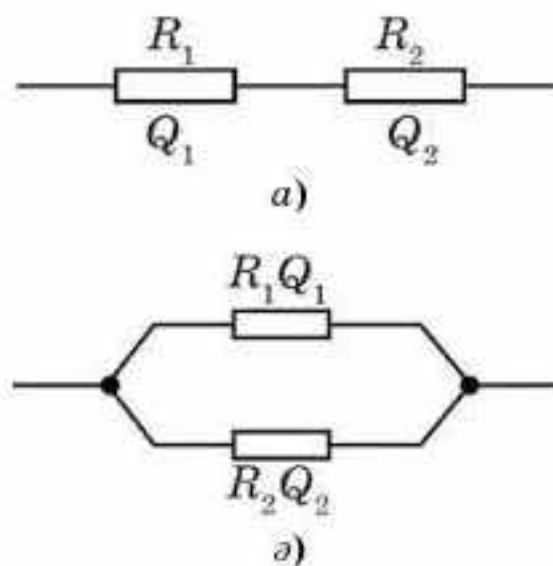
екені шығады. Демек, тізбектей жалғаған кезде әрбір өткізгіште бөлініп шығатын жылу мөлшері осы өткізгіштердің кедергілеріне тура пропорционал.

Кедергілері R_1 және R_2 болатын ЭҚК жоқ тізбектің екі бөлігін параллель жалғаса (63.2, ә-сурет), токтың әрбір жеке бөлігінде бөліп шығаратын жылу мөлшері $Q_1 = \frac{U^2 t}{R_1}$, $Q_2 = \frac{U^2 t}{R_2}$, осыдан

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (63.9)$$

ЭҚК жоқ тізбектің параллель жалғанған бөліктерінде токтың бөліп шығаратын жылу мөлшері осы бөліктердің кедергілеріне кері пропорционал болады.

(63.8) және (63.9) өрнектерден көріп отырғанымыздай, тізбектей жалғанған кезде ең көп жылу мөлшері кедергісі ең үлкен өткізгіште, ал параллель жалғанған кезде кедергісі ең кіші өткізгіште бөлініп шығарылады.



63.2-сурет



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Токтың өткізгіш бойымен өткен кездегі жасайтын жұмысын қалай анықтауға болады?
2. Ток қуаты деп нені түсінеміз?
3. Қандай қуат жоғалатын деп аталады? Ол қуатты қандай формуламен анықтайды?
4. Толық, пайдалы және жоғалатын қуаттар сыртқы тізбек кедергісінің шамасына қалай тәуелді? Осы тәуелділіктердің математикалық және графикалық дәлелдемесін келтіріңдер.
5. Джоуль—Ленц заңын тұжырымдаңдар.

Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

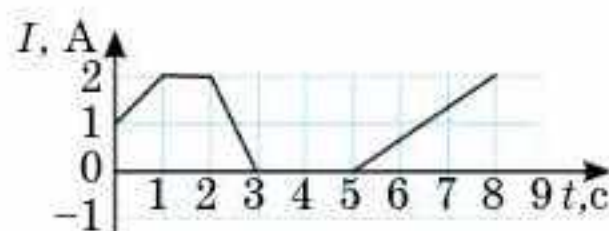
Электр пеші мен амперметрді электрлік тізбекке қосыңдар. Қызған пешке желдеткіш арқылы суық ауа ағынын бағыттайтын болсақ, амперметр көрсеткіші қалай өзгереді?

Түсіндіріңдер

1. Шам қызғанда оның қылының бетіндегі материалдың булануы әсерінен қылы уақыт өте келе жіңішкереді. Бұл шамның қуатына қалай әсер етеді?
2. Балқығыш сақтандырғыш 5 А ток күшіне есептелген. Мұндай сақтандырғыштың көмегімен қуаты 2,4 кВт құралды кернеуі 220 В ток көзіне қосуға бола ма?
3. Неліктен тізбектің басқа бөліктеріне қарағанда балқығыш сақтандырғыш тез істен шығып қалады?
4. Бір материалдан жасалған, ұзындықтары бірдей, бірақ қималары әртүрлі екі өткізгіш электр тогының тізбегіне тізбектей жалғанған. Оның қайсысы жылудың көп мөлшерін бөліп шығарады? Өткізгіштерді тізбекке параллель жалғағанда есептің жауабы қалай өзгереді?
5. Су тезірек қайнауы үшін суы бар ыдысқа түсірілген екі қыздырғыштың орамдарын қалай жалғаған дұрыс?
6. Екі қыздырғышты ыдыстағы суды тез қайнату үшін қалай жалғау қажет?

Зерттеңдер

Кедергісі 400 Ом өткізгіш бойымен өтетін ток күшінің уақыттан тәуелді $I(t)$ графигі берілген (63.3-сурет). Ток күшінің өзгерісін зерттеңдер. 8 с өткізгіште бөлінетін жылу мөлшерін анықтаңдар.



63.3-сурет

Талдаңдар

Болат сым арқылы ток өткен кезде сым аздап қызады. Егер сымның бір жақ бөлігін суытатын болсақ, екінші жағының жылуы қалай өзгереді? Неліктен?

Шығарыңдар

1. Қуаты 1500 Вт электршәйнегі сөндірілмей қалып қойған. Қанша уақыттан кейін шәйнектегі су қайнап бітеді? Шәйнек көлемі 2 л, ПӘК 50%, судың бастапқы температурасы 20°C .

Жауабы: ≈ 2 сағ

2. $I(U)$ тәуелділік графигі (63.4-сурет) арқылы 5 В кернеу кезінде 4 мин ішінде өткізгіште бөлінетін жылу мөлшерін анықтаңдар.

Жауабы: ≈ 90 Дж

3. Қуаттары сәйкесінше 1000 Вт және 500 Вт болатын, көлемдері әртүрлі электршәйнегі мен кәстрөл ток көзіне параллель қосылған. Ыдыстардағы су бірдей 4 мин

қайнады. Егер оларды ток көзіне тізбектей жалғайтын болсақ, шәйнектегі су кәстрөлдегі суға қарағанда қанша минут аз қайнайды?

Жауабы: 4,5 мин

4. Қимасы және массасы тең алюминий мен мыстан жасалған өткізгіштердің ұштарына бірдей кернеу берілді. Қай өткізгіште ток күші көп және қанша есе?

Жауабы: мыста 5,43 есе

■5. Электр тізбегіне шам мен резистор қосылған (63.5-сурет). Ток көзінің ПӘК 60%, оның ішкі кедіргісі 1 Ом. Ток көзі арқылы өтетін ток күші 1 А. Шамдағы кернеуді анықтаңдар.

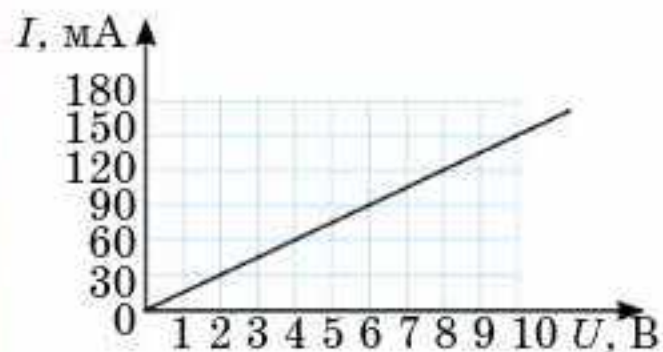
Жауабы: 1,5 В

■6. Электршәйнегінің спиралі қимасы $0,5 \text{ мм}^2$ болатын нихром сымнан жасалған. Шәйнекте 1,5 л су бар, және ол кернеуі 220 В ток көзіне қосылған. Шәйнектегі су 4 мин 298 К шамасынан 373 К мәніне дейін қызады. Шәйнектің ПӘК 75% тең болса, сымның ұзындығы қандай?

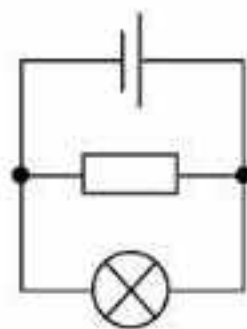
Жауабы: 17 см

7. Батареяның ЭҚК 80 В, ішкі кедергісі 1 Ом болса, 63.6-суреттегі сұлбадағы амперметрдің көрсеткіші қандай болады? Кедергілер: $R_1 = 25 \text{ Ом}$, $R_3 = 49 \text{ Ом}$. R_1 кедергісіне бөлінетін қуат 16 Вт. Амперметр кедергісі ескерілмейді.

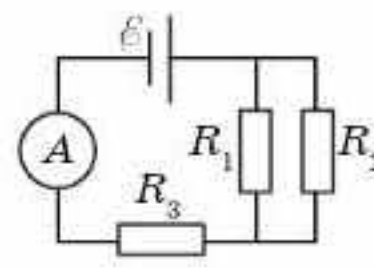
Жауабы: 2 А



63.4-сурет



63.5-сурет



63.6-сурет



Рефлексия

1. Ұғымдарды таңда: бәрін түсіндім, басқаларға көмектесе аламын; әлі де көмек керек; ештеңе түсінбедім; қызықты; жақсы; өте жақсы; қызық емес.
2. Оқылған материалға өз көзқарасыңды білдір: қызықты, пайдалы, қажет т.б.



Зарядталған бөлшектердің бағытталған немесе реттелген қозғалысы *электр тогы* деп аталады.

Электр тогын алу үшін ортада *зарядталған бөлшектер* мен *электр өрісінің* болуы шарт.

Электр тогы ток күшімен сипатталады: $I = \frac{q}{t}$.

Ток күші ампермен өлшенеді. Тізбектің бөлігінен өткен электр тогы тізбекке арналған Ом заңына бағынады:

$$I = \frac{U}{R},$$

мұндағы I — тізбектегі ток күші, U — тізбек ұштарындағы кернеу,

R — тізбектің кедергісі.

Электр өрісі зарядталған бөлшектердің орнын ауыстыра отырып жұмыс жасайды. Ол жұмысты *ток жұмысы* деп атап,

$$A = UIt$$

формуласы арқылы анықтайды.

Өткізгіш бойымен жүріп өткен ток оны қыздырады. Осы кезде өткізгіште бөлінген жылу мөлшері *Джоуль—Ленц заңынан* табылады:

$$Q = I^2Rt.$$

Электр тогының *қуаты* токтың жұмыс орындалу шапшаңдығын анықтайды:

$$P = \frac{A}{t} = IU.$$

Бұл формулада токтың барлық әсерлері (жылулық, магниттік, химиялық) ескерілген.

Тұйық (толық) тізбектерде *толық тізбек үшін Ом заңы* орындалады:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}.$$

12-тарау. ӨРТҮРЛІ ОРТАДАҒЫ ЭЛЕКТР ТОҒЫ

§ 64. Металдардағы электр тоғы



Тірек ұғымдар: электр өткізгіштігінің классикалық теориясы; кедергінің температуралық коэффициенті; кедергі термометрі; асқын өткізгіштік; жоғары температуралық асқын өткізгіштік.

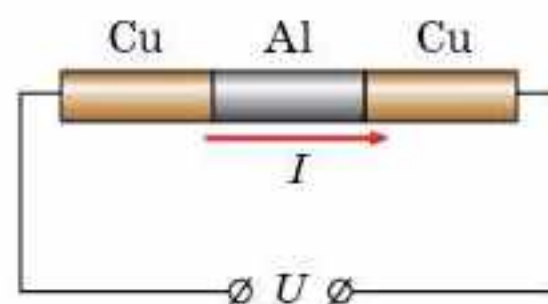
Бүгінгі сабақта: металдар өткізгіштігінің электрондық табиғатының тәжірибелік дәлелдемелерімен танысасыздар; металдар өткізгіштігінің электрондық теориясының негізгі қағидаларын оқып-үйренесіздер; асқын өткізгіштік және жоғары температуралық асқын өткізгіштік құбылыстарымен танысасыздар.

Металдардағы токтың электрондық табиғатын дәлелдейтін тәжірибелер. Металдардағы электр тоғын еркін электрондардың бағытталған қозғалысы тудыратыны бізге мәлім. Мұны дәлелдейтін тәжірибелердің кейбірін қарастырайық.

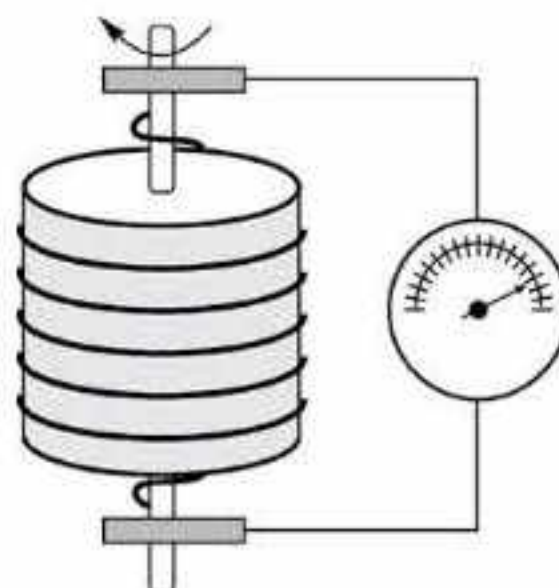
1901 жылы неміс экспериментші-физигі Э. Рикке өзінің жасаған тәжірибесінде табандары мұқият тегістелген үш металл цилиндрден (біреуі алюминий, екеуі мыстан жасалған) тұратын электр тізбегін құрады. Осындай құрама тізбек арқылы бір жыл бойы бір бағытта электр тоғы жіберді (64.1-сурет). Нәтижесінде Рикке бір металдың екінші металға енуінің ешқандай іздерін таба алмады. Сонымен қоса, токтың өтуі цилиндрлер массаларының өзгеруіне әкелмейтіні де байқалды. Демек, металдардағы ток тасушылары барлық металдардың құрамына кіретін және олардың барлығына ортақ болатын бөлшектер екені анықталды. Олар 1987 жылы Томсон ашқан электрондар болуы мүмкін еді.

Электрондар инерциясын пайдаланатын тәжірибелер. Металдардағы ток тасушылары дәл сол электрондар екеніне көз жеткізу үшін тасушылар зарядының таңбасы мен олардың

$\frac{q}{m}$ меншікті зарядының сандық мәнін анықтау қажет болды. Осы мақсаттағы тәжірибені, алғаш рет американ физиктері Р. Толмен және Т. Стюарт 1916 жылы жасады. Тәжірибеде металл сымнан оралған үлкен диаметрлі катушканы өз осінің бойымен тез айналдырып, кенеттен тез тоқтатады (64.2-сурет). Осы кезде катушкада қысқа мерзімді ток жүреді, демек зарядтың еркін тасушылары инерция салдарынан біраз уақыт қозғалыста болады. Сырғымалы



64.1-сурет



64.2-сурет

контакт көмегімен иілгіш сымдар арқылы өткізгіштің ұштарына жалғанған сезімтал гальванометрде пайда болған токтың күшін өлшейді. Эксперимент арқылы Толмен мен Стюарт металдардағы заряд тасушылардың таңбасы теріс, ал олардың меншікті заряды, яғни тасушының q зарядының оның m массасына қатынасы электронның $\frac{q}{m}$ меншікті зарядына өте жақын екенін анықтады.

Осылайша Толмен мен Стюарт жүргізген тәжірибеде металдардағы ток тасушылары еркін электрондар екенін дәлелденді.

Металдар өткізгіштігінің электрондық теориясы. XX ғасырдың басында неміс физигі П.Друде (1863—1906) және нидерланд физигі Х.Лоренц (1853—1928) металдар өткізгіштігінің классикалық электрондық теориясын жасады. Бұл теорияның негізгі қағидалары:

1. Еркін электрондар металда идеал газ молекулалары сияқты, хаостық және үздіксіз қозғалыста болады. Бірақ газ молекулаларына қарағанда электрондар өзара емес, электрондар кристалл торының түйіндерінде орналасқан иондармен соқтығысады. Электрондық газға идеал газдың молекулалық-кинетикалық теориясы заңдарын қолдануға болады. Мысалы, еркін электрондардың жылулық

қозғалысының орташа квадраттық жылдамдығын $v_{\text{орт}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}}$ формуласымен есептейді, мұндағы m_e — электронның массасы. Бөлме температурасында өткізгіштік электрондарының ретсіз қозғалысының орташа жылдамдығы 10^5 м/с шамалас.

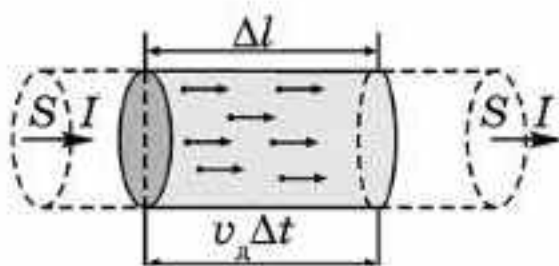
2. Электр өрісін қосқанда электрондардың хаостық қозғалысына орташа жылдамдығы v_d болатын, *электрондар дрейфі* деп аталатын, электрондардың реттелген қозғалысы қабаттасады. Осы жылдамдықтың шамасын табайық. Ол үшін металл өткізгіштің ішінен көлденең қимасы S , ұзындығы $\Delta l = v_d \Delta t$, еркін электрондар концентрациясы n болатын цилиндрді бөліп алайық. Ток сол жақтан оңға қарай бағытталсын (64.3-сурет). Анықтама бойынша өткізгіштегі ток күші мынаған тең:

$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, мұндағы Δq — цилиндрдің оң жақ табанын Δt уақытта қиып

өтетін барлық электрондардың қосынды заряды. Қосынды Δq зарядты $\Delta q = Ne$ өрнегімен есептеуге болады, мұндағы N — цилиндрдің ішіндегі барлық еркін электрондардың саны. Бұл шындық, себебі олардың барлығы токтың пайда болуына үлес қосады. Ең алыс орналасқан

электронның өзі v_d жылдамдықпен қозғала отырып, Δt уақытта цилиндрдің ұзындығына тең болатын $v_d \Delta t$ арақашықтықты жүріп өтіп, оң жақ табанды қиып өте алады. Онда

$$I = \frac{Ne}{\Delta t} = \frac{nVe}{\Delta t} = \frac{n\Delta l Se}{\Delta t} = \frac{nv_d \Delta t Se}{\Delta t} = nv_d eS. \quad (64.1)$$



64.3-сурет

Бұдан металдағы еркін электрондар дрейфінің жылдамдығы $v_d = \frac{I}{neS}$ тең болып шығады.

3. Барлық электрондар үшін бірінен соң бірі жүретін соқтығысулардың аралығындағы t уақыт бірдей болады және еркін жүру уақыты деп аталады. Әрбір соқтығысуда электрон өзінің кинетикалық энергиясын толығымен кристалл торына беріп отырады және соқтығысудан кейін өзінің қозғалысын $v_0 = 0$ нөлдік бастапқы жылдамдықпен бастайды.

1—3 жорамалдар дәл болмағандығына қарамастан, классикалық электрондық теория тұрақты токтың негізгі заңдарымен жақсы үйлеседі.

Ом заңын түсіндіру. Классикалық электрондық теория жорамалдарына сүйене отырып, Ом заңын түсіндіруге болатынын көрсетейік. Еркін жүру уақыты аралығында электрон, электр өрісінің әсерінен тең үдемелі қозғалып, $v_{\max} = at$ жылдамдығына ие болады, мұнда біз $v_0 = 0$ екенін ескердік. Ньютонның екінші заңын пайдаланып, электронның a үдеуін өткізгіштегі E электр өрісінің кернеулігі арқылы өрнектеуге

болады: $a = \frac{F}{m_e} = \frac{eE}{m_e}$.

Олай болса, $v_{\max} = \frac{eE}{m_e} t$. Біз электрондар дрейфінің v_d жылдамдығын электронның кристалл торының иондарымен бірінен соң бірі келетін екі соқтығысуының арасындағы теңүдемелі қозғалысының орташа жылдамдығы ретінде қарастыруымызға болады:

$$v_d = \frac{1}{2}(v_0 + v_{\max}) = \frac{1}{2}v_{\max} = \frac{eE}{2m_e}t.$$

v_d үшін табылған өрнекті (64.1) формулаға қояйық:

$$I = nev_d S = neS \frac{et}{2m_e} E = \frac{ne^2 St}{2m_e} E.$$

Соңғы теңдеуде электр E өрісінің кернеуін U потенциалдар айырымы арқылы есептейік: $E = \frac{U}{l}$, мұндағы l — өткізгіш ұзындығы. Онда ток күші келесі теңдеумен есептеледі:

$$I = \frac{ne^2 St}{2m_e l} U. \quad (64.2)$$

Осылайша өткізгіштегі I ток күші осы өткізгіштің ұштарындағы U потенциалдар айырымына тура пропорционал болады. Демек, біз Ом заңын қорытып шығардық: $I = \frac{1}{R} U$.

Джоуль—Ленц заңы. Өткізгіш арқылы ток өткенде, электрондар кристалл торының иондарымен өзара әсерлесіп, электр өрісінен алған энергиясын жоғалтады. Өткізгіш электрондарының торға берген энергиясы металл өткізгіштің ішкі энергиясын арттырады, сөйтіп өткізгіш қызады. Бұл кезде бөлінетін жылу мөлшері бізге белгілі Джоуль—

Ленц заңымен анықталады, ал ол заңды да классикалық электрондық теорияның көмегімен түсіндіруге болады.

Металдар кедергісінің температураға тәуелділігі. 11-тараудан металдар кедергісінің температура өсуімен $R = R_0(1 + \alpha t)$ заңымен артатыны белгілі, мұндағы R_0 — 0°C температурадағы өткізгіштің кедергісі, α — зат кедергісінің температуралық коэффициенті. Көптеген жай металдар үшін $\alpha \approx 0,004 \text{ K}^{-1}$ болатын тұрақты шама.

Металдар кедергісінің температураға тәуелділігін өткізгіштіктің классикалық электрондық теориясы негізінде түсіндіріп көрейік.

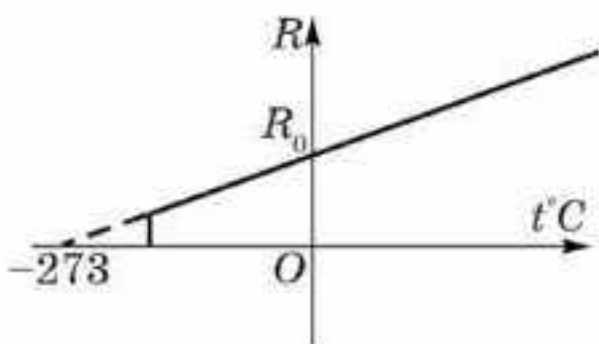
Ол үшін жоғарыда алынған (64.2) теңдеудің $I = \frac{1}{R} U$ Ом заңымен салыстырайық. (64.2) теңдеудің оң жағындағы U кернеудің алдындағы көбейткіш өткізгіштің кедергісіне кері шама болып табылатындығы айқын. Олай болса, металл өткізгіштің R электр кедергісі үшін

$$R = \frac{2m_e l}{ne^2 S \tau} \tag{64.3}$$

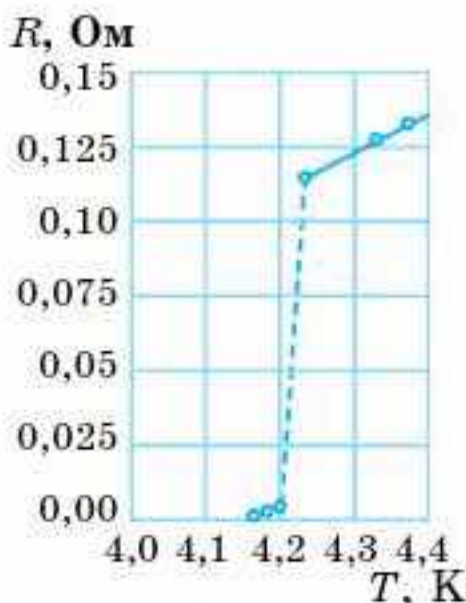
өрнегін аламыз.

Температура артқан сайын, кристалл торы түйіндеріндегі иондардың тербеліс амплитудасы да ұлғаяды. Демек, электрондардың иондармен соқтығысу саны да артуы тиіс. Бұл электрондардың τ еркін жүру уақытының кемуіне алып келеді. Сонда (64.3) өрнегіне сәйкес өткізгіштің R кедергісі артады.

Асқын өткізгіштік. 64.4-суреттен металдар кедергісі температура төмендеген сайын азаятынын көреміз. Кедергі қандай шекті мәнге дейін кеми алады деген сұрақ туындайды. Нидерланд физигі Х. Камерлинг—



64.4-сурет



64.5-сурет

Оннес (1853—1926) сол уақыттағы ең төмен (4 К жуық) температураны алған алғашқы ғалым болды. Мұндай температурада гелий инертті газы сұйық күйге айналады. Камерлинг—Оннес сұйық гелийдің температурасында сынаптың кедергісін өлшеу эксперименттерінде таңғажайып құбылыс байқаған: салқындату кезінде жайлап кемитін сынаптың кедергісі кенет бірден нөлге дейін түсіп кеткен (64.5-сурет). Төмен температурада кедергінің секірмелі түрде жоғалып кетуінің осындай құбылысы асқын өткізгіштік деп аталады. Ол кейін сынаптан басқа да көптеген металдар мен қоспаларда байқалды. Асқын өткізгіштік құбылысында кедергі шынымен де нөлге айналады, себебі ешқандай тәжірибелер кедергінің бар екенін таба алмады. Асқын өткізгіш күйдегі металл кедергісінің жоқ екеніне көз жеткізу

үшін, мысалы, сақина тәрізді өткізгіш арқылы ток жүргізіп, оның жанына қойылған компас тілшесін бақылауға болады. Егер компас тілшесінің орны уақыт өтуімен өзгермесе, онда сақинаның магнит өрісінің, яғни оны тудыратын токтың өзінің де тұрақтылығы жайлы айтуға болады. Ал бұл тек өткізгіш кедергісінің мәні нөлге тең болған жағдайда ғана мүмкін.

Кейінірек, асқын өткізгіштерде олар асқын өткізгіш күйге ауысу кезінде кедергінің жоғалуынан басқа, тағы бір қасиеттің пайда болатыны анықталды. Магнит өрісі асқын өткізгіштің өн бойынан ығыстырылып шығарылады. Осы керемет екі қасиетінің арқасында асқын өткізгіштік ғылым мен техникада кең қолданылады. Орамасы асқын өткізгіш сымнан оралған күшті электромагниттер элементар бөлшектердің үдеткіштерінде, термоядролық синтез құралдарында қолданылады. Магнит өрістерін тіркеу үшін асқын өткізгіштерден құрастырылған аса сезімтал жүйелерді медициналық-диагностикалық мақсатта пайдаланады, мысалы, магнитті-резонанстық томография (МРТ) құралдарында. Энергетикада асқын өткізгіштердің идеал өткізгіштігін электр тасымалдауыш сымдарда қолдануға болады. Жақын болашақта дамыған елдерде асқын өткізгіштердің левитациясына негізделген магниттік жастығы бар пойыздарды құрастыру жоспарланып отыр.

Өкінішке орай, асқын өткізгіш күйге ауысу температураларының төмен болуына байланысты асқын өткізгіштерді кеңінен қолдану мүмкіндіктері шектеулі болып отыр. Сондықтан ғалымдар мен технологтар асқын өткізгіш күйге ауысу температуралары жоғары болатын асқын өткізгіштерді іздестіру үстінде. 1986 жылы мұндай ізденістер үлкен жетістікпен аяқталды. IBM корпорациясының ғылыми бөлімшесінің қызметкерлері К.Мюллер мен Г.Беднорц құрамында лантан, барий және мыс бар металлоксидтік керамикада асқын өткізгіш күйге ауысу температурасы 40 К жуық болатын жоғары температуралық асқын өткізгішті тапты. Қазіргі таңда 100 К жоғары температурада асқын өткізгіш күйге ауысатын материалдар ашылды, бұл қалыпты атмосфералық қысымдағы сұйық азоттың қайнау 77 К температурасынан жоғары.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Неліктен барлық металдар — жақсы өткізгіштер?
2. Металдарда еркін электрондар қалай пайда болады?
3. Неліктен металдардағы өткізгіштік электрондық болып табылады?
4. Өткізгіште сыртқы электр жоқ кездегі және бар кездегі еркін электрондардың әсерін сипаттап айтып беріңдер.
5. Металдағы электрондар қозғалысы орташа жылдамдығының шамасын, олардың электр өрісі тарапынан болатын реттелген қозғалысының орташа жылдамдығының шамасымен салыстырыңдар.
6. Температураның жоғарылауымен металдар кедергісінің артуын түсіндіріңдер.
7. Асқын өткізгіштік деп қандай құбылысты атайды? Оны кім ашты?
8. Асқын өткізгіштік құбылысын қалай түсіндіруге болады?

Шығармашылық шеберхана

Түсіндіріңдер

1. Металдар өткізгіштігінің электрондық табиғатына қандай тәжірибелік дәлелдемелерді келтіре аласыңдар?
2. Металдардың жақсы электр- және жылу өткізгіштігін немен түсіндіруге болады?
3. Температура артқан сайын металдардың кедергісі артып отырады. Осы тәуелділіктің себебін түсіндіріңдер.

Ойлап табыңдар

1. Асқын өткізгіш күйдегі өткізгіштің ешқандай кедергісі болмайтынына көз жеткізетін қандай тәжірибе ұсынар едіңдер?
2. Өздерінің идеал өткізгіштігінен басқа асқын өткізгіш күйдегі өткізгіштер идеал диамагнетиктер, яғни өз көлемдерінен магнит өрісін итеріп шығаратын қасиетке де ие болады. Асқын өткізгіштердің осындай ғажап қасиеттерінің практикалық пайдаланылуы жайлы өз ойларыңды ұсыныңдар.

Талдаңдар

Металдардың диэлектриктерден айырмашылығы — металдардың құрамында еркін электрондардың бар болуы. Алайда, бөлме температурасында электрондар түгелдей металды тастап кете алмайды. Осыған не кедергі болады? Не ықпал етеді?

Шығарыңдар

1. Тығыздығы 11 А/м^2 тұрақты ток мыс өткізгіштің бойымен өткенде электрондардың бағытталған қозғалысының (дрейфтің) орташа жылдамдығы неге тең? Мыстың әр атомына бір еркін электрон келеді деп алыңдар. Мыстың мольдік массасы $64 \cdot 10^{-3} \text{ г/моль}$, тығыздығы 8900 кг/м^3 .

Жауабы: $8,2 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$

2. Қимасы 50 мм^2 алюминий сымы арқылы 1 сағатта 10 Кл заряд өтеді. Алюминийдің әр атомына бір еркін электрон келеді деп, ток күшін, ток тығыздығын және электрондардың бағытталған қозғалысының (дрейфтің) орташа жылдамдығын табыңдар. Алюминийдің тығыздығы 2700 кг/м^3 .

Жауабы: $2,8 \text{ А}$; $5,6 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$; $5,8 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$

3. 20°C температурада электршамының вольфрам қылының кедергісі $35,8 \text{ Ом}$. Егер шамды кернеуі 120 В желіге қосқанда қыл арқылы күші $0,33 \text{ А}$ ток өтетін болса, шам қылының температурасы неге тең? Вольфрам үшін кедергінің температуралық коэффициенті $4,6 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$.

Жауабы: 220°C

Рефлексия

1. Материалды қандай деңгейде меңгердіңдер? Неге?
2. Параграфтың қай бөлігі сендерге қызықты болды?
3. Оқыған материалды бекіту мақсатында қандай тәжірибелер жасауға болады?

§ 65. Жартылай өткізгіштердегі электр тогы



Тірек ұғымдар: электронды және кемтіктік өткізгіштер, жартылай өткізгіштердің меншікті өткізгіштігі, жартылай өткізгіштердің қоспалық өткізгіштігі, $p-n$ ауысуы, жартылай өткізгіш диод, жартылай өткізгіш транзистор.

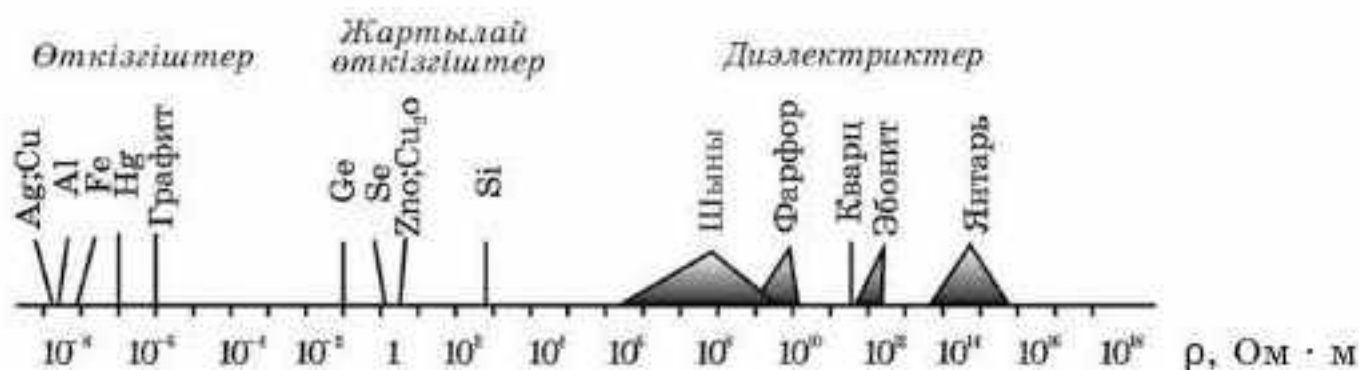
Бүгінгі сабақта: жартылай өткізгіштердің өткізгіштігі меншікті және қоспалық өткізгіштікке бөлінетінін білесіңдер; электронды-кемтіктік ауысуының қасиеттерімен танысасыңдар; $p-n$ -ауысуы негізінде жұмыс істейтін жартылай өткізгіш құралдарды оқып-үйренесіңдер.

Өткізгіштер, диэлектриктер, жартылай өткізгіштер. Барлық заттарды электр өткізгіштігіне қарай үш топқа бөледі: *электр тогын жақсы өткізетін заттар — өткізгіштер* [$\rho = (10^{-5}—10^{-8}) \text{ Ом} \cdot \text{м}$], *электр тогын нашар өткізетін заттар (меншікті өткізгіштігі өте төмен) — диэлектриктер* [$\rho = (10^8—10^{17}) \text{ Ом} \cdot \text{м}$] және *электр тогын өткізгіштігі өткізгіш пен диэлектриктің арасында жататын заттар — жартылай өткізгіштер* [$\rho = (10^4—10^5) \text{ Ом} \cdot \text{м}$] (65.1-сурет).

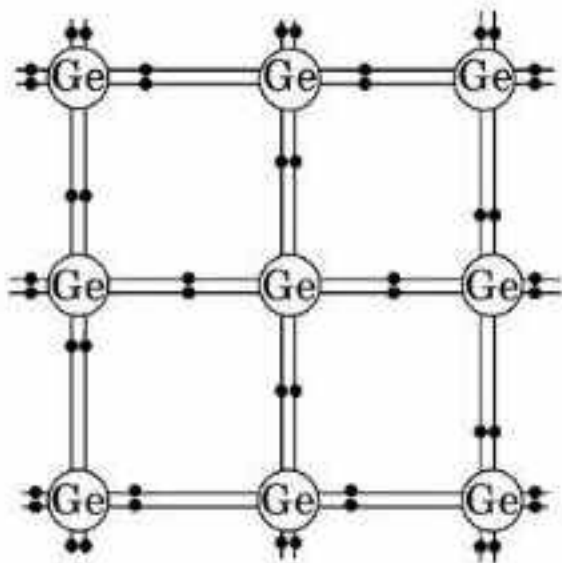
Өткізгіштерде еркін заряд тасымалдаушылардың көп болуы олардың жақсы өткізгіштік қасиетін түсіндіреді. Бірақ өткізгіштің құрамындағы қоспа оның кедергісін арттырады. Себебі еркін заряд тасымалдаушылардың концентрациясы өзгермесе де, олардың қозғалысына қоспа кедергі жасайды.

Диэлектриктерде еркін заряд болмағандықтан, олар электр тогын өте нашар өткізеді. Диэлектриктердің құрамында қоспа болса, онда, әдетте, оның электрондары өзінің атомдарымен нашар байланысқан. Сондықтан олар атомдарды оңай тастап кетеді де, еркін күйге өтіп, диэлектриктің кедергісін азайтады.

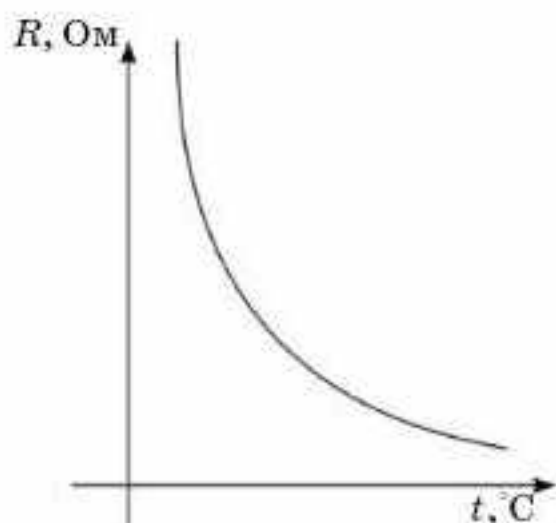
Жартылай өткізгіштердің тобына коваленттік байланыстағы заттар жатады. Көршілес төрт атом арасындағы коваленттік байланыс валентті электрондардың бірігуі есебінен пайда болады. Яғни, осы байланыс пайда болғанда әр атомнан бір валентті электроннан қатысып, электрондық жұп түзеді. Осы “қоғамдасқан” электрондар уақытының көп бөлігін көршілес атомдар аралығындағы кеңістікте өткізеді.



65.1-сурет



65.2-сурет



65.3-сурет

Аталған байланыстың құрылымы 65.2-суретте көрсетілген. Электрондардың “ұжымдық” жұбы тек екі атомға ғана тиісті. Әрбір атом көрші атомдармен төрт байланыс құрады, ал берілген валенттік электрон олардың кез келгеніне қарай қозғала алады. Көрші атомға жақындаған электрон оған өтеді, сосын келесі атомға өтеді, осылайша кристалл бойымен жүріп өтеді. Сондықтан “ұжымды” валентті электрондар тұтас кристаллға тиісті деп айтуға болады.

Төменгі температурада коваленттік байланыс жеткілікті берік (валентті электрондар кристалдық торға берік байланысқан) және берілген жағдайда жартылай өткізгіш диэлектрик секілді әсер жасайды. Сыртқы электр өрісі электрондардың бағытталған қозғалысын тудыра алмайды.

Асқын өткізгіштік кезінде металдардың кедергісі температураның жоғарылауымен артады, ал салқындаған кезде кемиді де, нөлге тең болады. Ал диэлектриктердің температурасының жоғарылауымен кедергісі

кемісе де салыстырмалы түрде ол үлкен қалпында қалады, нөлге дейін түспейді. Диэлектриктердің электрондары атомды тастап кетуі үшін көп энергия қажет, сондықтан қатты диэлектриктер үлкен өткізгіштікке ие болғанша балқып үлгереді.

Жартылай өткізгіштерде атомдардан электрон бөлініп шығуы үшін диэлектриктерге қарағанда аз энергия жұмсалады. Сол себепті жартылай өткізгіштер қызған кезде еркін заряд тасымалдаушылардың саны тез өседі де, кедергі кемиді. Жартылай өткізгіштің кедергісінің температураға тәуелділік графигі 65.3-суретте берілген. Төменгі температурада жартылай өткізгіштердің кедергісі диэлектриктердің кедергісімен теңеседі, өйткені осы кезде оларда еркін заряд тасымалдаушылар болмайды. Жартылай өткізгіште асқын өткізгіштік құбылыстың байқалмауы енді түсінікті.

Жартылай өткізгіштердің кедергісі жарықтану кезінде де кемиді, себебі сәулелену қозғалыстағы еркін зарядтардың пайда болуына жеткілікті энергия әкеледі.

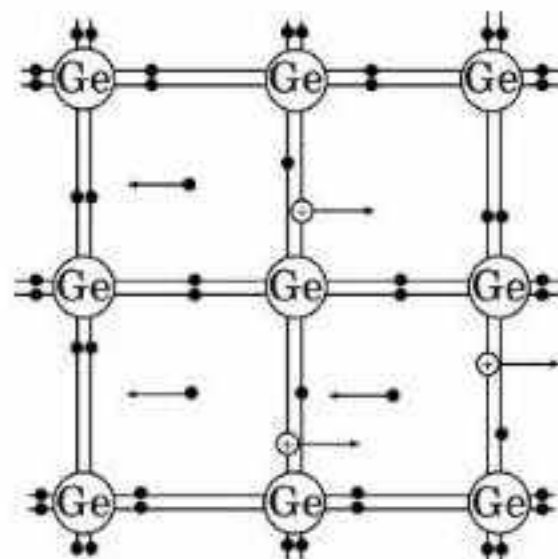
Сонымен, *жартылай өткізгіштердің өткізгіштігі температура мен жарықтануға тәуелді*. Бұл ерекшелік жартылай өткізгіштіктің кеңінен қолданылуына жол ашты.

Жартылай өткізгіштердің меншікті және қоспалы өткізгіштігі. Температураның жоғарылауымен жартылай өткізгіштегі электрондар өз атомдарымен байланысын үзеді де, еркін заряд тасымалдаушыға айналады. Еркін заряд тасымалдаушыларға электрондар мен кемтіктер (коваленттік байланыс бұзылғанда босап қалған орын) жатады. Басқа байланыстармен салыстырғанда кемтіктерде артық оң заряд болады (65.4-сурет). Кристалдардағы кемтік өз қалпын сақтамайды. Пайда болған кемтікке электронның секіріп түсуі байланысты қалпына келтіреді. Осылайша атомдарды байланыстыратын электрондардың қозғалысы кристалл бойымен кемтіктің орын ауыстыруын тудырады. *Кристалл ішінде еркін электрондардың қозғалысынан пайда болған өткізгіштік электронды өткізгіштік, ал кемтіктердің қозғалысынан пайда болған өткізгіштік кемтіктік* деп аталады. Таза жартылай өткізгіштерде әр уақытта бірдей мөлшерде еркін электрондар мен кемтіктер болады. Сондықтан таза жартылай өткізгіштің өткізгіштігі жартылай электронды, жартылай кемтіктік. Мұндай өткізгіштікті *меншікті өткізгіштік* деп атайды.

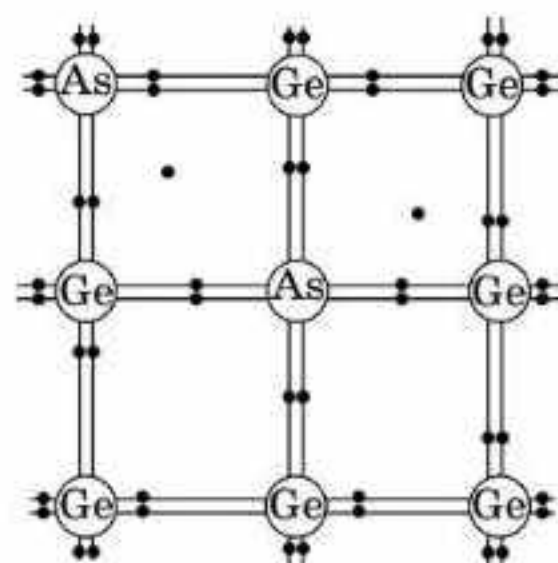
Таза жартылай өткізгіштердің құрамына арнайы таңдап алынған қоспаны қосу арқылы жасанды түрде электрондық немесе кемтіктік өткізгіштігі басым жартылай өткізгіш дайындауға болады.

Таза, балқытылған германийдің құрамына Менделеев кестесіндегі V топтың қандай да бір элементінің атомынан тұратын (мысалы, мышьяк атомы) қоспаның шамамен $10^{-5}\%$ немесе $0,00001\%$ қосайық. Сонда қатқаннан кейін кәдімгі германийдің кристалдық торын аламыз. Бірақ тордың түйіндерінде мышьяк атомдары орналасады (65.5-сурет).

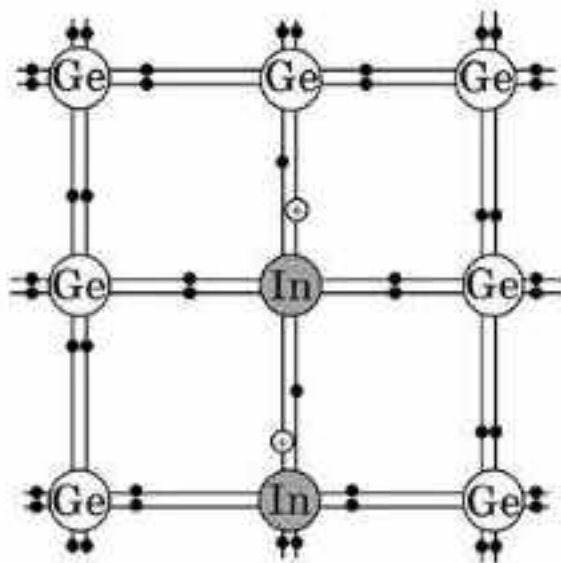
Осы кезде мышьяк атомының төрт валенттік электроны германийдің көрші атомдарымен коваленттік байланыс жасайды, ал бесінші электрон мышьяк атомымен әлсіз байланысқан. Осы электронды жұлып алу үшін жартылай өткізгіш атомын иондауға қарағанда аз энергия жұмсалады. Сондықтан қалыпты температурада жартылай өткізгіштегі мышьяк атомдары иондалған күйде кездеседі. Мышьяк атомының оң зарядтары тормен байланысқан (*локальданған*) және сыртқы электр өрісінің әсерінен қозғалысқа келмейді, ал еркін электрондар (қоспаның әр атомынан бір-бірден) қозғалыстағы заряд тасымалдағыш болып табылады. *Мұндай кристалдық*



65.4-сурет



65.5-сурет



65.6-сурет

өткізгіштік электрондық болады да, ол *n-типті* (латынша “негатив” — “теріс”) өткізгіштік, ал кристалдың өзі *n-типті* деп аталады. Жартылай өткізгіштегі еркін электрондарды тудыратын қоспаны *донорлық (беруші)* немесе *n-типті қоспа* деп атайды.

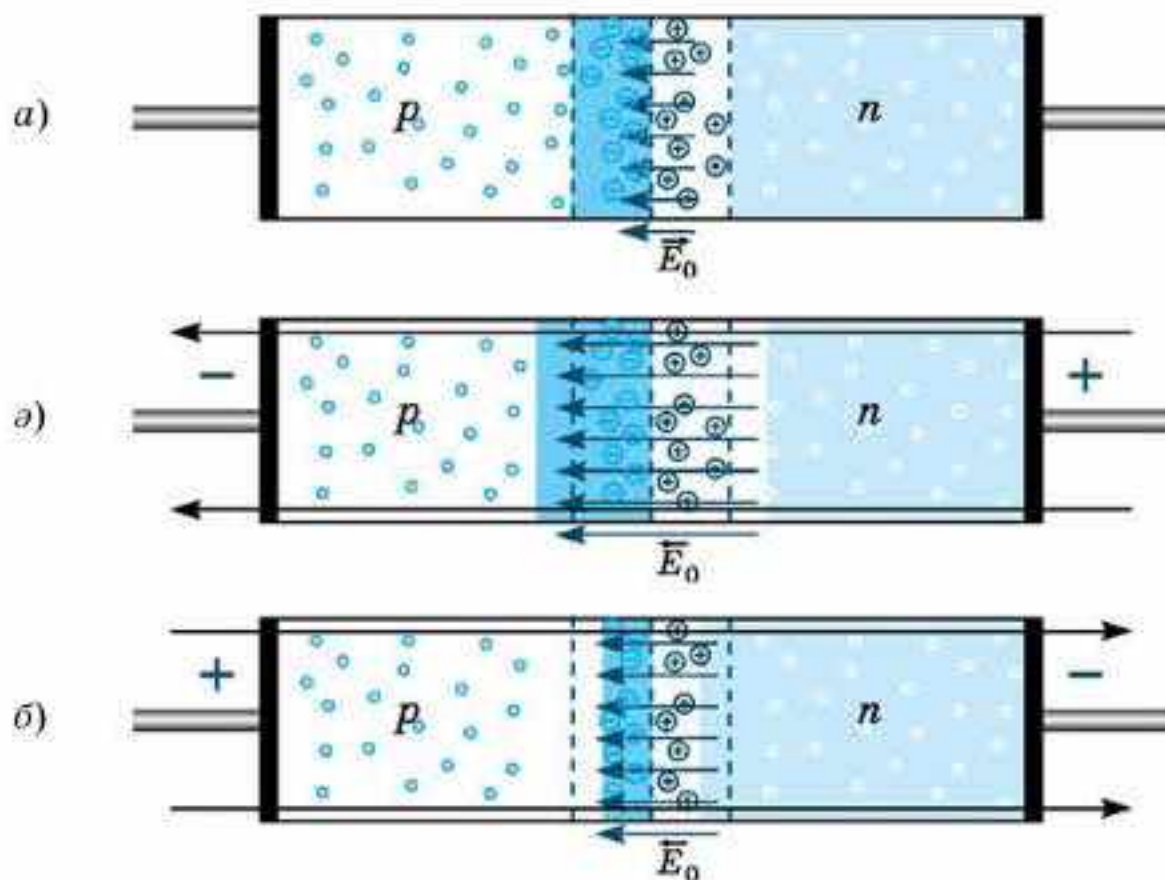
Егер таза германийге Менделеев кестесінің III тобындағы элементтердің атомын, мысалы, үш валенттік электроны бар индийді қосса, онда осы электрондар германийдің үш көрші атомымен коваленттік байланысты орнатуға жетеді. Германийдің төртінші атомымен бай-

ланысуы үшін индий атомы көрші атомдардың біреуінен электрон алады да, теріс ионға айналады, ал германий атомдарының біреуінде кристалл бойымен қозғалып жүретін кемтік пайда болады (65.6-сурет). III топ элементтері атомдарының қоспасы бар германий кристалдарында кемтіктік өткізгіштік басым. Оны *p-типті* (латынша “позитив” — оң) деп атайды. *p-типті өткізгіштікті тудыратын қоспа акцепторлық (қабылдайтын)* немесе *p-типті өткізгіштік* деп аталады.

Электронды-кемтіктік ауысу. Кез келген жартылай өткізгіштік құралда бір немесе бірнеше электронды-кемтіктік ауысу (немесе *p—n* ауысу) болады. *Электронды-кемтіктік ауысу дегеніміз — өткізгіштегі әртүрлі типті екі жартылай өткізгіштердің жанасу аймағы.*

n-типті жартылай өткізгіштерде негізгі еркін заряд тасымалдаушылар электрондар болғандықтан, олардың концентрациясы кемтіктер концентрациясынан артық ($n_n \gg n_p$). *p-типті* жартылай өткізгіштерде негізгі заряд тасымалдаушылар — кемтіктер ($n_p \gg n_n$). *n-* және *p-типті* екі жартылай өткізгіш жанасқанда диффузия процесі жүреді. *p* аймағынан кемтіктер *n* аймаққа өтеді, ал электрондар керісінше *n* аймағынан *p* аймағына өтеді.

Нәтижесінде жартылай өткізгіштің жанасқан жеріне жақын *n* аймағында электрондар концентрациясы азаяды және оң зарядталған қабат пайда болады. *p* аймақта кемтіктер концентрациясы азаяды да, теріс зарядталған қабат пайда болады. Осылайша өткізгіштер шекарасының аймағында электрондар мен кемтіктердің диффузия процесіне электр өрісі кедергі жасайтын қосарланған электрлік қабат пайда болады (65.7, *a*-сурет). Әртүрлі типті өткізгіштігі бар жартылай өткізгіштің шекаралық аймақ бөлігінің (оны *жапқыш қабат* деп атайды) ені, әдетте, шамамен он немесе жүз атомаралық қашықтыққа тең. Осы қабаттың көлемдік заряды *p* және *n* аймақтар арасында жуық шамамен германий *n—p* ауысуы үшін 0,35 В, ал кремний үшін 0,6 В тең U_T тежегіш (жапқыш) кернеу тудырады. *n—p* ауысуы біржақты өткізгіштік қасиетке ие.



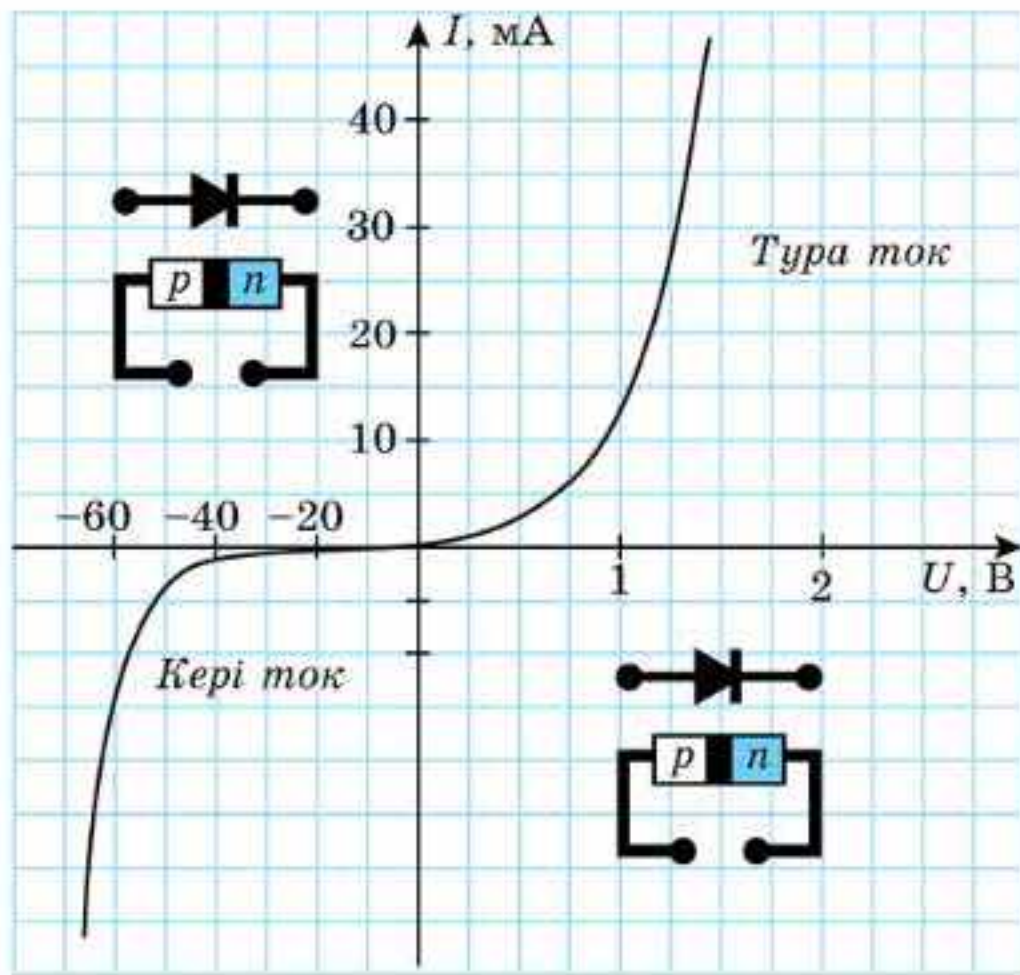
65.7-сурет

Егер $n-p$ ауысуы бар жартылай өткізгіш ток көзіне, оның оң полюсіне n аймақ, теріс полюсіне p аймақ (65.7, а-сурет) жалғанып етіп қосылса, онда жапқыш қабаттағы өріс кернеулігі артады. p аймақтағы кемтіктер және n аймақтағы электрондар $n-p$ ауысуынан оған қарсы ығысады да, жапқыш қабаттағы негізгі емес тасымалдаушылар концентрациясы артады. $n-p$ ауысуы арқылы ток жүрмейді. Бұл кезде $n-p$ ауысуына берілген кернеу *кері* деп аталады.

Шамасы өте аз болатын кері ток жартылай өткізгіштің меншікті өткізгіштігінен туындайды, яғни ол p аймақтағы еркін электрондар мен n аймақтағы кемтіктердің концентрациясының аздығымен түсіндіріледі.

Егер $n-p$ ауысуы бар жартылай өткізгішті ток көзіне, оның оң полюсіне p аймақ, ал теріс полюсіне n аймақ (65.7, б-сурет) жалғанып етіп қосса, онда жапқыш қабаттағы электр өрісінің кернеулігі кемиді де, негізгі тасымалдаушылардың жанасу қабаты арқылы ауысуы жеңілдейді. p аймақтан кемтіктер және n аймақтан электрондар бір-біріне қарама-қарсы бағытта қозғала отырып, $n-p$ ауысуын қиып өтеді де, *тура* бағыттағы токты тудырады. Бұл жағдайда ток көзінің кернеуі жоғарылағанда $n-p$ аймағы арқылы өтетін ток күші артады.

Жартылай өткізгіштік диод. $n-p$ ауысуының токты тек бір бағытта өткізетін қасиеті жартылай өткізгіштік диодтарда қолданылады. Жартылай өткізгіштік диод кремний мен германий кристалдарынан жасалады. Оларды дайындаған кезде қандай да бір типті өткізгіштігі бар кристалға басқа типті өткізгіштік алу үшін қоспа қосады. Жартылай өткізгіштік диод түзеткіштерде айнымалы токты тұрақты токқа түрлендіру үшін



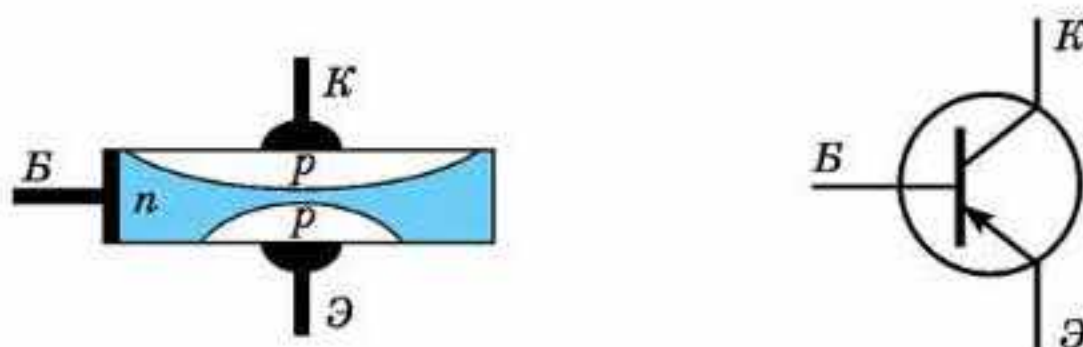
65.8-сурет

қолданылады. 65.8-суретте кремний диодының вольт-амперлік сипаттамасы берілген.

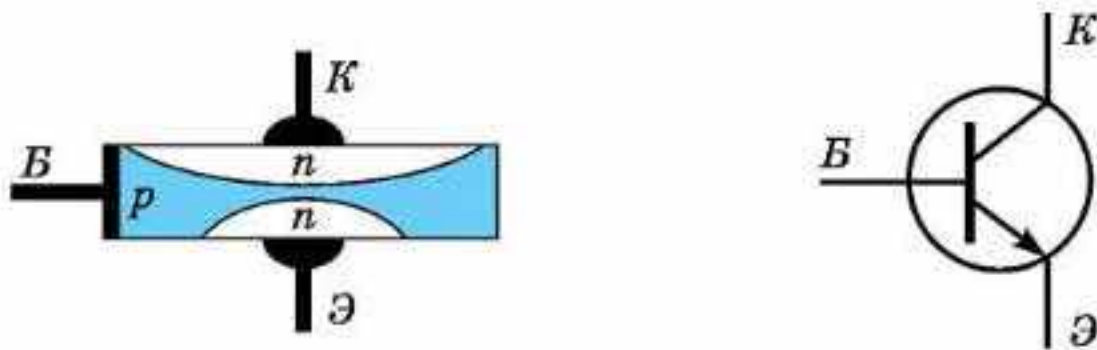
Жартылай өткізгіштік диодтардың вакуумдық диодтармен салыстырғанда көптеген артықшылықтары бар, атап айтсақ, өлшемі аз, жұмыс істеу мерзімі ұзақ, механикалық беріктігі жоғары.

Жартылай өткізгіштік диодтың кемшілігі — оның параметрлерінің температураға тәуелділігі. Мысалы, кремний диоды температураның -70°C -тан $+80^{\circ}\text{C}$ -қа дейінгі диапазонында ғана жұмыс істейді. Германий диодының жұмыс істеу диапазоны біршама үлкен.

Жартылай өткізгіштік транзистор. Екі $n-p$ ауысуы бар жартылай өткізгіштік құралдар *транзисторлар* деп аталады (ағылшынша *transfer* — тасымалдау және *resistor* — кедергі). Әдетте, транзисторларды жасағанда германий мен кремний қолданылады. Транзисторлар $p-n-p$ және $n-p-n$ транзисторы деп екіге бөлінеді. Мысалы, $p-n-p$ типті германий транзисторы донорлық қоспасы бар германий-



65.9-сурет



65.10-сурет

ден жасалған шағын пластина, яғни n -типті жартылай өткізгіштік. Осы пластинада акцепторлық қоспасы бар, яғни кемтіктік өткізгішті екі аймақ пайда болады (65.9-сурет). $n-p-n$ типті транзисторда негізгі германий пластинасы p -типті өткізгіштікке, ал онда пайда болған екі аймақ n -типті өткізгіштікке ие (65.10-сурет).

Транзистордың пластинасын (B) база деп, қарама-қарсы типті өткізгіштікті аймақтардың бірін (K) коллектор, ал екіншісін ($Э$) эмиттер деп атайды. Коллектордың көлемі эмиттердің көлемінен үлкен болады.

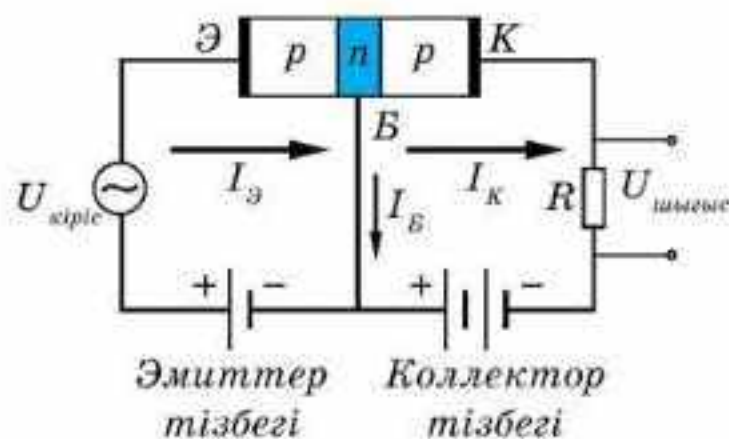
Әртүрлі құрылымдағы шартты белгілеулерде эмиттердің нұсқамасы транзистор арқылы өтетін токтың бағытын көрсетеді.

Транзистордың $n-p$ ауысуының екеуі де екі ток көзіне жалғанады. 65.11-суретте $p-n-p$ құрылымды транзисторды тізбекке қосу көрсетілген. “Эмиттер—база” ауысуы тура бағытта (эмиттер тізбегі), ал “коллектор—база” ауысуы тежегіш бағытта (коллектор тізбегі) қосылады.

Эмиттер тізбегі ажыратылып тұрған кезде коллектордағы ток өте аз, себебі негізгі еркін заряд тасымалдаушылар — базадағы электрондар мен коллектордағы кемтіктер үшін ауысу жабық.

Эмиттер тізбегін тұйықтаған кезде ондағы негізгі заряд тасымалдаушылар болып табылатын кемтіктер базаға ауысады да, тізбекте $I_Э$ эмиттер тогы пайда болады. Эмиттерден базаға түскен кемтіктер үшін коллектор тізбегінде $n-p$ ауысуы ашық тұрады. Көптеген кемтіктер осы ауысудың өрісімен қармалып коллекторға өтеді де, $I_К$ тогын тудырады. Эмиттер және коллектор токтары тең болуы үшін транзистордың базасын өте жұқа қабат түрінде жасайды. Эмиттер тізбегіндегі ток күші өзгерсе, коллектордағы ток күші де өзгереді.

Егер эмиттер тізбегін айнымалы кернеу көзіне қоссақ, онда коллектор тізбегіне жалғанған резисторда амплитудасы кіріс сигналының ампли-



65.11-сурет

тудасынан көп үлкен болатын айнымалы кернеу пайда болады. Демек, транзистор айнымалы кернеуді күшейтетін күшейткіш рөлін атқарады.

Жартылай өткізгіштік құралдарды қолдану. Қазіргі кезде радиоэлектроникада жартылай өткізгіштік құралдар кеңінен қолданылады. Қазіргі технология өлшемдері бірнеше микрометр болатын жартылай өткізгіштік құралдар — диодтар, транзисторлар, жартылай өткізгіштік фотоқабылдағыштар т.б. жасауға мүмкіндік береді. Интегралды микросхема және оны қолдану принциптерімен айналысатын *микроэлектрониканың* дамуы электронды техниканың жаңа кезеңі болып табылады.

Интегралды микросызба деп бір кристалда бірыңғай технологиялық процесспен жасалған өзара байланысқан элементтердің жалғағыш сымдардың, аса кіші диодтардың, транзисторлардың, конденсаторлар мен резисторлардың жиынтығын айтады. Өлшемі 1 см микросхемада бірнеше жүз мың микроэлементтің болуы мүмкін. Осындай жетістіктердің нәтижесінде қазіргі электрондық техниканың, ғарыштық байланыстың және электронды-есептеуіш машина жасаудың көптеген салаларына үлкен өзгерістер енді.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Жартылай өткізгіштерге қандай заттар жатады?
2. Жартылай өткізгіштердің кедергісі температураға қалай тәуелді?
3. Термистор деп қандай құралды атайды? Оларды қайда пайдаланады?
4. Қандай байланысты коваленттік деп атайды?
5. Жартылай өткізгіштер қызғанда не болады?
6. Кемтіктер деп нені айтады?
7. Меншікті өткізгіштік дегеніміз не?
8. Донорлық қоспа деп нені атайды?
9. Қандай қоспалар акцепторлық деп аталады?
10. Электронды-кемтіктік ауысу деп нені атайды?
11. Жартылай өткізгіштік диодтың құрылысы қандай және қалай жұмыс істейді? Қайда қолданылады?
12. Жартылай өткізгіштік диодтың вольт-амперлік сипаты қандай? Осы қисықтың сипатын түсіндіріңдер.
13. Транзистордың құрылысы қандай? Оның жұмыс істеу принципін түсіндіріңдер. Оны қайда қолданамыз?
14. База, эмиттер, коллектордың жұмысы туралы не білесіңдер?



Шығармашылық шеберхана

Түсіндіріңдер

1. Қандай жағдайда жартылай өткізгіш диэлектрикке айнала алады?
2. Қыздыру кезінде қоспасы жоқ жартылай өткізгіштің кедергісі неліктен азаяды?

Ойлап табыңдар

Сендерге екі заттың үлгісін берді. Солардың қайсысы металл, ал қайсысы жартылай өткізгіш екенін анықтау үшін қандай тәжірибе ұсынар едіңдер?

Талдаңдар

1. $p-n$ ауысуы арқылы азғантай мөлшердегі кері токтың өтуін қалай түсіндіруге болады?
2. Металл атомындағы электрондардың валенттік зонадан өткізгіштік зонаға өтуіне қажетті энергиясы жартылай өткізгіштер атомымен салыстырғанда едәуір аз екені мәлім. Олай болса, неліктен сәулелену кезінде жартылай өткізгіштердің кедергісі төмендейді, ал металдардың кедергісі өзгермейді?
3. Бес валентті мышьяк қоспасы бар төрт валентті кремний көбінесе электронды өткізгіштікке ие болады. Өткізгіштігі электрондық болатын жартылай өткізгіш пен металдың арасында қандай айырмашылық бар?

Рефлексия

1. Материалды қандай деңгейде меңгердіңдер? Неге?
2. Параграфтың қай бөлігі сендерге қызықты болды?
3. Оқыған материалды бекіту мақсатында қандай тәжірибелер жасауға болады?

§ 66. Сұйықтардағы электр тогы

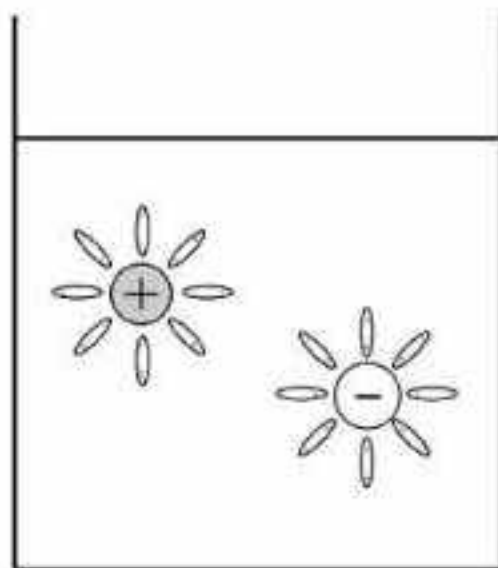


Тірек ұғымдар: электролиттік диссоциация, электролит, анион, катион, электролиз, электролиз үшін Фарадейдің бірінші және екінші заңдары, заттың электрохимиялық эквиваленті, заттың химиялық эквиваленті, гальваностегия.

Бүгінгі сабақта: электролиттік диссоциация қалай жүретінін білесіңдер; электролит деп нені айтатынын білесіңдер; электролиз үшін Фарадей заңдарын оқып-үйренесіңдер; электролиз заңдарын есеп шығару үшін пайдалануды үйренесіңдер.

Электролиттік диссоциация. Электр тогының қышқылдың, тұздардың және сілтілердің ерітінділері арқылы өтуін қарастырайық. Таза су — диэлектрик, оған тәжірибе арқылы көз жеткізуге болады. Егер қыздырғыш шамды ішіне екі металл пластина салынған таза су құйылған ваннаға тізбектей қосып, сосын шам мен ваннаны ток көзіне қоссақ, онда шам жанбайды. Суға қант қоссақ та осы жағдайдан аспаймыз. Ал егер су құйылған ыдысқа қышқылдың бірнеше тамшысын тамызсақ, онда шам жарқырап тұрып жанады. Демек, қышқылдың судағы ерітіндісі ток өткізгіш болып табылады. Енді осы құбылыстың себептерін қарастырайық.

Су молекулалары табиғи дипольдер болып табылады. Енді суда тұз қышқылының молекуласы (HCl) бар дейік. Бұл молекула H^+ және Cl^- иондардан тұрады, ал оларды біріктіріп ұстап тұрған — Кулондық тартылыс күші. Судың зарядтардың электрлік әсерлесуін әлсірететінін



66.1-сурет

білеміз (шамамен 80 еседей). Судың бейберекет қозғалыстағы молекулалары тұз қышқылы молекуласын жан-жақтан келіп соққылайды. Осының нәтижесінде HCl молекуласы иондарға ыдырайды. Судың дипольдері қышқылдың молекуласын қоршап алып, оны иондарға бөлетін секілді (66.1-сурет). Судағы қарама-қарсы зарядталған иондар бір-біріне тартылып, олар қайтадан молекулаларға біріге алады. Сондықтан қышқылды суда еріткенде онда молекулалардың ыдырауы ғана емес, сонымен бірге иондардан бейтарап молекулалардың пайда болуы да қатар жүріп жатады, яғни



(нұсқамалар процестің екі бағытта да өтетінін көрсетеді).

Молекулалардың еріткіштің әсерінен иондарға ыдырауы электролиттік диссоциация деп аталады. *Ерітілген зат молекулаларының*

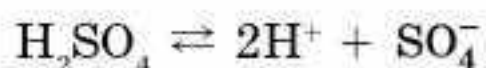
қандай бөлігі иондарға ыдыраған молекулалар болып табылатынын көрсететін сан *диссоциация дәрежесі* деп аталады.

Сөйтіп, ерітінділердегі зарядтарды тасымалдаушылар иондар болып табылады. Диссоциацияланған кезде сутек және металдардың иондары оң зарядталады. Ерітінділердегі иондар бірнеше атомдардан тұрады.

Молекулаларды иондарға тек еріткіш қана ыдыратып қоймайды. Мысалы, қатты қыздырған кезде заттың иондардан тұратын молекулалары жеке-дара иондарға ыдырай алады. Сондықтан тұздардың ерітінділері де электр тогының жақсы өткізгіштері болып табылады.

Электролиз. Енді иондары бар ерітінді арқылы токтың қалай өтетініне тоқталайық.

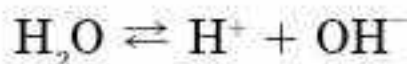
Заряд тасымалдаушылары тек қана иондар болып табылатын сұйық өткізгіш электролит деп аталады. Ваннада күкірт қышқылының судағы ерітіндісі болсын делік. Күкірт қышқылы молекулаларының диссоциациясы мынадай теңдеумен сипатталады:



Ваннаға платина пластиналарын салып, оларды амперметр арқылы батареямен қосайық. Бұл пластиналар *электродтар* деп аталады. Батареяның оң полюсімен жалғанған электрод *анод*, ал теріс полюспен жалғанған электрод *катод* деп аталады. Егер тізбекті тұйықтасақ, онда электролитте электродтар арасында электр өрісі пайда болады. Осы өрістің әсерінен H^+ сутек иондары катодқа қарай, ал қышқыл қалдығының SO_4^- иондары анодқа қарай ұмтылады.

Катодқа жетіп, H^+ иондар платинаның еркін электрондарының біреуін өзіне қосып алып, сутектің бейтарап атомына айналады. Бұл өзара жұптасып сутек газының молекулаларын түзіп, катодтан бөлініп шығады.

Қарастырылып отырған жағдайда электролитте SO_4^- иондарымен қатар басқа да теріс иондар болады, себебі судың молекулалары аз болса да диссоциацияланады:



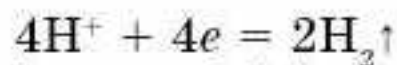
OH^- иондар (гидроксидтер) өздерінің артық электронын оңай береді, ал SO_4^- иондар өздерінің электрондарынан оңай айырыла қоймайды. Теріс иондар анодқа жеткен кезде OH^- иондар разрядталмайды, ал SO_4^- иондар ерітіндіде қалып қояды. OH^- иондар разрядталған кезде су және оттектің бейтарап молекулалары пайда болып, анодта оттек газы бөлініп шығады.

Электронның e зарядын енгізе отырып, процестерді былайша жазуға болады.

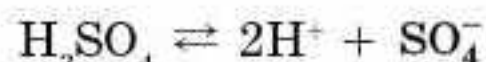
Ерітіндіде иондардың пайда болуы:



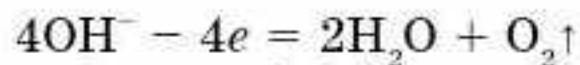
Катодтағы процестер
нәтижесінде



Сутек газы бөлініп
шығады



Анодтағы процестер
нәтижесінде



Оттек газы бөлініп шығады

Сонымен, ерітіндіден су молекулаларын құрайтын бөлігі кетеді де, қышқыл молекулаларын құрайтын бөлігі ерітіндіде қалады. Демек, ток өткен кезде ерітіндідегі судың мөлшері азаяды, ал ерітіндінің концентрациясы артады. Міне, сондықтан да осы процесті *электр тогымен судың ыдыратылуы* деп те атайды.

Осы айтылғаннан көріп отырғанымыздай, ток электролит арқылы өткен кезде заттың түрленуі қатар өтіп жатады екен, яғни электролиттегі токтың химиялық әсері болады. *Электролит арқылы ток өткен кезде электродтарда заттың бөлініп шығу процесі электролиз* деп аталады. *Электролит құйылған электродтары бар ыдыс электролиттік ванна* деп аталады.

Ерітіндідегі оң иондарды *катиондар* (себебі олар электролиз кезінде катодқа тартылады), ал теріс иондарды *аниондар* деп атайды. Сутектің және металдың иондарының катиондар болатынын ескерте кетейік.

Осы келтірілген мысалда зат екі электродтарда да бөлініп шығады. Дегенмен бұл жағдай барлық кездерде бола бермейді. Заттың екі электродта да бөлініп шығуы электролитте ерімейтін *активті емес* анод кезінде болады. Бұл келтірілген мысалда пластиналар электролитпен реакцияға түспейді. Техникада мұндай электролиз үшін көбіне көмір немесе графит электродтар пайдаланылады.

Электролиттегі ток та Ом заңына бағынады, яғни кернеуге тура пропорционал өзгереді. Электролитті қыздырған кезде оның тұтқырлығы төмендеп, осының нәтижесінде иондардың қозғалғыштығы артады. Сонымен бірге қыздырған кезде электролитте ерітілген заттың диссоциация дәрежесі, яғни электролиттегі токты тасымалдаушылар саны артады. Демек, қыздырған кезде электролиттің кедергісі кемиді.

Электролиз кезінде бөлініп шығатын заттың мөлшері. Фарадейдің бірінші заңы. Ерітінді арқылы өтетін заряд пен катодтың массасын электролизге дейін және одан кейін өлшей отырып, Фарадей мынаны тағайындады: *электролиз кезінде бөлініп шығатын заттың массасы ерітінді арқылы өтетін электр мөлшеріне тура пропорционал:*

$$m = kq. \quad (66.1)$$

(66.1) өрнегі *Фарадейдің бірінші заңының математикалық өрнегі* болып табылады.

Фарадей тәжірибелері көрсеткендей, электролиз кезінде бөлініп шығатын заттың массасы тек q зарядтың шамасына ғана емес, сонымен қатар заттың тегіне де тәуелді. *Электролиз кезінде бөлініп шыққан зат массасының заттың тегіне тәуелділігін білдіретін k пропорционалдық коэффициентін заттың электрохимиялық эквиваленті* деп атайды. *Электрохимиялық эквивалент электродта электролит арқылы бірлік заряд өткен кезде бөлініп шығатын заттың массасымен өлшенеді, демек,*

$$k = \frac{m}{q}. \quad (66.2)$$

Халықаралық бірліктер жүйесінде k электрохимиялық эквиваленттің өлшем бірлігі — 1 кг/Кл. $q = It$ болатындықтан, *Фарадейдің бірінші заңын*

$$m = kIt \quad (66.3)$$

деп жазуға болады.

Тәжірибе электрохимиялық эквивалентті үлкен дәлдікпен анықтауға мүмкіндік береді. Кезінде бұл (66.1) формуласы зарядтың өлшем бірлігі *кулонды* күмістің электрохимиялық эквиваленті арқылы анықтауға мүмкіндік берді, күміс үшін $k = 1,118 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл = 1,118 мг/Кл.

Фарадейдің екінші заңы. Ионның зарядын анықтау. *Иондардың бір молінің массасының (граммен алынған кезде) бір ионның салыстырмалы молекулалық массасына тең болатынын еске түсірейік:*

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

Иондардың мольдік массасының олардың валенттілігіне қатынасы $\frac{M}{n}$ осы иондардың химиялық эквиваленті деп аталады. Мысалы, мыстың салыстырмалы атомдық массасы 63,54, ал мыс иондарының валенттігі 2 тең. Сонда мыстың мольдік массасы 63,54 г/моль, ал оның химиялық эквиваленті $63,54/2$ г/моль = 31,77 г/моль = $31,77 \cdot 10^{-3}$ кг/моль болады.

Өз тәжірибелерінің нәтижелеріне сүйеніп, Фарадей электродта бір химиялық эквиваленттің кез келген түрдегі иондарының бөлініп шығуы үшін электролит арқылы электрдің бірдей F мөлшерін жіберу керек екенін тапты. Электрдің бұл мөлшерін **Фарадей тұрақтысы** деп атайды:

$$F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль.}$$

Демек, *бір химиялық эквивалентті құрайтын барлық иондардың жалпы заряды F мәніне тең.*

Егер электролиз кезінде электродта m зат массасы бөлініп шықса және химиялық эквивалент M/n болса, онда бөлініп шыққан m зат массасының заттың химиялық эквивалентіне қатынасы бөлініп

шыққан химиялық эквиваленттердің санын береді. Егер электролит арқылы q заряд өтсе, онда q шамасының F Фарадей тұрақтысына қатынасы да электролиз кезінде бөлініп шыққан химиялық эквиваленттің санын береді: $\frac{m}{\left(\frac{M}{n}\right)} = \frac{q}{F}$. Осыдан

$$m = \left(\frac{M}{nF}\right)q. \quad (66.4)$$

(66.1) және (66.4) формулаларын салыстыра отырып, мынаған келеміз:

$$k = \frac{1}{F} \frac{M}{n}. \quad (66.5)$$

(66.5) формуласы Фарадейдің екінші заңының математикалық өрнегі болып табылады, демек, түрліше заттардың электрохимиялық эквиваленттері олардың химиялық эквиваленттеріне тура пропорционал. (66.3) формуласы Фарадейдің электролиз үшін біріккен заңын өрнектейді.

Енді Фарадей заңының көмегімен бір валенттік ионның, яғни электронның e зарядын қалай анықтауға болатынына тоқталайық. Егер иондардың валенттілігі ($n = 1$) болса, онда $\frac{M}{n}$ химиялық эквивалент иондардың M мольдік массасына, ал әрбір ионның заряды сан жағынан e мәніне тең болады. Бір мольдегі иондар санының Авогадро тұрақтысына тең болатынын ескерейік. Сонда егер мольдің барлық иондарының жалпы заряды F болса, онда

$$e = \frac{F}{N_A}. \quad (66.6)$$

(66.6) өрнегіне F және N_A шамаларының сан мәнін қойып, бір валентті ионның немесе электронның зарядын табамыз:

$$e = \frac{9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ ион/моль}} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл/ион.}$$

Электрон зарядының бұл мәні Милликен тәжірибелерінің нәтижелерімен сәйкес келеді, яғни ол заттың электрондық құрылысының теориясын және электролиттік диссоциация теориясын дәлелдейді.

Электролиздің техникада қолданылуы. Электролиз техникада кеңінен қолданылады. Металлургияда электролизді кенді балқытқан кезде алынған металды бөгде қоспалардан арылту үшін пайдаланады. Электролиздің көмегімен балқытылған кеннен сумен реакцияға түсетін және судағы ерітіндіден өз бетінше бөлінбейтін жеңіл металдарды алуға пайдаланады. Осындай тәсілмен алюминийді, натрийді, литийді және т.б. алады. Мырыш пен никельді *электрострикциямен*, яғни металды ерітіндіден электролиздің көмегімен бөліп алады.

Электролиз кезінде бөлініп шыққан оттегі атомы өте күшті тотықтырғыш болып табылады. Оны әртүрлі дәрі-дәрмектерді жасаған кезде пайдаланады. Электролиздің көмегімен металдан жасалған заттарды ауада тотықпайтын басқа металдың жұқа қабатымен қаптауға болады. Мұндай қаптау тәсілін *гальваностегия* деп атайды. Мысалы, никельдеу мен хромдау осы тәсілмен іске асырылады. Гальваностегияны әшекей заттарына күміс және алтын жалату кездерінде пайдаланады.

Мысалы, никельмен қапталған өнім мұқият тазаланып, майсыздандырады, содан кейін ол қаптама гальваникалық ваннаға катод ретінде толтырылады. Электролит — өнімге арналған металл тұзының (никель) ерітіндісі. Анод — сол металдан дайындалған пластина. Біркелкі қаптау үшін өнімді екі анодтық пластинаның арасына орналастыру керек. Қаптаудан кейін өнім ваннадан шығарылып, кептіріледі және жылтыратылады. Гальванопластика көптеген салаларда, атап айтқанда, полиграфия өнеркәсібінде қолданылады. Гальванопластика процесін 1836 жылы орыс ғалымы Б.С. Якоби тұжырымдады, сонымен қатар, ол электротехника саласының дамуына да зор үлес қосты.

Металл заттардың көшірмелерін (тиындар, барельеф) дайындау үшін балауызды қолданады. Балауыз электрөткізгіштік қасиетке ие болу үшін, оны графитті тозаңмен қаптап, катод есебінде ваннаға батырады. Ол қажет қалыңдықтағы металл жабындысына ие болған кезде ваннадан алып, балауызды қыздыру арқылы алады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Электролиттік диссоциация деп қандай құбылысты айтады? Оның механизмі қандай?
2. Диссоциация дәрежесі дегеніміз не?
3. Қандай құбылыс рекомбинация деп аталады?
4. Неліктен сұйықтардың өткізгіштігі иондық?
5. Электролит дегеніміз не?
6. Электролиз дегеніміз қандай құбылыс? Ол қалай жүреді?
7. Электролиз үшін Фарадейдің бірінші заңын тұжырымдаңдар.
8. Электрохимиялық эквиваленттік деп қандай шаманы айтады? Оның физикалық мағынасы неде?
9. Фарадейдің электролиз үшін екінші заңын тұжырымдаңдар.
10. Химиялық эквивалент деп қандай шаманы атайды? Оның физикалық мағынасы неде?
11. Фарадей тұрақтысы деп нені айтады? Оның физикалық мәні неде?
12. Электролиздің техникада қолданылуына мысал келтіріңдер.

Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

Су электролизіне тәжірибе жүргізіңдер. Ол үшін стақандағы суға ас тұзының аз мөлшерін ерітіңдер. Графиттен (қарындаштың өзегін алуға болады) 2 электрод дайындаңдар. Ток көзі ретінде бір-бірімен тізбектей жалғанған екі 1,5 В батареяны алыңдар. Бір электродты ток көзінің оң полюсімен, екіншісін теріс полюсімен жалғаңдар. Электродтарда газдардың бөлінуін бақылаңдар.

Түсіндіріңдер

1. CuSO_4 мыс сульфатының судағы ерітіндісі мысалымен электролиттік диссоциация процесі қалай жүретінін түсіндіріңдер.
2. Қыздыру кезінде электролиттің кедергісі неліктен азаяды?

Ойлап табыңдар

Электролиз заңдары мен Авогадро тұрақтысын пайдалану арқылы электрон зарядын тәжірибелік жолмен табудың әдісін ұсыныңдар.

Талдаңдар

1. Электролиз кезінде ерітіндіден бөлініп шығатын металдардың оң иондары катодқа беріледі. Ерітіндідегі металдар иондарының саны қалай толтырылып отырады?
2. Металл өткізгіштері арқылы ток өткенде электролит тегі сияқты электродтарда заттар неліктен бөлініп шықпайды?

Шығарыңдар

1. Электролит арқылы күші 5 А ток өткенде 10 мин уақыт ішінде электролиттік ваннада 1,02 г екі валентті металл бөлінеді. Металдың салыстырмалы атомдық массасын анықтаңдар. *Жауабы: 65,4*

■ 2. Мыс купоросының (CuSO_4) электролизі кезінде электролиттен 5 сағ бойы тығыздығы 80 А/м^2 ток өткендегі бөлініп шыққан мыс қабатының қалыңдығын есептеңдер. *Жауабы: 54 мкм*

3. Электролиттік ваннада ерітінді арқылы 193 нКл заряд өтті. Сол кезде катодта зат мөлшері 1 моль металл бөлінді. Металдың валенттілігін табыңдар. *Жауабы: 2*

4. Күкірт қышқылы ерітіндісінің электролизінде 50 мин ішінде 0,3 г сутек бөлінді. Егер электролиттің кедергісі 0,4 Ом болса, онда оны қыздыруға жұмсалатын қуат неге тең? *Жауабы: 33 Вт*

Рефлексия

1. Материалды қандай деңгейде меңгердіңдер? Неге?
2. Параграфтың қай бөлігі сендерге қызықты болды?
3. Оқыған материалды бекіту мақсатында қандай тәжірибелер жасауға болады?

§ 67. Газдардағы электр тогы



Тірек ұғымдар: газдың иондалуы, тәуелді және тәуелсіз газ разрядтары, соқпалы иондалу, екінші реттік электрондық эмиссия, солғын разряд, доғалық разряд, үшқынды разряд, тәж разряды, плазма.

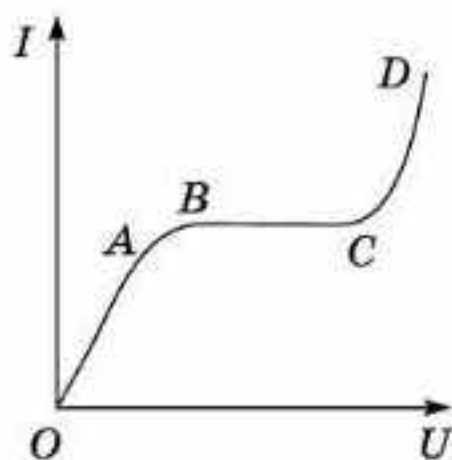
Бүгінгі сабақта: газдардың иондалуы не екенін және ол қалай жүретінін білесіңдер; газ разряды тәуелсіз немесе тәуелді болатынын білесіңдер; еркін газ разрядының пайда болу механизмін оқисыңдар; газ разрядының түрлерін қарастырасыңдар; заттың жаңа күйі — плазмамен танысасыңдар.

Газдың иондануы. Газдың иондық және электрондық өткізгіштігі. Қалыпты жағдайларда барлық газдар жақсы изоляторлар болып табылады, бірақ шектелген көлемде газдарды, оның ішінде ауаны өткізгішке айналдыруға болады. Ол үшін оларда жасанды түрде заряд тасымалдаушыларды тудыру қажет, яғни газ молекулаларын иондайды.

Мұны мынадай тәжірибенің көмегімен көрсетуге болады: үлкен жазық конденсаторды алып, оның пластиналарын ажыратып, кернеуі бірнеше мың вольт болатын ток көзіне қосамыз. Сезгіш гальванометр пластиналардың арасында электр өрісі болса да, тізбекте токтың жоқ екенін көрсетеді. Бұл пластиналардың арасындағы ауада еркін зарядтар жоқ немесе олардың саны соншалықты аз болғандықтан, гальванометр оны сезбейді деген сөз. Екінші тұжырым дұрыс.

Пластиналардың арасына жанып тұрған шырақты қояйық немесе оған рентген сәулелерін бағыттайық. Осы кезде гальванометрдің нұсқамасы ауытқиды, яғни тізбек бойымен ток өтеді. Демек, ауада молекулалар *иондалады* (зарядты тасымалдаушылар пайда болады). Егер иондаушыны алып кетсе, онда ток тез арада жоғалып кетеді, өйткені пластиналардың арасындағы ауа қайтадан изоляторға айналады. Осындай тәжірибелердің негізінде газдың иондаушысы *жоғары температура, рентген, ультракүлгін сәулелер, α -сәулелер* және т.б. болып табылатыны тағайындалды. Газдың иондалуымен қатар кері процесс — *иондардың рекомбинациясы* да жүріп жатады, яғни *газ иондарынан бейтарап молекулалар түзіледі*. Иондалу кезінде газ молекуласынан валентті электрондардың біреуі жұлынып алынады. Осы электрондардың бір бөлігі еркін күйде қалады. Сөйтіп, *иондалған газдағы зарядтарды тасымалдаушылар еркін электрондар мен иондар (оң да, теріс те) болып табылады*. Сондықтан *иондалған газдың өткізгіштігі жартылай иондық, жартылай электрондық*.

Газдағы ток күшінің кернеуге тәуелділігі. Конденсатордың пластиналарындағы U кернеуді жоғарылатып және гальванометрмен ток күшін өлшей отырып, ток күшінің кернеуге тәуелділігін (газ аралығының вольт-амперлік сипаттамасын) алуға болады (67.1-сурет). Иондаушы өне бойы жұмыс атқарып тұрады. Осы графиктен көріп отыр-



67.1-сурет

ғанымыздай, кернеудің аз мәндерінде газдағы ток Ом заңына бағынады. Осыны талдайық.

Пластиналардың арасындағы кернеу шамасы аз кезде токтың тасымалдаушылары өрістің әсерінен баяу қозғалып, көп жағдайларда пластиналарға жетпей-ақ рекомбинацияланып үлгереді. Кернеу артқан кезде өрістің әсерінен иондардың қозғалыс жылдамдығы артады да, олардың рекомбинациялау ықтималдығы азаяды. Сондықтан бірлік уақытта иондардың көпшілігі пластиналарға жетіп, онда бейтарап күйге көшеді, яғни ток артады. Сонымен, осы бөлікте (OA) токтың артуы газдағы зарядты тасымалдаушылардың рекомбинацияларының азаюының есебінен жүреді. Егер пластиналардағы кернеу одан әрі де арта беретін болса, онда токты тасымалдаушылардың рекомбинациясы тоқтап, токтың кернеуге тәуелсіз болатын I_k ең үлкен мәніне жететін кезеңі туады (67.1-суреттегі BC бөлігі). Шындығында, рекомбинация жоқ кезде пластиналарға ионизатор тудыратын барлық дерлік иондар жетіп үлгереді. Сондықтан кернеудің артуы токты арттыра алмайды. Бұл жағдайда токты арттыру үшін иондаушының интенсивтігін (қарқындылығын) көтеру керек. Мәні кернеуге тәуелсіз болатын газдағы мұндай ток қанығу тогы деп аталады.

Тағы да айта кететін нәрсе, астарларда разрядталған иондар қайтадан өздері шыққан газдың бейтарап молекулаларына айналады. Бұл газдағы токтың химиялық әсері болмайтынын және оған Фарадей заңы қолданылмайтынын көрсетеді.

Пластиналар арасындағы өрістің кернеулігі ондаған мың вольт болатындай жеткілікті жоғары кернеулерге жеткен кезде өріс күштерінің әсерінен қозғалысқа келген еркін электрондар соншалықты үлкен кинетикалық энергияға ие болып, газ молекулаларымен соқтығысып, олардың электрондарын жұлып алады, яғни оларды иондайды. Мұндай құбылысты соққылық иондалу деп атайды. Соққылық иондалудың салдарынан электродтардың арасындағы ток тасымалдаушылардың саны артады да, ток тез өседі (67.1-суреттегі CD бөлігі).

Атмосфералық қысым кезіндегі газдағы электр разряды. Тек бөгде иондаушының әсерінен ғана болатын газдағы разряд *тәуелді разряд* деп аталады. Бұл разрядты *тыныш разряд* деп те атайды (оны тек өлшеуіш құралдардың көмегімен ғана анықтауға болады). Бөгде ионизатордың көмегінсіз-ақ пайда болатын разрядты *тәуелсіз разряд* деп атайды.

Жоғарыда көрсеткеніміздей, газдағы токты тасымалдаушылар — еркін электрондар және иондар. Газ арқылы ток өткенде иондар электродтарда разрядталады да, бейтарап молекулаларға айналады, ал электрондар оң электродта жұтылады. Сонымен қатар токты тасымал-

даушылардың бір бөлігі рекомбинацияланып жоғалып кетеді. Демек, газдағы токты белгілі бір деңгейде ұстап тұру үшін токты тасымалдаушылардың санын қайсыбір тәсілмен толықтырып отыру керек. Мұны тәуелді разрядта тосын ионизатор, ал тәуелсіз разряд кезінде мұның рөлін токтың өзі атқарады. Газдағы токтың жаңа тасымалдаушыларын жасаудың бірнеше механизмдері бар. Олардың біреуі — соққылық ионизация. Оның қалай пайда болатынына тоқталайық.

Заряды e болатын электронды потенциалы ϕ болатын өріс нүктесінен өрістен тыс жерге алып кету үшін осы өрістің күштеріне қарсы $A = e\phi$ жұмыс атқару қажет. Демек, газ молекуласын иондау үшін қайсыбір $A_{и}$ жұмысты атқару қажет, оны мынадай қатынаспен өрнектеуге болады:

$$A_{и} = e\phi_{и}. \quad (67.1)$$

$\phi_{и}$ потенциалды атомның немесе молекуланың *иондану потенциалы* деп атайды. Еркін электрон газ молекуласымен соқтығысқан кезде оны иондау үшін электронның соқтығысар алдындағы W_k кинетикалық энергиясы $A_{и}$ иондану жұмысына тең не одан үлкен болуы керек, яғни

$$W_k \geq A_{и}. \quad (67.2)$$

Осы энергияны газда сыртқы электр күштерінің әсерінен электронның λ еркін жүру жолында алу керек, себебі электрон өзінің әрбір соқтығысынан кейін өріс бойымен бағытталған қозғалысының жылдамдығын жоғалтады да, жаңадан үдей бастайды. Электронға әсер ететін күш eE (мұндағы E — өріс кернеулігі), ал электронның жүріп өтетін жолы λ , сондықтан

$$A_{и} = eE\lambda \text{ немесе } \frac{mv^2}{2} = eE\lambda, \quad (67.3)$$

мұндағы λ — электронның еркін жолының ұзындығы, m — электронның массасы, ал v — электронның молекуламен соқтығысына дейінгі жылдамдығы. Атмосфералық қысым кезіндегі электронның еркін жүру жолы аз болғандықтан, соққылық иондалу пайда болу үшін газдағы өрістің кернеулігі E жеткілікті үлкен шамада болуы тиіс. Сондықтан соққылық иондалу атмосфералық қысым кезінде тек жоғары кернеу жағдайында ғана пайда болады. Егер электродтардағы кернеуді бірте-бірте арттырса, онда оның қайсыбір мәні кезінде өрістің кернеулігі соққылық иондалудың пайда болуына жеткілікті болады. Соққылық иондалуға әкелетін соқтығысулар саны әуелі онша көп емес, бірақ кернеумен бірге артып отырады.

Соққылық иондалу кезінде пайда болатын екінші реттік электрондар өріспен үдетіледі және иондалуға қатысады. Ақыры, электродтардағы белгілі кернеу кезінде, әрбір электрон жоғалар алдында, ең болмағанда газдың бір молекуласын иондап үлгереді және ең болмағанда бір еркін

электронды тудырып үлгереді. Сонда *газдағы разрядтың* өзін-өзі ұстап отырумен қатар, соққылық иондалуы *тасқындық сипатта* қабылдай алады. Осы кезде ток тасымалдаушылардың күрт артуы токтың тез өсуіне және газдың электрлік тесілуіне әкеп соғады. Осындай өз бетінше өтетін разряд үшін бірнеше еркін электронның болуы жеткілікті, ал олар газда әрқашан бар. Газ молекулаларымен соқтығысқан иондар да соққылық иондануды тудыра алады.

Енді тәуелсіз разряд кезіндегі ток тасымалдаушылардың пайда болуының басқа да механизмдерін қарастыра кетейік.

Теріс электродтың жоғары температурасында *термоэлектрондық эмиссия* құбылысы пайда болады, ол газда еркін электрондар санын біршама арттырады. Одан әрі газдың оң зарядталған иондары теріс электродқа тартылады және олардың кинетикалық энергиясы жеткілікті жоғары болса, онда олар электродқа келіп соқтығысқан кезде одан электрондарды жұлып ала алады. Бұл құбылыс *екінші реттік электрондық эмиссия* деп аталады. Қалыпты қысым және салқын катод кезінде екінші реттік электрондық эмиссия тек жоғары кернеу кезінде ғана пайда болады. Егер катод қыздырылса, онда тәуелсіз разряд электродтардағы онша үлкен емес кернеу кезінде-ақ пайда болады. Мұндай разрядтың *электрлік доға* деп аталатын түрін 1802 жылы орыс физигі В.В.Петров ашқан.

Газдардағы доғалық разряд қызған катодта немесе электродтардың арасында жоғары кернеуде пайда болады. Электрлік доға техникада кеңінен қолданылады, мысалы, доғалық электрпештерінде, алюминий алынатын электролиз құбылысында, электрмен пісіруде, прожекторларда қуатты жарық көздері ретінде және т.б.

Ом заңы доғалық разрядқа қолданылмайды.

Газдағы ұшқынды разряд деп тасқындық тесіп өтудің пайда болуына жеткілікті жоғары кернеудегі разрядты айтады. Ұшқын пайда болар мезетте үлкен ток күші электродтардағы кернеуді төмендетеді де, разряд тоқтайды. Біраз уақыттан кейін электродтардағы кернеу артады да, разряд қайтадан жаңарады.

Бұл разрядтар бірінен кейін бірі өте шапшаң өтеді, сондықтан көзге бірігіп жарқыраған ирек тәрізді сызық болып көрінеді. Қуатты ток көздерінде ұшқынды разряд доға разрядына ауысады. Ондағы газ өте жоғары температураға дейін қызады да, қатты жарқырайды. Газдың қызуынан пайда болған қысымның кенет көтерілуінен дыбыс әсері пайда болады. Табиғаттағы орасан зор ұшқынды разрядының мысалы — *найзағай*. Найзағай ойнағанда Жер мен бұлт арасындағы кернеу бірнеше жүздеген вольтке жетіп, найзағай тогының күші 100 000 А асып кетеді. Разрядтың ауа кедергісі аздау жерден (ол газда кездейсоқ орналасады) ағуы себепті найзағай ирелеңдеп көрінеді.

Газдардағы **тәж разряды** кеңістіктегі өрістің барлық жерінде емес, электродқа немесе өткізгішке жақын және өріс кернеулігі жоғарырақ жерлерде соққылық иондалудан пайда болады. Ондай разряд тасқыны кернеулігі төмен аймаққа жеткенде сөнеді. Разрядтың бұл түрі ұшқын разрядына қажетті кернеуден едәуір төмен кернеуде өтеді. Ол жоғары кернеуде тұрған өткізгіштің маңында пайда болады. Тәж разрядында әлсіз жарық (жылтыл) және шатыр-шұтыр дыбыс байқалады. Мұнда өткізгішке жақын жердегі ауада иондар разрядталады, соның салдарынан өткізгішпен беріліп жатқан энергияның шығыны болады. Сондықтан жоғары вольттік өткізгіштердегі тәж разряды зиянды құбылыс. Тәж разряды *электрофильдерде* ауаны ластайтын түтіннің ұсақ бөлшектерінен газдарды тазалауда т.б. қолданылады.

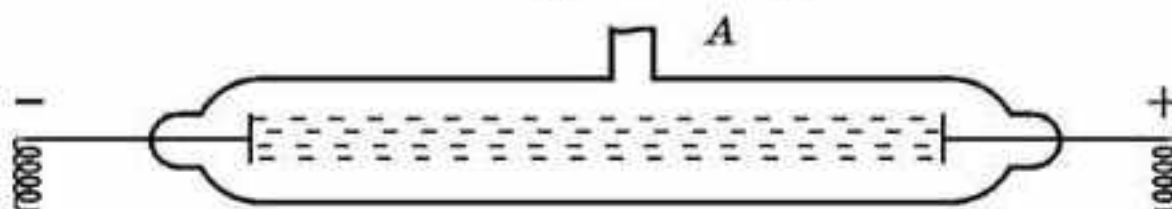
Сиретілген газдардағы **электрлік разряд**. (67.2) және (67.3) формулаларды салыстырсақ, газдың тәуелсіз өткізгіштігінде мына қатынас орындалуы тиіс:

$$eE\lambda \geq A_n, \quad (67.4)$$

яғни *электрондардың еркін жүру жолдары артса, E өріс кернеулігінің аз мәнінде газдың өздік өткізгіштігін алуға болады. Сонымен, газдарды сиреткенде олардың өткізгіштігі артады. Бұл қорытындыны тәжірибемен дәлелдейік.*

Ішінде екі электроды бар түтіктің электродтарын кернеу көзіне жалғап, ішіндегі ауаны біртіндеп сорғанда (67.2-сурет) ауаның барынша аз қысымында түтікте жарық пайда болады. Бұл тәуелсіз разрядтың пайда болғанын білдіреді. Түтікте пайда болған еркін электрондар катод бетіне соғылған иондардың екінші ретті эмиссия құбылысын тудыру нәтижесі болып табылады. Жарықтың сипаты ауаның сиреу дәрежесіне тәуелді. Электродтардың арасында әуелі ақшыл көк “жіптер” пайда болады, сосын түтіктегі барлық ауа қызғылт түске енеді. Түтікке әртүрлі газ толтырғанда жарықтың түсі өзгереді. Мысалы, аргоннан көк, неоннан қызыл жарық және т.с.с. Сиретілген газдардағы жарық шығарумен қатар жүретін разряд *солғын разряд* деп аталады. Солғын разрядтағы жылу энергиясының бөлінуі аз болғандықтан газ салқын. Солғын разряд жарық жарнамаларында кеңінен қолданылады.

Плазма туралы ұғым. Иондалған газ өткізгіш болғанмен, түгелімен алғанда электрлік бейтарап. Себебі ондағы ток таситын оң және теріс зарядтардың саны өзара тең. *Атомдарының не молекулаларының басым көпшілігі иондалған газ плазма* деп аталады.



67.2-сурет

Плазма деп оң және теріс зарядтарының мөлшері өзара тең, заттың электрлік жағынан бейтарап күйін айтады. Егер плазмада бейтарап атомдар не молекулалар кездесе, оларды жартылай иондалған деп атайды. Егер заттың барлық атомдары немесе молекулалары түгелдей иондалған болса, онда плазманы *толық иондалған* деп атайды.

20 000—30 000 К температурада кез келген зат толық иондалған плазма болады. Заттың бұл күйі табиғатта барынша кең тараған. Әлемнің барлығына дерлік массасы жинақталған Күн және басқа жұлдыздар — жоғары температурадағы алып тығыз плазма. Атмосфераның жоғары қабаты (*ионосфера*) жартылай иондалған плазмадан тұрады. Ғарыштық кеңістік плазманың өте күшті сиретілген күйінен тұрады. Ток өтетін газ да жартылай иондалған плазмаға мысал бола алады.

Классикалық плазма — бейтарап бөлшектермен сұйылтылған иондық электронды газ. Егер иондалу дәрежесі тым аз болса, онда газ кәдімгі газдарда жоқ көптеген ерекше қасиеттерге ие болады. Электрондық-иондық плазмада бөлшектер Кулон заңына сәйкес тартылады немесе реттеледі және өзара үлкен қашықтықта көрінеді. Бұл оларды бір-бірін өте аз қашықтықта сезінетін бейтарап газдың атомдары мен молекулаларынан ерекшелендіреді. Плазмадағы бөлшектер электр күштерінің әсері арқылы оңай ауысады. Сондықтан, тепе-теңдік плазмасында әртүрлі белгілердегі бөлшектердің тығыздығы іс жүзінде бірдей. Бұл маңызды қасиет *квази-бейтараптық* деп аталады. Сондықтан плазма ұжымдық мінез-құлықты көрсететін көптеген қарама-қарсы зарядталған бөлшектердің квази-бейтарап жүйесі ретінде түсіндіріледі.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. а) Жоғары температураға дейінгі қыздыру кезінде; ә) рентген сәулелерінің көмегімен; б) ультракүлгін сәулелер көмегімен; в) α -сәулелерінің көмегімен иондалу кезінде иондаушыларды тудыратын газдың иондалу механизмін қалай түсіндіруге болады?
2. Рекомбинация дегеніміз не? Оның тез өтетін себебі неде? (Иондалу тоқтағаннан кейінгі жағдайды қарастырындар.)
3. Газдың иондалу процесі деп нені атайды? Оның қалай өтетінін сипаттаңдар.
4. Газдың өткізгіштігі неге ионды – электрондық болады?
5. Газдардағы токтың вольт-амперлік сипаттамасы қандай? Осы қисықтың сипатын түсіндіріңдер.
6. Тәуелсіз разрядтар деп нені атайды? Ол қалай жүреді?
7. Соққылық иондалу немесе электрондық соққымен иондалу процестерін атаңдар.
8. Иондалу потенциалы деп нені атайды? Неге ол әртүрлі газдарда түрліше болады?
9. Тәуелді разряд дегеніміз не? Ол қалай жүреді?
10. Доғалық разрядтың өту ерекшелігін сипаттаңдар.
12. Тәж разрядының өту ерекшелігі неде?
13. Үшқындық разрядтың өту ерекшеліктерін айтып беріңдер.
14. Солғын разрядтың өту ерекшелігін сипаттаңдар.
15. Плазма деген не?



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Газ разрядтарын бақылауға болатын табиғатта кездесетін құбылыстарға мысалдар келтіріңдер.

Тәжірибе жасаңдар

Электрофорлық машинаның көмегімен үлкен демонстрациялық конденсаторды зарядтаңдар. Конденсатор астарын электроскопқа жалғап, пластинада зарядтың бар екеніне көз жеткізіңдер. Пластиналар арасындағы кеңістікке жанып тұрған шырақты енгізіңдер. Электроскоп тілшесінің қозғалысын бақылаңдар.

Түсіндіріңдер

1. Рентген сәулелері арқылы газдың иондалу механизмін қалай түсіндіруге болады?
2. Жоғары вольтты электр тасымалдау сымдарының тіректерін неліктен биік қылып жасайды?
3. Ионизатордың интенсивтілігі тұрақты болғандағы газдағы ток күшінің кернеуге тәуелділігінің графигін тұрғызыңдар. Графиктің әр бөлігін түсіндіріңдер.

Талдаңдар

1. Газдардың иондалуы мен электролиттердің диссоциациясы арасындағы ұқсастықтар мен өзгешеліктерді айтыңдар.
2. Электрондық тасқын тудыратын, электрондық соққылық ионизацияның жалғыз өзі ғана ұзақ уақыт тәуелсіз газ разрядын қамтамасыз ете алмайды. Тәуелсіз газ разрядын еркін разрядына ауыстыру үшін тағы қандай қосымша процестер қажет?

Шығарыңдар

1. Сутек атомын иондау үшін электрон қандай минимал жылдамдыққа ие болуы тиіс? Сутек атомының иондалу потенциалы 13,5 В.

Жауабы: 2,2 Мм/с

- 2. Егер ионизатор 1 см^3 көлемде секундына 10^9 иондар жұбын өндіретін болса, онда еріксіз газ разряды кезіндегі қанығу тогының күші нешеге тең? Екі жазық параллель электродтың әрқайсысының ауданы 100 см^2 , ал олардың арақашықтығы 5 см.

Жауабы: 8 мкА

3. Қандай температурада сынап атомдарының ілгерілемелі қозғалысының орташа кинетикалық энергиялары олардың иондалуына жеткілікті болады? Сынап атомының иондалу потенциалы 10,4 В.

Жауабы: 80000 К

Рефлексия

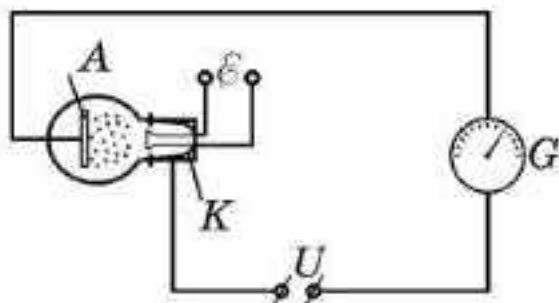
1. Материалды қандай деңгейде меңгердіңдер? Неге?
2. Параграфтың қай бөлігі сендерге қызықты болды?
3. Оқыған материалды бекіту мақсатында қандай тәжірибелер жасауға болады?

§ 68. Вакуумдағы электр тогы



Тірек ұғымдар: электрондық бұлт, екі электродты электрондық шам, үш электродты электрондық шам, электронды-сәулелік түтік.

Бүгінгі сабақта: термоэлектрондық эмиссия процесі қалай өтетінін білесіңдер; вакуумда диодтың вольт-амперлік сипаттамасын оқып-үйренесіңдер; кейбір вакуумда электрондық құралдардың жұмыс істеу принципі және пайдаланылуын қарастырасыңдар.



68.1-сурет

Толық вакуум идеал изолятор болып табылады. Жоғары вакуумда кеңістік арқылы ток жүру үшін осы кеңістікке еркін электрондар ендіру керек. Мұны термоэлектрондық эмиссияның көмегімен ғана іске асыруға болады. Вакуумның ішіне электр желісіне қосылған металл сымды орналастырамыз (68.1-сурет).

Вакуумды қыздырғыш шамды пайдалансақ, онда қызған сымнан вакуумда электрондар ұшып шығады. Егер K қыздырғыш сым мен A электродтың арасында электр өрісін тудырса, онда ол электрондарды A электродқа қарай айдайды, сонда тізбек тұйықталып, вакуумда ток жүреді. Бұл жерде еркін электрондар вакуумда еш кедергісіз қозғалады да, өріс күштерінің атқаратын жұмысы есебінен кинетикалық энергия алады. Егер 68.1-суреттегі электродтар арасындағы өріс кернеулігі U болса, онда K және A электродтардың арасында зарядтың орын ауыстыру жұмысы

$$A = Ue \quad (68.1)$$

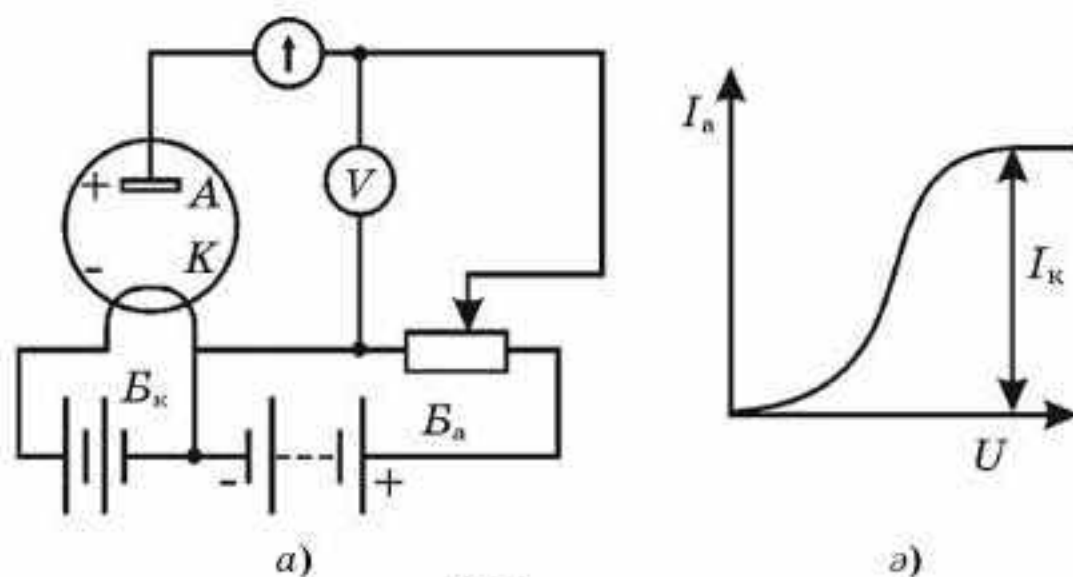
формуласымен беріледі. Осы жұмыстың есебінен электрондар кинетикалық энергия алады, ол

$$W_k = Ue \text{ немесе } \frac{mv^2}{2} = eU, \quad (68.2)$$

мұндағы m — электронның массасы, v — электронның жылдамдығы, e — электронның заряды. U кернеуді *үдеткіш кернеу* деп атайды. Электронның массасы өте аз, сондықтан вакуумдағы электронның қозғалысын жеңіл басқаруға болады.

Екі электродты электрондық шам (диод). Электрондық шамдардың құрылысы электр өрісінің көмегімен вакуумдағы еркін электрондардың қозғалысын бақылауға негізделген. Екі электроды бар қарапайым электрондық шамды *екі электродты шам* немесе *диод* деп атайды.

Электродтардың бірі вольфрам сымнан жасалып, ұшы шамнан шығарылады. Сымды B_k батареяға жалғап қыздырады (68.2, *a*-сурет). Шамда оның ішінен ауа сорып алынып, жоғары вакуум жасалады.



68.2-сурет

K сымы қызған кезде (ол шамның *катоды* қызметін атқарады) термо-электрондық эмиссия есебінен шамда еркін электрондар пайда болады.

Шамның екінші электроды A *анод* болып табылады. Оны катодпен B_a анодтық батарея арқылы жалғауға болады. Анодтың бір шығысы бар. Сондықтан диодтың тізбекке қосылатын үш шығысы болады.

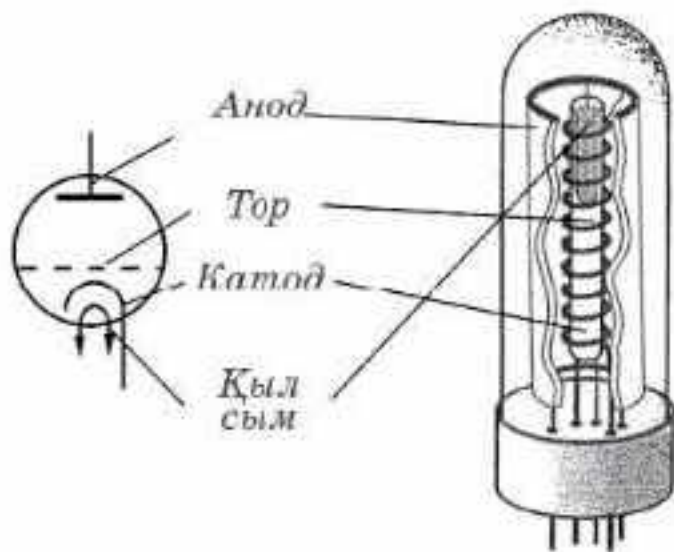
Анодтың батареясы ағытылған, ал катод қыздырылған кезде шамның ішіндегі еркін электрондар катодтың маңында жиналып, *электрондық бұлт* түзеді. Катодтың температурасы тұрақты болғанда, катодтан ұшып шығып жатқан және оған қайта оралып жатқан электрондар арасында динамикалық тепе-теңдік орнайды. Яғни, катодпен анод арасындағы кеңістіктегі еркін электрондар саны тұрақты болып қалады. Кеңістіктегі зарядты арттыру үшін катодтың температурасын жоғарылату керек.

Егер анод теріс полюсіне, ал катод оң полюске келетіндей етіп анодтық батареяны қоссақ, онда шамның ішіндегі электр өрісі кеңістіктегі зарядты катодқа қарай ығыстырады да, ондағы заряд біршама кемиді, ал анодтық тізбекте ток болмайды.

Енді шамның анодын B_a батареяның оң полюсіне, ал катодты теріс полюсіне қоссақ, онда шамдағы электр өрісінің әсерінен электрондар анодқа қарай орын ауыстыртады, сөйтіп шамда ток пайда болады (68.2, *a*-сурет).

Сонымен, *электрондық шам (диод) тоқты тек бір ғана бағытта* өткізеді. Шамның, міне, осы қасиетін айнымалы тоқты түзету үшін пайдаланады.

Анодтық кернеу жоғарылаған кезде диодтағы ток әуелі кернеумен бірге артады (катод маңындағы электрондық бұлттан электрондар катодтан гөрі анодқа көбірек бағытталады), кернеу одан әрі жоғарылағанда шамдағы токтың күші артуын тоқтатады, яғни ток I_k қанығу тогына жетеді. Катодтың қызу температурасы артқан сайын, ол да артады (68.2, *ә*-сурет). Осы айтылғандардан *Ом заңын электрондық шамдарға қолдануға жарамайтыны шығады*.



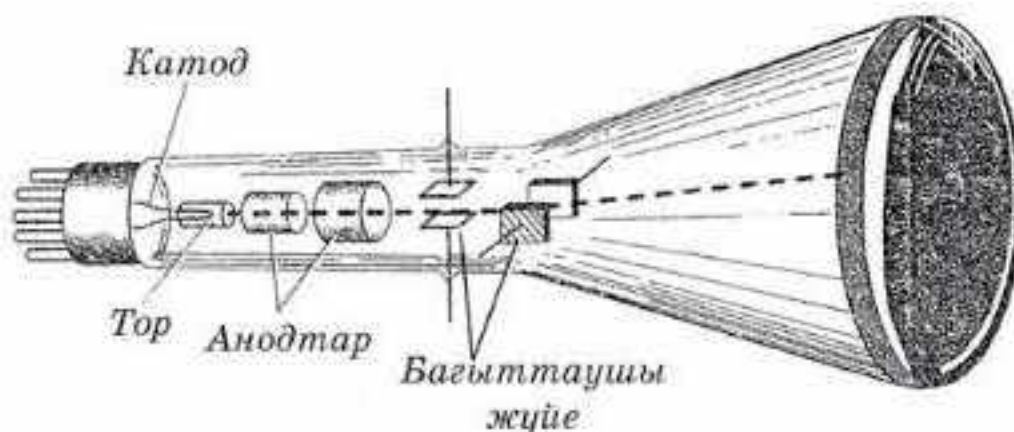
68.3-сурет

Үш электродты электрондық шам (триод). Электрондық шамдағы токты басқаруды ыңғайлы ету үшін *катод пен анодтың арасында орналастырылған қосымша тор* деп аталатын электродты пайдаланады. Торды катодқа жақын орналастырады, сондықтан тор мен катод арасына түсірілген азғана кернеудің өзінде-ақ, олардың арасында электр өрісі пайда болып, ол шамның анодтық тогына күшті әсер етеді.

Торды катодтың маңайында аз саңылау қалдырып, сымнан оралған ширатылым (спираль) түрінде жасайды. Ал анод тұтас цилиндрлік бет, ол тор мен катодты қоршап тұрады. Торы бар электрондық шамды *үшэлектродты электрондық шам* немесе *триод* деп атайды (68.3-сурет). Тордың потенциалы катодқа қатысты әрқашанда теріс болады.

Электронды-сәулелік түтік. Осциллографтардың, теледидарлардың, радиолокациялық қондырғылардың экрандарында және басқа да электрондық құралдарда электрондар шоғының көмегімен кескіндерді алу үшін *электронды-сәулелік түтікті* пайдаланады. Ол ішінен ауа сорылып алынған герметикалық, түбі кең шыны колба болып табылады. Түтіктің жіңішке жағында *электронды зеңбірек* орналасқан, ол *электрондық сәуле* тудырады. Электрондық зеңбірек *қыздырылатын катодтан және басқарушы электродтан* тұрады, ол триодтағы тор тәрізді жұмыс істейді (68.4-сурет).

Катодты қыздырғанда термоэлектрондық эмиссия пайда болады. Анодқа қарай бағытталған электрондар басқарушы электродтағы саңылау арқылы өтеді. *Басқарушы электрод* қуыс цилиндр түрінде жасалады. Басқарушы электрод анодқа бағытталған электрондар санын реттейді және олардан жіңішке шоқ түзеді, міне, осы шоқ *электрондық сәуле* деп аталады. Анод тесіктері бар бірнеше дискілерден тұрады. Бұл дискілер қуыс цилиндр ішіне орналасқан. Анодтың мұндай құры-



68.4-сурет

лысы *электрондық сәулені* колбаның түбіне фокустауға көмектеседі. Колбаның түбі *экран* болып табылады.

Түтіктің аноды мен катодының арасына бірнеше мың вольт кернеу беріледі. Анод пен катодтың арасындағы өріс электрондарға үлкен жылдамдықтар береді, ал осындай электрондар *люминофор* жағылған экранға келіп түскенде экранда жарқыл, яғни электрондардың ізі пайда болады.

Түтіктегі электрондық шоқты басқару үшін қосымша электр өрісін тудыратын *бағыттаушы пластиналарды* пайдаланады. Ол үшін түтіктің ішінде электрондық шоқтың жолына өзара перпендикуляр жазықтықтарда орналасқан екі пластина жұбы қойылады. Пластиналардың бір жұбы электрондық сәулені горизонталь бағытта, ал екінші жұбы вертикаль бағытта бұрады. Осының нәтижесінде электрондық сәулені экранның кез келген нүктесіне апаруға мүмкіндік туады. Электрондық сәулені магнит өрісінің көмегімен де басқаруға болады, бұл мүмкіндік теледидар түтіктерінде пайдаланылады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Қандай процесті термоэмиссия деп атайды? Бұл процесс қалай жүреді?
2. Электродтан шығатын эмиссияны қалай арттыруға болады?
3. Неліктен вакуумның өткізгіштігі біржақты?
4. Вакуумдағы диод деп нені атайды? Оның құрылысы мен жұмыс істеу принципін айтып беріңдер.
5. Вакуумдық триод дегеніміз не? Оның құрылысы қандай және қалай жұмыс істейді?
6. Электронды-сәулелік түтікше деп нені атайды? Оның құрылысы мен жұмыс істеу принципі қандай?

Есеп шығару үлгілері

1-есеп. Мыс сульфиті ерітіндісінің электролизі барысында $4 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}$ жұмыс жасалды. Ванна электродтарының арасындағы кернеу 6 В болса, бөлініп шыққан мыстың мөлшерін анықтаңдар.

Берілгені:

$$A = 4 \cdot 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$U = 6 \text{ В}$$

$$k = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ кг/Кл}$$

$$m = ?$$

Шешуі. Фарадейдің электролиз заңына сәйкес, электродтарда бөлінетін заттың массасы электролит арқылы өтетін зарядқа пропорционал:

$$m = kq.$$

Осы зарядтың орын ауыстыру жұмысы $A = qU$. Осыдан $q = \frac{A}{U}$.

$$\text{Сонда } m = \frac{kA}{U}. \quad m = \frac{3,3 \cdot 10^{-7} \text{ кг/Кл} \cdot 4 \cdot 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}}{6 \text{ В}} = 0,792 \text{ кг} = 792 \text{ г.}$$

Жауабы: 792 г

2-есеп. Көлденең қимасы 1 мм^2 болатын мыс өткізгіштің бойымен өтетін ток күші 10 МА . Электрондардың өткізгіш бойымен реттелген қозғалысының жылдамдығын табыңдар. Мыстың әр атомына бір электрондық өткізгіштік сәйкес келеді.

Берілгені:

$$S = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$I = 10 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

$$\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$M = 64 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$v = ?$$

Шешуі. Ток күшінің анықтамасы бойынша $I = \frac{q}{t} = \frac{e \cdot N}{t}$, мұндағы N — электрон саны.

$$N = N_A \cdot \nu = N_A \cdot \frac{m}{M} = \frac{N_A \cdot \rho \cdot V}{M} = \frac{N_A \cdot \rho \cdot S \cdot l}{M},$$

мұндағы l — өткізгіштің ұзындығы.

$$\text{Олай болса, } I = \frac{e \cdot N_n \cdot \rho S \cdot l}{M \cdot t}.$$

Электрондардың реттелген қозғалысының жылдамдығы $v = \frac{l}{t}$.

$$\text{Ендеше, } I = \frac{e \cdot N_n \cdot \rho S v}{M}, \text{ осыдан } v = \frac{IM}{e \cdot N_A \cdot \rho S},$$

$$v = \frac{10 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot 64 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} \cdot 8,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} = 0,75 \cdot 10^{-6} \text{ м/с} =$$

$$= 0,75 \text{ мкм/с.}$$

Жауабы: 0,75 мкм/с

3-есеп. Ауаның иондалу энергиясы 15 эВ. Электронның ауадағы орташа еркін жүру жолының ұзындығын табындар. Тесу кернеулігі $3 \cdot 10^6$ В/м.

Берілгені:

$$W_{\text{и}} = 15 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$E = 3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\lambda — ?$$

Шешуі. Ауаны иондауға қажет энергияға ие болу үшін электрон электр өрісінің әсерінен λ (еркін жүру жолының ұзындығы) жол жүреді: $W_{\text{и}} = qU$.

Мұндағы U кернеу электр өрісінің E кернеулігімен $U = E\lambda$ формуласы арқылы

өрнектеледі: $W_{\text{и}} = q \cdot E\lambda$. $q = e$, олай болса $\lambda = \frac{W_{\text{и}}}{eE}$.

$$\lambda = \frac{15 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 3 \cdot 10^6 \text{ В/м}} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 5 \text{ мкм.}$$

Жауабы: 0,5 мкм

4-есеп. Электролиз процесі 24 В кернеумен, ПӘК 80% жүрген кезде 10 кг алюминийді алу үшін қанша энергия жұмсалады?

Берілгені:

$$m = 10 \text{ кг}$$

$$U = 24 \text{ В}$$

$$\eta = 80\%$$

$$k = 9,3 \cdot 10^{-8} \text{ кг/Кл}$$

$$W — ?$$

Шешуі. $\eta = \frac{A_{\text{н}}}{A_{\text{з}}}$, мұндағы $A_{\text{н}} = IUt$ — ток жұмысы, $It = q$. Фарадей заңына сәйкес $m = kq$, $q = \frac{m}{k}$, мұндағы k — алюминийдің электрохимиялық эквиваленті.

$$A_{\text{т}} = W — \text{жұмсалған энергия.}$$

$$\text{Онда } \eta = \frac{mU}{kq}; W = \frac{mU}{k\eta} = \frac{10 \text{ кг} \cdot 24 \text{ В}}{9,3 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \cdot 0,8} \approx 3,2 \cdot 10^9 \text{ Дж.}$$

Жауабы: $3,2 \cdot 10^9$ Дж

5-есеп. Егер кремний элементін 0 К жуық температураға дейін суытсақ, онда ол асқын өткізгіш қасиетке ие бола ма?

Шешуі. Жоқ, себебі температура төмендеген кезде жартылай өткізгіштердің кедергісі артады. Демек өткізгіштегі еркін заряд тасушылардың саны азаяды (электрон мен кемтіктердің).

Шығармашылық шеберхана

Түсіндіріңдер

1. Вакуумдық диодтың вольт-амперлік сипаттамасының ерекшеліктерін түсіндіріңдер. Диод неліктен біржақты өткізгіштікке ие?
2. Вакуум идеал изолятор болып табылады. Олай болса, вакуумдық кеңістік арқылы ток өту үшін қандай шарттар орындалу керек?

Ойлап табыңдар

Вакуумдық диод біржақты өткізгіштікке ие. Диодтардың осы қасиетін пайдалануға мүмкіндік беретін құралдарды ойлап табыңдар.

Талдаңдар

Электронды-сәулелік түтіктегі электрон шоғын қарастырыңдар. Шоқтағы электрондардың жылдамдығы тұрақты емес, себебі олар үдемелі қозғалады. Шоқтағы ток күші туралы да солай деуге болады ма?

Шығарыңдар

1. Анодтық қанығу тогы 20 мА болса, онда вакуумдық диодтың 1 сағатта атқарған жұмысы кезінде катодтан қанша электрон шығады?

Жауабы: $4,5 \cdot 10^{20}$

■2. Электронды-сәулелік түтіктің қызған катодынан айтарлықтай аз жылдамдықпен шыққан электрон потенциалы φ тең анодтың өрісінде жылдамдыққа ие болады. Конденсатор пластиналарының арасында l жолды жүріп, конденсатордан L арақашықтықта орналасқан флуоресценцияланатын экранға тиеді. Конденсатордың ішінде электр өрісі пайда болғанда, экрандағы дақ d арақашықтыққа ығысады. Конденсатордағы электр өрісінің E кернеулігін табыңдар.

$$\text{Жауабы: } E = \frac{2d\varphi}{l\left(L + \frac{l}{2}\right)}$$

Рефлексия

1. Материалды қандай деңгейде меңгердіңдер? Неге?
2. Параграфтың қай бөлігі сендерге қызықты болды?
3. Оқыған материалды бекіту мақсатында қандай тәжірибелер жасауға болады?



Әртүрлі заттар электр өткізгіштігімен ерекшеленеді.

Металдардың электр өткізгіштігі еркін электрондардың болуымен түсіндіріледі. Сондықтан *металдардың өткізгіштігі электрондық* болып табылады.

Жартылай өткізгіштің өткізгіштігі температура мен қоспаға тәуелді. Сондықтан жартылай өткізгіштің өткізгіштігін басқару мүмкіндігі оны жартылай өткізгіштік құралдарда (диод, транзистор, термистор, фоторезистор т.б.) кеңінен қолданылады. *Жартылай өткізгіштің өткізгіштігі электронды-кемтік* өткізгішке жатады.

Вакуумда электр тогы *термоэлектрондық эмиссия* құбылысы салдарынан пайда болады. *Термоэлектрондық эмиссия* дегеніміз — қыздырылған металдардан электрондардың ұшып шығуы.

Вакуумның өткізгіштігі электрондық және біржақты.

Тұз, сілтілер мен қышқылдардың судағы ерітіндісі (электролиттер) жақсы өткізгіш болып табылады, себебі электролиттік диссоциация құбылысы салдарынан суда заряд тасымалдаушы оң және теріс иондар пайда болады.

Электролит арқылы ток өткенде электродтарда заттардың бөлінуі қоса жүреді. Бұл құбылыс *электролиз* деп аталады. Электролиз заңын М. Фарадей ашқан: $m = kIt$, мұндағы k — заттың электрохимиялық эквиваленті.

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n},$$

мұндағы $F = 96\,500$ Кл/моль — Фарадей тұрақтысы, M — мольдік масса, n — валенттілік.

Бөлме температурасына жақын температурада газдар бейтарап атомдардан немесе молекулалардан тұрады және диэлектрик болып табылады. Газдарды қыздырғанда немесе сәулелендіргенде атомдар (молекулалар) иондалады да, еркін заряд тасушылар оң және теріс иондар мен электрондарға ыдырайды.

Осылайша газ өткізгішке айналады, оның өткізгіштігі *электронды — ионды*. Газдардағы ток *разряд* деп аталады. Практикада тәуелсіз разрядтың солғын, доғалық, ұшқынды деп аталатын түрлері кеңінен қолданылады.

Толық немесе белгілі бір бөлігі иондалған газ плазма деп аталады. Плазманың электрлік қасиеттері оны техниканың әртүрлі салаларында қолдануға мүмкіндік береді.

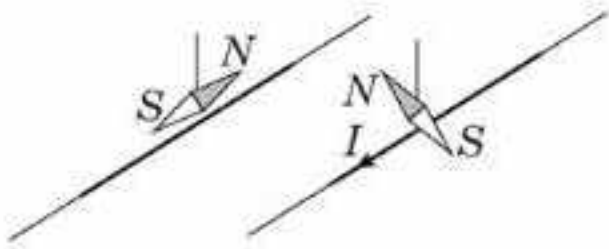
13-тарау. МАГНИТ ӨРІСІ

§ 69. Магнит өрісі. Параллель токтардың өзара әсері

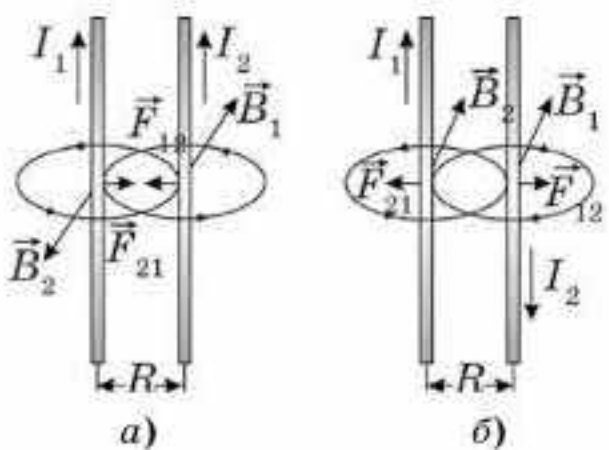


Тірек ұғымдар: магнит өрісі, магнит өрісінің күш сызықтары, магнит индукциясының векторы, оң қол ережесі.

Бүгінгі сабақта: магнит индукциясы векторының физикалық мағынасын білесіңдер.



69.1-сурет



69.2-сурет

Электр тогы компастың тілшесіне әсер етіп, оны тоққа перпендикуляр бағыттайтынын байқағаннан соң, Эрстед тогы бар өткізгіш өзін қоршаған кеңістіктің қасиеттерін өзгертеді деген гипотеза айтты (69.1-сурет). Кеңістіктегі бұл өзгеріс токтың магнит тілшесіне әсерін жеткізеді. Шын мәнінде, тогы бар өткізгіштің маңайында магниттік әсерлерді жеткізетін ерекше орта пайда болады. Бұл ортаны Эрстед **магнит өрісі** деп атады.

Параллель токтардың өзара әсерін ашқан А.Ампердің тәжірибелері осы әсерлердің магнит өрісі арқылы жүзеге асатынын дәлелдеді. Параллель өткізгіштердің бойынан өтетін токтар бағыттас болса, олар тартылады (69.2, а-сурет), ал егер токтар

әртүрлі бағытта жүрсе, өткізгіштер тебіледі (69.2, б-сурет). Өзара әсерлесетін токтардың күші олардың арақашықтығына тәуелді.

Егер ток өтіп жатқан рамканы магнит полюстерінің арасына қойса, ол тек белгілі бір тәртіппен орналасады (69.3-сурет). Демек, магнит өрісінің магниттік әсері ғана емес, сонымен қатар бағыттаушы әсері де бар.

Қазіргі көзқарас бойынша тогы бар өткізгіштер бір-біріне тікелей күшпен емес, оларды қоршаған магнит өрісі арқылы әсерлеседі. Магнит өрісінің көзі — қозғалыстағы электр зарядтары (токтар). Магнит өрісі тогы бар өткізгіштердің айналасындағы кеңістікте қозғалмайтын электр зарядының маңайында пайда болған электр өрісі секілді туындайды.



69.3-сурет

Тұрақты токтардың магнит өрісін заттардың молекулалары ішіндегі дөңгелек микротоктар туғызады.

Токтардың магнит өрісі электр өрісінен ерекшеленеді. Магнит өрісі электр өрісінен тек қозғалыстағы зарядтарға (токқа) күштік әсерімен өзгешеленеді.

Магнит өрісі дегеніміз — магниттік әсерлерді тасымалдайтын материяның ерекше түрі. Ол біздің санамыздан тыс өмір сүреді. Ол кеңістікте үзіліссіз және оның әсері шексіздікке дейін тарайды.

Дәл осылай өте ауқымды денелердің айналасындағы гравитациялық өзара әсер де беріледі. Оны *гравитациялық өріс* деп атайды. Зарядталған денелердің айналасында электрлік өзара әсерлерді тасымалдайтын басқа күшті өріс болады. Оны *электр өрісі* деп атайды.

Кез келген күштік өрістің әрбір нүктесі ерекше физикалық шама — өрістің кернеулігімен сипатталады. Мысалы, электр өрісінің кернеулігі деп электр өрісінің өрістің берілген нүктесінде орналасқан бірлік оң зарядқа қандай күшпен әсер ететінін көрсететін физикалық шаманы түсінеміз:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{эл}}{q_0}. \quad (69.1)$$

Гравитациялық өрістің кернеулігі дегеніміз — өрістің берілген нүктесінде орналасқан бірлік массалы денеге гравитациялық өрістің қандай күшпен әсер ететінін көрсететін физикалық шама:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_{гр}}{m}. \quad (69.2)$$

Магнит өрісін магнит индукция векторы \vec{B} деп аталатын күштік шамамен сипаттайды.

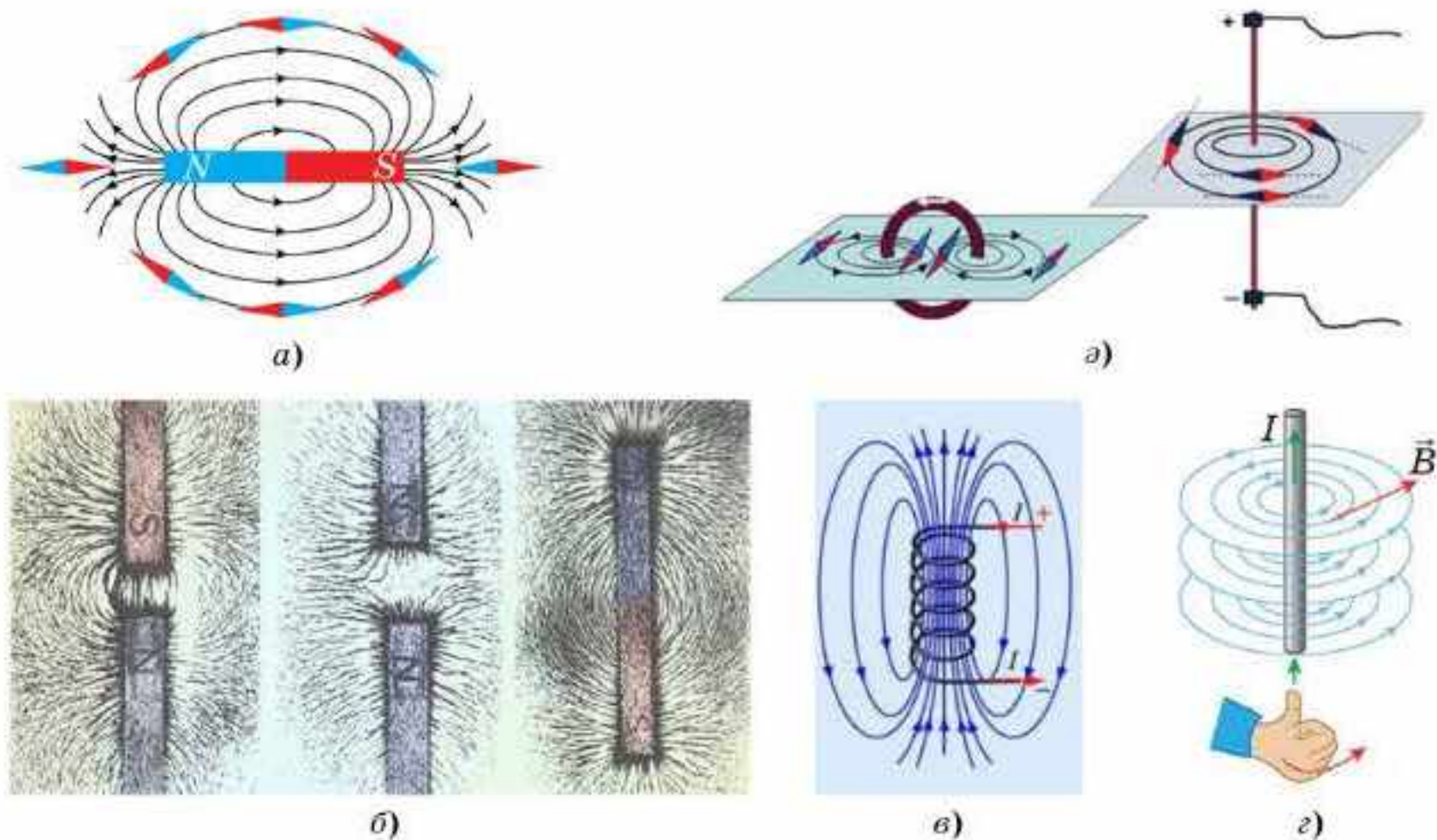
Магнит индукция векторы деп магнит өрісі тарапынан ұзындығы бір метр, бойынан бірлік ток өтіп жатқан өткізгішке әсер ететін күшке тең физикалық шаманы айтады: $B = \frac{F}{Il}$.

ХБ жүйесінде магнит өрісінің индукциясы Сербия физигі Н. Тесла (1856—1943) құрметіне *тесламен* (Тл) өлшенеді: $[1 \text{ Тл}] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$.

Магнит өрісін күш сызықтары көмегімен графикалық түрде кескіндейді. Егер ұсақ магнит үгінділерінің үстіне магнит қойсақ, онда осы үгінділер магнит тілшелері тәрізді магнит өрісінде магниттеледі де, күш сызықтарының бойында орналасады (69.4, а, ә, б, в, г-суреттер).

Магнит өрісінің күш сызықтары деп өрістің әр нүктесіндегі жанама осы нүктедегі магнит индукция векторының бағытымен сәйкес келетіндей ойша салынған сызықтарды түсінеміз.

Магнит өрісінің күш сызықтары — еш жерден үзілмейтін тұйық сызықтар. Бұл магнит өрісінің көзі магнит зарядтарының болмайтынын көрсетеді. Осындай қасиетке ие өрістер *құйынды* деп аталады.

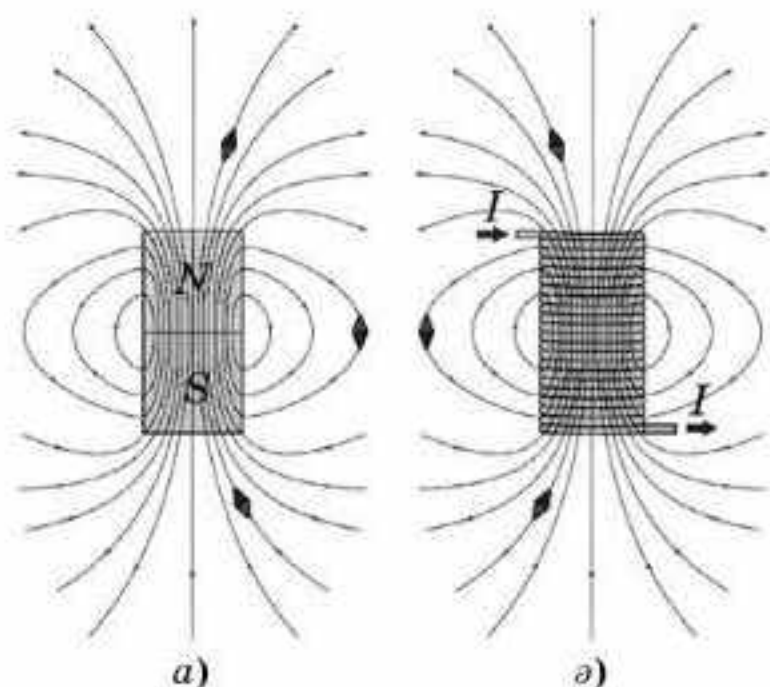


69.4-сурет

\vec{B} векторының оң бағыты ретінде магнит өрісінде S оңтүстік полюстен N солтүстік полюске еркін бағдарланатын магнит тілшесінің бағыты қабылданған.

Магнит өрісінің бағытын оң қол ережесімен тапқан жеңіл: *егер оң қолдың бас бармағын өткізгіштегі ток бағытымен бағыттаса, онда өткізгішті орай ұстаған төрт саусақтың бағыты магнит өрісінің күш сызықтарының бағытын көрсетеді* (69.4, d -сурет).

69.5, a -суретте тұрақты магнит пен тогы бар катушканың (69.5, a -сурет) магнит өрісінің күш сызықтары кескінделген. Суреттен көріп отырғанымыздай, катушка мен тұрақты магниттің ішіндегі магнит өрісінің күш сызықтары оңтүстіктен солтүстікке, ал сыртындағы күш сызықтары керісінше солтүстіктен оңтүстікке бағытталған. Индикаторлық магниттік тілшелер индукция сызықтарына жанама бойымен бағытталады.



69.5-сурет

А.Ампер кезінде Жердің және жолақ магниттің магнит өрісі сәйкесінше Жердің және магниттің ішіндегі микротоктардың циркуляциясынан пайда болады деген болжам айтқан. Бұл гипотеза атом ядросының құрылысы ашылғаннан кейін расталды. Микротоктардың рөлін ядроны айнала қозғалып жүретін электрондар атқарады.

Параллель токтардың өзара әсері. А.Ампердің параллель екі өткізгіштің бойынан ток бір бағытта өткенде олардың бір-біріне тартылатынын байқағаны туралы алдыңғы тақырыптарда сөз болған. Егер токтар қарама-қарсы бағытта болса, өткізгіштер тебіледі. Олардың өзара әсерін магнит өрісі туғызады. Бір токтың магнит өрісі екінші токқа Ампер күшімен әсер етеді және керісінше.

Тәжірибе көрсеткендей, әр өткізгіштің ұзындығы Δl кесіндісіне әсер ететін күштің модулі өткізгіштердегі I_1 және I_2 ток күштері мен кесіндінің l ұзындығына тура пропорционал және олардың арақашықтығына кері пропорционал:

$$F = k \frac{I_1 I_2 \Delta l}{R} \tag{69.3}$$

Халықаралық бірліктер жүйесінде пропорционалдық k коэффициентін

$$k = \frac{\mu_0}{2\pi} \tag{69.4}$$

түрінде жазу келісілген, мұндағы μ_0 — магниттік тұрақты деп аталатын тұрақты шама. Магниттік тұрақтыны енгізу бірқатар формулалардың жазылуын оңайлатады. Оның сан мәні мынаған тең:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \approx 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \tag{69.5}$$

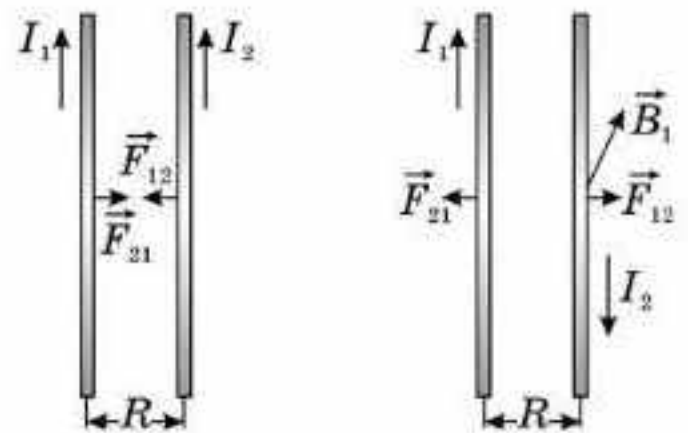
Осы формуланы ескерсек, параллель токтардың өзара магниттік әсерін өрнектейтін заң мынадай болады:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 \Delta l}{R} \tag{69.6}$$

Осыдан тогы бар әрбір түзу өткізгіштің магнит өрісі индукциясының өрнегін алу қиын емес. Тогы бар түзу өткізгіштің магнит өрісінің осьтік симметриясы болу керек. Ендеше, магнит индукциясының тұйық сызықтары тек концентрлік шеңберлер болады. Бұл шеңберлер өткізгішке перпендикуляр жазықтықта жатады. Демек, параллель I_1 және I_2 токтарының магнит индукция векторлары B_1 және B_2 екі токқа да перпендикуляр жазықтықта жатыр (69.6-сурет). I_1 , I_2 тогы бар өткізгіштердің одан R қашықтықтағы магнит өрістері индукциясының модульдері сәйкесінше мына қатынастармен өрнектеледі:

$$B_1 = \mu_0 \frac{I_1}{2\pi R}, \tag{69.7}$$

$$B_2 = \mu_0 \frac{I_2}{2\pi R}. \tag{69.8}$$



69.6-сурет

Тоғы бар параллель өткізгіштердің магниттік өзара әсері Халықаралық бірліктер жүйесінде ток күшінің бірлігін, яғни амперді анықтау үшін қолданылады.

1 Ампер — вакуумда бір-бірінен 1 м қашықтықта орналасқан шексіз ұзын, көлденең қимасы шексіз аз екі параллель өткізгіштің әрбір метріне әсер ететін 0,2 мкН магниттік күш тудыратын олардан өтетін бірдей өзгермейтін токтың күші.

Магнит өрісінің индукциясы — бойынан ток өтіп жатқан өткізгіштің пішінінен тәуелсіз шама. Тоғы бар радиусы R дөңгелек орамның центріндегі магнит өрісі индукциясының модулін мына формуламен есептейді:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2R}. \quad (69.10)$$

Соленоидтің (шексіз катушка) ішіндегі магнит өрісі индукциясының модулі

$$B = \mu_0 nI, \quad (69.11)$$

мұндағы n шамасы бір бірлікке келетін орам санын анықтайды: $n = \frac{N}{l}$.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Электр және магниттік құбылыстардың байланысын кім және қалай ашқан?
2. Эрстед тәжірибесі туралы не білесіңдер?
3. Бір-біріне жақын орналасқан екі параллель өткізгіштің бойынан ток өткізе отырып, Ампер не байқады?
4. Бойынан ток өтетін рамканы магнит өрісінде орналастырса не байқалады?
5. Күштік өріс деп нені түсінеміз?
6. Қандай өзара әсер магниттік деп аталады?
7. Магнит өрісінің негізгі қасиеттерін атаңдар.
8. Магнит өрісін суретте қалай бейнелейді?
9. Қандай сызықтар магнит өрісінің күш сызықтары деп аталады?
10. Тұрақты магнит өрісі мен электростатистикалық өрістің күш сызықтарының ерекшеліктері неде?
11. Магнит өрісінің күш сызықтарының бағытын қалай табады?
12. Жердің магниттік қасиетін Ампер қалай түсіндірді?
13. Параллель токтардың магниттік өзара әсер күшін қандай формуламен анықтайды?
14. Бойымен ток өтетін өткізгіштің пішініне магнит өрісінің индукциясы тәуелді ме?
15. Амперге анықтама беріңдер.



Рефлексия

1. Сабақта сені ойландырған...
2. Сені қандай материал таңғалдырды?
3. Өзің үшін сабақта жаңа не білдің?
4. Қандай ақпарат саған болашақта қажет болуы мүмкін?

§ 70. Ампер күші



Тірек ұғымдар: Ампер күші, сол қол ережесі.

Бүгінгі сабақта: магнит өрісінің тогы бар өткізгішке әсерін анықтауды үйренесіңдер.

Магнит өрісін сандық тұрғыда сипаттау үшін \vec{B} векторының бағытын ғана емес, оның модулін де анықтау тәсілін көрсету керек. Ол үшін зерттелетін магнит өрісіне тогы бар өткізгішті енгізіп, өткізгіштің қандай да бір түзусызықты бөлігіне әсер ететін күшті өлшеу керек.

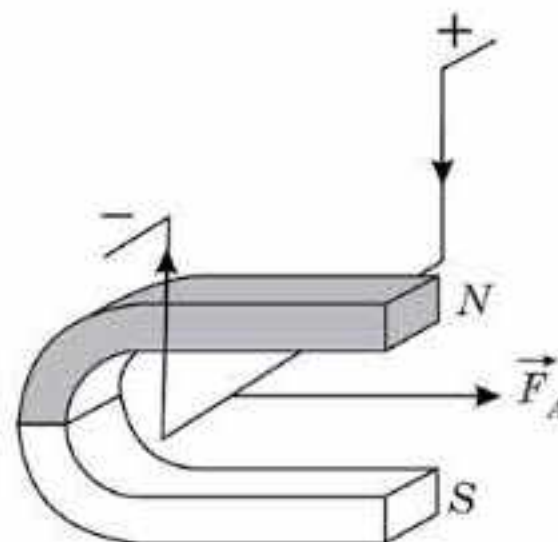
1820 жылы француз физигі А.М. Ампер эксперименттік түрде магнит өрісі тарапына тогы бар өткізгішке әсер ететін күштің өткізгіштегі токтың күші мен оның белсенді бөлігіне (магнит өрісінде тұрған өткізгіштің бөлігіне), магнит өрісінің шамасына тура пропорционал екенін көрсетті. Ол тогы бар өткізгішті таға тәрізді магнит полюстерінің арасына орналастырып, ток күші мен магнит өрісін және өткізгіштің белсенді бөлігін өзгертті (70.1-сурет). Сонда тогы бар өткізгішке магнит өрісі тарапынан әсер ететін күштің шамасы өткізгіштің магнит өрісінде орналасу жағдайына тәуелді болатыны анықталды.

Егер тогы бар өткізгіш магнит өрісі индукция сызықтарына перпендикуляр орналасса, онда күштің шамасы ең үлкен, ал параллель жатса, онда күштің нөлге тең екені тағайындалды. Өз тәжірибелерінің нәтижесін жалпылай келе, А.М. Ампер магнит өрісінің тогы бар өткізгішке әсер ететін күшін есептеу формуласын алды. Оны Ампер күші деп атайды:

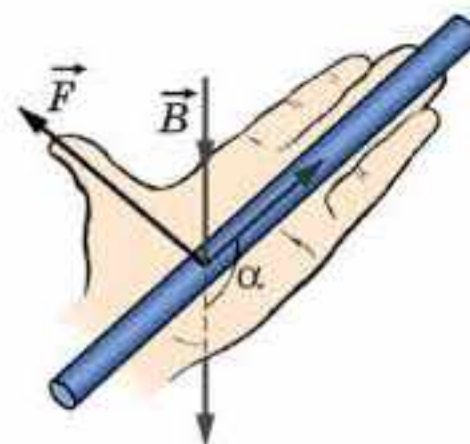
$$F_A = BI\Delta l \sin \alpha, \quad (70.1)$$

мұндағы B — магнит индукция векторы, I — өткізгіштегі ток күші, Δl — өткізгіштің белсенді бөлігінің ұзындығы, α — магнит индукция векторы мен өткізгіштегі токтың арасындағы бұрыш.

Ампер күшінің бағытын *сол қол ережесі* бойынша табады: егер сол қолды магнит өрісінің күші сызықтары алақанға кіретін, ал төрт саусақты ток бойымен бағытталамын етіп ұстаса, онда 90° бұрыш құрайтын бас бармақ Ампер күшінің бағытын көрсетеді (70.2-сурет).



70.1-сурет



70.2-сурет

Тоғы бар өткізгіш магнит өрісінің индукция векторына перпендикуляр болғанда күш максимал және мынаған тең:

$$F_{\max} = B I \Delta l. \quad (70.2)$$

Осы теңдеуден индукция векторының шамасын анықтауға болады:

$$B = \frac{F_{\max}}{I \Delta l}. \quad (70.3)$$

Егер өткізгіш арқылы өтетін ток күшін 1 А, ал оның ұзындығын 1 м деп алсақ, онда B индукция векторының шамасы өткізгішке әсер ететін максимал күшке тең болады. $1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Ампер күші деп нені атаймыз?
2. Ампер күшінің бағытын қалай табады?
3. Магнит индукция векторының физикалық мағынасы қандай?
4. 1 Тл деп нені түсінеміз?
5. Сол қол ережесін тұжырымдаңдар.
6. Оң қол және сол қол ережесін қолданып, параллель токтардың бағыты бірдей болса тартылатынын, ал қарама-қарсы болса төбілетінін дәлелдеңдер.

Есеп шығару үлгілері

1-есеп. Вертикаль біртекті өрістегі екі жіңішке жіпке массасы 0,16 кг және ұзындығы 80 см өткізгіш горизонталь ілінген. Өткізгіштің ұштары өрістен тыс жатқан иілгіш өткізгіштер арқылы ток көзіне қосылған. Өткізгіштен 2 А ток өтсе, жіп вертикальдан қандай бұрышқа ауытқиды? Магнит өрісінің индукциясы 1 Тл.

Берілгені:

$$L = 0,80 \text{ м}$$

$$I = 2 \text{ А}$$

$$B = 1 \text{ Тл}$$

$$m = 0,16 \text{ кг}$$

$$\alpha - ?$$

Шешуі. Өткізгіштер жіңішке әрі иілгіш болғандықтан, $|AC|$ мен $|BD|$ магнит өрісінен тысқары орналастырылған. Сондықтан Ампер күші $|CD|$ өткізгішке ғана әсер етеді (70.3, а, ә-суреттер). Өткізгішке екі \vec{F}_k керілу күші, $m\vec{g}$ ауырлық күші мен \vec{F}_A Ампер күші әсер етеді. Соңғысының бағытын сол қол ережесінен табамыз. Бұлардың қорыт-

қы \vec{F}_k күші $|AC|$ мен $|BD|$ жіптеріне параллель бағыттанып, керілу күшін Ньютонның бірінші заңына сәйкес теңестіру керек. Өткізгіш тыныштықта тұрғандықтан,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_A}{mg} = \frac{IBl}{mg}; \operatorname{tg} \alpha = \frac{2 \text{ А} \cdot 1 \text{ Тл} \cdot 0,8 \text{ м}}{0,16 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}^2} = 1 \text{ немесе}$$

70.3, а-суреттен

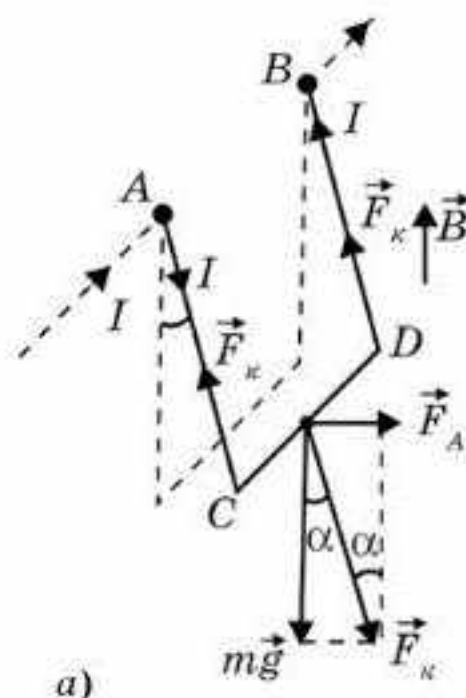
$$F_k \sin \alpha = F_A; F_k \cos \alpha = mg \text{ және } \operatorname{tg} \alpha = \frac{F_A}{mg}, \alpha = 45^\circ.$$

2-есеп. Салмағы 100 г және ұзындығы 25 см горизонталь өткізгіш білік индукциясы 0,2 Тл горизонталь магнит өрісіне перпендикуляр орналасқан (70.4-сурет). Егер білік бойымен 10 А ток ағып өтсе, оны бірқалыпты қозғалту үшін оның осіне перпендикуляр қандай горизонталь күш түсіру керек? Білік пен беттің арасындағы үйкеліс коэффициенті 0,2.

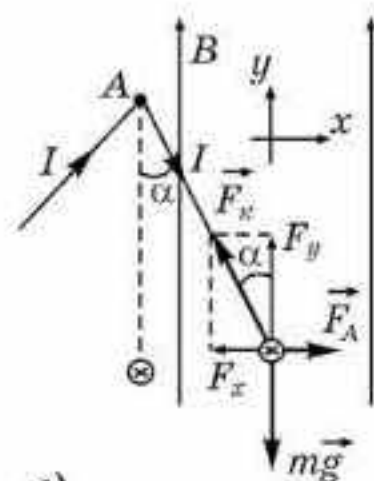
Шешуі. 70.5-суретте біз магнит өрісінің күш сызықтарының бағытын саламыз және сол қол ережесін қолданып, Ампер күші бағытын табамыз. Біз өткізгішке әсер ететін барлық күштерді бейнелейміз және өткізгіш қозғалысына Ньютонның екінші заңын қолданамыз, оның проекциялары:

$$Ox: F - F_{\text{үйк}} = 0 \text{ және } Oy: N - mg - F_A = 0. F_{\text{үйк}} = \mu N, \text{ онда } F_{\text{үйк}} = \mu(mg + F_A) = \mu(mg + BIl).$$

$$F = 0,2 (1 \text{ Н} + 0,5 \text{ Н}) = 0,3 \text{ Н}.$$

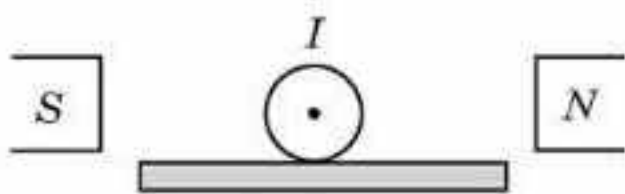


а)

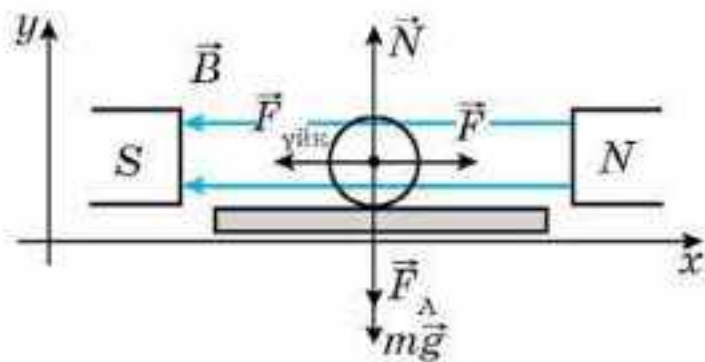


ә)

70.3-сурет



70.4-сурет



70.5-сурет

3-есеп. Сымнан жасалған сақинаны магнит өрісіне оның жазықтығына перпендикуляр орналастырғанда сақина бойымен I ток жүреді. Егер сым F күшке төтеп берсе, магнит өрісінің қандай индукциясында сақина үзіледі? Сақинаның радиусы R , ток тудырған магнит өрісінің әсерін ескермеуге болады.

Берілгені:

I, F, R

B — ?

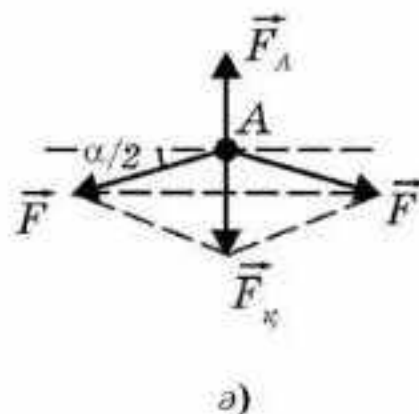
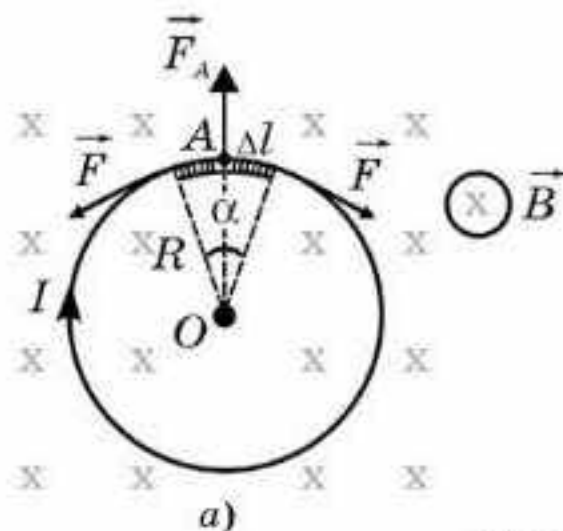
Шешуі. Сақинадан $I\Delta l$ ток элементін бөліп алайық (70.6, *a*-сурет). I ток күшінің және B магнит өрісі индукциясының таңдап алынған бағытында сақинаның элементтеріне Ампер күші әсер етіп, оны кереді. Нәтижесінде сақинада механикалық кернеу

тудыратын F күші пайда болады. (Сұрақты басқаша да қоюға болады. Айталық, индукцияның қандай шамасында сақина үзіледі? Бірақ ол үшін сақинаның қандай материалдан жасалғанын білу керек.) Сақина тыныштықта тұрғандықтан, қорытқы F күші Ампер күшімен теңеседі. Сақинаның элементін A нүктесіне жинақтаймыз (70.6, *ә*-сурет).

70.6, *a, ә*-суреттерден келесі теңдіктерді аламыз:

$F_n = 2F \sin \frac{\alpha}{2} = 2F \frac{\alpha}{2} = F\alpha$ (сақинаның элементі Δl өте аз болғандықтан, $\sin \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$). Сонда $IB\Delta l = F\alpha$; $\Delta l = R\alpha$ (70.6, *a*-сурет). Олай болса,

$$IBR\alpha = F\alpha, F = IBR; B = \frac{F}{IR}.$$



70.6-сурет



Шығармашылық шеберхана

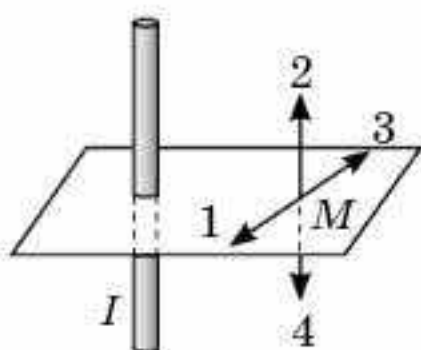
Бақылаңдар

Екі тұрақты магниттің өзара әсерлесуін қарастырыңдар. Магниттің полюстерін өзгертсек, олардың өзара әсерлесуі өзгере ме?

Талдаңдар

1. Тоғы бар өткізгіштің M нүктеде тудыратын магнит өрісінің индукциясының векторы қалай бағытталған (70.7-сурет)?

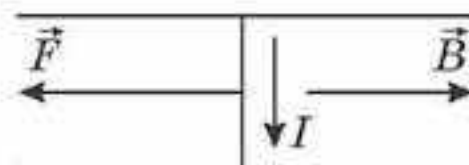
2. Тоғы пар екі параллель өткізгіш өзара тартылады. Төменгі өткізгіште ток солға бағытталса, жоғары өткізгіште ток қалай бағытталады (70.8-сурет)?



70.7-сурет



70.8-сурет



70.9-сурет

Шығарыңдар

1. Ұзындығы 1 см түзу өткізгіш арқылы индукциясы 0,1 Тл магнит өрісінде 1,5 А ток өтеді. Магнит өрісінің күш сызықтары өткізгіш осіне параллель болса, өткізгішке әсер ететін күшті табыңдар.

Жауабы: 0 Н

2. Өткізгіштің белсенді бөлігінің 5 см ұзындығына 50 мН күш әсер ететін болса, магнит өрісінің индукциясын есептеңдер. Өткізгіш магнит өрісі индукциясының векторына перпендикуляр орналасқан.

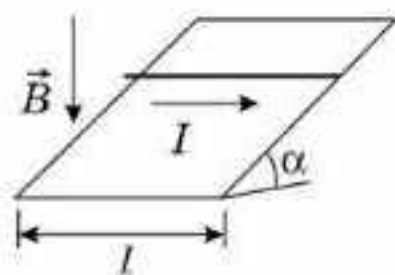
Жауабы: 0,1 Тл

3. Ұзындығы 40 см өткізгіш екі динамометрге горизонталь ілініп, күш сызықтары өткізгішке перпендикуляр болатын индукциясы 0,5 Тл горизонталь біртекті магнит өрісіне орналастырылған. Өткізгіштен 12 А күш өтетін болса, әрбір динамометрдің көрсеткіші қалай өзгереді?

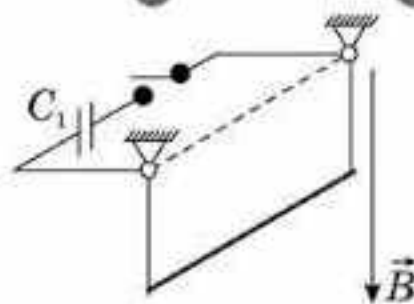
Жауабы: 1,2 Н

4. Күш сызықтары горизонталь және рельс бойымен бағытталған, индукциясы 0,1 Тл біртекті магнит өрісінде орналасқан горизонталь рельсте массасы 0,2 кг және ұзындығы 0,6 м өткізгіш бар (70.9-сурет). Егер өткізгіш арқылы 20 А күш жіберсе, өткізгішті сол жаққа жылжыту үшін 0,5 Н күш қажет. Өткізгіштегі ток бағытын қарама-қарсы бағыттайтын болсақ, өткізгішті сол жаққа жылжыту үшін қажет күштің ең кіші мәнін табыңдар.

Жауабы: 2 Н



70.10-сурет



70.11-сурет

5. Массасы 0,5 кг, ұзындығы 1 м металл стержень көкжиекпен 30° бұрыш жасайтын көлбеу жазықтықта сырғанайды. Кеңістіктегі индукциясы 0,1 Тл біртекті магнит өрісінің күш сызықтары тік төмен бағытталған. Егер стержень бойымен 5 А токты 70.10-суретте көрсетілгендей бағытта жіберсе, оның үдеуі неге тең? Стержень мен көлбеу жазықтық бетінің арасындағы үйкеліс коэффициенті 0,2.

Жауабы: 2,5 м/с²

*6. Өткізгіш сырық күш сызықтары тік төмен бағытталған магнит өрісінде екі жеңіл сымға горизонталь ілінген. Өткізгішті бекіту нүктесіне конденсатор қосуға болады (70.11-сурет). Сырық разрядталғанда вертикальдан 5° бұрышқа ауытқитындай конденсатордың C_1 сыйымдылығын анықтаңдар. Осындай кернеуге дейінгі сыйымдылығы $C_2 = 30$ мкФ конденсатор разрядталғанда ауытқу бұрышы 3° -қа тең.

Жауабы: 50 мкФ

7. Екі параллель өткізгіш шина горизонталь жазықтықта жатыр және бір жағынан ішкі кедергісі 0,1 Ом, ЭҚК 10 В ток көзіне тұйықталған. Шинаның үстінде массасы 10 г металл сырық жатыр. Біртекті магнит өрісінде орналасқан сырық шина бойымен қозғала бастайтындай ең аз магнит индукциясының бағыты мен модулін табыңдар. Шиналардың арақашықтығы 0,1 м, сырық пен шинаның арасындағы үйкеліс коэффициенті 0,6. Шиналар мен сырықтың кедергілері ескерілмейді.

Жауабы: 6 мТл

*8. Ұзындығы 8 см түзу өткізгіштегі ток күші 50 А. Ол индукциясы 20 мТл біртекті магнит өрісінде тұр. Өрістің күш сызықтары өткізгішке перпендикуляр. Егер өткізгіш индукция сызықтарына перпендикуляр 10 см қашықтыққа жылжыса, ток көзі қандай жұмыс жасайды?

Жауабы: 8 мДж



Рефлексия

1. Сабақта сені ойландырған...
2. Сені қандай материал таңғалдырды?
3. Өзің үшін сабақта жаңа не білдің?
4. Қандай ақпарат саған болашақта қажет болуы мүмкін?

§ 71. Магнит өрісіндегі тогы бар контур



Тірек ұғымдар: магнит ағыны, магнит өрісіндегі тогы бар рама.

Бүгінгі сабақта: магнит өрісіндегі тогы бар раманы жүргізуді үйренесіңдер.

Магнит өрісін толық сипаттау үшін *магнит ағыны* немесе *магнит индукция векторының ағыны* деген физикалық шама енгіземіз.

Бет арқылы өтетін магнит ағыны деп магнит индукция векторы модулінің бет ауданына скаляр көбейтіндісін айтады. Бұл көбейтінді берілген ауданды қанша магнит өрісінің күш сызықтары тесіп өтетінін көрсетеді (71.1-сурет):

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha. \quad (71.1)$$

Бұл жағдайда магнит өрісін біртекті деп есептейміз: $B \cdot \cos\alpha = B_n$, мұндағы B_n — бетке түсірілген нормальге магнит индукция векторының проекциясы. Осыны ескерсек, $\Phi = B_n \cdot S$.

ХБ жүйесінде магнит ағынының өлшем бірлігі ретінде *Вебер (Вб)* алынған: $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$.

Ауданы 1 м^2 бетті 1 Тл магнит өрісінің индукциясы тесіп өткенде магнит ағыны 1 Вб тең болады.

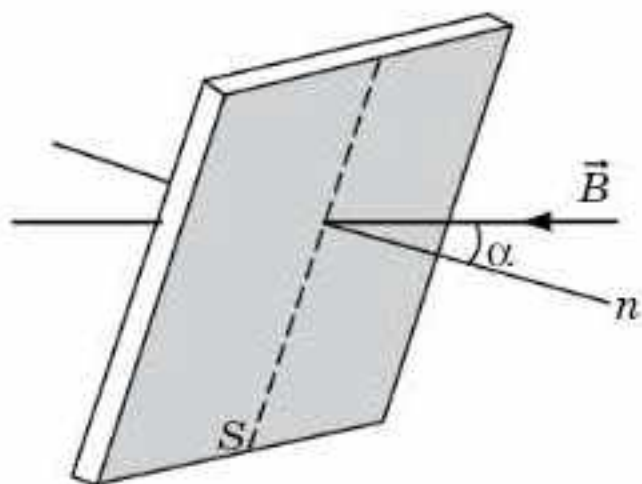
Енді біртекті магнит өрісінде орналасқан тогы бар жазық контурды қарастырайық. Дербес жағдайда пішіні тікбұрышты контурды аламыз (71.2-сурет). Ампер заңына сай $|AB| = |DC| = a$ қабырғаға $|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = F = Iba$ ($\sin\alpha = 1$) күш әсер етеді.

$|BC| = |AD|$ қабырғаларына Ампер күші әсер етпейді, себебі $\sin\alpha = 0$. $O'O''$ осіне қатысты контурға Ампер күштерінің максимал моменті әсер етеді. Бұл жағдайда күш иіні максимал:

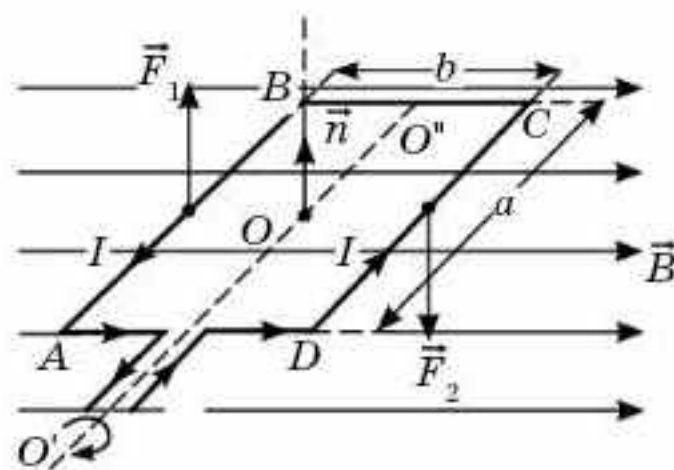
$$M_{\max} = Iba \frac{b}{2} + Iba \frac{b}{2}; M_{\max} = IBab,$$

мұндағы $ab = S$ — ток өтетін контурдың ауданы. Осыдан

$$M_{\max} = IBS. \quad (71.2)$$



71.1-сурет



71.2-сурет

Мұндай қалыпта магнит өрісі индукция векторының ағыны нөлге тең.

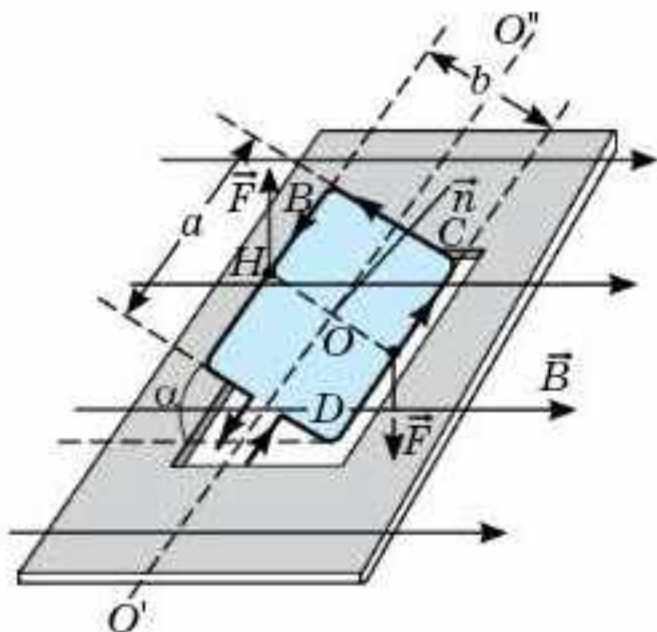
Рамка қайсыбір бұрышқа бұрылсын, онымен бірге n нормаль да дәл осындай бұрышқа бұрылады. Бұрынғыша \vec{n} және \vec{B} арасындағы бұрышты α арқылы белгілейміз. Енді рамканың барлық жақтарына да Ампер күштері әсер етеді. $|AB|$ және $|DC|$ жақтарына тағы да дәл 71.2-суреттегідей күштер әсер етеді, тек енді күш иіндері кемиді (71.3-сурет). $|AD|$ және $|BC|$ жақтарына контурды созуға тырысатын күштер әсер етеді, $|AD|$ қабырғасына түсірілген күш “бізге”, ал $|BC|$ қабырғасына түсірілген күш “бізден әрі” бағытталған, бірақ олар айналдырғыш момент тудырмайды, себебі олар $O'O''$ осі бойымен бағытталған (71.3-суретте олар көрсетілмеген). Сонда $O'O''$ осіне қатысты қос күштің моменті $M = 2F \frac{b}{2} \sin \alpha$, себебі $\cos(90^\circ - \alpha) = \sin \alpha$. Сондықтан $M = IBab \sin \alpha$ немесе $M = IBS \sin \alpha$ формулаларын аламыз.

Осы кезде Ампер күштерінің механикалық моменті азаяды, ал магнит ағыны $\Phi = BS \cos \alpha$ шамасына артады.

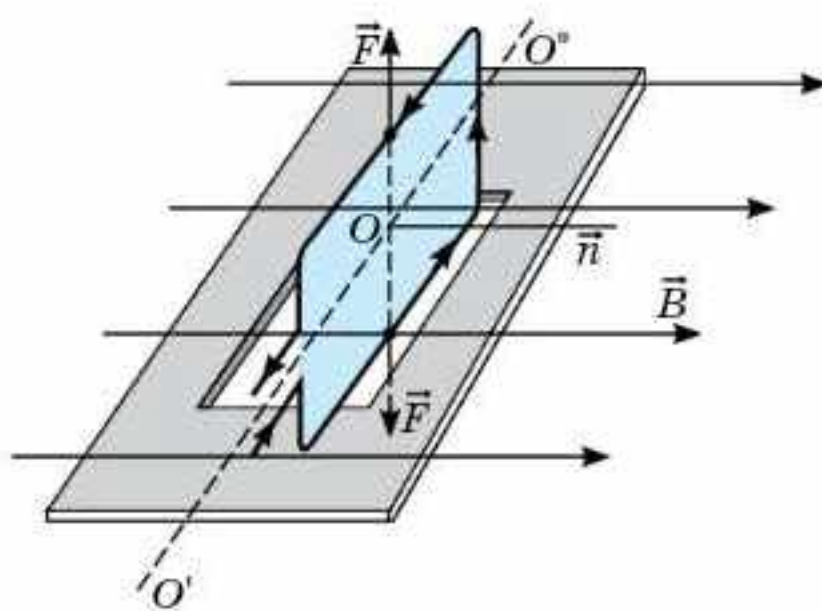
Контур айнала отырып, 71.4-суретте көрсетілгендей қалыпқа келеді. Суреттен көріп отырғанымыздай, Ампер күштерінің қорытқы моменті нөлге тең (күштер контурды жан-жаққа тартады, егер ол қатты болмаса, шеңберге айналған болар еді). Бұл қалыпта магнит ағыны максимал: $\Phi_{\max} = BS$.

Контурдың осы қалпының үш маңызды жағдайына назар аудару керек:

1. Бұл контурдың сыртқы магнит өрісіндегі орнықты қалпы.
2. Бұранда ережесі бойынша контурдағы ток тудыратын B_0 магнит өрісі сыртқы магнит өрісімен бағыттас, яғни тогы бар контур магнит өрісінде магнит тілі тәрізді орналасады.
3. Егер осы қалыпта контурдағы токтың бағытын өзгертсек, онда ол инерция бойынша орнықты қалыптан шығып, сол бағытта одан әрі айнала береді, сөйтіп біз электрқозғалтқыш аламыз.



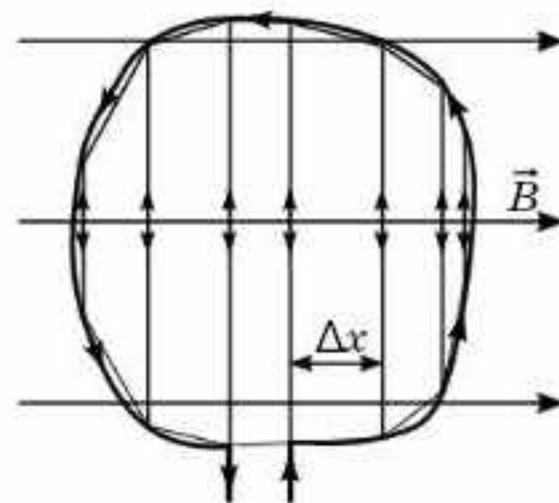
71.3-сурет



71.4-сурет

Жоғарыда келтірілген пайымдаулар еркін пішіндегі жазық контур үшін ақиқат бола ма?

Магнит өрісіндегі кез келген пішінді жазық контур. Индукциясы B болатын біртекті магнит өрісінде еркін жазық контурға әсер ететін Ампер күштері моментінің тікбұрышты жазық контур үшін қорытып шығарылған формуламен есептелетінін көрсетейік. Тоғы бар контурды трапеция түріндегі микроконтурларға бөлейік (71.5-сурет).



71.5-сурет

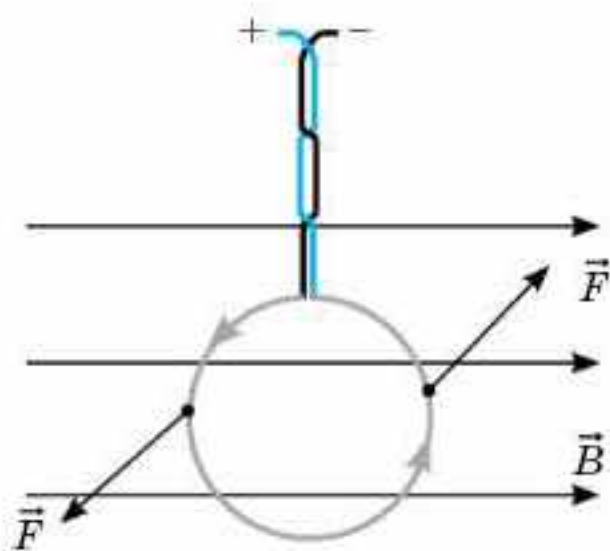
$\Delta x \rightarrow 0$ кезінде микротрапециялар тікбұрышты рамкаларға айналып, олардың әрбіреуіне амперлік күштердің $\Delta M_i = B \Delta l_i \cdot \Delta S_i$ моменті әсер етеді, бірақ $\sum I_i = I$, $\sum S_i = S$. Олай болса, $\sum \Delta M_i = BIS$, яғни $M = BIS$, бұл максимал магнит моментімен бірдей ((71.2) формула). Сонымен, *ток бірдей және ауданы тең болған жағдайда түрлі пішіндегі жазық рамкаларға Ампер күштерінің бірдей моменттері әсер етеді.* Бұл өрнек

$$B = \frac{M_{\max}}{IS} \quad (71.3)$$

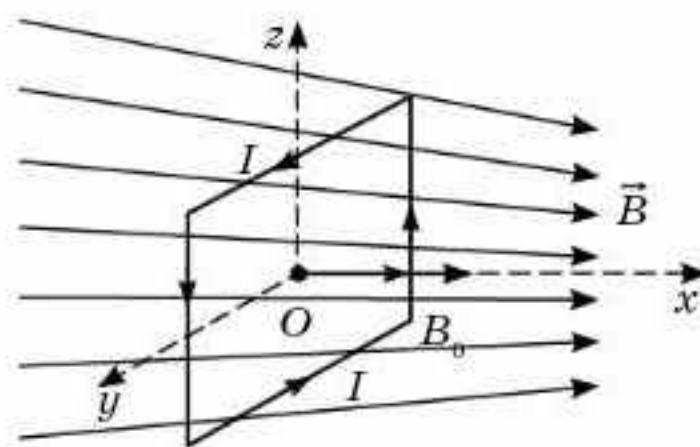
түрінде жазылады және ол $B = \frac{F_{\max}}{Il}$ формуласына қарағанда магнит өрісінің индукциясын тәжірибе жүзінде жеңілірек анықтауға мүмкіндік береді. Ампер күштерінің механикалық моментін бұралу деформациясы үшін Гук заңын пайдалана отырып, серпімді күштердің моментін өлшеу арқылы анықтауға болады:

$$M = k\phi,$$

мұндағы ϕ — контур ілінген сымның бұралу бұрышы (71.6-сурет). Біртекті магнит өрісіндегі жазық тоғы бар, x , y және z осьтерін айнала қозғалатын еркін контур жайлы жоғарыда айтылғандарға қорытынды жасауға болады (71.7-сурет):



71.6-сурет



71.7-сурет

- 1) магнит өрісінде контур өз тогының \vec{B}_0 магнит өрісі сыртқы \vec{B} магнит өрісімен бағыттас болатындай орналасады;
- 2) контур магнит өрісі күштірек жаққа қарай тартылады;
- 3) контур үдеумен қозғалады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Тогы бар тұйық контур магнит өрісінде өзін қалай ұстайды?
2. Қандай физикалық шама магнит индукция векторының ағыны немесе магнит ағыны деп аталады?
3. Магнит ағынының геометриялық түсініктемесі қандай?
4. Тогы бар контур магнит өрісінде қалай орналасады? Неліктен?
5. Тогы бар жазық контурдың магнит өрісінде орналасуы оның пішініне тәуелді ме?
6. Магнит өрісінде тогы бар рамка қалай орналасқанда, оған әсер ететін Ампер күштерінің моменттері максимал болады?

Есеп шығару үлгілері

1-есеп. I ток жүріп жатқан радиусы R сақинаны біртекті емес аксиалды-симметриялық оське орналастырады. Сақинаның осі өрістің симметрия осімен беттеседі. Токқа әсер ететін магнит өрісінің \vec{B} индукциясы өрістің симметрия осіне α бұрыш жасай бағытталған. Сақинаның массасы m . Сақинаның үдеуін анықтаңдар.

Берілгені:

R, I, B

α, m

$|\vec{a}| - ?$

Шешуі. 71.8-суреттен көріп отырғанымыздай, қарастырылып отырған Δl_i ток элементіне магнит өрісінің $B_x = B \cos \alpha$ құраушысы тарапынан сақинаны сығатын күш әсер етеді. Ал симметрия тұрғысынан бұл қорытқы күш нөлге тең болады және үдеу тудырмайды.

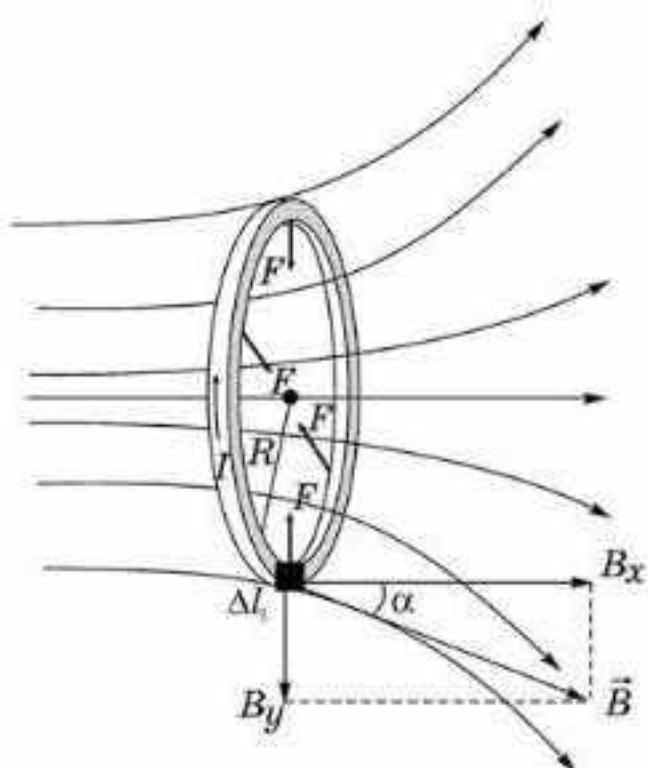
Ал $B_y = B \sin \alpha$ құраушысы тарапынан сақинаның Δl_i элементіне $\Delta F_i = IB \Delta l_i \sin \alpha$ күші әсер етеді. Олардың қосындысы

$$\sum_{i=1}^{\infty} \Delta F_i = IB \sin \alpha \sum_{i=1}^{\infty} \Delta l_i$$

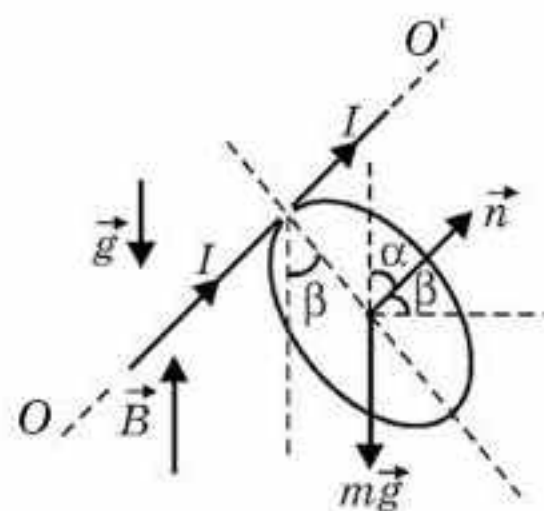
$\sum_{i=1}^{\infty} \Delta l_i = 2\pi R$, ал $\sum_{i=1}^{\infty} F_i = F_k$ екені анық, яғни $F_k = 2\pi RIB \sin \alpha$, сонда

Ньютонның екінші заңы бойынша $a = \frac{F_k}{m}$ немесе $a = \frac{2\pi RIB \sin \alpha}{m}$.

2-есеп. Шеңбер түріндегі сым рамка OO' горизонталь осінен айнала алады. Сымның бірлік ұзындығының массасы ρ , рамкадағы ток I . Рамка индукциясы \vec{B} болатын магнит өрісінде орналасқан, ал ол өріс ауырлық күшімен бағыттас (71.9-сурет). Шеңбер жазықтығының вертикальдан ауытқу бұрышын есептеңдер.



71.8-сурет



71.9-сурет

Берілгені:
 ρ, I, B

 $\beta - ?$

Шешуі. Есепті квадрат рамка қарастырылған жолмен шығаратын болсақ, оның шығарылуын күрделендіріп жібереміз, сондықтан бұл есепті ауырлық күші моментін Ампер күштерінің моментіне теңестіру арқылы жеңілірек шығаруға болады.

Ауырлық күшінің моменті $M_1 = mgd$ (71.10-сурет). $m = \rho l = \rho 2\pi R$, ал $d = R \sin \beta$, сонда $M_1 = \rho 2\pi R g R \sin \beta$. Ампер күштерінің моменті $M_2 = IBS \sin \alpha$. $\alpha = 90^\circ - \beta$, ал $S = \pi R^2$ болғандықтан, $M_2 = IB\pi R^2 \cos \beta$.

Ендеше, $\rho 2\pi R g R \sin \beta = IB\pi R^2 \cos \beta$, осыдан $\operatorname{tg} \beta = \frac{IB}{2\rho g}$.

3-есеп. Металл сырық аралықтары $l = 50$ см болатын рельске перпендикуляр орналасқан (71.11-сурет). Рельс горизонтпен $\alpha = 30^\circ$ жасайды. Сырық арқылы $I = 40$ А ток жібергенде ал қозғалысқа келу үшін рельске перпендикуляр бағытталатын магнит өрісінің индукциясы қандай болу керек? Сырық пен рельс арасындағы үйкеліс коэффициенті $\mu = 0,6$, сырықтың массасы $m = 1$ кг.

Берілгені:
 $l = 50$ см
 $\alpha = 30^\circ$
 $I = 40$ А
 $\mu = 0,6$
 $m = 1$ кг

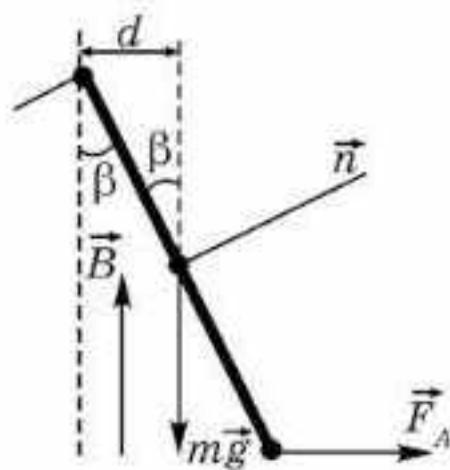
 $|\vec{B}| - ?$

Шешуі. 71.11, а-суретте есептің шарты көрсетілген. Осындай кеңістікте сырыққа әсер ететін күшті көрсету қиын. Ыңғайлы болу үшін қондырғыға бүйірінен қарайық. 71.11, ә-суретте көрсетілгендей, ток “бізден әрі қарай” бағытталған. “Сол қол ережесі” бойынша Ампер күші сырықтың төмен сырғып түсуіне ықпал етеді. Одан әрі Ньютонның екінші заңын координаталар осі бойынша жазамыз:

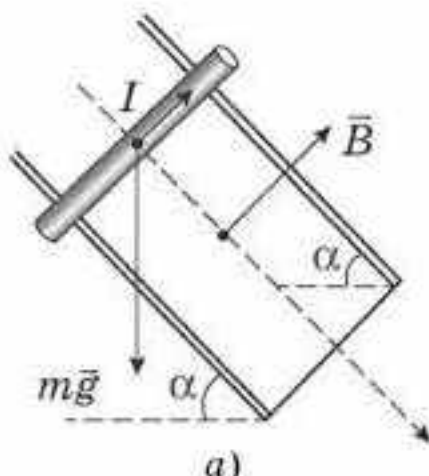
x осі бойынша $F_A + mg_x = F_{\text{үйк}}$ немесе $IBl + mg \sin \alpha = \mu \cdot N$;
 y осі бойынша $N = mg_y$ немесе $N = mg \cos \alpha$.

Осы екі теңдеуден $IBl + mg \sin \alpha = \mu mg \cos \alpha$. Осыдан төмен қарай қозғалыс үшін $|\vec{B}| = \frac{mg(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)}{Il}$. Токтың басқа бағыты үшін немесе

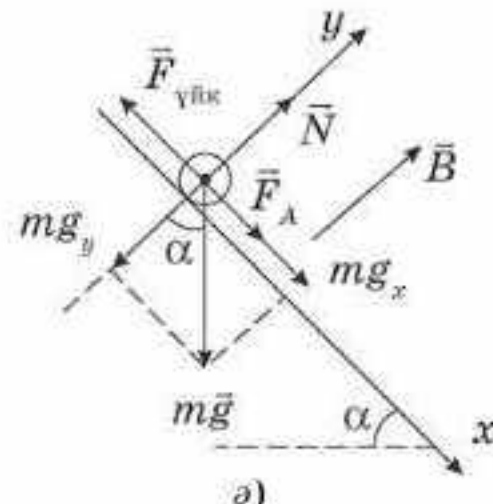
$|\vec{B}|$ бағыты бойымен бағытталса, $|\vec{B}| = \frac{mg(\mu \cos \alpha + \sin \alpha)}{Il}$.



71.10-сурет

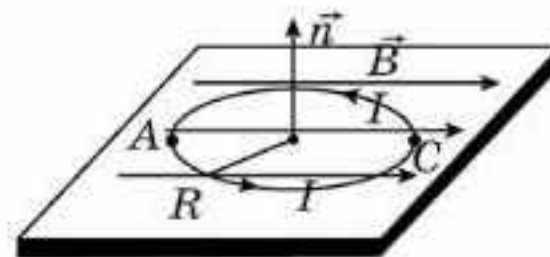


71.11-сурет



Бұл есепте сырық Ампер күшінің әсерінсіз де қозғалысқа келе алады. Егер $B = 0$ кезінде $\mu \cos \alpha - \sin \alpha = 0$ болса, яғни $\mu = \operatorname{tg} \alpha$, онда сырықтың төмен сырғуы мүмкін. $\alpha = 30^\circ$ үшін $\mu = 0,5774$. Ал үйкеліс коэффициенті көрсетілген мәннен сәл аз болса, сырық төмен қозғалады, жоғары қозғалуы үшін оған “көмектесу” қажет.

4-есеп. Жұқа қатты өткізгіш сақина ток өткізбейтін горизонталь бетте жатыр және ол индукция сызықтары горизонталь болатын біртекті магнит өрісінде орналасқан (71.12-сурет). Сақинаның массасы m , радиусы R , индукция шамасы B . Сақина көтеріле бастау үшін оның бойымен қандай I ток жіберу керек?



71.12-сурет

Берілгені:

m, R, B

$I - ?$

Шешуі. Тағы да күш моменттері ережесін пайдаланған ыңғайлы. Ауырлық күшінің моменті контурға әсер ететін Ампер күштері моментінен аз болу керек: $mgR \leq IBS$, мұндағы S — I ток өтіп жатқан жазық контурдың ауданы, яғни $mgR \leq IB\pi R^2$, осыдан

$$I \geq \frac{mg}{\pi BR}.$$

Қызық болатын мәселе сақинаның қай шеті (A немесе C) берілген ток күші мен магнит өрісі индукциясының бағытында көтеріледі (71.12-сурет)?

5-есеп. Сұйық (балқыған) металдарды айдауға арналған магнито-гидродинамикалық сорғының қабырғасы a болатын квадрат қималы бөлігі біртекті магнит өрісінде орналасқан. Бүйір электродтар арқылы магнит өрісіне перпендикуляр $I = 100$ А ток жібергенде сорғыдағы қысым $\Delta p = 0,5$ кПа төмендейді. Магнит өрісінің индукциясын табу керек.

Берілгені:

$a, I, \Delta p$

$|\vec{B}| - ?$

Шешуі. Сұйық металл жақсы өткізгіш болып табылады (ток тасымалдаушылар — электрондар мен оң иондар), магнит өрісі тарапынан қозғалыстағы сұйық металлға Ампер күші әсер етеді.

Сорғыға кірер кездегі металдың жылдамдығы v_A , ал шығар кездегі жылдамдығы v_B болсын (71.13-сурет). Әрі v_A, v_B, \vec{B} және I шамаларының берілген бағыты кезінде Ампер күші A нүктесінен C нүктесіне қарай бағытталады, яғни $v_B > v_A$. Олай болса, сұйықтың қалыптасқан қозғалысы кезінде $p_A S = p_B S + I Ba$, $\Delta p S = I Ba$ немесе $\Delta p a^2 = I Ba$, осыдан $B = \frac{\Delta p \cdot a}{I}$.

6-есеп. Орамдарынан ток өтетін катушка горизонталь жазықтықта вертикаль орналасқан. Катушканың массасы m , орам саны N . Горизонталь бағытталған біртекті магнит өрісінің қандай индукциясында катушка аударылып түседі? Катушканың радиусы R .

Берілгені:

I, m, N

$B — ?$

Шешуі. Есептің 4-есептен ешқандай айырмашылығы жоқ. Шынында, контур сыртқы магнит өрісінде \vec{B}_0 катушканың меншікті магнит өрісі \vec{B} сыртқы өріспен бағытас болатындай қалыпта орналасуға тырысады.

Сондықтан контур сурет жазықтығына перпендикуляр және A нүктесінен өтетін оське қатысты айнала бастайды (71.14-сурет).

C нүктесі орнынан азғантай аралыққа үзіледі. Бірақ ол сыртқы өрістің \vec{B} индукциясын арттырмай-ақ катушканың аударылуына жеткілікті. (Неліктен осылай болатынына жауап беріп көріңдер.) A нүктесіне қатысты күш моменттерінің ережесінен $IBSN \geq mgR$, мұндағы $IBSN$ — Ампер күш моменті, ол ауырлық күш моментінен аздап үлкен, $S = \pi R^2$ — контурдың ауданы. Соңында $IB\pi R^2 N \geq mgR$, осыдан $B \geq \frac{mg}{\pi RIN}$.

Тіреудің N_A реакция күші A нүктесіне қатысты момент туғызбайды.

7-есеп. Шексіз ұзын өткізгіш өткізгішке қатысты жанай тұзақ құрады (71.15-сурет). Өткізгіштің бойынан $I = 5$ А ток өтеді. Тұзақтың радиусы $R = 10$ см. Тұзақтың центріндегі магнит өрісі индукциясын табындар.

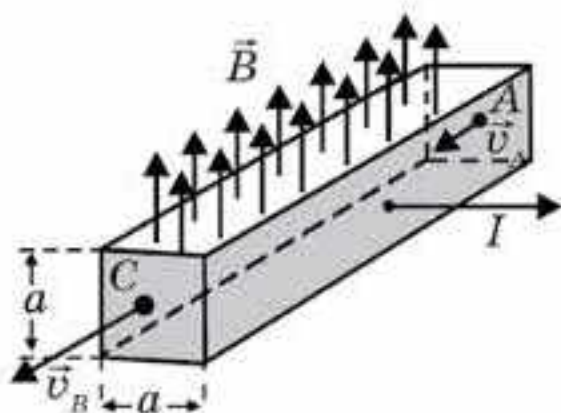
Жауабы: $\left(B = \mu \frac{I}{2R} \left(1 - \frac{1}{n} \right) \right)$

Бұл есепті суперпозиция принципін пайдаланып өздерің шешіңдер.

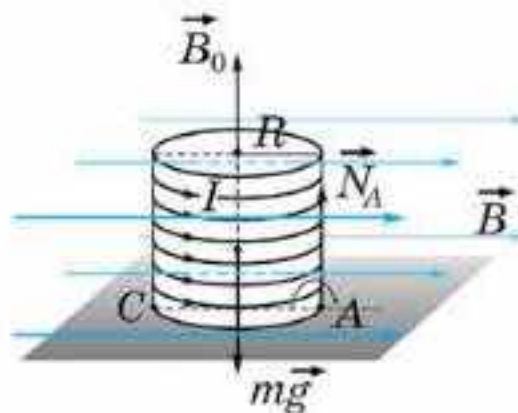
8-есеп. Шексіз ұзын, бойынан $I_1 = 4$ А ток өтетін соленоидтің ішіне бойынан $I_2 = 1$ А ток өтетін, радиусы $R = 0,5$ см дөңгелек контур орналастырылған, оның жазықтығы соленоидтің магнит сызықтарына параллель. Соленоидтің ұзындығы $l = 10$ см, орам саны $N = 40$. Дөңгелек контурды айналдырушы күш моментін табындар.

Жауабы: $\left(M = \mu \pi R^2 I_1 I_2 \frac{N}{l} \right)$.

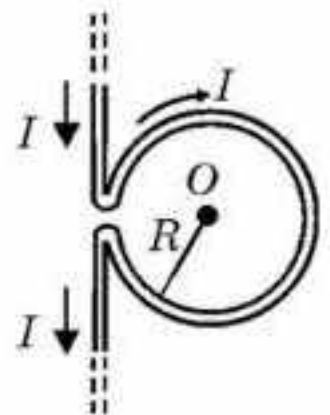
7-, 8-есептерді өздерің шығарып көріңдер.



71.13-сурет



71.14-сурет



71.15-сурет



Шығармашылық шеберхана

Шығарындар

1. Біртекті магнит өрісіндегі ауданы 10 см^2 рамкаға әсер ететін максимал айналдыру моменті $0,4 \text{ мН} \cdot \text{м}$. Рамкадағы ток күші 1 А . Магнит өрісінің индукциясын табыңдар.

Жауабы: $0,4 \text{ Тл}$

2. Ауданы 400 см^2 рамка біртекті магнит өрісіне оған түсірілген нормаль $0,2 \text{ Тл}$ магнит индукция векторымен 60° бұрыш жасайтындай етіп орналастырылған. Рамкадағы ток күші 4 А . Рамкаға әсер ететін айналдыру моментін табыңдар.

Жауабы: $4 \text{ мН} \cdot \text{м}$

3. Көлденең қимасының ауданы 150 см^2 қысқа катушканың орамасында 200 орам бар. Оның бойымен 4 А ток өтеді. Катушка индукциясы 10 мТл біртекті магнит өрісінде орналасқан. Оған өріс тарапынан әсер ететін айналдыру моментін табыңдар. Катушканың осі өрістің күш сызықтарымен 60° бұрыш жасайды.

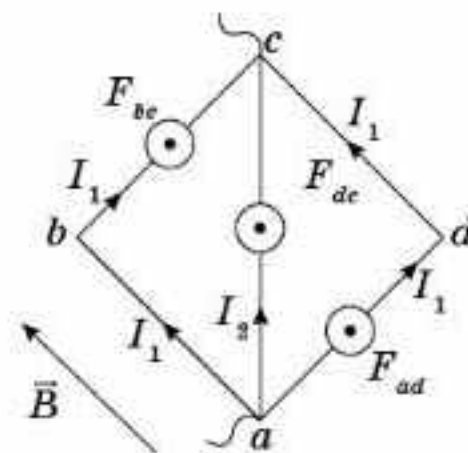
Жауабы: $0,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$

*4. Диагональ бойымен қосылған квадрат пішінді контур көлденең қимасы 1 мм^2 мыс сымнан жасалып, 110 В тұрақты кернеу көзіне қосылған (71.16-сурет). Квадраттың жазықтығы индукциясы 2 мТл магнит өрісі индукция сызықтарына параллель. Өріс тарапынан контурға әсер ететін күштің модулі мен бағытын табыңдар.

Жауабы: 22 Н

*5. Қимасы 1 мм^2 мыс сымнан жасалған радиусы 10 м сақина бойымен 10 А ток өтеді. Сақина біртекті магнит өрісіне оның осі өрістің бағытымен сәйкес келетіндей етіп орналастырылған. Магнит өрісі индукциясының қандай максимал мәнінде сақина үзіледі? Мыстың беріктігі $\sigma = 230 \text{ МН/м}^2$.

Жауабы: $2,3 \text{ Тл}$



71.16-сурет

Рефлексия

1. Сабақта сені ойландырған...
2. Сені қандай материал таңғалдырды?
3. Сабақта өзің үшін жаңа болатын не білдің?
4. Қандай ақпарат саған болашақта қажет болуы мүмкін?

§ 72. Лоренц күші. Электр және магнит өрістеріндегі зарядталған бөлшектердің қозғалысы



Тірек ұғымдар: Лоренц күші, сол қол ережесі, электр және магнит өрісіндегі бөлшектердің қозғалысы.

Бүгінгі сабақта: қозғалатын бөлшектерге магнит өрісінің әсерін зерттейсіңдер.

Ампер күші — магнит өрісінде тұрған, бойынан I ток өтетін өткізгіштің ұзындығы Δl кесіндісіне әсер ететін күш. Ток күшін заряд тасымалдаушылардың реттелген қозғалысының орташа жылдамдығы мен олардың концентрациясы арқылы өрнектеуге болады:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{q_0 N}{t} = \frac{q_0 nV}{t} = \frac{q_0 nSl}{t} = q_0 nSv. \quad (72.1)$$

Жеке заряд тасымалдайтын бөлшекке әсер ететін күш арқылы Ампер күшін өрнектеуге болады:

$$F_A = Bq_0 n v S \Delta l \sin \alpha. \quad (72.2)$$

Ұзындығы Δl өткізгіштің S көлденең қимасы арқылы өтетін заряд тасымалдаушылардың жалпы саны $N = nV = nS\Delta l$ екенін ескерсек, Ампер күші мынаған тең:

$$F_A = Bq_0 N v \sin \alpha. \quad (72.3)$$

Осыдан магнит өрісі тарапынан қозғалыстағы жеке зарядталған бөлшектерге әсер ететін күшті табамыз:

$$F_L = Bq_0 v \sin \alpha, \quad (72.4)$$

мұндағы α — бөлшектердің жылдамдық векторы мен магнит индукция векторы арасындағы бұрыш.

Бұл күшті алғаш рет голланд физигі Лоренц есептеп тапқан. Сондықтан оны Лоренц күші деп атайды. *Лоренц күшінің бағытын* сол қол ережесімен табады: *егер сол қолды магнит өрісінің күш сызықтары алақанға енетін етіп, ал төрт саусақты бөлшектердің қозғалысы бойымен бағыттаса, онда 90° бағытталған бас бармақ Лоренц күшінің бағытын көрсетеді.*

Сол қол ережесі оң зарядталған бөлшектер үшін орындалады.

Электр өрісіндегі бөлшектер. Электр өрісіндегі зарядталған бөлшекке Кулон күші әсер етеді. Оны берілген нүктедегі өрістің кернеулігі арқылы табамыз: $F = Eq$. Бұл күш бөлшекке үдеу береді:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m}, \quad (72.5)$$

мұндағы m және q — сәйкесінше бөлшектің массасы мен заряды. Егер бөлшектің заряды оң болса ($q > 0$), үдеудің бағыты электр өрісінің кернеулік векторының бағытымен сәйкес келеді.

Егер электростатикалық өріс біртекті болса, онда бөлшектің қозғалысы сыртқы күштер жоқ кезде бірқалыпты үдемелі. Бөлшек траекториясының түрі бастапқы шарттарға тәуелді. Егер бастапқыда зарядталған бөлшектер тыныштықта болса ($v_0 = 0$) немесе бастапқы жылдамдық үдеумен бағыттас болса, онда бөлшек өріс бойымен бірқалыпты түзусызықты қозғалады және оның жылдамдығы артады. Егер бастапқы жылдамдық пен үдеудің векторлары қарама-қарсы бағытталса әрі параллель болса, онда бөлшектер осы өрісте тежеледі.

Егер бастапқы жылдамдық пен үдеу арасындағы бұрыш сүйір болса $0 < \alpha < 90^\circ$ (немесе доғал), онда осы электростатикалық өрісте зарядталған бөлшектер парабола бойымен қозғалады.

Барлық жағдайда электростатикалық өрістегі зарядталған бөлшектердің қозғалыс жылдамдығының модулі, сондай-ақ кинетикалық энергиясы өзгеріп отырады.

Магнит өрісіндегі бөлшек. Магнит өрісінің тыныштықтағы зарядталған бөлшектерге әсер етпейтінін есте ұстаған жөн. Магнит өрісі тек қозғалыстағы зарядталған бөлшектерге ғана әсер етеді. Сонымен қатар магнит өрісіндегі зарядталған бөлшектерге әсер ететін Лоренц күші әр уақытта бөлшектердің қозғалыс жылдамдығына перпендикуляр болады. Сондықтан магнит өрісіндегі жылдамдықтың модулі өзгермейді. Демек, бөлшектердің кинетикалық энергиясы да өзгермейді. Магнит өрісіндегі зарядталған бөлшек траекториясының түрі өріске кіретін бөлшектің жылдамдығы мен магнит индукциясы арасындағы бұрышқа тәуелді. Өртүрлі үш жағдай болуы мүмкін.

1. Зарядталған бөлшектер магнит өрісіне оның күш сызықтарына параллель бағытта ұшып кіреді. Бұл жағдайда Лоренц күші бөлшекке әсер етпейді және бөлшек бірқалыпты түзусызықты қозғалысын сақтайды.

2. Бөлшектер магнит өрісіне оның күш сызықтарына перпендикуляр бағытта ұшып кіреді (72.1-сурет). Бұл жағдайда Лоренц күші магнит өрісі мен бөлшектің жылдамдық векторына перпендикуляр бағытталып, оған центрге тартқыш үдеу береді:

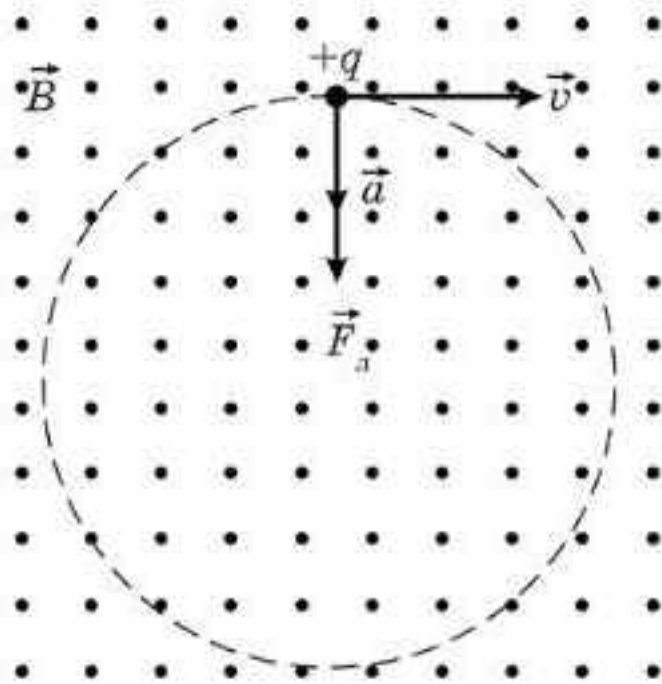
$$a_n = \frac{F_n}{m} = \frac{Bqv}{m}. \quad (72.6)$$

Центрге тартқыш үдеудің мына формуламен өрнектелетінін білеміз:

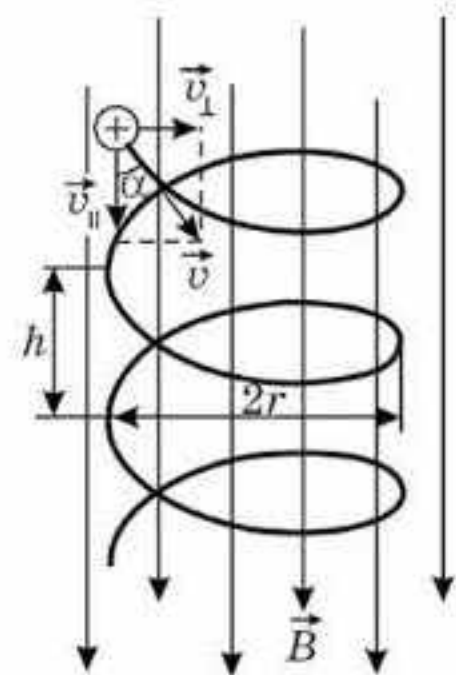
$$a_n = \frac{v^2}{R}. \quad (72.7)$$

Ендеше, магнит өрісіне перпендикуляр ұшып кірген зарядталған бөлшек шеңбер бойымен мына радиуспен қозғалады:

$$R = \frac{mv}{Bq}. \quad (72.8)$$



72.1-сурет



72.2-сурет

Бөлшек жылдамдығының модулі өзгермегендіктен, оның айналу периоды

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{Bq} \quad (72.9)$$

формуласы арқылы анықтаймыз. Соңғы формуладан бөлшектің айналу периодының жылдамдық пен траекторияның радиусына емес, бөлшектің меншікті заряды $\left(\frac{q}{m}\right)$ мен өрістің магнит индукциясына тәуелді екенін көріп отырмыз.

3. Бөлшек магнит өрісіне оның күш сызықтарына бұрыш жасай енеді (72.2-сурет). Бөлшектің қозғалысын оның өріс бойымен $v_{||} = v \cos \alpha$ жылдамдықпен бірқалыпты түзусызықты қозғалысы мен өріске перпендикуляр шеңбер бойымен жазықтықта жылдамдық модулі $v_{\perp} = v \sin \alpha$ тұрақты болатын қозғалысының қосындысы ретінде қарастыруға болады. Нәтижесінде бөлшек осі магнит өрісіне параллель болатын бұрандалы сызық бойымен қозғалады. Бұл сызық шеңберінің радиусы тұрақты және мынаған тең: $R = \frac{mv \sin \alpha}{Bq}$. Ал бұранданың қадамы (ол да тұрақты)

$$h = T v \cos \alpha = \frac{2\pi m}{Bq} v \cos \alpha$$

формуласынан табылады. Спиральдың айналу бағыты бөлшек зарядының таңбасына тәуелді.

4. Егер зарядталған бөлшек жылдамдығы біртекті емес магнит өрісі векторының бағытымен α бұрыш жасаса (мұнда өрістің индукциясы бөлшек қозғалысының бағытында өседі), онда шеңбердің радиусы мен бұранданың қадамы B өскен сайын кемиді. Магнит өрісінде зарядталған бөлшектерді фокустау осыған негізделген.

5. Егер қозғалыстағы зарядталған бөлшектерге индукциясы B болатын магнит өрісінен басқа бір мезгілде кернеулігі E электростатикалық өріс әсер етсе, онда бөлшекке түсірілген тең әсерлі күш электр күші мен Лоренц күшінің векторлық қосындысына тең:

$$\vec{F} = \vec{F}_э + \vec{F}_л.$$

Бұл жағдайда қозғалыс сипаты мен траекторияның түрі осы күштердің қатынасы мен электростатикалық және магниттік күштердің бағытына тәуелді. Осылайша егер зарядталған бөлшектің жылдамдық векторы, электр өрісінің кернеулігі мен магнит өрісінің индукциясы өзара перпендикуляр болса, онда осы өрістегі бөлшектің бірқалыпты қозғалысын қарастыруға болады. Бөлшектің жылдамдығы мына қатынаспен анықталады: $v = \frac{E}{B}$.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Электр күш сызықтарына: а) параллель; ә) перпендикуляр; б) бұрыш жасай енген зарядталған бөлшектер қалай қозғалады?
2. Тыныштықтағы зарядталған бөлшекті магнит өрісіне енгізгенде ол қалай қозғалады?
3. Магнит өрісіне енген зарядталған бөлшекті шеңбер бойымен қозғауға мәжбүрлейтін қандай күш? Бұл шеңбердің радиусын қалай есептеуге болады?
4. а) Магнит өрісіне перпендикуляр; ә) өрістің индукция сызықтарына бұрыш жасай енген зарядталған бөлшек қалай қозғалады?
5. Бұрандалы сызықтың қадамы деп нені айтады?
6. Зарядталған бөлшек индукциясы бөлшектің қозғалыс бағытында кемитін біртекті емес магнит өрісіне енгенде оның айналу периоды, шеңбердің радиусы мен бұрандалы сызықтың қадамы қалай өзгереді?

Есеп шығару үлгілері

1-есеп. Жылдамдықтары біртекті магнит өрісінің индукциясына перпендикуляр бағытталған екі протонның кинетикалық энергиялары K_1 және K_2 . Протондардың қозғалыс траекторияларының радиустарының қатынасын табыңдар.

Берілгені: K_1 , K_2
 $\frac{R_1}{R_2} = ?$

Шешуі. 72.3-суретте магнит өрісі бізге қарай бағытталған. Протонға әсер ететін Лоренц күші максимал мәнге ие болады. $F_{\perp} = q_0 v B$, себебі $\sin \alpha = 1 (\alpha = 90^\circ)$ және ол жылдамдыққа перпендикуляр бағытталған, сондықтан бұл күш жұмыс атқармайды, тек жылдамдықтың бағытын ғана өзгертеді, нәтижесінде протондар вакуумда шеңбер бойымен қозғалады.

Протондар үшін Ньютонның екінші заңын жазамыз: $q_0 v_1 B = m_0 \frac{v_1^2}{R_1}$, осыдан

$$R_1 = \frac{m_0 v_1}{q_0 B}, \quad (1)$$

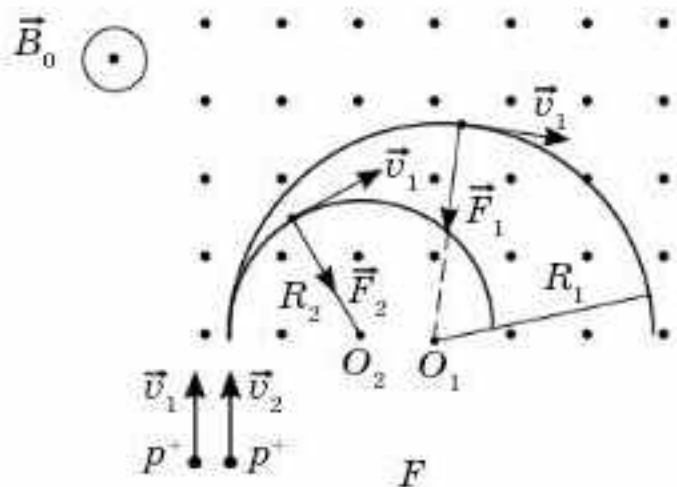
дәл осылай

$$R_2 = \frac{m_0 v_2}{q_0 B}, \quad (2)$$

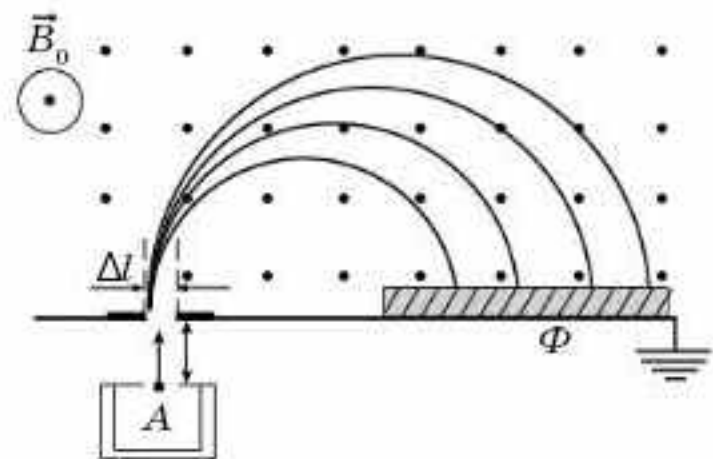
мұндағы m және q_0 — сәйкесінше протонның массасы мен заряды, v_1 және v_2 жылдамдықтарды олардың кинетикалық энергиясы арқылы өрнектейміз: $K_1 = \frac{m_0 v_1^2}{2}$; $K_2 = \frac{m_0 v_2^2}{2}$. Осылардан жылдамдықтарды таба-

мыз: $v_1 = \sqrt{\frac{2K_1}{m_0}}$ және $v_2 = \sqrt{\frac{2K_2}{m_0}}$. Осы мәндерді (1) және (2) өрнектерге қойып, $\frac{R_1}{R_2}$ қатынасын табамыз: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}$ (72.3-суретте $|\vec{v}_1| > |\vec{v}_2|$ жағдай бейнеленген).

2-есеп. 72.4-суретте *масс-спектрометрдің* ең қарапайым түрі көрсетілген, оның өрісінің индукциясы 0,1 Тл. А ионизаторда пайда

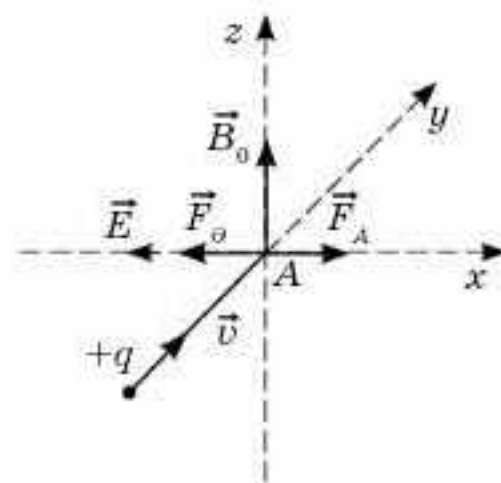


72.3-сурет



72.4-сурет

болған иондар кернеуі 10 кВ өріспен үдетіледі. Магнит өрісінде бұрылған иондар Φ фотопластинкаға түсіп із қалдырады. Фотопластинкада ${}_1\text{H}^+$, ${}_2\text{H}^+$, ${}_3\text{H}^+$, ${}_2\text{He}^+$ иондардың жолақтары саңылаудан қандай қашықтықта орналасады? ${}_{16}^{16}\text{O}^+$ және ${}_{15}^{15}\text{N}^+$ иондардың жолақтарын ажырату үшін саңылаудың Δl ені қандай болу керек?



72.5-сурет

Шешуі. Жоғары температураның әсерінен бастапқы заттың атомдары бірнеше рет иондалады және электр өрісімен үдетіледі. Дегенмен жылулық қозғалыстың әсерінен иондардың жылдамдықтары шама жағынан да, бағыт жағынан да түрліше болады. Ал саңылауға жылдамдықтары шама жағынан да, бағыт жағынан да бірдей болатын иондар түсу керек. Сондықтан А ионизатор мен Δl саңылаудың арасына қондырғы қойып, ол арқылы тек жылдамдықтары бірдей болатын иондарды өріске бағыттайды. А ионизатор мен Δl саңылаудың арасында өзара перпендикуляр электр және магнит өрістері құрылады (72.5-сурет). q_0 оң ионға электр өрісі тарапынан да, магнит өрісі тарапынан да күш әсер етеді. Осы күштер теңгерілген кезде ($q_0 E = q_0 B_0 v$) жылдамдықтары тек $v = \frac{E}{B_0}$ болатын электрондар ғана түзусызықты қозғалады. Ал басқа жылдамдықтағы иондар бұл бағыттан ауытқиды да, Δl саңылауға түспейді. Сөйтіп, B_0 өріске жылдамдықтары шама жағынан да, бағыт жағынан да бірдей иондар келіп түседі. Сол себепті барлық иондар радиустары $R = \frac{m_0 v}{q_0 B_0}$ болатын шеңберлер бойымен қозғалады (алдыңғы есептің шешімін қараңдар). Φ фотопластинкада ені саңылаудың Δl еніне тең жолақтар пайда болады.

Саңылаудан фотопластинкадағы жолаққа дейінгі қашықтық $2R$, яғни шеңбердің диаметріне тең.

1. ${}_1\text{H}^+$ иондар үшін (протондар) $l_1 = 2 \cdot \frac{m_0 v}{q_0 B_0}$. Сонда v жылдамдықты $\Delta\phi = 10$ кВ үдетуші потенциалдар айырымы бойынша анықтаймыз:

$$q_0 \Delta\phi = \frac{m_0 v^2}{2}; \quad v = \sqrt{\frac{2q_0 \Delta\phi}{m_0}}. \quad \text{Олай болса, } l_1 = 2 \cdot \frac{m_0}{q_0 B_0} \cdot \sqrt{\frac{2q_0 \Delta\phi}{m_0}} \quad \text{немесе}$$

$$l_1 = \frac{2\sqrt{2}}{B_0} \sqrt{\frac{m_0}{q_0} \Delta\phi}.$$

$\frac{q_0}{m_0}$ қатынасы бөлшектің меншікті заряды деп аталады. Протон үшін ол $\gamma = \frac{q_0}{m_0} = \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}{1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} = 0,96 \cdot 10^8 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$.

$$\text{Соңында } l_1 = \frac{2\sqrt{2}}{B_0} \sqrt{\frac{\Delta\varphi}{\gamma}}; l_1 = \frac{2\sqrt{2}}{0,1 \text{ Тл}} \sqrt{\frac{10^4 \text{ В}}{0,96 \cdot 10^8 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}}} = 0,29 \text{ м аламыз.}$$

2. Массасы протонның массасынан екі есе артық сутек изотопы ${}^2_1\text{H}^+$ иондары (дейтерий ядролары) үшін $l_2 = \sqrt{2} l_1 = 0,4 \text{ м}$.

3. Ядросының массасы протонның массасынан үш есе үлкен ауыр сутек ${}^3_1\text{H}^+$ иондары (тритий ядролары) үшін $l_3 = \sqrt{3} l_1 = 0,5 \text{ м}$.

4. Массасы протон массасынан 4 есе артық ${}^4_2\text{He}^+$ гелий ядролары (α -бөлшектер) үшін $l_4 = \sqrt{4} l_1 = 0,4 \text{ м}$.

Саңылаудың Δl ені қандай болғанда фотопластинкадағы ${}^{16}_8\text{O}^+$ және ${}^{15}_7\text{N}^+$ иондарының жолақтарын ажырату мүмкін екенін анықтау үшін экрандағы жолақтардың аралығы (ол аралық Δl саңылаудың еніне тең) Δl шамасынан сәл артық болуы талап етіледі, яғни олардың арасында саңылау болу керек:

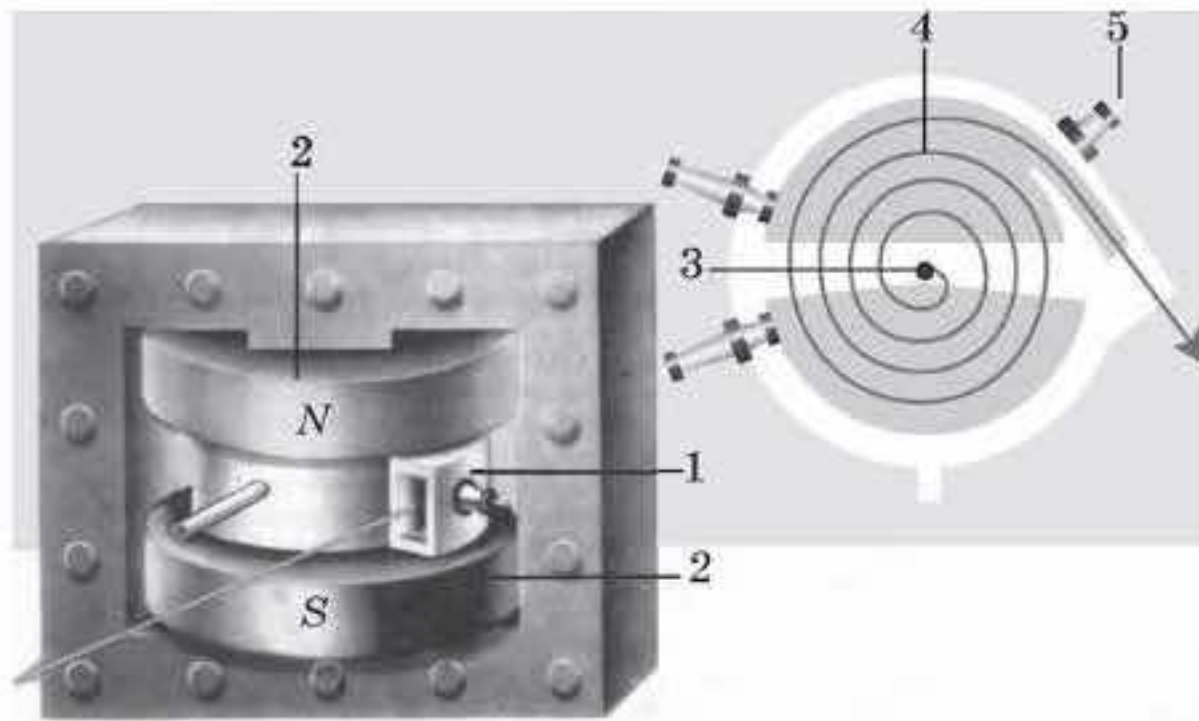
$$l({}_8\text{O}) - l({}_7\text{N}) = \frac{2\sqrt{2}}{B_0} \sqrt{\frac{m_0 \Delta\varphi}{q_0}} - \frac{2\sqrt{2}}{B_0} \sqrt{\frac{m_N \Delta\varphi}{q_0}} \geq \Delta l,$$

мұндағы m_0 — оттект ядросының массасы (электрондардың массасы ескерілмейді), m_N — азот ядросының массасы (электрондардың массасы ескерілмейді). Оттек ядросының массасы протон массасынан 16 есе, ал азот ядросының массасы m_N 15 есе артық. Сонда $l_N = \sqrt{15} \cdot 0,29 \text{ м}$; оттект үшін m_0 протон массасынан 16 есе артық, яғни $l_0 = 4 \cdot 0,29 \text{ м}$, яғни $\Delta l > 0,037 \text{ м}$.

Есептің нәтижесін талдай отырып, мына сұраққа жауап беріңдер: “Жеңіл әлде ауыр элементтердің қайсысының изотоптарын тез ажыратып сұрыптауға болады?”

3-есеп. Циклотрон. “Әлем кеңістігі қалай құрылған?” деген сұрақ физиканың басты мәселесінің бірі. Бұдан 2500 жыл бұрын “Зат шексіздікке дейін бөліне ме?” деген сұраққа Демокрит: “Жоқ, әрі қарай бөлінбейтін бөлшек — атом болу керек”, — деп жауап берген.

Дегенмен сендер атомның күрделі құрылым екенін білесіңдер. Резерфорд радийден шығатын α -бөлшектермен (гелий атомының ядросы) химиялық элементтерді атқылап, атом ядросын ашты. Сол сияқты Резерфорд “алхимиктердің” ежелгі арманы — қарапайым материалдан (темірден) асыл металдар (алтын) алды. Ол адам баласының тарихында бірінші рет 1919 жылы жасанды ядролық реакцияны іске асырып, азот ядросын α -бөлшектермен атқылап оттект ядросын алды. Осылайша алтынның ядросын да, жалпы табиғатта бар кез келген элементті, тіпті табиғатта жоқ элементтерді де алуға болады. Дегенмен радийден шығатын α -бөлшектердің кинетикалық энергиясы аз, небәрі 5—6 МэВ. “Зат қалай құрылған?” деген мәселені зерттеу үшін, яғни



72.6-сурет. Циклотрон:

1 — вакуумды үдеткіш; 2 — тұрақты магнит; 3 — бөлшек көзі; 4 — циклотрондағы бөлшек траекториясы; 5 — үдеткіш кернеу беретін электрондар

атом ядроларын жасанды түрде түрлендіру үшін энергиясы әлдеқайда жоғары бөлшектер керек. Міне, сол үшін әртүрлі типті зарядталған бөлшектерді үдететін қондырғылар қажет. Бұл мақсатқа қолайлы машина — *циклотронды* 1930 жылы америкалық физик Э. Лоуренс ойлап тапқан.

Циклотронның негізгі бөлігі — екі жазық қуыс металл қораптар, олар *дуанттар* деп аталады. Дуанттар бір-бірінен диаметріне қатысты ығыстырылған және жоғары жиілікті генераторға қосылған (72.6-сурет). Бұл ортасынан қақ бөлініп әрі бір-бірінен сәл ажыратылып қойылған консерві банкасына ұқсайды. Дуанттарды қуатты электромагниттік полюстердің арасындағы вакуумдық кеңістікке орналастырса, электромагниттік индукциясы бірнеше теслаға жететін магнит өрісі пайда болады. Дуанттардың центріне иондар (немесе электрондардың, протондардың және т.б. бөлшектердің) көзі қойылады. Бөлшек ион көзінен қайсыбір v_0 жылдамдықпен ұшып шығады да, дуанттың ішіне енеді. Магнит өрісі бөлшекке жылдамдыққа перпендикуляр $F_{\perp} = q_0 v_0 B$ Лоренц күшімен әсер етеді және оны бұрып, оған центрге тартқыш

үдеу береді. Ньютонның екінші заңы бойынша $q_0 v_0 B = m \frac{v_0^2}{r_0}$, мұндағы m — бөлшектің массасы, сөйтіп магнит өрісі бөлшекті радиусы $r_0 = \frac{mv_0}{q_0 B}$ шеңбер бойымен қозғалуға мәжбүр етеді.

Бөлшек дуант ішінде қозғалып жүрген уақытта дуанттардың полярлығы өзгеруі тиіс және дуанттардың арасындағы саңылаудың электр өрісі бөлшекті қозғалысқа келтіру үшін $A = q\Delta\phi$ жұмыс атқарады, мұндағы $\Delta\phi$ — дуанттар арасындағы потенциалдар айырымы.

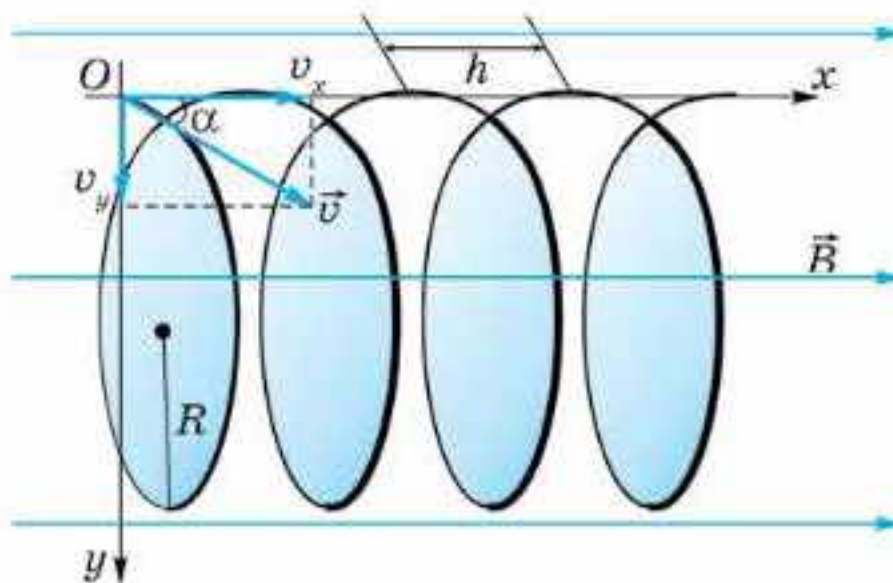
(Дуанттардың ішінде электр өрісі жоқ, себебі қораптар металдан жасалған.) Электр өрісі тарапынан бөлшек қозғалысқа келіп, екінші дуантқа үдетіліп жетеді, яғни бөлшек үлкенірек жылдамдықпен, $r = \frac{mv}{q_0 B}$ радиусы үлкенірек болатын траекториямен қозғалады. Бөлшектің дуанттар ішіндегі траекториясы ағытылып бара жатқан ширатылымға ұқсайды. Сөйтіп, бөлшек дуанттар арасындағы саңылаудан өткен сайын жоғары жиілікті генератор тудыратын электр өрісі тарапынан қозғалыс алады, нәтижесінде бөлшектің энергиясы артып отырады. Осыдан кейін ол циклотроннан шығарылып, нысанаға бағытталады. Енді генератордың жиілігін бөлшектің айналу жиілігімен қалай үйлестіру (синхрондау) керек деген мәселе туады. Ондағы мақсат бөлшек дуанттан шыққан сайын үдеткіш өріске тап болу керек қой! Ең қызығы, осы үйлесімділік автоматты түрде (өз бетінше) орындалады екен! Радиусы R шеңбер бойымен бөлшектің айналу периодын табайық: $T = \frac{2\pi r}{v}$, осыған $r = \frac{mv}{q_0 B}$ радиустың мәнін қойсақ, $T = \frac{2\pi m}{q_0 B}$, яғни период радиусқа тәуелсіз. Демек, генератордың жұмыс жиілігі $\nu = \frac{q_0 B}{2\pi m}$ өрнегімен анықталуы тиіс. Ол r радиусқа да, бөлшектің жылдамдығына да тәуелсіз. Бөлшектің циклотронды тастап шығар мезетіндегі максимал кинетикалық энергиясы $W_k = \frac{mv_{\max}^2}{2}$.

$R_{\max} = \frac{mv_{\max}}{q_0 B}$ өрнегінен $v_{\max} = R_{\max} \frac{q_0 B}{m}$. Оны кинетикалық энергия өрнегіне қойсақ, $W_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{q_0^2}{m} B^2 R_{\max}^2$, мұндағы R_{\max} — дуанттың радиусы.

4-есеп. Индукциясы \vec{B} біртекті магнит өрісінде массасы m , заряды q бөлшек \vec{v} жылдамдықпен қозғалады әрі \vec{B} вектор мен \vec{v} жылдамдықтың арасындағы бұрыш — α . Бойымен бөлшек қозғалатын шиыршықтың (спиральдың) радиусын және қадамын табыңдар.

Берілгені: B, v α, m <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black;"/> $R — ? h — ?$	<i>Шешуі.</i> Бөлшектің жылдамдығын екі құраушыға жіктейміз (72.7-сурет). Бөлшек оң зарядталған дейік. Қозғалыстардың тәуелсіздігін пайдаланайық. Әуелі Oy осі бойындағы қозғалысты қарастырамыз.
--	---

Бөлшек Лоренц күші әсерінен жылдамдығының бағытын өзгертіп, центрге тартқыш үдеу алады. Oy осімен қозғалыс үшін \vec{v}_y және \vec{B} векторларының арасындағы бұрыш 90° ($\sin 90^\circ = 1$), сондықтан Ньютонның екінші заңы $q_0 v_y B = m \frac{v_y^2}{R}$, осыдан $v_y = \frac{q_0 B R}{m}$; ал радиусы R шеңбер



72.7-сурет

бойымен айналу периоды $T = \frac{2\pi R}{v_y}$, яғни $T = \frac{2\pi Rm}{q_0 BR} = \frac{2\pi m}{q_0 B}$, демек, период, бұрын белгілі болғандай, радиус пен бөлшек жылдамдығына тәуелсіз шама.

Магнит өрісіндегі бөлшек орбитасының радиусы $R = \frac{mv_y}{Bq_0} = \frac{mv \sin \alpha}{Bq_0}$.

Ox осінің бойымен қозғалғанда v_x және B арасындағы бұрыш 0° , яғни $\sin 0^\circ = 0$. Лоренц күші нөлге тең, сондықтан бөлшектің Ox осі бойымен қозғалысы бірқалыпты және түзусызықты. Нәтижесінде екі тәуелсіз қозғалыстардың қорытқы қозғалысы осі магнит өрісі индукция векторына параллель болатын радиусы R шиыршықтың бойымен өтеді. Шиыршықтың h қадамы бөлшектің ширатылым осі бойымен бір толық айналым уақыты ішіндегі ығысуына тең болады:

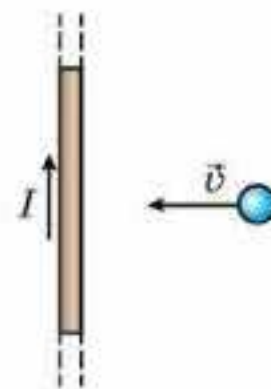
$$h = v_x T = v \cos \alpha \frac{2\pi m}{q_0 B} = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{q_0 B}.$$

Шығармашылық шеберхана

Түсіндіріңдер

1. Протон магниттік сызықтарға белгілі бір бұрышпен индукциясы B біртекті магнит өрісіне ұшып кіреді. Ол неліктен спираль бойымен қозғалады?

2. Оң зарядталған бөлшекке тогы бар шексіз өткізгіш бағытында жылдамдық берілді (72.8-сурет). Бөлшекке әсер ететін күш қалай өзгереді?

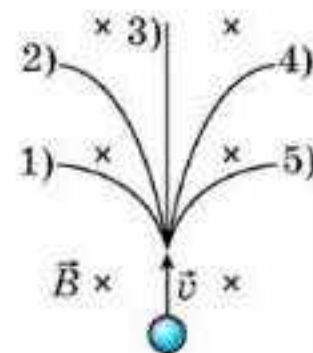


72.8-сурет

Талдаңдар

1. Электрон магниттік индукция сызығына перпендикуляр бағытта біртекті магнит өрісіне ұшып кірді. Жылдамдығын 3 есе арттырғандағы оның айналу периоды қалай өзгереді?

2. 72.9-суретте біртекті магнит өрісіндегі электрон қозғалысының әртүрлі бес траекториясы көрсетілген. Кинетикалық энергиясы ең төмен электрон қай траекториямен қозғалады?



72.9-сурет

Шығарыңдар

1. Электрон 4 кВ потенциалдар айырымынан өтіп, күш сызықтарына 30° бұрышпен индукциясы 10 мТл біртекті магнит өрісіне ұшып кіреді. Электрон қозғалатын спиральдың радиусын анықтаңдар.

Жауабы: 2,13 см

2. Протон 4,35 кВ потенциалдар айырымынан өтіп, индукция сызықтарына перпендикуляр индукциясы 20 мТл біртекті магнит өрісіне ұшып кіреді. Протон қозғалатын шеңбердің радиусын және протонның айналу периодын табыңдар.

Жауабы: 1,5 см, 3,3 с

■3. Индукциясы 0,1 Тл біртекті магнит өрісіне перпендикуляр болатын, кернеулігі 1 кВ/м біртекті электрлік өріс тудырған. Екі өріске де перпендикуляр түзусызықты траекториядан ауытқымай зарядталған бөлшек қозғалады. Бөлшектің жылдамдығын анықтаңдар.

Жауабы: 10 км/с

4. Электрон индукциясы 2 мТл болатын магнит өрісінде радиусы 2 см бұрандалы сызық бойымен қозғалады. Бұранда қадамы 5 см. Электронның жылдамдығын табыңдар.

Жауабы: 7,6 Мм/с

■5. Заряды $3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл болатын бөлшек индукциясы 0,1Тл біртекті магнит өрісін тудыратын циклотронда үдетілген. Бөлшекті үдету жиілігі 6 МГц. Бөлшектердің радиусы 2 м шеңбер бойымен қозғала бастаған мезеттегі кинетикалық энергиясын табыңдар.

Жауабы: 2,4 пДж

6. Электрон индукциясы 10 мТл біртекті магнит өрісінде қозғалады. Оның жылдамдық векторы 1 Мм/с болған кезде магнит өрісінің бағытымен 30° бұрыш жасайды. Электрон қозғалатын бұрандалы сызықтың радиусы мен қадамын анықтаңдар.

Жауабы: $R = 0,28$ мм; $h = 3,1$ мм

7. Электрон вакуумдағы индукциясы $0,1$ Тл біртекті магнит өрісінде 3 Мм/с жылдамдықпен қозғалады. Электрон жылдамдығы мен индукция сызықтары арасындағы бұрыш 90° болса, электронға әсер ететін күш неге тең?

Жауабы: $4,8 \cdot 10^{-14}$ Н

*8. Заряды $m = 20$ г, массасы $q = 1$ мкКл шағын дене салмақсыз, ұзындығы $l = 50$ см диэлектрлік жіпке ілініп, индукциясы $B = 0,1$ Тл, күш сызықтары ауырлық күшіне перпендикуляр біртекті магнит өрісіне орналастырылған. Дене векторына перпендикуляр жазықтықта тепе-теңдік жағдайдан $h = 10$ см биіктікке жіпті керіп тұрып ауытқытқан соң бастапқы жылдамдықсыз қоя берілді (72.10-сурет). Дененің тепе-теңдік күйден өткен кезіндегі жіптің керілу күшін табыңдар.

Жауабы: $0,27$ Н

*9. Электрон зарядының оның массасына қатынасын анықтау үшін электрондар шоғы электронды-сәулелік түтікшенің катоды мен аноды арасында үдетілді. Түтіктен шыққаннан кейін электрондар индукциясы $0,5$ мТл, күш сызықтары электрондар шоғының жылдамдығына перпендикуляр біртекті магнит өрісіне енеді. Осы кезде анодтың артқы жағында тұрған крандағы жарық дақ магнит өрісі жоқ кездегі орнынан $7,5$ мм ығысады. Егер түтіктің аноды мен катоды арасындағы кернеу 10 кВ, ал анод пен экранның арақашықтығы 10 см болса, $|e|/m$ қатынасы қандай?

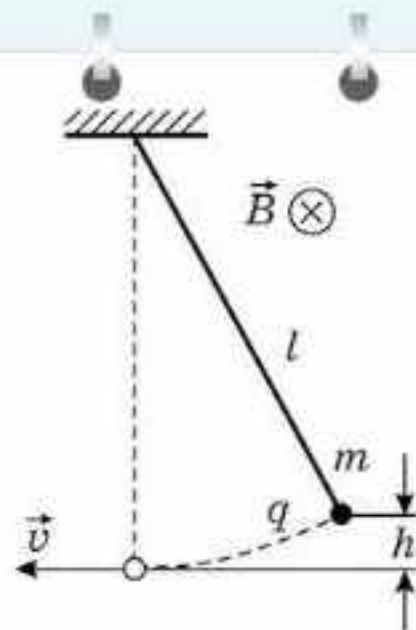
Жауабы: $1,8 \cdot 10^{11}$ Кл/кг

10. Ұзындығы $l = 50$ см, салмақсыз диэлектрлік жіпке ілінген массасы $m = 10$ г, заряды $q = 1$ мкКл кішкене шар горизонталь жазықтықта айналады. Кеңістікте индукциясы $B = 0,1$ Тл, күш сызықтары ауырлық күші бағытымен төмен бағытталған магнит өрісі бар (72.11-сурет). Қозғалыс кезінде жіп вертикальмен $\alpha = 30^\circ$ бұрыш жасайды. Шардың айналу периодын табыңдар.

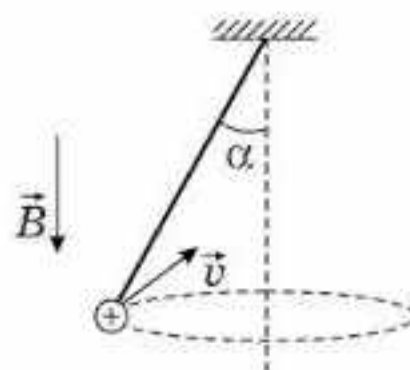
Жауабы: $1,31$ с

*11. Ұзындығы $l = 50$ см салмақсыз жібек жіпке ілінген массасы $m = 10$ г, заряды $q = 1$ мкКл кішкене шар индукциясы $B = 0,1$ Тл болатын біртекті горизонталь магнит өрісіне орналастырылған. Шар тепе-теңдік күйде болғанда оған векторына перпендикуляр бағытталған v_0 жылдамдық берілген (72.12-сурет). Жылдамдықтың қандай мәнінде шар іліну нүктесінен толық бір айналым жасайды?

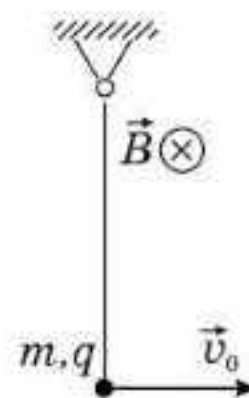
Жауабы: $v_0 \geq 5$ м/с



72.10-сурет



72.11-сурет



72.12-сурет



Рефлексия

1. Сабақта сені ойландырған...
2. Сені қандай материал таңғалдырды?
3. Сабақта өзің үшін жаңа болатын не білдің?
4. Қандай ақпарат саған болашақта қажет болуы мүмкін?

§ 73. Заттардағы магнит өрісі



Тірек ұғымдар: магнит өтімділігі, диамагнетик, парамагнетик, ферромагнетик, гистерезис тұзағы, домен.

Бүгінгі сабақта: заттарды олардың магниттік қасиеттері бойынша жүйелеуді және олардың қолдану аймағын анықтауды үйренесіңдер; магниттік материалдардың қазіргі заманғы аймақтарын талдауды және олардың қолданылу тенденциясын білесіңдер.

Эксперименттік зерттеулер барлық заттардың магниттік қасиеті болатынын көрсетті. Егер тогы бар екі орамды қандай да бір ортаға орналастырса, онда токтардың арасындағы өзара магниттік әсер күші өзгереді. Тәжірибе көрсеткендей, заттарда электр тогы туғызатын магнит өрісінің индукциясы осы токтардың вакуумда туғызатын магнит өрісінің индукциясынан өзгеше болады.

Біртекті ортадағы B магнит өрісінің индукциясы модулі жағынан вакуумдағы B_0 магнит өрісінің индукциясынан неше есе өзгеше екенін көрсететін физикалық шама *магнит өтімділігі* деп аталады: $\mu = \frac{B}{B_0}$.

Магнит өтімділігі $\mu \neq 1$ болатын заттар магнетиктер деп аталады.

Магнетиктер сыртқы магнит өрісінде магниттеледі. Заттардың магниттік қасиеттері атомдар мен олардың құрамына кіретін элементар бөлшектердің (электрондар, протондар, нейтрондар) магниттік қасиеттерімен анықталады. Протондар мен нейтрондардың магниттік қасиеттері электрондардың магниттік қасиеттерінен 1000 есе әлсіз екені тағайындалған. Сондықтан заттардың магниттік қасиеттерін атом құрамына кіретін электрондар анықтайды.

Электрондарда электр өрісі ғана емес, сонымен қатар өздік магнит өрісінің болуы — оның басты қасиеттерінің бірі. Электрондардың өздік магнит өрісі спиндік (ағылшынша *spin* — айналу) деп аталады. Электрон ядроны айнала өзінің орбиталды қозғалысы нәтижесінде дөңгелек микротоктарға ұқсас магнит өрісін туғызады. Электрондардың спиндік және магниттік өрістері олардың орбита бойымен қозғалысынан туады да, заттың магниттік қасиетінің кең спектрін анықтайды.

Заттар бір-бірінен магниттік қасиеттерімен ерекшеленеді. Көптеген заттарда бұл қасиеттер әлсіз. *Әлсіз магниттік заттар парамагнетиктер* (мысалы, алюминий, платина, азот, оттегі, вольфрам) және *диамагнетиктер* (мысалы, мыс, мырыш, висмут, шыны, инертті газдар, сутек, органикалық қосылыстар) деп аталатын екі үлкен топқа бөлінеді. Сыртқы магнит өрісіне енгізгенде парамагнетиктер олардың өздік магнит өрісі сыртқы өріспен бағыттас болатындай магниттелсе, диамагнетик заттар сыртқы өріске қарсы магниттеледі.

Парамагнетиктерде $\mu > 1$, ал диамагнетиктерде $\mu < 1$, себебі

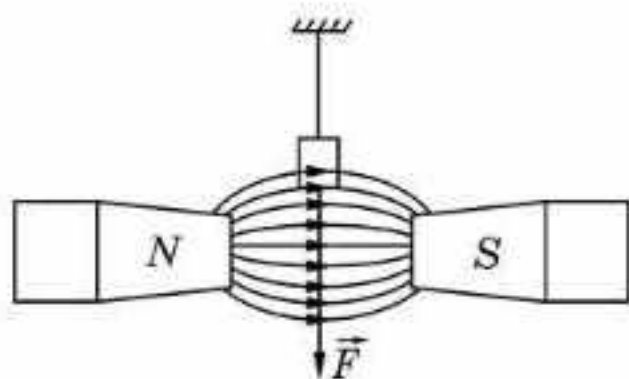
$$\mu = \frac{B}{B_0} = \frac{B_0 + \Delta B}{B_0} = 1 + \frac{\Delta B}{B_0} > 1, \quad \mu = \frac{B}{B_0} = \frac{B_0 - \Delta B}{B_0} = 1 - \frac{\Delta B}{B_0} < 1,$$

мұндағы B_0 — вакуумдағы сыртқы магнит өрісінің магнит индукциясы, B — заттағы сыртқы магнит өрісінің магнит индукциясы, ΔB — магниттелген дененің магнит индукциясы.

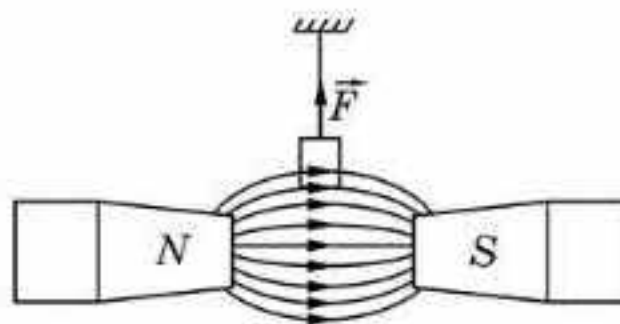
Пара- және диамагнетиктер өтімділігінің бір санынан өзгешелігі өте аз. Мысалы, алюминийде $\mu = 1,000023$, оттеkte $\mu = 1,000002$, вольфрамда $\mu = 1,000176$, мыста $\mu = 0,999990$, суда $\mu = 0,999991$, висмутта $\mu = 0,999824$. Парамагниттік заттарды электромагнит полюстерінің арасындағы біртекті магнит өрісіне орналастырса, олар күшті өріске қарай тартылады (73.1-сурет), ал диамагнетиктен жасалған заттар өрістен тебіледі (73.2-сурет).

Пара- және диамагнетизм сыртқы магнит өрісіндегі электрондық орбиталардың қасиеттерімен түсіндіріледі. Диамагнетик заттардың атомдарындағы электрондардың өздік магнит өрісі сыртқы магнит өрісі жоқ кезде электрондардың орбита бойымен қозғалысы салдарынан туатын магнит өрісін теңгереді. Диамагнетизмнің пайда болуы электрондық орбитаға әсер ететін Лоренц күшімен байланысты. Осы күштің әсерінен электрондардың орбита бойымен қозғалысының сипаты өзгереді және магнит өрістерінің теңдігі бұзылады. Осы кезде пайда болған атомның өздік магнит өрісі сыртқы өрістің индукциясына қарсы бағытталады.

Парамагнетик заттардың атомдарындағы электрондардың магнит өрісі толығымен теңгерілмеген және атом өздік магнит өрісі бар кішкентай дөңгелек токтарға ұқсас болады. Сыртқы өріс жоқ кезде осы дөңгелек микротоктар еркін (әртүрлі бағытта) орналасқан, сондықтан магнит индукцияларының қосындысы нөлге тең. Сыртқы магнит өрісінде микротоктар сыртқы магнит өрісінің бағытымен бағыттас орналасады. Бірақ атомдардың жылулық қозғалысының салдарынан микротоктар ешқашан толық бағдарланбайды, яғни барлық микротоктардың бағыты сыртқы магнит өрісімен бағыттас бола бермейді. Сыртқы магнит өрісінің артуымен микротоктардың бағдарлану эффектісі өседі, сондықтан парамагнетиктердің өзіндік



73.1-сурет



73.2-сурет

магнит өрісінің индукциясы сыртқы магнит өрісінің индукциясына тура пропорционалдық қатынаста артады. Парамагнетиктердегі толық магнит өрісінің индукциясы сыртқы магнит өрісінің индукциясы мен магниттелу процесінде пайда болған өздік магнит өрісінің индукциясының қосындысынан тұрады. Парамагнетиктердің магниттелу механизмі полюстік диэлектриктердің поляризациялану (үйектелу) механизміне өте ұқсас. Заттардың электрлік қасиеттерінің ішінде диамагнетизмнің аналогі жоқ.

Кез келген заттың атомдары диамагниттік қасиетке ие. Дегенмен көп жағдайларда атомдардың диамагнетизмі өте күшті парамагниттік эффектісінен байқалмай қалады. Диамагнетизм эффектісін 1845 жылы М. Фарадей ашты.

Магнит өрісінде күшті магниттелетін заттар ферромагнетиктер деп аталады. Олардың магнит өтімділігі $10^2—10^5$ аралығында жатады. Мысалы, болатта $\mu = 8\ 000$, темір мен никель қоспасында $\mu = 250\ 000$.

Ферромагнетиктер тобына төрт химиялық элемент жатады: темір, никель, кобальт, гадолиний. Олардың ішінде темірдің магнит өтімділігі жоғары. Сондықтан осы топ *ферромагнетик* деген атауға ие болған.

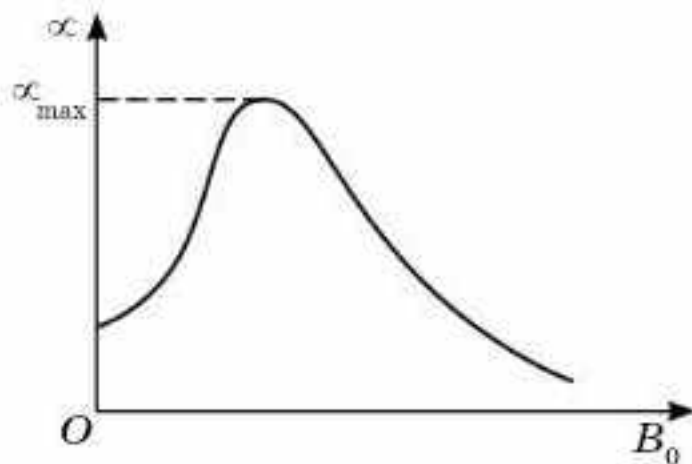
Құрамында ферромагниттік элементтер бар әртүрлі қоспаларда да ферромагниттік қасиеттер бар. Керамикалық ферромагниттік материал — *ферриттер* техникада кең қолданылады. Ферриттер ток өткізбейтін қасиетімен ферромагнетиктерден ерекшеленеді.

Әрбір ферромагнетиктің *Кюри температурасы (нүктесі)* деп аталатын белгілі бір температурасы болады. Осы температурадан жоғары температурада ферромагниттік қасиеттер жойылып, зат парамагнетикке айналады. Темірдің Кюри температурасы 770°C , кобальт үшін ол 1130° тең, никельде 360°C .

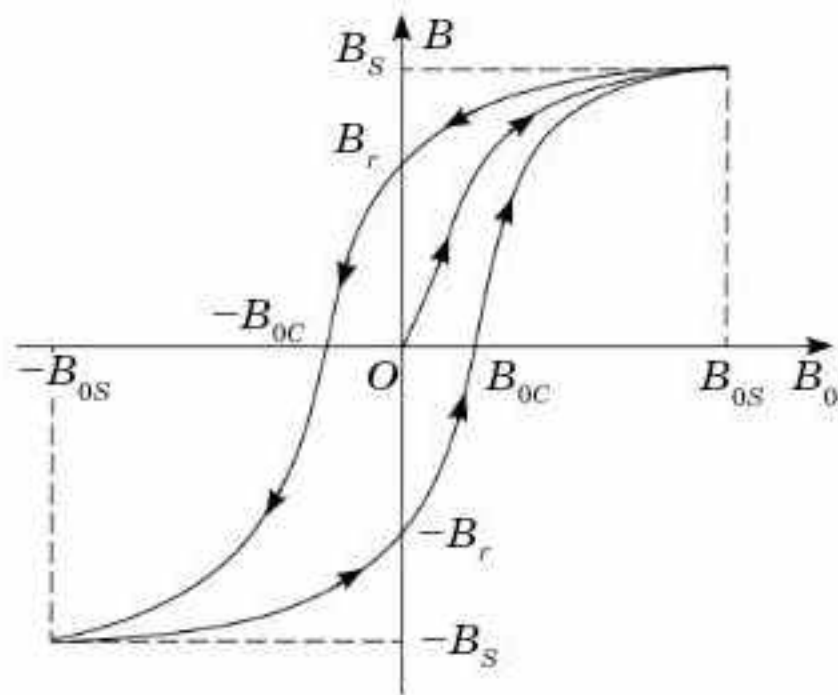
Ферромагниттік материалдар *жұмсақ магнитті* және *қатаң магнитті* материал деп аталатын екі үлкен топқа бөлінеді. Сыртқы магнит өрісі жоғалған кезде жұмсақ магнитті ферромагниттік материалдар магниттік қасиетінен толығымен айырылады. Оларға таза темір, электротехникалық болат және кейбір қорытпалар жатады. Бұл материалдар үздіксіз қайта магниттелетін, яғни магнит өрісі өз бағытын үнемі өзгертіп отыратын айнымалы ток құралдарында (трансформаторлар, электрқозғалтқыштар т.б.) қолданылады.

Қатаң магнитті материалдар магниттік қасиетін сыртқы магнит өрісі жоқ кезде де сақтайды. Қатаң магнитті материалдарға көміртекті болат және арнайы қоспалардың қатары жатады. Қатаң магнитті материалдар, негізінен, *тұрақты магниттер* жасау үшін қолданылады.

Ферромагнетиктердің магниттік өтімділігі тұрақты шама болып табылмайды. Ол сыртқы өрістің B_0 индукциясына тәуелді. $\mu(B_0)$ тәуелділігі 73.3-суретте көрсетілген. Кестелерде, әдетте, магниттік өтімділіктің ең үлкен мәні беріледі.



73.3-сурет



73.4-сурет

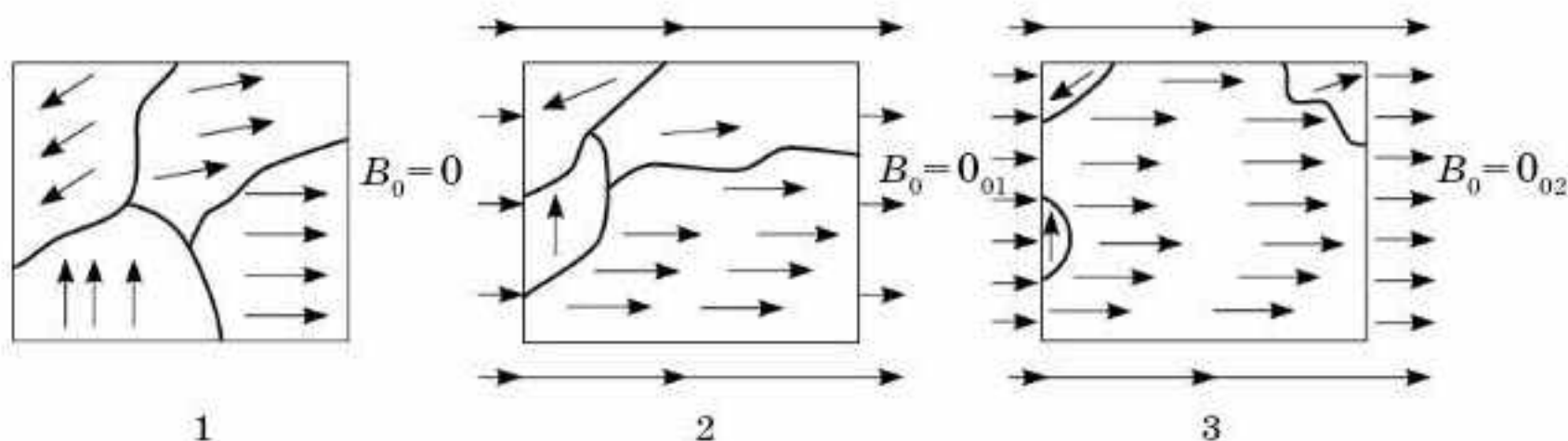
Магниттік өтімділіктің тұрақсыздығы ферромагнетиктердегі B магнит өрісі индукциясының B_0 сыртқы магнит өрісінің индукциясына күрделі, сызықты емес тәуелділігіне әкеледі. *Магниттік гистерезис* (грекше “гистерезис” — кешігу) ферромагнетиктердің магниттелу процесінің ерекше сипаты болып табылады. Магниттелу материалдың магниттелуінің алдындағы тарихына тәуелді. Ферромагниттік заттардың $B(B_0)$ магниттелу қисығы *гистерезис тұзағы* деп аталатын күрделі пішінді тұзақ тәріздес қисық береді (73.4-сурет).

73.4-суреттен $|B_0| > B_{0s}$ кезінде заттың магниттік қасиетінің ең үлкен мәніне жетіп, магниттік қанығудың басталатынын көреміз. Егер енді сыртқы өрістің B_0 магнит индукциясын азайтып, оны қайтадан нөлдік мәнге жеткізсек, онда ферромагнетик қалдық магниттелуді сақтайды, заттың ішіндегі өрістің индукциясы B_r -ге тең болады.

Заттардың қалдық магниттелуі тұрақты магнит жасауға мүмкіндік береді. Заттың магниттік қасиетін толығымен жою үшін сыртқы өрістің таңбасын өзгертіп, B_0 магнит индукциясын *коэрцитивтік күш* деп аталатын B_{0c} мәніне дейін жеткізу керек. Әрі қарай қайта магниттеу процесін 73.4-суретте көрсетілген нұсқамаларға сәйкес жалғастыру мүмкін.

Жұмсақ магнитті заттардағы B_{0c} коэрцитивтік күштің мәні үлкен емес — мұндай материалдың гистерезис тұзағы жеткілікті “жіңішке”. Коэрцитивтік күшінің мәні үлкен материалдар, яғни гистерезис тұзағы “жалпақ” болатын заттар қатаң магнитті затқа жатады.

Ферромагнетизмнің табиғаты кванттық көзқарас тұрғысынан ғана толық түсіндірілуі мүмкін. Электрондардың меншікті (спиндік) магнит өрісінің болуы ферромагнетизмге сапалық түсінік береді. Ферромагниттік материалдардың кристалдарында көрші электрондардың күшті спиндік магниттік өрістерінің өзара әсерінен электрондардың параллель бағыттарының (ориентациясы) энергетикалық қолайлы болу



73.5-сурет

шарты туындайды. Осындай өзара әсер нәтижесінде ферромагниттік кристалдардың ішінде 10^{-3} — 10^{-1} мм шамасындай өлшемі бар магниттелген облыстар өздігінен пайда болады. Мұндай облыстар *домендер* деп аталады. Әрбір домен кішкене тұрақты магнит тәріздес болады.

Сыртқы магнит өрісі жоқ кезде әртүрлі домендердегі магнит өрісі ферромагнетиктерде бейберекет бағытталған. Сондықтан ферромагнетик магниттелмеген болып шығады. B_0 сыртқы магнит өрісінде домендер шекарасының ығысуы байқалады, сыртқы өріс бағытымен бағыттас домендер көлемі артады. Сыртқы магнит өрісі индукциясының артуымен магниттелген заттың магнит индукциясы да артады. Өзіндік және сыртқы магнит өрістері сәйкес келетін домендер өте күшті магнит өрісінде қалған домендерді жұтады да, магниттік қанығу басталады.

73.5-суретте ферромагнетик заттардың магниттелу процесі көрнекі түрде көрсетілген.

Сыртқы магнит өрісінен ферромагнетиктерді алған кезде көптеген домендер өздерінің жаңа бағытын сақтайды, сондықтан ферромагнетиктер магниттелген қалпында қалады. Магниттік қасиетті жою үшін ферромагнетиктерге механикалық әсер ету керек немесе Кюри температурасына дейін қыздырады (осы кезде домендер хаосты бағытқа қайтадан ие болады).

Магнит өрісінде орналасқан өткізгіштегі токқа Ампер күші әсер етеді де орын ауыстыру арқылы жұмыс жасайды. Келесі мысалдарды қарастырайық:

1-мысал. Ток 50 А ток күшіне ұзындығы 20 см болатын өткізгіш 40 мТл индукциясымен біртекті магнит өрісінде орналасқан. Электр өткізгіштің магнит индукциясы векторына перпендикуляр 10 см жылжытқанда, ток жұмыс жасайды (магнит индукциясы векторы ток өткізгіштің бағытына перпендикуляр).

Ампер күші жасаған жұмыс көлемі: $A = F\Delta x = BIl\sin\alpha \cdot \Delta x = BIl\Delta x$ тең.

Сандық мәндерді қойып, есептеу жүргізгенде: $A = 40$ мДж болады.

2-мысал. Ұзындығы 0,15 м болатын өткізгіш магнит индукциясы векторға перпендикуляр бағытталған, оның модулі $B = 0,4$ Тл. Электр өткізгіштегі ток күші — 8 А. Өткізгіштің Ампер күшінің бағыты бойынша 2,5 см жылжыған кезде жасалынған жұмыстарды табыңдар. Ампер күші жасаған жұмыс: $A = F\Delta x = BIl\sin\alpha \cdot \Delta x = BIl\Delta x$ тең.

Сандық мәндерді қойып есептеулер жүргізейік, $A = 12$ мДж болады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Магнетиктер деп қандай заттар аталады?
2. Заттың магниттік өтімділігінің физикалық мағынасы қандай?
3. Парамагнетик дегеніміз не?
4. Қандай қасиеттері үшін заттар диамагнетиктер деп аталады?
5. Қандай заттар ферромагнетиктер деп аталады?
6. Кюри нүктесі дегеніміз не?
7. Ферромагнетизм теориясы қалай түсіндіріледі?



Рефлексия

1. Сабақта сені ойландырған...
2. Сені қандай материал таңғалдырды?
3. Сабақта өзің үшін жаңа болатын не білдің?
4. Қандай ақпарат саған болашақта қажет болуы мүмкін?



Кеңістікте тогы бар өткізгіштің және қозғалыстағы зарядталған бөлшектердің төңірегінде магниттік өзара әсерді тартатын, үзіліссіз материяның үзіліссіз ерекше түрі — *магнит өрісі* болады. Магнит өрісі құйынды (тұйық) сипатқа ие болуымен электростатикалық өрістен ерекшеленеді. *Магнит өрісінің бағытын оң қол ережесі бойынша анықтайды*: егер оң қолдың бас бармағын өткізгіштегі ток бағытымен бағыттасақ, онда қалған төрт саусақтың өткізгішті орай ішке қарай бағытталған бағыты магнит өрісінің (күш сызықтарының) бағытын көрсетеді.

Магнит өрісінің күш сызықтарының бағытын бұранда ережесінің көмегімен де табуға болады.

Магнит өрісі магнит индукция векторымен сипатталады:

$$B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}.$$

Магниттік индукция векторы **тесламен** өлшенеді:

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}.$$

Магнит өрісін толық сипаттау үшін магнит индукция векторының ағыны немесе магнит ағыны ұғымы енгізілген:

$$\Phi = BS \cdot \cos\alpha.$$

Магнит ағынының ХБ жүйесіндегі өлшем бірлігі — **вебер**:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2.$$

Тогы бар өткізгішке магнит өрісі тарапынан Ампер күші әсер етеді:

$$F_A = BI\Delta l \sin\alpha.$$

Магнит өрісіндегі тогы бар рамкаға оны айналдыратын Ампер күшінің моменті әсер етеді: $M_{\max} = BIS$.

Зарядталған бөлшекке магнит өрісі тарапынан Лоренц күші әсер етеді:

$$F_L = Bqv\sin\alpha.$$

Заттардағы магнит өрісі өзгеріп отырады. Магнит өрісі өзгертін заттарды *магнетиктер* деп атайды. Магнетиктерді *диамагнетиктер* (сыртқы магнит өрісін азайтады), *парамагнетиктер* (сыртқы магнит өрісін күшейтеді) және *ферромагнетиктер* (сыртқы магнит өрісін көп есе күшейтеді) деп бөледі.

Ферромагнетиктердің ерекше қасиеттері кеңінен қолданылады.

14-тарау. ЭЛЕКТРОМАГНИТТІК ИНДУКЦИЯ

§ 74. Электромагниттік индукция заңы



Тірек ұғымдар: электромагниттік индукция, индукциялық ток, индукцияның ЭҚК, электромагниттік индукция заңы.

Бүгінгі сабақта: электромагниттік индукция құбылысын кім және қалай ашқанын білесіңдер, бұл құбылыстың мәнін анықтайсыңдар, Фарадей тәжірибелерімен танысып, контурдағы ЭҚК қалай пайда болатынын және ол неге тәуелді екенін білесіңдер.

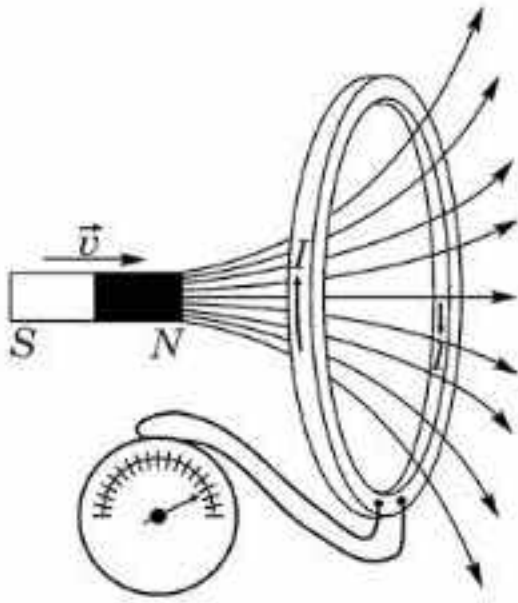
Электромагниттік индукция құбылысын ашудың алдын ала жағдайлары. Эрстед ашқан тогы бар өткізгіштің маңайындағы магнит өрісінен кейін ғалымдардың көпшілігі, атап айтқанда, Ампер, Фарадей және т.б. осы құбылыстың терең де жан-жақты зерттеулерін бастады. Ғалымдар егер ток өзінің төңірегіндегі кеңістікте магнит өрісін тудыратын болса, онда магнит өрісі де өз кезегінде өткізгіште электр тогын тудыруы тиіс деген сенімде болды. Мұндай пайымдау үшін дәлел болатын факт — ол әлемдегі көптеген құбылыстардың симметриялы болып келуі, айталық оң және теріс заряд, солтүстік пен оңтүстік магнит полюстері және т.б.

Сонымен, сол кездің физиктердің алдында тұрған мәселені қарапайым түрде былайша тұжырымдауға болатын еді: егер ток магнит өрісін тудыра алатын болса, онда магнит өрісінің көмегімен контурда токты қоздыруға болмас па екенін анықтау.

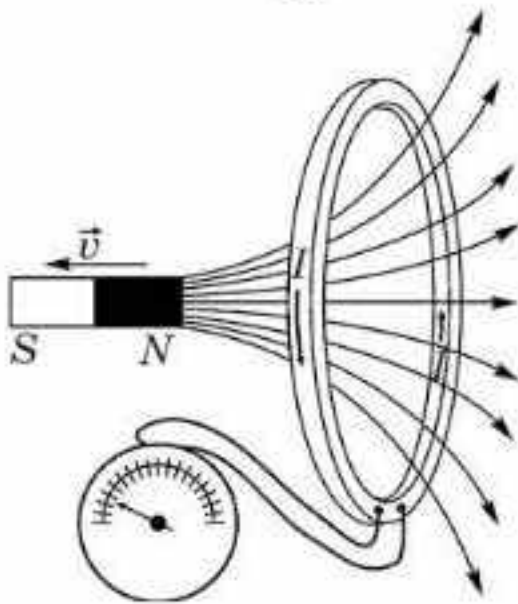
Фарадей тәжірибелері. 1831 жылы алғаш рет осы құбылысты тәжірибе жүзінде ағылшын физигі М. Фарадей анықтады. Фарадейдің жасаған негізгі тәжірибелерінің біреуі соншалықты қарапайым, оны сендер өздерің-ақ қайталай аласыңдар. Ол үшін тұрақты магнит, сезгіш гальванометр, ұштары гальванометрге жалғанатын іші қуыс цилиндр тәрізді катушка немесе жай ғана тұйық контур керек. Егер магнитті контурдың ішіне енгізетін болсақ, не одан суыратын болсақ, онда гальванометр тілшесінің ауытқитынын, яғни, контурда токтың пайда болуын байқай аласыңдар. Ал егер контурға қатысты магнит қозғалмаса, онда токтың ешқандай белгісін көре алмайсыңдар.

Контурда пайда болатын токты *индукциялық ток* деп атады. Фарадейдің пайымдауынша, индукциялық ток магниттің контурға қатысты қозғалысы кезінде ғана пайда болады. Ал егер магнит пен контурдың өзара орналасуы өзгермесе, онда тізбекте индукциялық ток пайда болмайды.

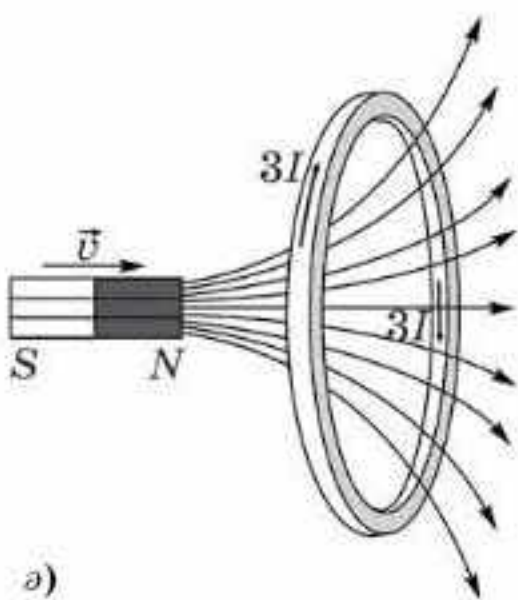
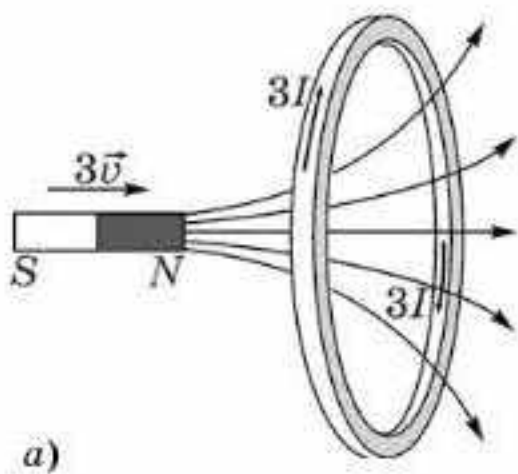
Өзі ашқан құбылыстың мәнін анықтау мақсатында, көптеген тәжірибелер жүргізу арқылы, Фарадей индукциялық ток неліктен пайда болады және оның шамасы неге тәуелді болуы мүмкін деген сұрақтарға жауап алуға тырысты. Осы тәжірибелерді жасау кезінде Фарадейдің тапқан кейбір фактілерін қарастырайық.



74.1-сурет



74.2-сурет



74.3-сурет

1. Магнитті контурдың ішіне енгізгенде пайда болатын индукциялық токтың бағыты, оны контурдан суырғанда пайда болатын индукциялық токтың бағытына қарама-қарсы (74.1- және 74.2-суреттер).

2. Магнитті контурға қатысты неғұрлым жылдамырақ қозғалтса, гальванометр тілінің ауытқуы соғұрлым үлкен болады (74.3, а-сурет).

3. Тәжірибеде пайдаланылатын жолақ магниттердің саны неғұрлым көп болса, гальванометр тілінің ауытқуы соғұрлым үлкен болады (74.3, ә-сурет).

4. Жолақ магнитті тогы бар катушкамен алмастырсақ және бірінші катушканың ұштарын гальванометрге жалғап, екінші катушка арқылы ток жіберсек, онда токты қосып-ажыратқанда және реостат арқылы ток күшін арттырып-азайтқанда, гальванометрдің тілшесі ауытқиды (74.4-сурет). Токты қосқанда және ажыратқанда, катушкаларды жақындатқанда гальванометрдің тілшесі бір жаққа, ал токты ағытқан кезде немесе азайтқан кезде немесе катушкаларды бір-бірінен алыстатқанда ол басқа жаққа ауытқиды.

5. Егер деформация арқылы катушканың көлемін өзгертсе, онда токтың пайда болатыны тағайындалған. Индукциялық токтың бағыты катушканың көлемінің өзгерісіне байланысты (74.5-сурет).

6. Егер контурды біртекті магнит өрісінде индукция сызықтары оның жазықтығына перпендикуляр болатындай етіп орын ауыстырса, онда гальванометр токты көрсетпейді (74.6-сурет).

Фарадейдің тәжірибелерінен мынандай қорытындыға келеміз:

1. *Контурда оны тесіп өтетін магнит өрісі индукция векторының ағыны уақыт бойынша өзгертін кезде ғана индукцияның ЭҚК пайда болады, яғни $\Delta\Phi \neq 0$.*

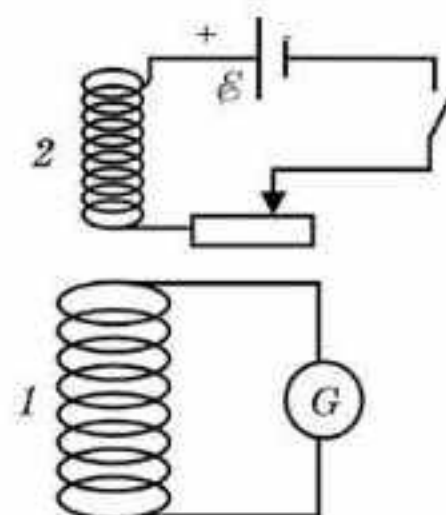
2. *Индукциялық токтың шамасы контурды тесіп өтетін магнит ағынының өзгеріс жылдамдығына, яғни $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ шамасына тәуелді.*

3. Өткізгіш магнит өрісінің күш сызықтарын қиып өткенде контурда индукциялық ток пайда болады. Бұл тәжірибелерді жоққа шығармайды.

Өз тәжірибелерін жалпылай отырып, Фарадей мынадай қорытындыға келді: контурда пайда болатын индукцияның ЭҚК контурды тесіп өтетін магнит ағыны өзгерісіне тура пропорционал:

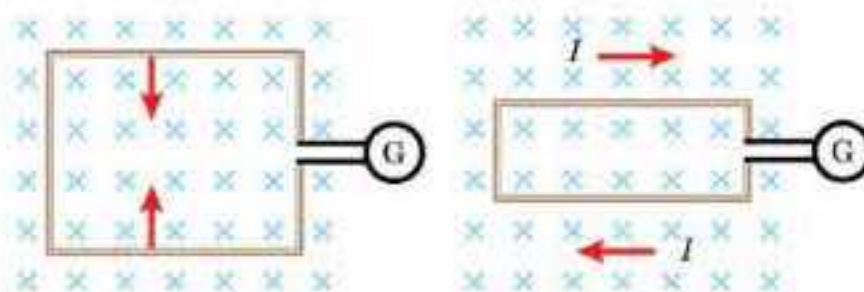
$$|\mathcal{E}| = k \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|. \quad (74.1)$$

Халықаралық бірліктер жүйесінде Φ магнит ағыны вебермен (Вб) өлшенеді, ал (74.1) формуладағы k пропорционалдық коэффициенті өлшемсіз және мәні 1 тең. Демек, Фарадейдің электромагниттік индукция заңын былай өрнектеуге болады:

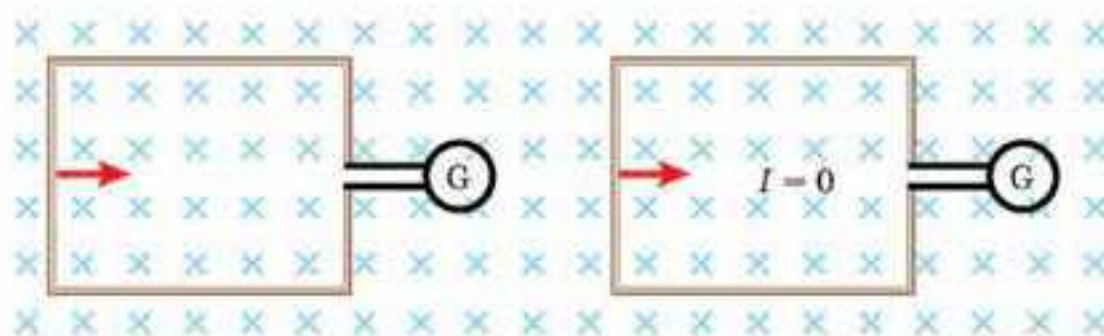


74.4-сурет

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (74.2)$$



74.5-сурет



74.6-сурет



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Электромагниттік индукция құбылысын түсіндіріңдер. Оны ашқан кім?
2. Электромагниттік индукция құбылысын тәжірибе арқылы бақылауға болатынына мысалдар келтіріңдер.
3. а) Магнитті тыныштықтағы тұйық контурға енгізсек; ә) тыныштықтағы магнитке тұйық контурды енгізсек, индукцияның ЭҚК мен индукциялық ток пайда бола ма? Контурды тұйықтасақ не болады?
4. Егер тұйық токты магнит өрісіне параллель бағытта қозғалысқа келтірсе индукцияның ЭҚК мен индукциялық ток пайда бола ма?
5. Контур біртекті магнит өрісіне қойылған. а) Контур магнит өрісінің күш сызықтарына перпендикуляр қозғалған; ә) контур өріске қатысты қайсыбір бұрышпен ілгерілемелі қозғалған; б) контур өрісте қандай да бір осьті айнала бұрылған индукциялық ток осы жағдайлардың қайсысында пайда болады?

Шығармашылық шеберхана

Тәжірибе жасаңдар

Катушка, мультиметр және тұрақты магнитті пайдаланып, Фарадейдің тәжірибелерін өздерің жасаңдар. Индукциялық токтың шамасы мен бағытына қандай факторлар әсер ететініне көңіл аударыңдар.

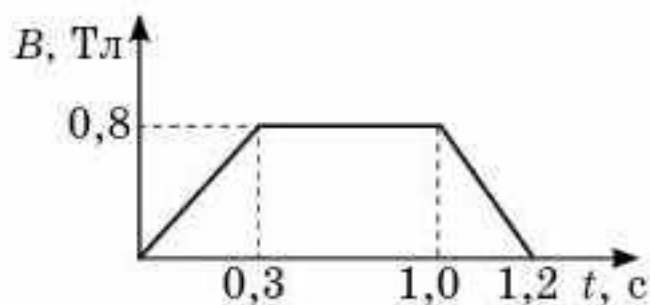
Түсіндіріңдер

Мыстан жасалған түтіктің ішінде оның осі бойымен магнит еркін құлайды. Магнит H биіктіктен құлағандағы оның жылдамдығын есептеу үшін неліктен $v = \sqrt{2gH}$ формуласын пайдалануға болмайды?

Шығарыңдар

1. 32 с уақыт ішінде катушка арқылы өтетін магнит ағыны 24 мВб мәнінен 50 мВб мәніне дейін өзгергенде, ондағы туындайтын индукцияның орташа ЭҚК 10 В болу үшін, катушканың орамдар саны нешеге тең болуы тиіс?

Жауабы: 12,3



74.7-сурет

2. Біртекті магнит өрісі уақытқа орай 74.7-суретте көрсетілгендей өзгереді. Жазықтығы магнит өрісіне перпендикуляр орналасқан сақинадағы индукциялық токтың уақытқа тәуелділік графигін тұрғызыңдар. Сақинаның кедергісі 0,02 Ом, ауданы 14 см².

■3. Массасы 1 г мыс сымнан квадрат тәрізді контур жасап, оның ұштарын тұйықтады. Квадрат контурды индукциясы 0,1 Тл магнит өрісіне, оның индукция

сызықтары квадрат жазықтығына перпендикуляр болатындай етіп орналастырды. Егер квадратты оның қарсы жатқан ұштарынан тартып, бір сызыққа созса, өткізгіш арқылы қанша заряд өтеді?

Жауабы: 41,4 мКл

Рефлексия

1. Осы параграфта өткен материалдың қайсысы түсініксіз болды?
2. Өтілген материалды қандай деңгейде түсіндіңдер?
3. Тақырыптағы материалды қосымша түсіндіру керек пе?

§ 75. Ленц ережесі



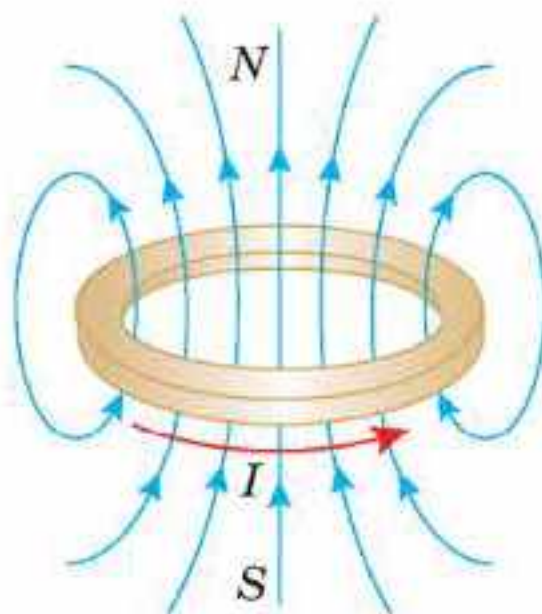
Тірек ұғымдар: магнит ағыны, индукциялық ток.

Бүгінгі сабақта: индукциялық ток неге тәуелді болатынын білесіңдер; контурдағы индукциялық токтың бағытын анықтауды үйренесіңдер.

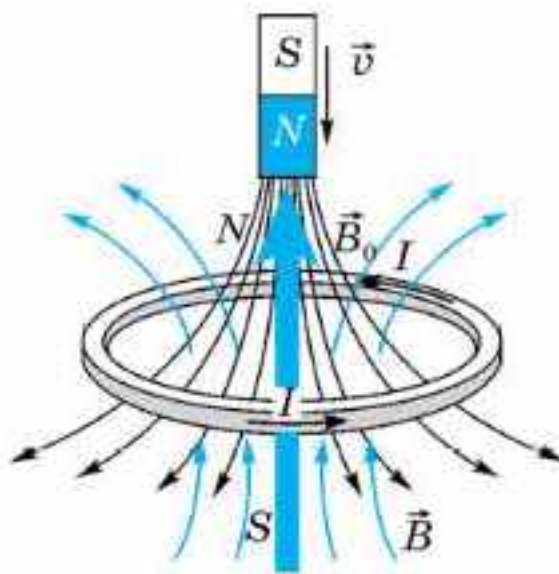
Тоғы бар контурдың магнит өрісі. Магнит өрісінің индукция сызықтарының тұйық екені және шарт бойынша олар солтүстік полюстен шығып, оңтүстік полюске кіріп жататыны белгілі. Тіптен тоғы бар жіңішке деген жазық контурдың да солтүстік-оңтүстік полюстері бар (75.1-сурет). Токтың берілген бағытында контурдың үстінде солтүстік полюс, ал астында оңтүстік полюс орналасады.

Энергияның сақталу заңы және индукциялық токтың бағыты. Контурды горизонталь орналастырып Фарадейдің бірінші тәжірибесін қайтадан жасайық. Магнитті солтүстік полюсімен қаратып контурға енгізетін болсақ, оның үстінгі жағында контурдағы индукциялық токтың тудыратын магнит өрісінің солтүстік полюсі пайда болады (75.2-сурет). Мұның себебін энергияның сақталу заңына сүйене отырып түсіндіруге болады.

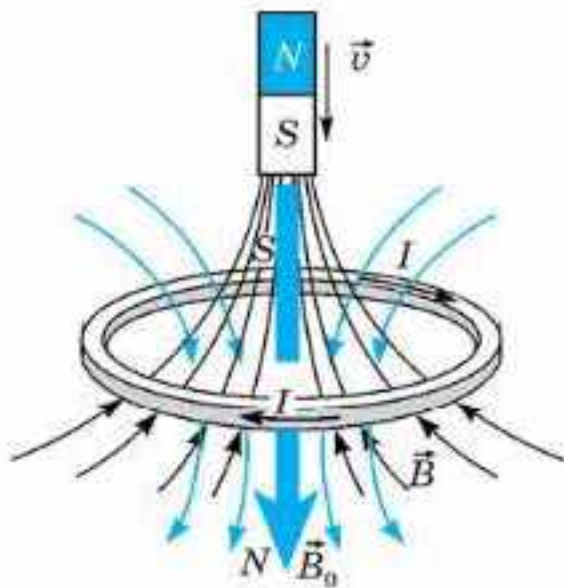
Шынымен, егер жағдай керісінше болып, контурдың үстінде оңтүстік полюс пайда болады десек, онда, біріншіден, магнит қозғалған кезде пайда болатын индукциялық ток Джоуль—Ленц заңына сәйкес контурда жылу бөліп шығарар еді. Екіншіден, бұл жолы магнит пен индукциялық тоғы бар контурдың полюстері біріне-бірі тартылып, нәтижесінде магниттің кинетикалық энергиясы артатын еді. Ал бұл энергияның сақталу заңына қайшы келетін еді. Демек, контурдағы индукциялық ток 75.2-суреттегідей үстінен қарағанда сағат тілшесіне қарсы бағытталады. Егер магнитті контурға оңтүстік полюсімен қаратып енгізсек, онда контурдағы индукциялық токтың бағыты 75.2-суреттегімен салыстырғанда қарама-қарсыға ауысқанының дәлелі болып, контурдың үстіңгі жағында оңтүстік полюс орнайды (75.3-сурет). 75.2-және 75.3-суреттерді бір-бірімен салыстыра отырып, осы екі жағдайдың әрқайсысында индукциялық токтың тудыратын \vec{B} магнит өрісі магниттің тудыратын өрісінің \vec{B}_0



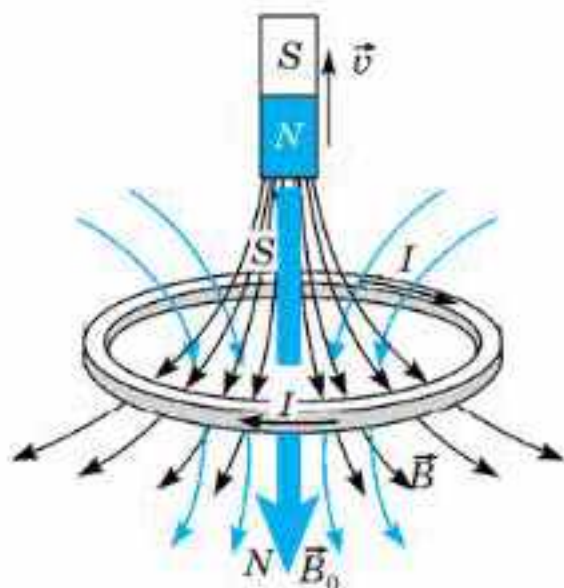
75.1-сурет



75.2-сурет



75.3-сурет



75.4-сурет

индукция векторының артып келе жатқан ағынына қарсы бағытталғанын көреміз.

Енді магнитті солтүстік полюсімен қаратып контурдан суырайық. Бұл жолы контурдың үстінде оңтүстік полюстің пайда болуын күтуге болады (75.4-сурет). Сонда сыртқы күш магниттің солтүстік полюсі мен контурдың оңтүстік полюсінің бір-біріне тартылысын жеңуге кететін жұмыс атқарады. Контурдағы индукциялық ток дәл осы жұмыстың есебінен пайда болуы тиіс.

Демек, энергияның сақталу заңы орындалу үшін, индукциялық токтың бағытын 75.2-суреттегімен салыстырғанда қарама-қарсы бағытқа өзгерту керек. Осы кезде индукциялық токтың тудыратын \vec{B} магнит өрісінің бағыты да қарама-қарсыға өзгереді.

75.2, 75.3-суреттерді бір-бірімен салыстырайық. 75.2-суретте магниттің магнит өрісінің контурды тесіп өтетін ағыны артады: $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$. Ал, индукциялық токтың магнит өрісі ағынының артуына кедергі жасайды.

75.4-суретте магнитті суыра отырып, біз магниттің магнит өрісінің контурды тесіп өтетін магнит ағынын кемітеміз, яғни $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$, бірақ бұл жағдайда да индукциялық токтың магнит өрісі өзі тудырған магнит ағынының өзгерісіне кедергі жасайды.

Ленц ережесі. Жоғарыда қарастырылған жағдайлардың барлығын жалпылай отырып, біз индукциялық токтың бағытын анықтайтын *Ленц ережесін* былай деп тұжырымдауымызға болады: *индукциялық ток өзін тудырған магнит ағынының өзгерісіне қарсы әсер ететін магнит өрісін тудыратындай бағытталады.*

Ленц ережесін ескере отырып, Фарадейдің электромагниттік индукция заңын мына түрде жазуға болады:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (75.1)$$

Ленц ережесін көрнекі дәлелдейтін тәжірибелердің біреуінде вертикаль оське қатысты еркін айнала алатын сырыққа бекітілген жеңіл алюминий сақина мен тұрақты магнитті пайдаланады (75.5-сурет). Тәжірибеде байқайтынымыз: егер тұрақты магнитті сақинаның ішіне

енгізбекші болсақ, ол магниттен тебіліп, одан алыстауға тырысады, ал егер магнитті сақинаның ішінен суырсақ, сақина магнитке қарай тартылады. Егер сақина тұйықталмаған болса, ол магниттің қозғалғанына қарамастан өз орнында қала береді.



75.5-сурет

Тұйық контурдағы ток күші $I = \frac{\mathcal{E}}{R}$ тең, мұндағы R — контурдың кедергісі. Олай болса, электромагниттік индукция заңын индукциялық токқа сәйкес былай жазуға болады:

$$I_i = -\frac{1}{R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad (75.2)$$

Ленц ережесін пайдалану. Ленц ережесі көмегімен индукциялық токтың бағытын анықтаудың алгоритмі:

1. Сыртқы магнит өрісінің \vec{B}_0 индукция векторының (индукция сызықтарының) бағытын анықтау. Өрістің индукция сызықтары қарастырылып отырған контурды тесіп өтуі тиіс.

2. Магнит ағынының қалай өзгертінін ($\Delta\Phi$ таңбасын) анықтау.

3. Индукциялық токтың тудыратын магнит өрісінің \vec{B} индукция векторының (индукция сызықтарының) бағытын анықтау. Бұл өріс $\Delta\Phi > 0$ болған жағдайда сыртқы \vec{B}_0 магнит өрісіне қарама-қарсы бағытталады, ал $\Delta\Phi < 0$ болған жағдайда онымен бағыттас болады.

4. \vec{B} магнит өрісінің бағыты белгілі болса, онда индукциялық токтың бағытын оң бұранда ережесі бойынша анықтауға болады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Тұйық контурға тік магнитті енгізгенде индукциялық токтың пайда болуын түсіндіріңдер.
2. Тұйық контурда пайда болған индукция тогының шамасын қалай есептейміз?
3. Индукциялық ток пен сыртқы магнит өрісінің ағыны өзара қандай қатынаста болады?
4. Ленц ережесін тұжырымдаңдар.
5. Магнит ағыны мен дене импульсі арасындағы ұқсастықты неге сөз еттік?

Шығармашылық шеберхана

Түсіндіріңдер

1. Магнит полюстерінің бірін катушкаға жақындатқанда оның ішінде индукциялық ток пайда болады. Энергияның сақталу заңына сүйеніп, индукциялық токтың бағытын қалайша алдын ала болжауға болады?

2. 75.2-75.4 суреттерде көрсетілмеген, магнитті контурдан оңтүстік полюсімен қаратып суыратын жағдай үшін ұқсас сызбаны тұрғызыңдар. Сызбада магниттің \vec{B}_0 және индукциялық токтың тудыратын \vec{B} өрістерінің индукция сызықтарын салыңыздар және индукциялық токтың бағытын көрсетіңдер

Талдаңдар

Егер электромагниттік индукция заңындағы магнит ағыны өзгерісінің таңбасы теріс емес, оң болса, онда қандай қызық құбылыстарды бақылауға болар еді?

Шығарыңдар

1. Екінші тізбектегі ток 75.6-суретте көрсетілгендей бағытталуы үшін ток көзі бар тізбектегі кілтті тұйықтау керек пе, әлде ажырату керек пе? Жауаптарыңды түсіндіріңдер.

Жауабы: тұйықтау керек

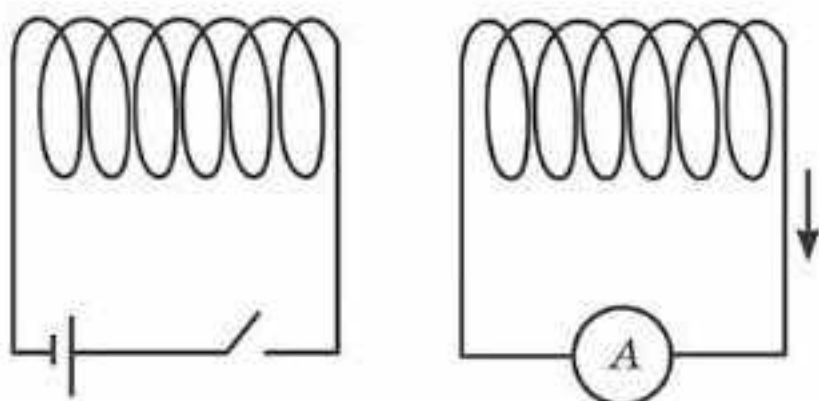
2. Магнитті катушканың ішіне енгізу үшін атқарылатын жұмыс: 1) катушка тұйықталған; 2) катушка ажыратылған жағдайлар үшін бірдей ме?

Жауабы: бірінші жағдайда A үлкенірек

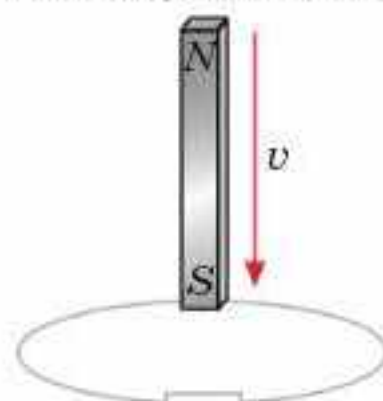
3. Жолақ магнитті горизонталь орналасқан өткізгіш сақинаның үстінде оның оңтүстік полюсі төмен қарап тұратындай ұстап тұр (75.7-сурет). Магнитті сақина арқылы өтетіндей етіп босатып жібереді. Сақинадағы резистор арқылы өтетін индукциялық токтың бағытын мына жағдай үшін анықтаңдар: а) магнит сақинаға жақындап келе жатқан уақытта; ә) магнит сақинаны өтіп, одан алыстап бара жатқан уақытта.

Жауабы: жоғарыдан төменге қарағанда:

а) сағат тілімен; ә) сағат тіліне қарсы



75.6-сурет



75.7-сурет

Рефлексия

1. Осы параграфта өткен материалдың қайсысы түсініксіз болды?
2. Өтілген материалды қандай деңгейде түсіндіңдер?
3. Тақырыптағы материалды қосымша түсіндіру керек пе?

§ 76. Жылжып келе жатқан өткізгіштердегі индукцияның ЭҚК



Тірек ұғымдар: энергияның сақталу заңы, индукцияның электр қозғаушы күші, Лоренц күші, электромагниттік индукция заңы.

Бүгінгі сабақта: магнит өрісінде қозғалып келе жатқан өткізгіштегі индукцияның ЭҚК қалай пайда болатынын білесіңдер, магнит өрісінде қозғалып келе жатқан өткізгіштегі индукцияның ЭҚК есептеуді үйренесіңдер.

Алдыңғы параграфтарда қарастырылған тәжірибелерде, индукцияның ЭҚК айнымалы магнит өрісінде қозғалмай тұрған тұйық контурларда туындайтын еді. Алайда, индукцияның ЭҚК тұрақты магнит өрісінде қозғалатын өткізгіштер жағдайларында да пайда болуы мүмкін.

Индукцияның ЭҚК Лоренц күшінің көмегімен есептеу. Индукция сызықтары сурет жазықтығына перпендикуляр бағытталған (оқырманнан параққа қарай) индукциясы \vec{B} біртекті магнит өрісінде ұзындығы l өткізгіш өріске перпендикуляр бағытта \vec{v} тұрақты жылдамдықпен қозғалсын делік (76.1-сурет). Өткізгіштің еркін электрондарына магнит өрісі тарапынан өткізгіштің бойымен және \vec{v} мен \vec{B} векторларының екеуіне де перпендикуляр бағытталған

$$F_B = evB$$

Лоренц күші әсер етеді. Электрондардың бұл күштің әсерінен өткізгіштің төменгі ұшына қарай орын ауыстырып, сонда жинақталуы, өткізгіштің төменгі ұшының теріс зарядқа, ал жоғары жатқан ұшының оң зарядқа ие болуына әкеледі. Зарядтардың бөліну нәтижесінде, өткізгіште кернеулігі \vec{E} электр өрісі пайда болады. Электр өрісі электрондарға жоғары қарай бағытталған $F_s = eE$ күшпен әсер етеді. Өткізгіштің ұштарында зарядтардың жинақталуы, Лоренц күші электр күшімен теңескен жағдайда ғана тоқтайды $F_B = F_s$.

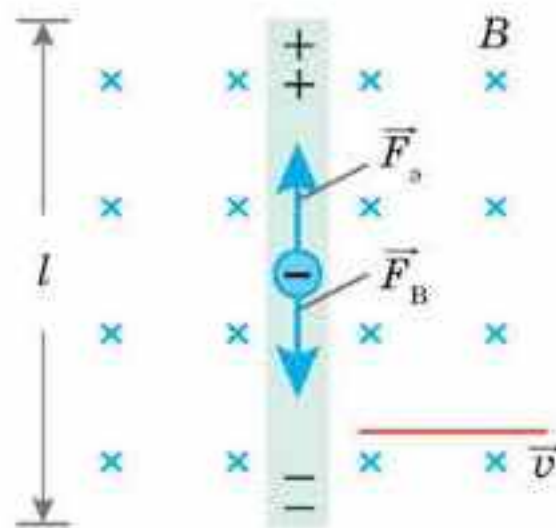
Демек, тепе-теңдік күйде электр және магнит өрістерінің арасында $E = vB$ байланысы орнайды.

Өткізгіштегі электр өрісінің кернеулігі оның ұштарындағы потенциалдар айырымымен былай байланысқан:

$$U = El.$$

Сонда, қарастырылып отырған жағдай үшін тепе-теңдік орнықталған кезде өткізгіштің ұштарындағы пайда болатын потенциалдар айырымы

$$U = El = Bvl.$$



76.1-сурет

Бұл кезде электрондар қозғалысы тоқтап, өткізгіштің бойымен электр тогы өтпейді. Өткізгіштің ұштарында потенциалдар айырымының бар болғанына қарамастан, өткізгіштің бойында токтың болмауы, потенциалдар айырымына тең және оған қарсы бағытталған ЭҚК пайда болатынын көрсетеді $U = -\mathcal{E}_i$. Бұл магнит өрісінде қозғалатын өткізгіштегі индукцияның ЭҚК дәл өзі болып табылады:

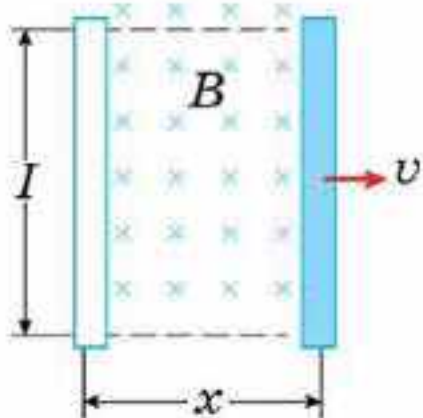
$$\mathcal{E}_i = -Blv. \quad (76.1)$$

Біз өткізгіштің қозғалу бағыты магнит өрісінің индукция сызықтарына перпендикуляр болатын жағдайды қарастырдық. Жалпы алғанда, магнит өрісінде жылжып келе жатқан өткізгіште пайда болатын индукцияның ЭҚК мына формуламен анықталады:

$$|\mathcal{E}_i| = Blv \sin \alpha, \quad (76.2)$$

мұндағы α — жылдамдықтың \vec{v} векторы мен магнит индукциясының \vec{B} векторы арасындағы бұрыш.

Сонымен, *біртекті магнит өрісінде өткізгіштің қозғалысы тоқтамағанша, оның ұштарында потенциалдар айырымы жоғалмайды.*



76.2-сурет

Индукцияның ЭҚК электромагниттік индукция заңының көмегімен есептеу. Енді біртекті магнит өрісінде қозғалатын ұзындығы l өткізгіштегі туындайтын индукцияның ЭҚК өрнегін электромагниттік индукция заңын пайдалану арқылы алып көрейік. Егер өткізгіштің кез келген уақыт мезетіндегі координатасын x деп белгілесек (76.2-сурет), онда lx өткізгіш сызатын контурдың ауданына тең болады. Сонда сол контурды тесіп өтетін магнит ағыны мына формуламен өрнектеледі:

$$\Phi = Blx.$$

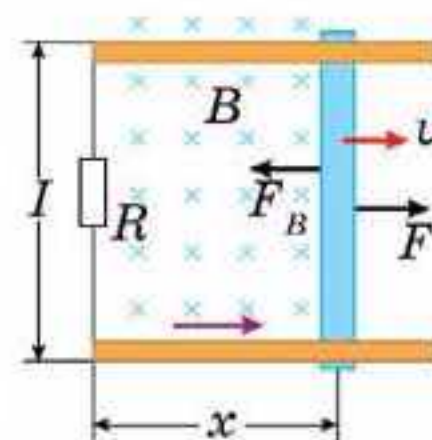
Фарадейдің $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ заңын пайдалана отырып және өткізгіштің бірқалыпты қозғалысы кезіндегі жылдамдығы $\frac{\Delta x}{\Delta t} = v$ екенін ескерсек, магнит өрісінде қозғалатын өткізгіштегі индукцияның ЭҚК үшін мына формуланы аламыз:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(Blx)}{\Delta t} = -Bl\frac{\Delta x}{\Delta t} = -Blv. \quad (76.3)$$

(76.1) мен (76.3) өрнектерді салыстыра отырып, индукцияның ЭҚК есептеудің екі әдісі де бірдей нәтижеге әкелетінін байқауға болады. Демек, қозғалатын өткізгіштегі индукцияның ЭҚК сипаттау үшін, біз

не Лоренц күшін, не Фарадейдің электромагниттік индукция заңын пайдалануымызға болады.

Магнит өрісінде орналасқан өткізгіштің орын ауыстыруы кезінде күштің атқаратын жұмысы. Қозғалып келе жатқан өткізгіш, тұйық өткізгіш контурдың бір бөлігі болсын делік. Бекітілген екі параллель өткізгіш рельстер және солардың үстінен сырғанай алатын ұзындығы l сырықтан тұратын тізбекті қарастырайық (76.3-сурет). Сырықтың кедергісін елемейік, ал тізбектің қозғалмайтын бөлігінің кедергісін R резисторымен белгілейік.



76.3-сурет

Индукциясы \vec{B} біртекті магнит өрісін жазықтыққа перпендикуляр болатындай етіп бағыттайық. Сыртқы \vec{F} күштің әсерінен сырық \vec{v} жылдамдықпен қозғалғанда, оның еркін электрондарына сырықтың бойымен төмен қарай бағытталған Лоренц күші әсер етеді. Еркін электрондардың қозғалысы тұйық контурда тоқты тудырады.

Бұл тұрақты магнит өрісінде қозғалатын өткізгіштегі индукцияның ЭҚК тудыратын индукциялық токтың дәл өзі.

Бойымен индукциялық ток өтетін сырыққа магнит өрісі тарапынан Ампер күші әсер етеді. Суретте бұл күш \vec{F}_B деп белгіленген және сыртқы \vec{F} күшке қарама-қарсы бағытталған. Егер осы екі күш шамалары жағынан тең болса, сырық бірқалыпты қозғалады да, сыртқы күштің жұмысы R резистордың ішкі энергиясына ауысады.

Сырықтың орын ауыстыруы кезінде сыртқы күштің атқаратын жұмысын есептейік. Сыртқы күш Ампер күшіне тең болғандықтан,

$$F = F_A = BIl.$$

Сырықты Δx арақашықтыққа орын ауыстырғанда F сыртқы күштің атқаратын жұмысы:

$$A = F\Delta x = BIl\Delta x.$$

Мұндағы $l\Delta x$ көбейтіндісі сырықтың орын ауыстыру кезінде сызатын ауданына тең

$$\Delta S = l\Delta x.$$

Ал егер біз ΔS ауданды тесіп өтетін магнит ағыны $\Delta\Phi = B\Delta S$ екенін ескерсек, онда:

$$A = BIl\Delta x = I\Delta\Phi. \quad (76.4)$$

Магнит өрісінде орналасқан тогы бар өткізгіштің орын ауыстыру кезінде сыртқы күштің атқаратын жұмысы ток күшінің орын

ауыстырғандағы сызатын ауданын тесіп өтетін магнит ағынының өзгерісіне көбейтіндісіне тең.

R резисторда бөлінетін жылулық қуатқа тең болатын сыртқы күштің өндіретін қуатын есептеу қиын емес:

$$P = Fv = BIl\Delta = \frac{B^2 l^2 v^2}{R} = \frac{\mathcal{E}_i^2}{R}. \quad (76.5)$$



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Энергияның сақталу заңының көмегімен Ом заңын жазыңдар.
2. Магнит өрісінде қозғалатын түзу сызықты өткізгіштегі индукцияның ЭҚЖ формуласын алыңдар.



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Металл пластинасы тұрақты магнит полюстерінің арасына индукция сызықтары перпендикуляр орналасқан. Пластинаны сыртқа алып шығу үшін оң жұмыс атқару қажет пе? Неліктен?

Талдаңдар

Магнит өрісінде қозғалатын зарядталған бөлшек үстінен Лоренц күшінің атқаратын жұмысы нөлге тең екені мәлім. Алайда электр генераторларында электр энергиясы дәл сол Лоренц күшінің жұмысы есебінен өндіріледі. Бұл қайшылық болып көрінетін жағдайды қалай түсіндіруге болады?

Шығарыңдар

1. Магнит өрісінде индукция сызықтарына перпендикуляр бағытта 10 м/с жылдамдықпен қозғалатын, активтік ұзындығы 50 см өткізгіште, 1,5 В индукцияның ЭҚК қоздырылу үшін магнит өрісінің индукциясы неге тең болуы тиіс?

Жауабы: 0,3 Тл

2. Индукциясы 0,2 Тл вертикаль біртекті магнит өрісінде горизонталь орналасқан, ұзындығы 50 см өткізгіш 10 м/с жылдамдықпен ілгерілемелі қозғалады. Өткізгіштің жылдамдық векторы индукция векторымен 30° бұрыш, ал өткізгіштің осімен 60° бұрыш жасайды. Өткізгіште пайда болатын индукцияның ЭҚК табыңдар.

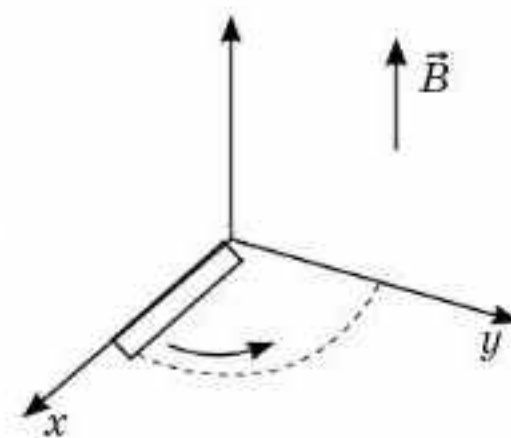
Жауабы: 0,435 В

3. Реактивтік ұшақ 900 км/сағ жылдамдықпен горизонталь ұшып келеді. Егер Жердің магнит өрісінің индукция векторының вертикаль құраушысы 50 мкТл болса, онда ұшақ қанаттарының ұштары арасында қандай потенциалдар айырымы пайда болады? Ұшақ қанаттарының құлашы 24 м. Осы кезде ұшақтың тұмсығы мен құйрығының арасындағы потенциалдар айырымы неге тең?

Жауабы: 0,3 В; 0 В

*4. Ұзындығы l сырық индукциясы B магнит өрісінде өзінің бір ұшының айналасында ω бұрыштық жылдамдықпен сағат тіліне қарсы бағытта айналады. Өрістің индукция сызықтары сырықтың айналу жазықтығына перпендикуляр бағытталған (76.4-сурет). Сырықта пайда болатын индукцияның ЭҚК есептеңдер.

Жауабы: $\mathcal{E}_i = -\frac{1}{2}B\omega l^2$



76.4-сурет

Рефлексия

1. Осы параграфта өткен материалдың қайсысы түсініксіз болды?
2. Өтілген материалды қандай деңгейде түсіндіңдер?
3. Тақырыптағы материалды қосымша түсіндіру керек пе?

§ 77. Максвелл гипотезасы

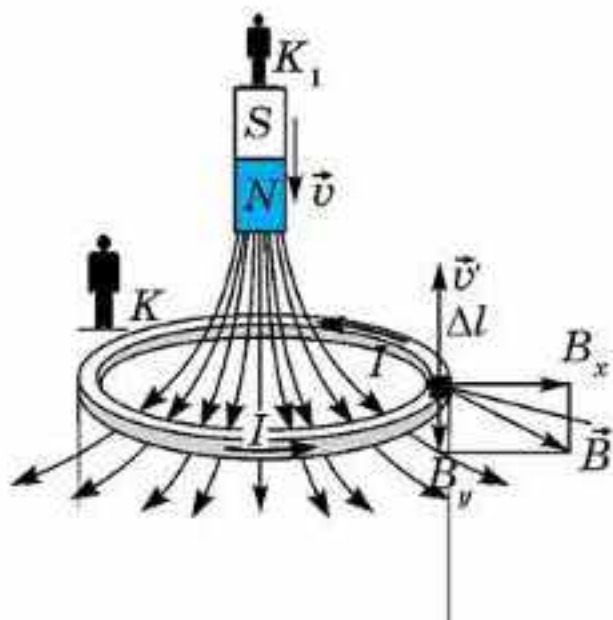


Тірек ұғымдар: инерциялық санақ жүйелері, құйынды электр өрісі, Максвелл гипотезасы, электромагниттік толқындар.

Бүгінгі сабақта: тыныштық күй жағдайындағы өткізгіште; индукциялық токтың пайда болуын қалай түсіндіруге болатынын білесіңдер; Максвелл гипотезасы мен одан шығатын электромагниттік толқындар идеясының мәндерін білесіңдер.

Сөйтіп, электромагниттік индукция заңын бұрынғы білімдер негізінде алуға және энергияның сақталу заңы мен Ампер заңын пайдаланып немесе Лоренц күші арқылы динамикалық тәсілмен таза теориялық жолмен қорытып алуға да болады.

Электромагниттік индукция құбылысы және салыстырмалылық принципі. Фарадей тәжірибесіндегі жаңа құбылысты байқау үшін Максвеллдің даналығы керек болды. Шынында да, егер Фарадейдің бастапқы тәжірибелерінің біріне оралсақ және индукцияның ЭҚК (индукциялық ток — контур тұйық) пайда болу құбылысын екі инерциялық бақылаушының — магнитпен байланысты K_1 бақылаушы мен өзіне қатысты контур қозғалыссыз болып көрінетін K зертханасындағы бақылаушы тұрғысынан түсіндіруге тырысатын болсақ, онда қайшылық туады (77.1-сурет). K бақылаушы үшін индукцияның ЭҚК мен тұйық контурда индукциялық токтың пайда болуын түсіндіру “бұрынғы” заңдар тұрғысынан мүмкін емес болып шығады, атап айтқанда, Эрстед тәжірибелері магнит өрісі тек қозғалыстағы зарядтарға ғана әсер ететінін көрсетеді, ал өткізгіштегі еркін зарядтар бейберекет жылулық қозғалысқа қатыса отырып, K бақылаушыға қатысты бағытталған қозғалыс жылдамдығына ие бола алмайды, демек, Лоренц күші нөлге тең. Магнит өрісімен байланысты санақ жүйесінде болатын K_1 бақылаушы үшін индукциялық токтың пайда болуын Лоренц күшінің көмегімен түсіндіруге болады. K_1 бақылаушыға қатысты контур және онымен бірге өткізгіштік электрондар оған қарай \vec{v}' жылдамдықпен қозғалады.



77.1-сурет

\vec{B} векторын B_x және B_y құраушыларына жіктейміз (77.1-сурет). \vec{B}_y жағынан контурдың Δl элементіндегі электрондарға әсер ететін Лоренц күші нөлге тең, өйткені \vec{v}' мен B_y арасындағы бұрыш 180° ,

$$F_n = ev' B_y \sin 180^\circ = 0.$$

B_x жағынан сол электронға әсер ететін Лоренц күші нөлден өзгеше және “бізге” қарай бағытталған.

Демек, бұл күштің әсерінен контурда, бізден әрі қарай бағытталған индукциялық ток пайда болып, токтың бағыты Ленц ережесімен үйлеседі. Қайшылықтар туындайды, себебі салыстырмалылық принципі бойынша барлық инерциалдық жүйелерде физикалық процестер бірдей өту керек. K мен K_1 санақ жүйелері инерциалды, себебі бір-біріне қатысты түзусызықты, бірқалыпты қозғалады. Алайда оларды тең деп айта алмаймыз, өйткені олардың біреуінде (K_1) индукциялық токтың пайда болуын түсіндіре аламыз, ал екінші жүйеде (K) оны түсіндіру мүмкін емес.

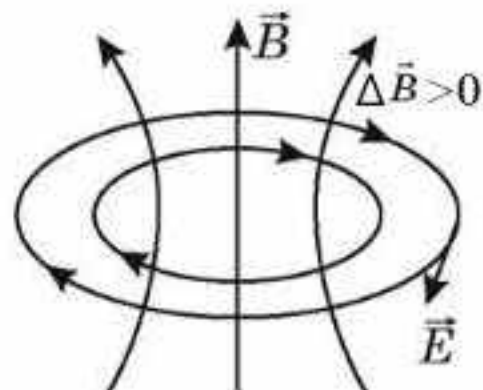
Алайда осы қайшылықты болдырмау үшін байқап қарасаңдар, K жүйесінде орналасқан бақылаушыға магнит тудыратын магнит өрісі тұрақты емес, өйткені магнит оған қатысты өзінің кеңістіктегі орын өзгертеді.

Құйынды электр өрісі. Осыған сүйене отырып, Максвелл индукциялық токтың пайда болу себебінің мынадай түсіндірмесін ұсынды: *айнымалы магнит өрісі тыныштық күйдегі өткізгіш контурдың электрондарына әсер етіп, олардың бағытталған қозғалысын, яғни электр тогының пайда болуына әкелетін электр өрісін тудырады.*

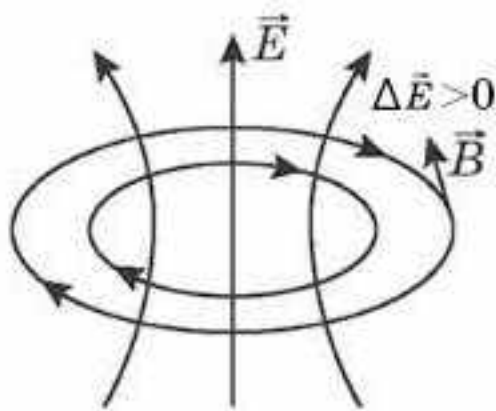
K санақ жүйесіндегі бақылаушы дәл сол токты тіркейді. Фарадей тәжірибелеріндегі гальванометрге жалғанған сым орамының атқаратын тек бір қызметі — бойындағы пайда болатын индукциялық ток арқылы электр өрісінің бар екенін айқындау. Айнымалы магнит өрісінен туындайтын электр өрісі зарядтардан туындайтын кулондық электр өрісімен салыстырғанда мүлде өзгеше. Мұндай өрістің кернеулік сызықтары тұйық болып келеді, ал, біздің білуімізше, кулондық электр өрісінің күштік сызықтары тұйық емес, олар оң зарядтардан басталып, теріс зарядтарда аяқталады. Егер электростатикалық потенциалдық өріс кернеулігінің тұйық контур бойымен атқаратын жұмысы нөлге тең болса, айнымалы магнит өрісінен туындайтын электр өрісі потенциалдық болмайды. Демек, мұндай өрістің тұйық контур бойымен атқаратын жұмысы нөлден өзгеше болады. Тегі осындай күштік өрістерді *құйынды* деп атайды.

Сонымен, Максвеллдің айтуынша, *айнымалы магнит өрісі бар кеңістікте әрдайым құйынды электр өрісі пайда болады.*

Құйынды \vec{E} электр өрісінің кернеулік сызықтарының бағыты айнымалы магнит өрісіне орналастырғандағы нақты сым орамында пайда болатын индукциялық токтың бағытымен бағыттас болады. Демек, пайда болатын электр өрісінің кернеулік сызықтары магнит өрісінің индукция сызықтарын орағытып, магнит индукциясы артатын жағдайда ($\Delta B > 0$), олар



77.2-сурет



77.3-сурет

\vec{B} векторының бағытымен сол бұранда жасайтындай бағытталады (77.2-сурет).

Электр және магнит құбылыстары арасындағы өзара тығыз байланысқа негізделе отырып, Максвелл табиғатта біз жоғарыда қарастырған процеске кері процесс болуы туралы өзінің гипотезасын ұсынды: *айнымалы электр өрісі кеңістікте магнит өрісін тудырады*. Пайда болатын магнит өрісінің индукция сызықтары

айнымалы электр өрісінің кернеулік сызықтарын орағытып, электр өрісінің кернеулігі векторы артатын жағдайда ($\Delta E > 0$), олар \vec{E} векторының бағытымен оң бұранда жасайтындай бағытталады (77.3-сурет).

Электромагниттік толқындар. Максвелл гипотезасы және оның негізінде қаланған электр және магнит құбылыстарының бірлестірілген теориясы, электромагниттік толқындардың — кеңістікте таралатын электр және магнит өрістері тербелістерінің — бар болуын алдын ала болжады. Максвелл алған теңдеулерге сәйкес, бұл толқындардың вакуумдағы таралу жылдамдығы мынаған тең:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.} \quad (77.1)$$

Электромагниттік толқындардың таралу жылдамдығы мен жарық жылдамдығының тең болуы Максвеллді жарықтың электромагниттік теориясын құруына әкелді.

Кейін электромагниттік толқындар неміс физигі Г. Герцтің жасаған тәжірибелерінде алынып, Максвелл гипотезасының әділдігін растады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Максвелл гипотезасын тұжырымдаңдар.
2. Параграфта айтылған тұйық контурда пайда болған құбылысты K және K' бақылаушылар қалай сипаттап берген болар еді?
3. Электромагниттік толқынның бар екенін Максвелл қалай болжаған?
4. Электромагниттік толқынның таралу жылдамдығын есептейтін формуланы қорытып шығарыңдар.



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

1. Автокөлік көпірдің астынан немесе тоннельдің ішінде жүріп келе жатқанда, автомагнитоланың радиоқабылдағышының нашар жұмыс істейтінін байқауға болады. Сол құбылыстың себебі неде?
2. Табиғаттың қандай құбылыстары кезінде электромагниттік толқындардың сәулеленуін байқауға болады?

Тәжірибе жасаңдар

Бөлмелеріңдегі электршамын жағып, өшіріңдер. Жұмыс істеп тұрған радиоқабылдағышта шытырлаған дыбысты ести аласыңдар. Олар неліктен пайда болды?

Түсіндіріңдер

1. Параграфта айтылған K және K_1 бақылаушылардың әрқайсысы контурдағы индукциялық токтың пайда болу құбылысын қалай түсіндіреді?
2. Электр заряды әртүрлі жағдайда төмендегі үш өрісті тудыру үшін: а) электр өрісін; ә) магнит өрісін; б) электромагнит өрісін, олар қандай шарттарға бағынуы тиіс?

Талдаңдар

1. Кеңістіктің кейбір нүктесінде тек электр немесе тек магнит өрісі бар деген тұжырымды неліктен абсолют дұрыс деп санауға болмайды?
2. Магнит өрісі неден туындауы мүмкін?
3. “Жарық – электромагниттік толқын” деген идеяға Максвеллді не итермеледі?

Шығарыңдар

1. Қысқа толқынды радиохабарлағыш толқын ұзындығы 10 м шамасынан 100 м мәніне дейін аралықтағы толқындарды шығарады. Хабарлағыш жиіліктің қандай аралығында жұмыс істейді?

Жауабы: $3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$ Гц

2. Электромагниттік толқындар вакуумнан диэлектрлік өтімділігі ϵ диэлектриктің ішіне кіреді. Осы кезде толқынның қандай сипаттамалары болады және олар қалай өзгереді?

Жауабы: ϵ есе v азаяды; ϵ есе λ артады; v өзгермейді

Рефлексия

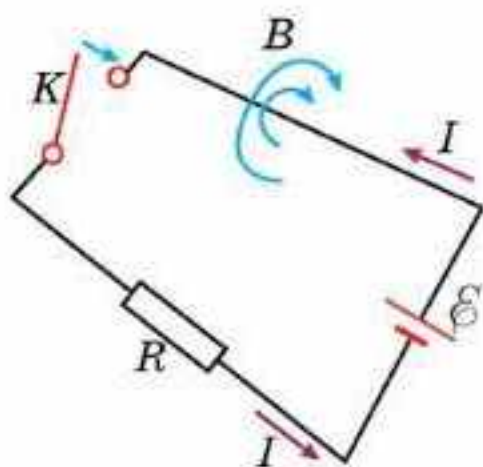
1. Осы параграфта өткен материалдың қайсысы түсініксіз болды?
2. Өтілген материалды қандай деңгейде түсіндіңдер?
3. Тақырыптағы материалды қосымша түсіндіру керек пе?

§ 78. Өздік индукция құбылысы

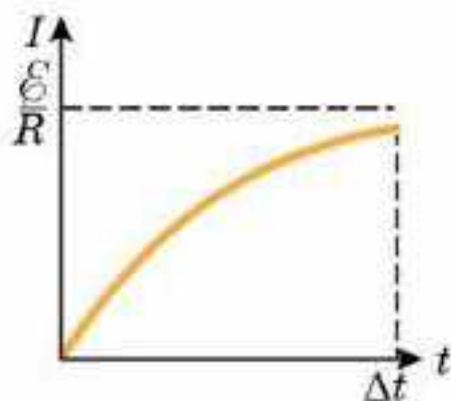


Тірек ұғымдар: өздік индукция; индуктивтілік; магнит өрісінің энергиясы; магнит өрісі энергиясының көлемдік тығыздығы.

Бүгінгі сабақта: өздік индукция құбылысымен, индуктивтілік деп аталатын физикалық шамамен танысасыздар; катушканың (соленоидтің) индуктивтілігін есептеуді, токтың магнит өрісі энергиясының формуласын қорытуды үйренесіздер.



78.1-сурет



78.2-сурет

Өздік индукция. ЭҚК-і \mathcal{E} ток көзі, кедергісі R резистор және K кілттен тұратын тізбекті қарастырайық (78.1-сурет). Кілтті тұйықтағанда тізбектегі ток көзінің $I_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{R}$ максимал мәніне лезде емес, қандайда бір Δt уақыттан кейін жететінін тәжірибе көрсетеді (78.2-сурет).

Бұл құбылыс Фарадейдің электромагниттік индукция заңымен была түсіндіріледі. Кілт тізбекті тұйықтаған мезеттен бастап, тізбектегі I ток арта бастайды, онымен бір мезетте осы ток тудыратын \vec{B} магнит өрісі де артады.

Контурды қиятын уақыт өтуімен өзгертін магнит ағыны тізбекте ЭҚК тудырады. Ленц ережесіне сай, индукцияның ЭҚК ол тудыратын индукциялық ток бастапқы \vec{B} магнит өрісінің өзгеруіне қарсы әсер ететін магнит өрісін тудыратындай бағытталады.

Сөйтіп, индукцияның ЭҚК ток көзінің ЭҚК қарама-қарсы бағытталады. Ток күшінің өзінің максимал I_{\max} мәніне дейін секірмелі түрде емес, бірітіндеп өсуінің себебі де осы. Біз қарастырған осы құбылысты *өздік индукция* деп атайды, себебі контурды қиятын магнит ағынының өзгерісін де, индукцияның ЭҚК де контурдың өзі тудырады. Ал бұл жағдайда пайда болатын индукцияның ЭҚК *өздік индукцияның ЭҚК* деп аталады да \mathcal{E}_{si} деп белгіленеді.

Индуктивтілік. Өздік индукцияның ЭҚК өрнегін алу үшін Фарадейдің электромагниттік индукция заңына сәйкес, индукцияның ЭҚК теріс таңбамен алынған магнит ағынының өзгеру жылдамдығына тең екенін еске түсірейік:

$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Өздік индукция құбылысы жағдайында магнит ағыны контурдағы ток тудыратын өрістің магнит индукциясына тәуелді, ал оның өзі өз

кезегінде контурдағы ток күшіне тәуелді болады. Олай болса, біз магнит ағынын былай жазуымызға болады:

$$\Phi = LI, \quad (78.1)$$

мұндағы L — коэффициенті *контурдың индуктивтілігі*.

Контурдың индуктивтілігі оның геометриялық пішініне, өлшемдеріне және ол орналасқан ортаның магниттік қасиеттеріне тәуелді. Халықаралық бірліктер жүйесінде индуктивтіліктің өлшем бірлігі — генри (Гн). (78.1) өрнегін ескере отырып, біз өздік индукцияның E_{si} ЭҚК былай өрнектей аламыз:

$$E_{si} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (78.2)$$

Өздік индукцияның ЭҚК ток күшінің өзгеру жылдамдығына тура пропорционал.

Мұндағы “-” таңбасы өздік индукцияның ЭҚК, демек, өздік индукцияның тогы негізгі токтың өзгеруіне қарсы әсер ететінін көрсетеді.

Соленоидтің индуктивтілігі. Өздік индукция құбылысы индуктивтілігі үлкен контурларда айқын байқалады. Үлкен индуктивтілікке ұзындығы диаметрінен әлде қайда үлкен болатын цилиндр тәрізді орама — соленоид ие болады. Ұзындығы l , көлденең қимасының ауданы S , бір-біріне тығыз оралған орамдар саны N және өзекшесі магниттік өтімділігі μ материалдан жасалған соленоидтің индуктивтілігі үшін өрнекті алайық. Соленоид өрісінің магнит индукциясын $B = \infty_0 nI$ формуланың көмегімен анықтауға болады, мұндағы

$n = \frac{N}{l}$ — соленоидтің бірлік ұзындығына келетін орамдар саны. Сонда

соленоидтің әр орамын тесіп өтетін магнит ағыны $\Phi_0 = BS = \infty_0 \frac{NS}{l} I$ болғандықтан, оның барлық орамдарын тесіп өтетін магнит ағыны мынаған тең: $\Phi = N\Phi_0$. (78.1) формуланы соленоид индуктивтілігін табу үшін қолданайық:

$$L = \frac{N\Phi_0}{I} = \frac{\mu_0 \frac{N^2 S}{l} I}{I} = \mu_0 \frac{N^2}{l} S. \quad (78.3)$$

(78.3) формуладан соленоидтің индуктивтілігі оның геометриясы мен ортаның магнит өтімділігіне тәуелді және орамдар санының квадратына пропорционал екенін көруге болады.

Токтың, магнит өрісінің энергиясы. Параграфтың басында қарастырылған тәжірибеге оралайық. Тізбек тұйықталғаннан соң ток күшінің нөлден өзінің қалыптасқан $\frac{E}{R}$ мәніне (78.2-сурет) жету үшін кететін Δt уақыт ішінде ЭҚК E ток көзі энергиясының кейбір бөлігі кедергісі R резисторда жылу түрінде бөлінеді. Оның қалған бөлігі өз-

дік индукцияның ЭҚК жеңу үшін жұмсалады да, магнит өрісінің W_m энергиясы түрінде жинақталады. Оны есептеу үшін қарастырылып отырған контур үшін Кирхгоф ережесін жазайық: $E + E_{\text{эл}} = IR$.

(78.2) өрнегін ескерсек, мынаны аламыз:

$$E = IR + L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Бұл формуланың екі жағында Δt уақыт ішінде контурдың бойымен тасымалданатын $\Delta q = I\Delta t$ заряд мөлшеріне көбейтейік:

$$EI\Delta t = I^2 R\Delta t + LI\Delta I$$

Бұл теңдеуде $EI\Delta t$ — ток көзінің атқарған жұмысы, $I^2 R\Delta t$ — кедергісі R резисторда бөлінетін жылу мөлшері. Демек, $LI\Delta I$ контурдағы тудырылатын токтың магнит өрісінің W_m энергиясынан басқа ештеме бола алмайды.

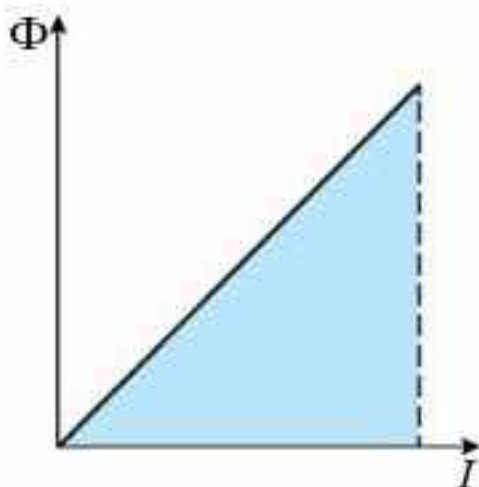
Контурдың L индуктивтілігі уақытқа тәуелсіз болғандықтан, $LI\Delta I$ көбейтіндісін $I\Delta(LI)$ алмастыруға болады. Магнит ағыны $\Phi = LI$ екенін ескере отырып, токтың магнит өрісінің энергиясы үшін мынаны жазуымызға болады:

$$W_m = I\Delta\Phi. \quad (78.4)$$

Индуктивтілігі L кейбір контурда ток күші нөлден берілген I мәніне дейін артады делік. (78.1) өрнегіне сәйкес токтың тудыратын магнит ағыны да нөлден Φ дейін өзгереді. Олай болса магнит ағынының өзгерісі $\Delta\Phi = \Phi$ және (78.4) формуланы $W_m = I\Phi$ түрінде жазуға болады. Сонда, магнит өрісінің энергиясын магнит ағынының ток күшіне $\Phi(I)$ тәуелділігінің графигінің көмегімен штрихтелген үшбұрыштың ауданы арқылы оңай табуға болады $W_m = \frac{\Phi I}{2}$ (78.3-сурет).

Магнит ағынының орнына $\Phi = LI$ қоятын болсақ, бойымен I ток өтетін индуктивтілігі L контурдың магнит өрісінің энергиясы үшін мына өрнекті аламыз:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (78.5)$$



78.3-сурет

Магнит өрісінің энергиясы. Контурға индуктивтілігі L соленоидті орналастырайық. Ұзын соленоидтің магнит өрісі біртекті және толығымен соленоидтің ішінде шоғырланады. Осы өрістің энергиясын өрістің өзін сипаттайтын шама — магнит индукциясының B векторы арқылы өрнектейік. Соленоид өрісінің магнит индукциясының $B = \mu_0 nI$ формуласынан соленоид арқылы жүретін $I = \frac{Bl}{\mu_0 N}$ ток күшін

табуға болады. I ток күші мен L индуктивтілік үшін өрнектерді (78.5) формулаға қоятын болсақ, мынаны аламыз:

$$W_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{\mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S \left(\frac{Bl}{\mu\mu_0 N} \right)^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0} Sl,$$

мұндағы Sl көбейтіндісі — соленоидтің көлемі екенін ескерсек, магнит өрісінің энергиясы үшін мына формуланы аламыз:

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0} V. \quad (78.6)$$

Егер магнит өрісінің энергиясы көлем бойынша біртекті таралатын болса, онда магнит өрісі энергиясының ω_m тығыздығы ұғымын енгізуімізге болады: магнит өрісі энергиясының тығыздығы деп *магнит өрісі энергиясының оның алатын көлеміне қатынасын* атайды.

Сонда соленоидтің магнит өрісі энергиясының тығыздығы:

$$\omega_m = \frac{W_m}{V} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0}. \quad (78.7)$$

(78.5) өрнегі біртекті магнит өрісі үшін алынса да, күрделірек есептеулер көрсететіндей, оны біртекті емес өрістер үшін де қолдануға болатынын

Магниттік және механикалық шамалар арасындағы ұқсастық. Магнетизмдегі өздік индукция және механикадағы инерция құбылыстарының арасында белгілі ұқсастықты байқауға болады. Денеге әсер ететін күш қанша үлкен болмасын, ол денені лезде тоқтату мүмкін еместігін есімізге түсірейік. Біз механикадан білетіндей, оның себебі өлшемі масса болып табылатын дененің инерттілік қасиеті. Дәл солай біз индуктивтілігі бар контурдағы ток күшін де секірмелі түрде өзгерте алмаймыз. Біз білетіндей, олай істеуге шамасы контур индуктивтілігіне тәуелді болатын өздік индукция құбылысы кедергі болады. Демек, магниттік құбылыстарда L индуктивтіліктің және механикадағы m массаның атқаратын рөлдері бірдей. Осыдан, қозғалыстағы дененің $\frac{mv^2}{2}$ кинетикалық энергиясы мен магнит өрісінің $\frac{LI^2}{2}$ энергиясы, дененің mv импульсі мен LI магнит ағыны араларында да ұқсастық жүргізуге болады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Өздік индукция деп нені айтамыз?
2. Бойынан не шамасы, не бағыты өзгертін ток өткенде тұйық контурда өздік индукция деп аталатын тағы бір токтың пайда болатынын түсіндіріңдер.
3. Магнит өрісінің энергиясын қандай формуламен есептеуге болады?

Шығармашылық шеберхана

Түсіндіріңдер

Үлкен индуктивтіліктен тұратын контурды шұғыл ажыратуға болмайтынын түсіндіріңдер.

Талдаңдар

1. Механикадағы күшке қандай магниттік шаманы сәйкестендіруге болады?
2. Механикадағы қандай заңды өздік индукцияның ЭҚК ұқсас деуге болады?

Шығарыңдар

1. Реостаттың көмегімен катушкадағы ток күшін секундына 0,1 А бірқалыпты арттырады. Катушканың индуктивтілігі 0,01 Гн. Өздік индукцияның ЭҚК орташа мәнін табыңдар.

Жауабы: 1 мВ

2. Индуктивтілігі 1 мГн бірқабатты катушканы жасау үшін диаметрі 2 см картон цилиндріне диаметрі 0,4 мм сымның қанша орамын орау керек? Сым изоляциясының қалыңдығын елемейтіндей жұқа деп алыңдар.

Жауабы: 10^3

3. Соленоидтің орамдар саны 1000. Өзекшенің көлденең қимасының ауданы 10 см^2 . Орама арқылы өтетін ток индукциясы 1,5 Тл магнит өрісін тудырады. Егер ток күші 500 мкс уақыт ішінде нөлге дейін азаятын болса, онда соленоидте пайда болатын индукцияның ЭҚК орташа мәні нешеге тең болады?

Жауабы: 3 кВ

4. Соленоидтің орамдар саны 1000. Оның орамасы арқылы күші 1 А ток өтеді. Соленоидтің көлденең қимасы арқылы өтетін магнит ағыны 0,1 Вб. Магнит өрісінің энергиясын есептеңдер.

Жауабы: 50 мДж

5. Магнит өрісінің индукциясы 1 Тл болғанда, темірдегі магнит өрісі энергиясының тығыздығы 200 Дж/м^3 . Осы жағдайдағы темірдің магнит өтімділігін анықтаңдар.

Жауабы: $2 \cdot 10^3$

6. Катушканың ішіндегі магнит ағыны 32 с ішінде 24 мВб мәнінен 50 мВб дейін өзгерген кезде индукцияның орташа ЭҚК 10 В болуы үшін қанша орам саны керек?

Жауабы: 12 300

7. Темір өзекті катушканың көлденең қимасының ауданы 20 см^2 , ал индуктивтілігі 20 мГн. Ток күшінің қандай мәнінде өзектегі магнит өрісінің индукциясы 1 мТл болады? Катушканың орамдар саны 1000.

Жауабы: 0,1 А

8. Индукциясы 0,2 Тл болатын вертикаль біртекті магнит өрісінде горизонталь орналасқан ұзындығы 50 см өткізгіш 10 м/с жылдамдықпен қозғалады. Өткізгіштің

жылдамдық векторы магнит өрісімен 30° , ал өткізгіштің осімен 60° бұрыш жасайды. Өткізгіште пайда болатын индукцияның ЭҚК табындар.

Жауабы: 0,435 В

9. Ұзындығы 1,4 м түзу өткізгіш индукциясы 74 мТл болатын біртекті магнит өрісінде орналасқан. Магнит өрісіне перпендикуляр жазықтықта өткізгіш 75 рад/с бұрыштық жылдамдықпен айналады. Өткізгіш ұштарындағы потенциалдар айырымын табындар.

Жауабы: 5,4 В

10. Индуктивтілігі 0,2 Гн катушкадағы ток күші 10 А. Осы катушкадағы магнит өрісінің энергиясы қандай? Егер ток күші екі есе артса, онда магнит өрісінің энергиясы қалай өзгереді?

11. Ауданы 20 см^2 , 1000 орамнан тұратын бірқабатты катушка индукциясы 8 мТл болатын біртекті магнит өрісінің күш сызықтарына параллель орналасқан. Катушканың кедергісі 30 Ом. Магнит өрісін алып тастаған кезде катушкадан қандай заряд өтеді?

Жауабы: 0,53 мКл

12. Көлденең қимасының ауданы 50 см^2 сым орамы сыйымдылығы 20 мкФ конденсаторға тұйықталған. Орам жазықтығы біртекті магнит өрісіне тұйықталған. Конденсатордың заряды 1 нКл болса, магнит индукциясының өзгеріс жылдамдығы неге тең?

Жауабы: 10 мТл/с

*13. Кедергісі 0,2 Ом сымнан радиусы 6 см болатын сақина жасалған, ол индукциясы 20 мТл магнит өрісіне перпендикуляр орналасқан. Сақинадан сол жазықтықта жататын сегіздік түріне келтіріп екі бірдей сақина жасайды. Одан кейін магнит өрісін алып тастайды.

а) Сақинадан екі сақина жасаған уақыттағы;
ә) магнит өрісін алып тастаған уақыттағы өткізгіштен өтетін заряд шамасын анықтаңдар.

Жауабы: 0,56 мКл; 1,13 мКл



Рефлексия

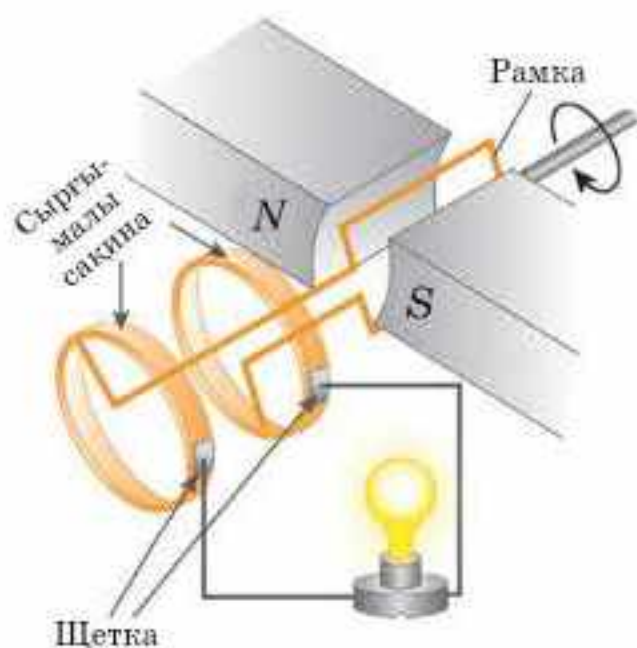
1. Осы параграфта өткен материалдың қайсысы түсініксіз болды?
2. Өтілген материалды қандай деңгейде түсіндіңдер?
3. Тақырыптағы материалды қосымша түсіндіру керек пе?

§ 79. Электромагниттік құралдар

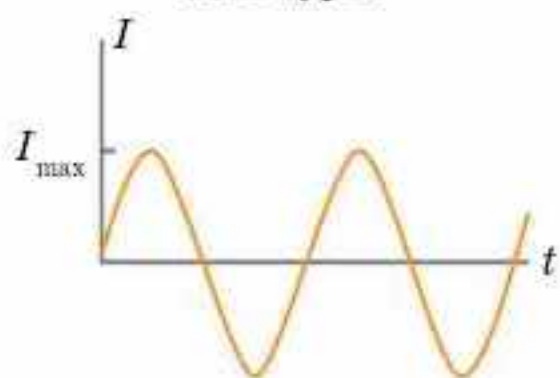


Тірек ұғымдар: айнымалы ток генераторы, тұрақты ток генераторы, электрқозғалтқыш, трансформатор.

Бүгінгі сабақта: айнымалы және тұрақты ток генераторының құралымен, электрқозғалтқыштың әсер ету принциптерімен танысасындар.



79.1-сурет



79.2-сурет

Айнымалы ток генераторы. Айнымалы ток генераторы электромагниттік индукция құбылысына негізделген. *Айнымалы ток деп уақытқа орай шамасы жағынан да, бағыты жағынан да периодты түрде өзгертін электр тогын айтады.* Айнымалы ток электрэнергетика және электромеханикада кең пайдаланылады. *Айнымалы ток генераторы* деп механикалық энергияны электр энергиясына айналдыратын құралды айтады. Генератордың жұмыс істеу принципін тұрақты біртекті магнит өрісінде айналатын сым рама мысалында қарастырайық (79.1-сурет). Рама өз осінің бойымен тұрақты бұрыштық жылдамдықпен айналғанда, оны тесіп өтетін магнит ағыны периодты өзгеріп отырады. Демек, онда периодты өзгертін айнымалы деп аталатын *индукциялық ток* пайда болады (79.2-сурет). Рама айналғанда сым-

дар бұралып кетпес үшін, ток рамадан сыртқы тізбекке сырғымалы жанасқыш сақиналар мен щеткалардың көмегімен шығады (79.1-сурет).

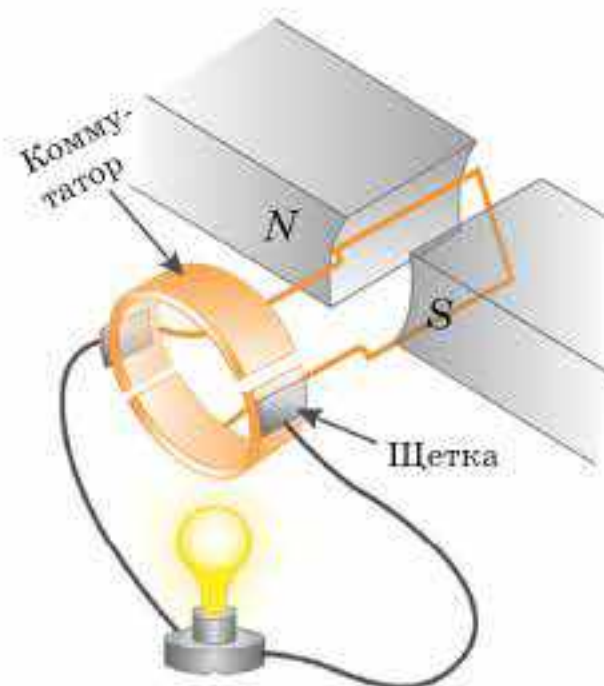
Қазіргі заманғы өндірістік айнымалы ток генераторлары конструкциясы бойынша бір-бірінен ерекшеленеді. Дегенмен, олардың барлығы бірдей негізгі бөлімдерден тұрады: 1) магнит өрісін тудыратын тұрақты магнит немесе электромагнит; 2) ішінде айнымалы индукцияның ЭҚК тудыратын орама. Орамада ЭҚК жоғары амплитудалық мәнін алу үшін орам саны өте көп болуы тиіс, себебі тізбектей жалғанған орамдарда қоздырылатын ЭҚК қосылады.

Генератордың орамасын айналдыру үшін энергияның әртүрін пайдалануға болады. Мысалы, гидроэлектростанцияларда осы мақсатта құлаған судың энергиясын, ал жылу электрстанцияларында — будың кинетикалық энергиясын пайдаланады.

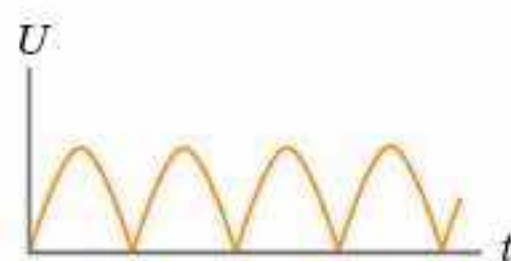
Тұрақты ток генераторы. Уақыт өтуімен өзгермейтін токты *тұрақты* деп атайды. Тұрақты ток генераторының конструкциясы негізінде айнымалы ток генераторына ұқсас болады. Бірақ, айныма-

лы ток генераторынына қарағанда, тұрақты ток генераторының рамасының ұштары сырғымалы түйісу сақиналарына емес, коммутатордың бір-бірінен оқшауланған екі жартылай сақиналарына жалғанады (79.3-сурет) және солармен бірге айналып тұрады. Генератордың щеткалары қозғалмайтын болғандықтан, олар біресе бір жартылай сақинамен, біресе екінші жартылай сақинамен жанасып тұрады. Бір уақытта осымен қатар рамада қозатын ЭҚК полюстері де өзгеріп отыратындықтан, коммутатордың жартылай сақиналарының полюсі, демек, шығу тұстағы кернеудің полюсі бірдей болады. Бұл кернеудің графигі *пульсация* түрінде болады (79.4-сурет). Пульсацияны тегістеу арқылы генератордың шығу тұсында уақытқа орай өзгермейтін кернеуге қол жеткізуге болады. Пульсацияны реттеу үшін өте көп рамалық контурды қолданады, олардың әрқайсысы өзіне сәйкес жартылай сақинаға бекітілген. Оқшауланған аралықтармен бөлінген мұндай түйісу жартылай сақиналарының жиынтығын *коллектор* деп атайды.

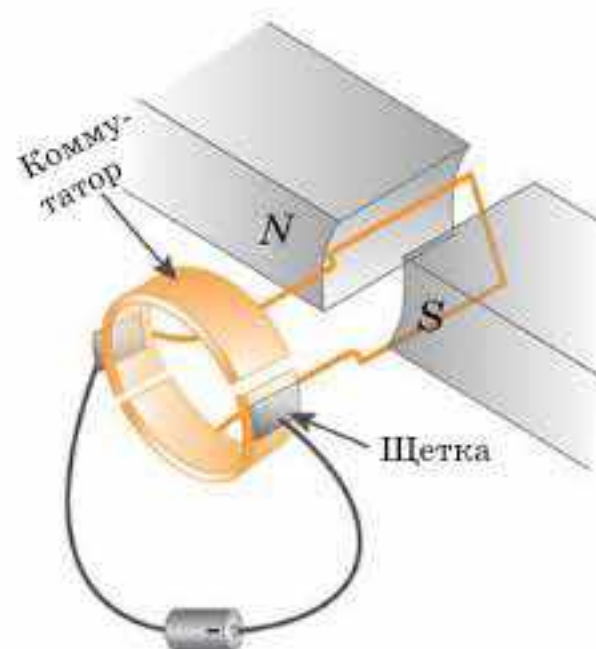
Электрқозғалтқыш. *Электрқозғалтқыш деп электр энергиясын механикалық жұмысқа айналдыратын құралды айтады.* Шын мәнінде, электрқозғалтқыш — бұл ток генераторы, бірақ керісінше жұмыс істейтін. Электрқозғалтқыштың жұмыс істеу принципі Ампер күшінің әсеріне негізделген. Тоғы бар рама электромагнит болып табылады, оның полюстері тұрақты магнит полюстерімен өзара әсерлеседі. Осы кезде пайда болатын күш жұбы рамаға әсер етіп, оны айналдырады. Үздіксіз айналу үшін, электрқозғалтқышта коммутаторды — бір-бірінен оқшауланған екі жартылай сақина жүйесін пайдаланады (79.5-сурет). Коммутатордың жартылай сақиналарына щетканың көмегімен батареядан ток беріледі. Рама айналғанда щеткалар кезекпен кезек жартылай сақиналардың біресе біреуімен, біресе екіншісімен жанасады, сөйтіп рамадағы токтың бағытын қарама-қарсы жаққа өзгертеді. Тұрақты магниттің оңтүстік полюсіне тартылатын, бұл электромагниттің сол-



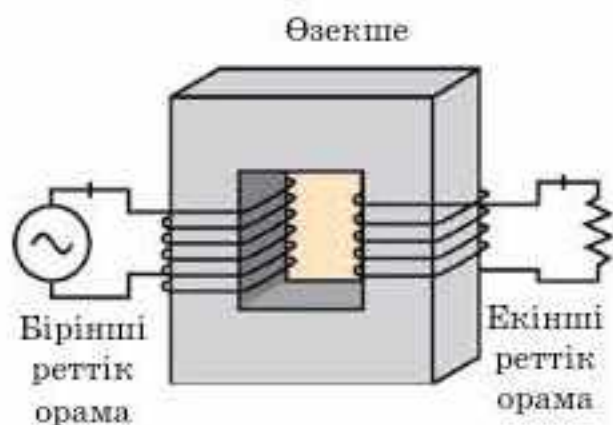
79.3-сурет



79.4-сурет



79.5-сурет



79.6-сурет

түстік полюсі 180° -қа бұрылған соң автоматты түрде оңтүстік полюске ауысады. Сонда рама тоқтамайды, инерция мен аттас полюстердің тебілуінен өзінің қозғалысын жалғастыра береді. Қазіргі заманда электрқозғалтқыштар машиналар мен механизмдердің электржетекшісі ретінде тәжірибе жүзінде өндірістің барлық секторында және көптеген тұрмыстық құралдарда қолданылады.

Электрқозғалтқыштардың жылу қозғалтқыштарымен салыстырғанда артықшылықтары бар: 1) электрқозғалтқыштардың ПӘК екі есе жоғары; 2) электрқозғалтқыштардың көлемі кіші; 3) электрқозғалтқыштардың табиғатқа әкелетін экологиялық зияны аз.

Трансформатор. Жоғарыда қарастырылған құралдардан басқа жұмыс істеу принципі қалай болғанда да электромагниттік индукция құбылысына негізделген өзгеде құралдар бар. Айнымалы токты түрлендіру үшін пайдаланылатын құралдың бірі — *трансформатор*. Трансформатордың құрамына ферромагнитті материалдан жасалған өзекше арқылы бір-бірімен индуктивті байланысқан екі катушка кіреді. (79.6-сурет). *Бірінші реттік орама* деп аталатын катушкалардың біреуіне айнымалы ток генераторы жалғанады. Екінші катушка, оны *екінші реттік орама* деп атайды, k жүктемесі — *тізбек бөлігі* болып табылады. Бірінші реттік ораманың орамдары арқылы өтетін айнымалы ток трансформатордың өзекшесінде айнымалы магнит ағынын тудырады. Орамалардың екеуінің де орамдарын тесіп өтетін бұл магнит ағыны оларда индукцияның ЭҚК қоздырады. Бірінші және екінші орамаларда индукцияланған ЭҚК шамасы олардың орамдар санына пропорционал болғандықтан, орамалардағы ЭҚК қатынасы сәйкес

орамалардың орамдар санының қатынасына тең:
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Демек, орамалардағы орамдар санын реттеу арқылы, екінші реттік орамадағы кернеуді арттыруға немесе кемітуге болады. *Жоғарлатқыш және төмендеткіш* деп аталатын осындай трансформаторларды электр энергиясын сымдар арқылы үлкен арақашықтықтарға тасымалдау үшін қолданылады.



Өзін-өзі бақылауға арналған сұрақтар

1. Айнымалы ток генераторының жұмыс істеуі қандай заңға негізделген?
2. Тұрақты ток генераторындағы коммутатордың рөлі?
3. Электрқозғалтқыштың қозғалысы неге негізделген?



Шығармашылық шеберхана

Бақылаңдар

Өз үйлеріңдегі электрқозғалтқыштары бар тұрмыстық құралдарға мысал келтіріңдер.

Түсіндіріңдер

1. Генератордың айналатын бөлігі ротор, ал қозғалмайтын бөлігі – статор деп аталады. Неге айнымалы токтың үлкен өндірістік генераторларында ротор ретінде ЭҚК индукцияланатын орама емес, электромагнит болатынын түсіндіріңдер.

2. Неліктен гидроэлектростанцияларда полюстер жұбы от көп болатын роторлары бар генераторлар қолданылады?

3. Неліктен трансформатордың ПӘК генераторлар мен электрқозғалтқыштардың ПӘК әлдеқайда жоғары?

Тәжірибе жасаңдар

Интернет ресурстарын қолданып, электрқозғалтқыштың қарапайым моделін жасаңдар.

Талдаңдар

Гидроэлектростанцияда қандай энергетикалық түрленулер жүреді?

Шығарыңдар

1. Егер генераторы стандартты жиілігі 50 Гц болатын айнымалы ток шығаратын болса, гидрогенератордың 125 айн/мин жасайтын роторының неше жұп магнит полюсы болады?

Жауабы: 24

2. Айнымалы ток генераторының роторы біртекті магнит өрісінде тұрақты жиілікпен айналады. Егер магнит өрісі индукциясы 2 есе көбейсе, индукция ЭҚК қалай өзгереді?

Жауабы: 2 есе артады

3. Трансформатордың бірінші орамасының кернеуі 220 В, ал қуаты 44 Вт тең. Егер орамалардың қатынасы $k = \frac{N_1}{N_2} = 5$ болса, онда екінші орамадағы ток күшін есептеңдер.

Жауабы: 1 А

Рефлексия

1. Осы параграфта өткен материалдық қайсысы түсініксіз болды?
2. Өтілген материалды қандай деңгейде түсіндіңдер?
3. Тақырыптағы материалды қосымша түсіндіру керек пе?



Фарадейдің электромагниттік индукция заңы мынаны тұжырымдайды: тұйық контурда пайда болатын индукцияның ЭҚК, сол контур арқылы өтетін магнит ағынының өзгеру жылдамдығына тура пропорционал:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

мұндағы $\Phi = BS\cos\alpha$ — магнит ағыны.

Электромагниттік индукция заңындағы “—” таңбасы *Ленц ережесінің* салдары.

Ленц ережесін былай деп тұжырымдауымызға болады: *индукциялық ток өзін тудырған магнит ағынының өзгерісіне қарсы әсер ететін магнит өрісін тудыратындай бағытталады.*

Ережеге сәйкес, индукцияның ЭҚК мен индукциялық токтың бағыты оларды тудыратын магнит ағынының өзгерісіне қарсы болатындай етіп бағытталады.

Ұзындығы l өткізгіш сырық индукциясы B магнит өрісінде v жылдамдықпен қозғалғанда, онда пайда болатын индукцияның ЭҚК мына формуланың көмегімен өрнектеледі:

$$\mathcal{E}_i = -Blv\sin\alpha,$$

мұндағы α — жылдамдықтың \vec{v} векторы мен магнит индукциясының \vec{B} векторының арасындағы бұрыш.

Максвелл индукциялық токтың пайда болу себебінің мынадай түсіндірмесін ұсынды: *айнымалы магнит өрісі тыныштық күйдегі өткізгіш контурдың электрондарына әсер етіп, олардың бағытталған қозғалысын, яғни электр тогының пайда болуына әкелетін электр өрісін тудырады.*

Сонымен, контурдағы ЭҚК мен индукциялық токтың пайда болу себебі айнымалы магнит өрісінің кеңістікте тудыратын *құйынды электр өрісі* болып табылады.

Максвелл ұсынған гипотезаға сәйкес, айнымалы электр өрісі кеңістікте магнит өрісін тудырады.

Максвеллдің электромагниттік теориясы салдарынан жарық жылдамдығымен таралатын *электромагниттік толқындардың* бар екені шығады. Катушка арқылы өтетін ток күші уақытқа орай өзгерсе, электромагниттік индукция заңына сәйкес катушкада *индукцияның ЭҚК* пайда болады.



Өздік индукцияның ЭҚК мына формуламен өрнектеледі:

$$\mathcal{E}_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

мұндағы L – катушканың индуктивтілігі.

Катушканың индуктивтілігі

$$L = \frac{N\Phi}{I},$$

мұндағы Φ — катушка арқылы өтетін магнит ағыны, N — катушкадағы орамдар саны. Өткізгіштің индуктивтілігі оның пішіні мен геометриялық өлшемдеріне тәуелді. Мысалы, түзусызықты катушканың – соленоидтің индуктивтілігі мына формуламен есептеледі:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l},$$

мұндағы S — соленоидтің көлденең қимасының ауданы, l — оның ұзындығы.



Зертханалық жұмыстар

№ 6-зертханалық жұмыс. Өткізгіштердің аралас жалғануы

Жұмыстың мақсаты: ток тұтынушыларының аралас жалғанған электр тізбегіндегі жұмысын оқып-үйрену.

Керекті құралдар: вольтметрлер (3 дана), кедергісі 100—1000 Ом болатын резистор, 6,3 В · 0,3 А (3 дана) шам, ток көзі, жалғағыш сымдар.

Жұмыстың орындалу тәртібі

1-тапсырма. Айнымалы резисторды қосымша кедергі ретінде пайдаланып, аралас жалғанған электр сұлбасын оқып-үйреніңдер.

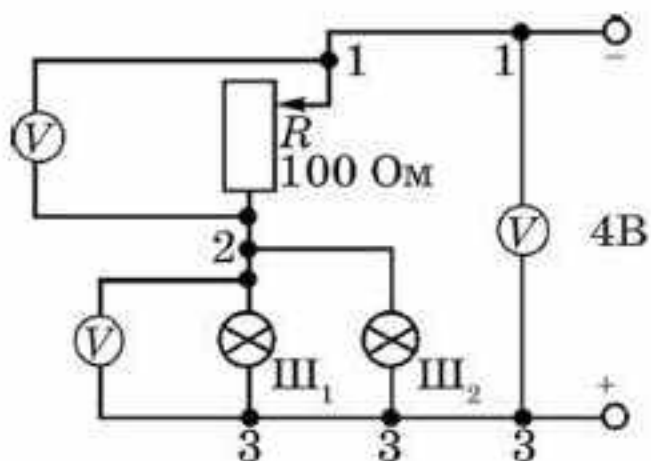
- 1-сурет бойынша электр тізбегін жинаңдар.
- Ш_1 , Ш_2 шамдары мен R айнымалы резисторларының бір-бірімен қалай жалғанғанын айтыңдар.
- 1- және 2-нүктелер арасындағы U_1 кернеу мен 1- және 3-нүктелер арасындағы U_2 кернеуді айнымалы резистор реттегішінің шекті жағдайы үшін өлшеңдер.

4. $U = U_1 + U_2$ теңдігінің дұрыстығына көз жеткізіңдер.

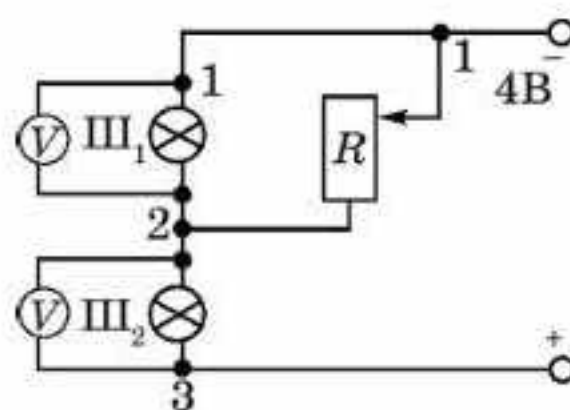
5. Резистордың реттегішін қозғай отырып, шамның жарықтылығының өзгеру себебін түсіндіріңдер.

2-тапсырма. Шунт (айналып өту жолы) қызметін атқаратын айнымалы резисторы бар аралас жалғаудың сұлбасын оқып-үйреніңдер.

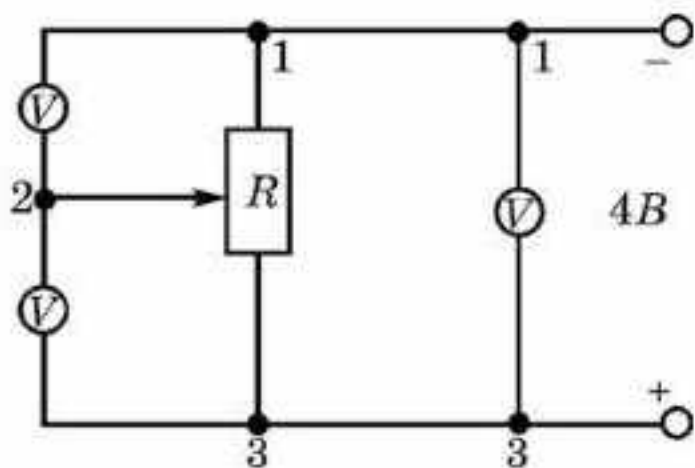
- 2-сурет бойынша электр тізбегін құрыңдар.
- Ш_1 , Ш_2 шамдары мен айнымалы резистордың өзара қалай жалғанғанын айтып беріңдер.
- Шамдарға параллель вольтметрді қосыңдар. Айнымалы резистор реттегішінің бір шекті жағдайдағы орнынан екінші шекті жағдайына қозғалта отырып, вольтметрдің көрсетуі мен шамның жарықтығын бақылаңдар. Байқалған эффектіні түсіндіріңдер.
- Резистордың реттегішін максимал кедергіні беретін жағдайға қойыңдар (2-сурет). Шамның жарықтығын еске сақтап, осы жарықтыққа сәйкес вольтметрдің көрсетуін жазып алыңдар.



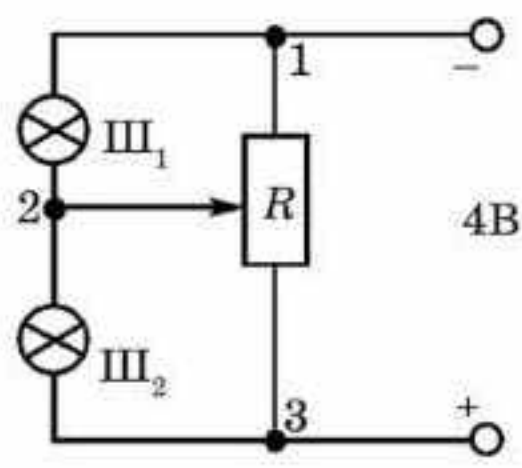
1-сурет



2-сурет



3-сурет



4-сурет

5. Резистордың реттегішін минималды кедергіні беретін жағдайға қойыңдар (2-сурет, төменгі бөлік). Шамның жарықтығын есте сақтап, осы жарықтыққа сәйкес вольтметрдің көрсетуін жазып алыңдар.

6. Аталған екі жағдайдағы шамдардың жарықтығы мен құралдар көрсетуін салыстырыңдар. Кедергі аз болғанда (екінші жағдай) Ш₁ шам неге жанбайды? Ал оған қосылған вольтметр кернеуді неге көрсетпейді?

3-тапсырма. *Потенциометрдің (кернеу бөлгіш) қызметін атқаратын айнымалы резисторы бар аралас жалғаудың сұлбасын оқып-үйрену.*

1. 3-сурет бойынша электр тізбегін құрыңдар.

2. Резистордың реттегішін бір шекті жағдайдан екінші шекті жағдайға жылжытыңдар. Вольтметрдің көрсетуін бақылаңдар.

3. Резистордың реттегішінің кез келген жағдайында тізбектегі жалпы кернеу (1- және 3-нүктелер арасы) V_1 мен V_2 вольтметрлері көрсетулерінің қосындысына тең болатынына көз жеткізіңдер, яғни айнымалы резистор U жалпы кернеуді U_1 және U_2 құраушыларына бөледі.

4. 4-сурет бойынша V_1 , V_2 вольтметрлерді шамдармен алмастырып, тізбек құрыңдар. Резистордың реттеуішін жылжыта отырып және шамның жарықтылығын бақылап, алдыңғы пунктте жасалған қорытындының дұрыстығына көз жеткізіңдер.

№ 7-зертханалық жұмыс. Ток көзінің ЭҚК және оның ішкі кедергісін анықтау

Керекті құралдар: ток көзі (4,5 В батарея), амперметр, вольтметр, реостат (6 Ом), жалғағыш сымдар.

Теориялық материал

5-суретте берілген сұлба бойынша реостат көмегімен тұйық тізбекке арналған Ом заңын $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$ қолданып, тізбектегі ток күшін өзгертіңдер.

Амперметр мен вольтметрдің көрсетуі бойынша бірнеше өлшеулер жүргізіп, \mathcal{E} ЭҚК мен ток көзінің r ішкі кедергісін анықтаңдар.

1) $I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + r}$ және $R_1 = \frac{U_1}{I_1}$, сонда $I_1 R_1 + I_1 r = \mathcal{E}$ немесе $U_1 + I_1 r = \mathcal{E}$.

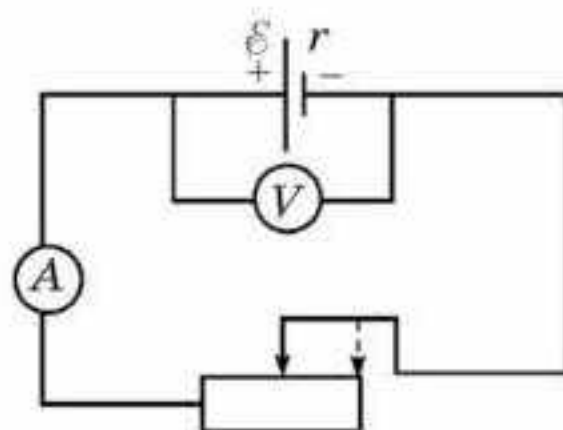
2) $U_2 + I_2 r = \mathcal{E}$, осыдан $U_1 + I_1 r = U_2 + I_2 r$. Сонда

$$r = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1}. \quad (1)$$

$I_1 r = \mathcal{E} - U_1$ және $I_2 r = \mathcal{E} - U_2$ болғандықтан,

$$\mathcal{E} = \frac{U_2 I_1 - U_1 I_2}{I_1 - I_2}. \quad (2)$$

Жұмыстың орындалу тәртібі



5-сурет

1. 5-суреттегі сұлбаға сәйкес тізбек құрастырыңдар.

2. Реттегішті реостаттың ортасына қойыңдар.

3. I_1 амперметрдің және U_1 вольтметрдің көрсетуін жазып алыңдар.

4. Реостаттың реттегішін жылжыта отырып, жаңа орынға апарыңдар.

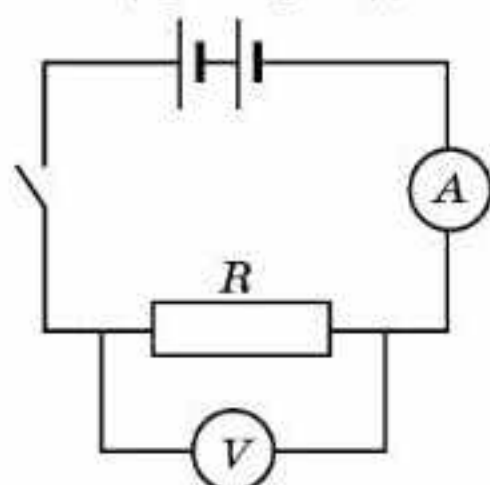
5. I_2 амперметрдің және U_2 вольтметрдің жаңа көрсетуін жазып алыңдар.

6. (1) және (2) формулаларын қолданып, ток көзінің ішкі кедергісі мен электр қозғаушы күшін есептеңдер.

7. Өлшеу қателерін анықтаңдар.

№ 8-зертханалық жұмыс. Қыздыру шамының, резистордың және жартылай өткізгіш диодтың вольт-амперлік сипаттамасы

Жұмыстың мақсаты: тұрақты кедергі кезінде өткізгіштегі, қыздыру шамындағы және жартылай өткізгішті диодтағы ток күшінің оның ұштарындағы кернеуге тәуелділігін зерттеу.



6-сурет

Керекті құралдар: ток көзі (12 В); вольтметр; амперметр; кілт; резистор; жартылай өткізгішті диод; шам патроны, қыздыру шамы (12 В); байланыстырушы сым.

Жұмыстың орындалу тәртібі

1. 6-суретте көрсетілген электр тізбегін жинаңдар.

2. Қоректендіру көзін қосыңдар.

3. Ажыратқышты тұйықтаңдар.

4. 0 В-тан 10 В-қа дейінгі кернеуді әрбір жолы 2 В ұлғайтыңдар, бұл ретте ток күшін, резистордағы кернеуді өлшеңдер.

5. Нәтижелерін 1-кестеге жазыңдар.

6. Резисторда өлшенген кернеудің өлшенген ток күші мәніне арақатынасын есептеп шығарыңдар және алынған кедергі мәндерін кестеге енгізіңдер.

1-кесте

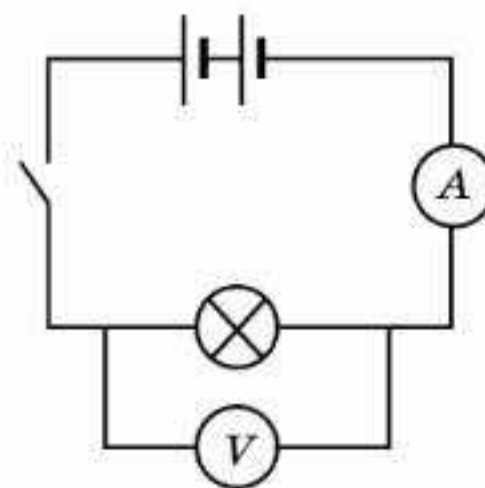
№	U , В	I , А	R , Ом

7. Резисторды қыздыру шамымен ауыстырыңдар (12 В) (7-сурет).

8. Қоректендіру блогын қайта қосыңдар, ажыратқышты тұйықтаңдар және өлшеулердің барлық тәртібін қайталаңдар.

9. Шамдағы ток күші мен кернеу үшін алынған деректерді 2-кестеге енгізіңдер.

10. Резисторда өлшенген кернеудің өлшенген ток күшінің мәніне арақатынасын есептеп шығарыңдар және алынған кедергінің мәндерін кестеге енгізіңдер.



7-сурет

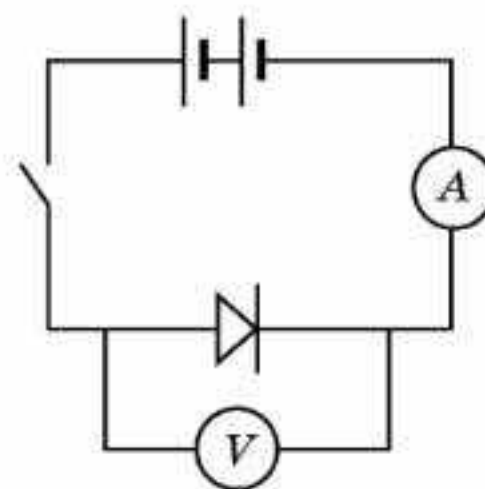
2-кесте

№	U , В	I , А	R , Ом

11. Қыздыру шамын жартылай өткізгішті диодпен ауыстырыңдар (8-сурет).

12. Ток көзіне қайта қосыңдар, ажыратқышты тұйықтаңдар және өлшеулердің барлық сериясын қайталаңдар.

13. Диодтағы ток күші мен кернеу үшін алған деректерді 3-кестеге енгізіңдер.



8-сурет

3-кесте

№	U , В	I , А

14. Тізбекті ажыратып жіберіңдер және ток көзін ажыратыңдар. Токтың кері бағыты кезіндегі жартылай өткізгішті диодтың вольт-амперлік сипаттамасын алу үшін сұлбаны жинақтаңдар.

15. Қоректендіру блогын қайта қосыңдар, ажыратқышты түйықтаңдар және өзгерістердің барлық сериясын қайталаңдар.

16. Диод арқылы токтың кері бағыты кезінде диодтағы ток күші мен кернеу үшін алған деректерді 4-кестеге енгізіңдер.

4-кесте

№	$U, В$	$I, А$

Эксперименттік деректерді өңдеу

1. 1-кестедегі деректер бойынша ток күшінің резисторға арналған кернеуге тәуелділік графигін құрыңдар.

2. 2-кестедегі деректер бойынша ток күшінің қыздыру шамына арналған кернеуге тәуелділік графигін құрыңдар.

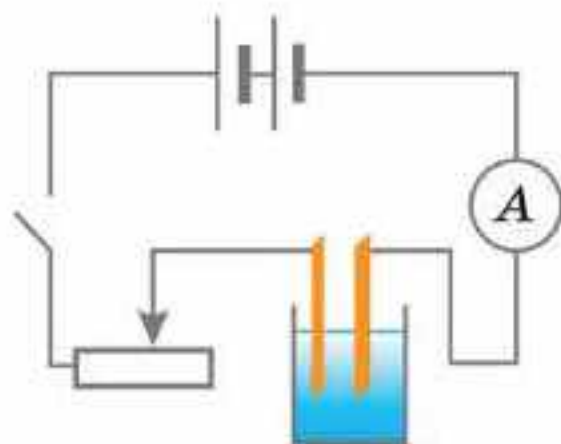
3. 3- және 4-кестелердегі деректер бойынша ток күшінің диод арқылы токтың тікелей және кері бағыттары үшін жартылай өткізгішті диодқа арналған кернеуге тәуелділік графигін құрыңдар.

№ 9-зертханалық жұмыс. Бір валентті ионның электр зарядын өлшеу

Жұмыстың мақсаты: бір валентті ионның зарядын тәжірибе арқылы анықтау.

Керекті құралдар: мыс купоросының су ерітіндісі бар электролиттік ванна (Cu_2SO_4), ток көзі (12 В), амперметр, реостат, 2 мыс электрод, кілт, жалғағыш сымдар, секунд өлшеуіш, электрондық таразы.

Жұмыстың орындалу тәртібі



9-сурет

1. Тазартқыш қағазының көмегімен мыс электродтардың бірінің үстін тазалаңдар. Оны кранның астына қойып жуыңдар және құрғатыңдар.

2. Электрондық таразының көмегімен осы электродтың m_1 массасын анықтаңдар.

3. 9-суретте көрсетілген электр тізбегін жинаңдар. Массасы белгілі электрод ток көзінің теріс клеммасына қосыңдар.

4. Ток көзіне қосып, тізбекті түйықтаңдар.

5. Реостаттың көмегімен тізбектегі токтың 1 А тең күшін орнатыңдар және тәжірибе жүргізілген уақыт ішінде оны тұрақты ұстандар.

6. Секунд өлшеуішті қосыңдар.

7. 20 мин өткеннен кейін тізбекті түйықтаңдар және ток көзін қосыңдар.

8. Ваннадан мыс электрод-катодты шығарыңдар. Электрондық таразылардың көмегімен оны құрғатыңдар және оның m_2 массасын анықтаңдар.

Эксперименттік деректерді өңдеу

1. Фарадей электролизінің бірінші заңының формуласын пайдалана отырып, мыстың электрохимиялық потенциалын есептеңдер:

$$k = \frac{\Delta m}{It}. \quad (1)$$

k табылған мәнін пайдалана отырып, мыс үшін валенттілік $z = 2$, ал молярлық масса $M = 64 \cdot 10^{-3}$ кг/моль екенін ескере отырып, электролиздің екінші заңының көмегімен Фарадей тұрақтылығын анықтаңдар:

$$F = \frac{M}{kz}. \quad (2)$$

$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ екенін ескере отырып, $F = eN_A$ формуласы бойынша бір валентті ионның зарядын есептеңдер.

2. Өлшемдер мен есептеулердің нәтижелерін 5-кестеге енгізіңдер.

5-кесте

m_1 , кг	m_2 , кг	$\Delta m = m_2 - m_1$, кг	I , А	t , с	k , кг/Кл	F , Кл/моль	e , Кл

МАЗМҰНЫ

ІІІ бөлім. ЭЛЕКТР ЖӘНЕ МАГНИТИЗМ

10-тарау. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

§ 49. Электр заряды. Электрлену. Электр зарядының сақталу заңы	4
§ 50. Кулон заңы	7
§ 51. Электр өрісі. Электр өрісінің кернеулігі. Электр өрісінің күш сызықтары	12
§ 52. Электр өрісі кернеулігі векторының ағыны. Гаусс теоремасы.....	21
§ 53. Электр өрісі күштерінің жұмысы	25
§ 54. Электр өрісінің потенциалы.....	29
§ 55. Электр өрісіндегі өткізгіштер.....	36
§ 56. Электр өрісіндегі диэлектриктер	40
§ 57. Электр сыйымдылық	45
§ 58. Конденсаторлардың құрылысы және түрлері	48
§ 59. Электр өрісінің энергиясы	53

11-тарау. ТҰРАҚТЫ ЭЛЕКТР ТОГЫ

§ 60. Электр тогы. Тізбек бөлігіне арналған Ом заңы	62
§ 61. Электр тізбегіне өткізгіштерді тізбектей және параллель жалғау. Толық тізбек үшін Ом заңы	69
§ 62. Кирхгоф ережелері	77
§ 63. Токтың жұмысы мен қуаты. Электр тогының жылулық әсері. Джоуль—Ленц заңы	81

12-тарау. ӨРТҮРЛІ ОРТАДАҒЫ ЭЛЕКТР ТОГЫ

§ 64. Металдардағы электр тогы.....	87
§ 65. Жартылай өткізгіштердегі электр тогы.....	93
§ 66. Сұйықтардағы электр тогы.....	102
§ 67. Газдардағы электр тогы.....	109
§ 68. Вакуумдағы электр тогы	116

13-тарау. МАГНИТ ӨРІСІ

§ 69. Магнит өрісі. Параллель токтардың өзара әсері	124
§ 70. Ампер күші.....	129
§ 71. Магнит өрісіндегі тогы бар контур.....	135
§ 72. Лоренц күші. Электр және магнит өрістеріндегі зарядталған бөлшектердің қозғалысы	144
§ 73. Заттардағы магнит өрісі	156

14-тарау. ЭЛЕКТРОМАГНИТТІК ИНДУКЦИЯ

§ 74. Электромагниттік индукция заңы	163
§ 75. Ленц ережесі.....	167
§ 76. Жылжып келе жатқан өткізгіштердегі индукцияның ЭҚК	171

§ 77. Максвелл гипотезасы	176
§ 78. Өздік индукция құбылысы	180
§ 79. Электромагниттік құралдар	186
Зертханалық жұмыстар.....	192
№ 6-зертханалық жұмыс. Өткізгіштердің аралас жалғануы	192
№ 7-зертханалық жұмыс. Ток көзінің ЭҚК және оның ішкі кедергісін анықтау	193
№ 8-зертханалық жұмыс. Қыздыру шамының, резистордың және жартылай өткізгіш диодтың вольт-амперлік сипаттамасы.....	194
№ 9-зертханалық жұмыс. Бір валентті ионның электр зарядын өлшеу	196



Учебное издание

**Кронгарт Борис Аркадьевич
Казахбаева Данагуль Мукажановна
Имамбеков Онласын
Кыстаубаев Талгат Зайнулланович**

ФИЗИКА

Часть 2

Учебник для 10 классов естественно-математического направления
общеобразовательных школ

(на казахском языке)

Редакторы *А. Сабдалиева*
Көркемдеуші редакторы *А. Сланова*
Техникалық редакторы *Л. Садықова*
Корректоры *Г. Тұрмағанбетова*
Компьютерде беттеген *Д. Шарипова*

Баспаға Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің
№ 0000001 мемлекеттік лицензиясы 2003 жылы 7 шілдеде берілген

ИБ № 5873

Басуға 08.06.19 қол қойылды. Пішімі 70 · 100¹/₁₆. Офсеттік қағаз.
Қаріп түрі "SchoolBook Kza". Офсеттік басылыс. Шартты баспа
табағы 16,13+0,32 қосарбет. Шартты бояулы беттаңбасы 66,46.
Есептік баспа табағы 9,29+0,54 қосарбет.
Таралымы 65000 дана. Тапсырыс №

"Мектеп" баспасы, 050009, Алматы қаласы, Абай даңғылы, 143-үй
Факс: 8(727) 394-37-58, 394-42-30
Тел.: 8(727) 394-41-76, 394-42-34
E-mail: mektep@mail.ru
Web-site: www.mektep.kz

