

Ҳ. САЪДУЛЛОЗОДА, Д.М. АҚДОДОВ

*Китоб ба соли маорифу фарҳанги  
техникӣ ва 20-солагии истиклолияти  
Ҷумҳурии Тоҷикистон бахшида  
мешавад.*

## ЭЛЕКТР ВА МАГНЕТИЗМ

ДАРСНОМА БАРОИ  
МАКТАБҲОИ ОЛӢ

Душанбе-2011

УДК 537 (075)  
ББК 22.33 Я 72  
С – 38

Муаллифон: номзади илмҳои техникӣ, дотсент  
Ҳочатулло Саъдуллозода Садуллоев;

номзади илмҳои физика ва математика  
Ақдодов Донаёр Мавлобахшович.

Муқарризон: Қодиров Бобоқул Абдуллоевич-номзади илмҳои физика ва математика, дотсент; Қумъаев Ҳусейн Қобилович-номзади илмҳои педагогӣ, дотсент; Сайдуллоева Муътабар-номзади илмҳои химия, и.в. профессор; Соддиқов Ислоҳ Соддиқович-номзади илмҳои физика ва математика, дотсент; Сабзалии Мисриён-номзади илмҳои физика ва математика, дотсент.

Дарсномаи тозаҷоди доир ба фанни «Электр ва магнетизм» панҷ боб: 1. Электростатика, 2. Қонунҳои ҷараёни доимӣ, 3. Майдонҳои магнитӣ, 4. Ҳодисаҳои электромагнитӣ ва қонунҳои ҷараёни тағйирёбанда, 5. Лаппиш ва мавҷҳои электромагнитӣ-ро дар бар гирифта, бо 134 расму нигораҳо ороиш дода шудааст.

Китоб мутобиқи барномаҳои таълимии Донишгоҳи миллии Тоҷикистон таълиф ёфтааст ва ҷавобгӯии ҳадди аққали Стандарти давлатӣ доир ба таълими олии касбии Қумхурии Тоҷикистон мебошад.

Дарснома ба шогирдони ихтисосҳои физикаи донишгоҳҳо, ичунин мактабҳои олии техникӣ ва табиатшиносӣ тавсия карда мешавад.

© Ҳ. САЪДУЛЛОЗОДА, Д.М. АҚДОДОВ

## ПЕШГУФТОР

Хонандаи арчманд, ба рӯйхати адабиёте, ки дар таълифи китоби дар даст доштаатон ин ё он қадар истифода шуданашонро таъкид менамоем, назар афканед. Дар он китобҳое, ки ба соҳаҳои электр ва магнетизм бахс мекунанд ва солҳои охир ба забони тоҷикӣ барои мактабҳои олии дарҷ ёфтаанд, ангуштшуморанд. Ҳол он, ки китобҳои дар ин соҳа бевосита ба забони русӣ таълифёфта ё аз забонҳои дигар ба забони русӣ тарҷумашуда маротиба зиёданд. Гузашта аз ин, дар баъзе аз васоити таълимии ба забони тоҷикӣ нашргардида, ки ба ҳалли намунавии масъалаҳои доир ба электр ва магнетизм ба қадри бояду шояд барои амиқтар азбар кардани мавзӯҳо кӯмак мерасонда бошанд, камтар аҳамият дода шудааст. Дар ҷанде аз онҳо ба таҷрибаҳои таҷрибаҳои назарияҳои конунҳои диққати назаррас дода нашуданашонро пайҳас кардан душвор нест.

Ин гуна камбудихоеро, ки ба зарурияти нашри он китобҳо ба ҳеҷ вачҳ монёе нашуда буданд, ба эътибор гирифта, муаллифон бо истифодаи таҷрибаи солҳои тӯлонӣ дарсгӯӣ аз электр ва магнетизм барои ихтисосҳои гуногуни илм ва техника, фанҳои дигари табиатшиносӣ ба таълифи китоби барои эҳтиҷманди ин соҳаҳо пешкашгардида миён бастанд.

Ҳангоми таълифи ин воситаи таълимӣ боз ба он диққати ҷиддӣ дода шуд, ки китоб бояд ба талаботи Стандарти давлатии таълими маълумоти олии касбии Ҷумҳурии Тоҷикистон ҷавобгӯ бошад. Муаллифон то ҷӣ андоза ба ин талабот муваффақ гардидаанд, бигзор мутахассисони варзидаи ин соҳаҳо ва эҳтиҷмандони китоб арзёбӣ намоянд.

Китоб панҷ бобро дарбар гирифтааст: 1. Электростатика, 2. Қонунҳои ҷараёни доимӣ, 3. Ҳодисаҳои магнитӣ, 4. Ҳодисаҳои электромагнитӣ ва қонунҳои ҷараёни тағйирёбанда, 5. Лаппиш ва мавҷҳои электромагнитӣ.

Баёни мавзӯҳои тамоми бобҳо ба намунаи ҳалли бисёр масъалаҳои барои амиқтар азбар намудани мунтазами мавзӯҳо кӯмакрасон ҷӯр мешаванд. Ғайр аз он, дар поёни ҳар як боб машқҳои иборат аз 25-30 масъалаҳо бо ҷавобҳоишон барои ҳалли мустақилона оварда шудаанд.

Муаллифон ба муқарризони мӯхтарам: Қодиров Бобокул Абдуллоевич-номзади илмҳои физика ва математика, дотсенти факултети физикаи Донишгоҳи омӯзгорӣ Тоҷикистон ба номи С. Айни; Ҷумъаев Ҳусейн Қобилович-номзади илмҳои педагогӣ, мудири кафедраи методикаи таълими физикаи Донишгоҳи омӯзгорӣ Тоҷикистон ба номи С. Айни; Сайдуллоева Мӯътабар-номзади илмҳои химия, иҷрокунандаи вазифаи профессори кафедраи физикаи Донишгоҳи техникаи Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ; Соддиқов Ислоҳ Соддиқович-номзади илмҳои физика ва математика, мудири кафедраи физикаи Донишгоҳи аграрӣ Тоҷикистон ба номи Шириншоҳ Шотемур; Сабзалии Мисриён-номзади илмҳои физика ва математика, дотсенти кафедраи физикаи ҷисмҳои саҳти Донишгоҳи миллии Тоҷикистон, ки барои пурмазмунтар гардидани китоб маслиҳатҳои хеле муфид додаанд, инчунин ба муҳаррирони маъсул – дотсент Ҳ. Шарифзода, Истамов Ф.-номзади илмҳои физика ва

математика, Шоимов У.-муаллими калони кафедраи физикаи умумии Донишгоҳи миллии Тоҷикистон, ки дар бартараф кардани чанде аз камбудихову норасоихои дар китоб роҳёфта сахм гузоштанд, арзи миннатдорӣ менамоянд.

Китоб ба соли маорифу фарҳанги техникӣ ва 20-солагии истиклолияти Ҷумҳурии Тоҷикистон бахшида мешавад.

Муаллифон умедворанд, ки хонандагони арҷманд доир ба тарзи баёни мавзӯҳо, мундариҷа ва банду басти китоб ақидаҳои худро бевосита ба нишонаи кафедраи физикаи умумии Донишгоҳи миллии Тоҷикистон ё тариқи матбуоти даврӣ изҳор менамоянд ва ба нашрияҳои минбаъдаи мукамалтари китоб сахмгузор мешаванд.

Муаллифон



## МУҚАДДИМА

Вожаҳои раъду барқ, ҷараёну қувваҳои электрӣ, инчунин кори мошину дастгоҳҳо, механизмҳои гуногун, компютерҳо, асбобҳои рӯзгор (гармидиҳандаҳо, мошинҳои ҷомашӯӣ, ҷароғҳои гуногун, радиову телевизион, телефонҳои мобилӣ), василаҳои андозагирӣ (амперметру вольтметрҳо ва ғайра), ҳаракати троллейбусу трамвайҳо, ки бо таъсири ҷараёнҳои электрӣ иҷро мешаванд, ба бисёриҳо гӯё маълуманд. Вале ҳодисаҳои ба ном электромагнитӣ ва қонуниятҳои онҳо, ки омӯхтанашон ҳадафи ин дарснома мебошад, на ба ҳама шиносанд. Ҳол он, ки амали кулли мошину дастгоҳҳои зикрффта маҳз ба қонуниятҳои ҳодисаҳои электромагнитӣ асос ёфтаанд.

Аксари қувваҳо, ки шумо бо онҳо дар қисмҳои механикаю физикаи молекулавӣ шинос шудед: чандирӣ, соиш, фишор, гидродинамикӣ (ғайр аз қувваҳои гравитатсионӣ) табиатан электромагнитанд. Дар сохтори атому молекулаҳо, ки тамоми модҳо аз онҳо таркиб ёфтаанд, қувваҳои электромагнитӣ нақши ҷиддӣ доранд.

Муқаррар карда шудааст, ки афканишоти гуногун – инфрасурх, рӯшноии ба ҷашм намоён, ултрабунафш, шуоҳои рентгенӣ, гамма-шуоҳо табиати ягона доранд-онҳо мавҷҳои электромагнитанду бо басомад ё дарозии мавҷашон фарқ мекунанд.

Барои ба қонуниятҳои ҳодисаҳои электромагнитӣ амиқтар сарфаҳм рафтан муҳтасар бо таърихи ташаккул ёфтани мафҳумҳои асосӣ ва донишҳои мо оид ба ҳодисаҳои электромагнитӣ аз аҳамият ҳолӣ нест.

Юнониҳои қадим (садаи VI пеш аз солшумории милодӣ) ҳодисаи аҷибро мушоҳидаву доир ба он дар маъхазҳо маълумот дода буданд (Фалес Милетский): ҳангоми бо мақсади тоза кардан ба матои пашмин совидани мӯҳраҳо, ки аз қатрон (шилм)-и дарахтон месохтанду бо мурури замон тира мегаштанд, ба онҳо нахҳои мӯй, чизҳои майдаи сабук ҷазб мешаванд (ба забони тоҷикӣ ин гуна қатрон қаҳрабо ном доштанаширо хотиррасон менамоем). Садаҳои тӯлонӣ ин ҳодиса танҳо ҳоси қаҳрабо доништа мешуд.

Олими англис У. Гилберт с. 1600 китобро бо унвони «Дар бораи магнит, моддаҳои магнитӣ, Замин-магнити азимҷусса» ба нашр расонда, ғайр аз қаҳрабо зиёда аз 20 моддаҳои дигар (гӯгирд, намаки ошӣ, шиша, кварц, аксари сангҳои қиматбаҳо,...)-ро номбар кардааст, ки дорои ҳосияти қаҳрабо гардида метавонанд. Ҳамин буд, ки У. Гилберт ба забони юнонӣ *электрон* ном доштани қаҳраборо ба эътибор гирифтаву шояд барои гиromидошти кашофони нахустини ҳосияти қаҳрабо ва моддаҳои дигари номбурда ҳодисаи дар боло зикрффтаре «*электрӣ*» номид. Дар ин асос У. Гилберт дар таърихи илмҳои табиатшиносӣ чун поягузори соҳаи электромагнитӣ шинохта шудааст.

Агар ҷисме тавассути соиш ё усули дигаре (мо бо онҳо минбаъд шинос хоҳем шуд) ҳосияти кашидани нахҳои мӯй ё чизҳои майдаю

сабукро пайдо намояд, мегӯянд, ки он чисм дорои як *микдор электр*<sup>\*)</sup> (ба лафзи русӣ *количество электричества* ё мухтасар *заряд*, ба англисӣ *electricity*) мебошад. (Ин гуна ходисаро ба русӣ *электризация* меноманд, ки дар ибтидои тарҷумаи китобҳои дарсӣ аз русӣ ба тоҷикӣ он *электрнокшавӣ* қабул шуда буд, вале минбаъд бо сабаби дар ин вожа паси ҳам омадани чор ҳамсадои муҳолифи қойидаҳои забони тоҷикӣ онро бо истилоҳи иқтибосии *заряднокшавӣ* иваз карданд; дар ин китоб ба ҷойи ин вожа муродифи ба ҳақиқати ҳол мувофиқтари *электришавӣ* корбаст гардид.)

Ҳодисаҳои электрӣ бо сабаби хеле заиф будани қувваҳои ҷозибаи зикрғфта ва минбаъд татбиқи амалӣ наёфтани то садаи XVII гӯё фаромӯш гардиданд. Вале ходисаҳои магнитӣ бештар диққати одамро ҷалб намуданд. Бояд ёдовар шуд, ки магнит низ аз замони қадим маълум будааст. Масалан, доимо ба як сӯи муайян нигаронида шудани сӯзани оҳани магнитнокро, ки аз миёнҷояш дар нӯги ресмон овезон аст (намунаи аввалини ақрабаки магнитии ҳозира-қутбнамо-компас)-ро, чиниҳо ханӯз дар садаи XI барои дарёфти самтҳои қорвонгардӣ дар биёбонҳои беканор бо мақсадҳои тичорат истифода мебардаанд.

Аврूपоиён танҳо дар садаи XII ба муносибати шуғл варзидан бо баҳрнавардӣ компасро корбаст мекардагӣ шуданд.

Соли 1269 дар Фаронса П. Перегринус ҳамеша дорои ду қутб (ҳоло онҳоро шимолию ҷанубӣ меноманд) будани магнитро ошкор сохт ва муқаррар кард, ки қутбҳои гуногунном ҳамдигарро ҷазб менамоянду қутбҳои ҳамном аз якдигар тела меҳӯранд.

Ҳамин тариқ, то охири садаи XVI далелҳои зиёди таҷрибавӣ доир ба магнетизм гун шуданд, вале дар бораи ходисаҳои электрӣ маълумоти ночиз гирд омада буданд. У. Гилберт тамоми далелҳои то замонаш маълуми оид ба ходисаҳои магнетию электрӣ, инчунин натиҷаҳои тадқиқот ва мушоҳидаҳои ҳудро ҷамъбаст намуда, китоби номбурдаашро ба ҷоп расонд.

Дар нимаи аввали садаи XVII як қатор кашфиётҳои нав доир ба ходисаҳои электрӣ тавачҷӯҳи табиатшиносро зиёд намуд. Ба ин, пеш аз Ҳама, ихтирои мошини электрӣ барои ҳосил кардани зарядҳои зиёд (олими олмонӣ О. Герике, с. 1660) имконияти васеи таҷрибагузарониро фароҳам овард (ин гуна мошинҳои электрии минбаъд хеле такмилёфта ҳоло дар кулли лабораторияю кабинетҳои мактабҳо ҷой гирифтаанд).

Соли 1729 олими англис С. Грей (1666 - 1736) аввалин шуда ба воситаи симҳои металлӣ интиқол додани зарядҳоро ошкор сохта,

\*) Ҳоло термини байналмилалӣ «электр» - ро бо истилоҳи «барқ» иваз карда истодаанд; чунончӣ, энергияи электриро нерӯи барқ, ҷараёни электриро - барқ мегӯянд, ки чандон дуруст нест. Зеро дар илм, техника садҳо истилоҳҳо дучор меоянд, ки дар таркибашон решаи «электр» доранд: электрод, электролиз, электроника, электростатика, электродинамика, электромагнитӣ чанд намуна аз онҳост. Ин гуна терминҳоро бо «барқ» ифода кардан ғайри имкон аст, пеш аз Ҳама маънӣ вайрон мешавад, қойидаҳои калимасозӣ риоя намегарданд. Зиёда аз он, барқ ходисаи ниҳоят кӯтоҳмуддати атмосферист, ки бо дурахш ва ақсар тарқиши пурқуввати гулдурӯсӣ рӯй медиҳад, вале ҷараёни электрии муқаррарӣ ин гуна аломатҳо надорад. Истилоҳи «барқ» бештар ба термини русии «разряд» рост меояд.

моддаҳоро ба ноқил ва ғайриноқил (диэлектрик ё изолятор) - хо чудо қард. Олими фаронсавӣ Ш. Дюфэ (1698 - 1739) мавҷудияти танҳо ду чинс (навъ) - ҳои зарядҳоро кашф карда, онҳоро шишагию каҳрабӯӣ номид. Ӯ муқаррар кард, ки зарядҳои гуногунном ҳамдигарро ҷазб менамоянду зарядҳои ҳамном аз якдигар тела меҳӯранд. Сипас ба ҳодисаҳои электрӣ шавқи тадқиқотчиён афзудан гирифт. Дар асоси таҷрибаҳо олимони рус М.В. Ломоносов (1711 - 1765), Г.В. Рихман (1711 - 1753) ва олими амриқоӣ Б. Франклин (1706 - 1790) табиати электрии раъду барқро муқаррар намуданд (академик Рихман аз таъсири ҷараёни раъду барқ ҳалок гардид). Маҳз Б. Франклин ба ҷойи зарядҳои шишагию каҳрабӯӣ мувофиқан мафҳумҳои зарядҳои мусбату манфиро ба илм ворид кардааст.

Бояд бо ифтихор ёдовар шуд, ки Шайхурраис (Ибни Сино) дар асари худ «Дар зикри сабабҳои раъд» дар натиҷаи соишхӯрии абрҳо ба вучуд омадани оташақро ҳанӯз дар садаи X шарҳ дода буд. Зиёда аз он, дар рисолаи дигар «Қурозаи табиӣёт» ӯ овардааст, ки ҳангоми хилъати навшустаи хушқро бо дастон молиш додан оташақ мепарад ва он оташақи ҳангоми бархӯрди ду санг ҳосилшавандаро ба ёд меорад.

То миёнаи садаи XVIII ҳодисаҳои электрӣ танҳо сифатан тадқиқ карда мешуданд. Олими фаронсавӣ Ш. Кулон (1736 - 1806) қонуни миқдории ҳамтаъсироти ҷисмҳои хурди заряднок (зарядҳои нуқтавӣ) - ро кашф кард (с.1785). Минбаъд олимони итолиёвӣ Л. Галванӣ (1737 - 1798) ва А. Волта (1745 - 1825) ҳодисаҳои электрии контакт (тамос)-иро ошқор сохтанд, ки дар натиҷа А. Волта с. 1800 аввалин шуда манбаи ҷараёнро ихтироъ намуд. Сипас ҷараёни устувори электрӣ - ҳаракати тӯлонии ботартибонаи зарраҳои заряднок ҳосил карда шуд, ки ба бунёди электротехникаи муосир таҳкурсии асосӣ гардид. Даре нагузашта тадқиқотчиёни англис Э. Карлейл (1768 - 1840) ва У. Николсон (1753 - 1815) бо ёрии ҷараёни электрӣ обро ба гидроген ва оксиген таҷзия карда, ба электрохимия асос гузоштанд, ки боиси татбиқи васеии амалии ҷараёни электрӣ гардиду минбаъд ин гуна татбиқҳои ҷараён афзудан гирифтанд.

Соли 1820 олими даниягӣ Х. Эрстед (1777 - 1851) таъсироти ҷараёни электрӣ ба ақрабаки магнитиро кашф кард ва ба ҳам пайваста будани ҳодисаҳои электрию магнитиро ошқор сохт. Тадқиқотҳои олими фаронсавӣ А.М. Ампер (1745 - 1836) дар ҳамон солҳо, хусусан таъсироти майдони магнити доимӣ ба ноқили ҷараёндор ва ҳамтаъсироти ҷараёнҳои параллелӣ дар инкишофи назарияи электромагнитӣ нақши қалон бозиданд. Минбаъд дар тадқиқоти оид ба ҳосиятҳои ҷараёни электрӣ кашфиёти олими олмонӣ Г. С. Ом (1787 - 1854), ки ҳоло чун қонуни Ом маъмул аст (с. 1826), саҳми босазо гузошт.

Дар таърихи физика ду кашфиёти олими англис М. Фарадей (1791 - 1864) - аввало ҳодисаи индуксияи электромагнитӣ (с. 1831) ва қонунҳои электролиз (с. 1834), ки асоси татбиқҳои техникаӣ гардиданд, нақши беҳамто бозиданд.

Кашфи қонуне, ки новобаста ба якдигар олими англис Ч.П. Ҷоул (1818 - 1889) ва олими рус Х. Ленс (1804 - 1865) дар соҳаи таъсироти ҳароратии ҷараёни электрӣ (с. 1841 ва 1842) қарданд ва



холо номи онҳоро гирифтааст, минбаъд барои татбиқи амалии чараёни электрӣ мусоидат намуд.

Дар ташаккулёбии мафҳуми асосии таълимоти оид ба ҳодисаҳои электромагнитӣ - майдони электромагнитӣ саҳми олимони англис М. Фарадей ва Ч.К. Максвелл (1831 - 1879) хеле бузург аст. Махз Максвелл с. 1860 - 1865 назарияи майдони ягонаи электромагнитиро бунёд сохт ва с. 1865 имконияти дар фазои озод паҳн шудани мавҷҳои электромагнитиро пешгӯӣ кард. Ҳамин буд, ки физики олмонӣ Х. Ҳерц (1857 - 1894) ба тарзи таҷрибавӣ (с. 1887 - 1888) имконияти дар фазои озод паҳн шудани мавҷҳои электромагнитиро ошкор сохта, ба назарияи электромагнитии Максвелл асоси комил гузошт.

Аз назарияи Максвелл инчунин табиати мавҷи электромагнитӣ доштани рӯшноӣ бармеояд ва таҷрибаҳои Ҳерц ин хулосаро низ пурра тасдиқ намуданд.

Ба истифодаи амалии мавҷҳои электромагнитӣ ихтироии телеграфи бесим, радио (олими рус А.С. Попов с.1895 ва олими италийӣ Г. Маркони с. 1896) асос ёфт.

Дар тасдиқи таҷрибавии назарияи Максвелл тадқиқоти олими рус П.Н. Лебедев (1866 - 1912) оид ба ошкор сохтан ва чен кардани фишори рӯшноӣ (с.1901) аҳамияти калон доштанд.

Бояд иқрор шуд, ки муодилаҳои Максвелл чун қонунҳои Нютон умумияти далелҳои таҷрибавӣ буда, ҳодисаҳои электромагнитиро бо сохти дохилии модда алоқаманд намегардонад. Ҳамин буд, ки ин назария ҳодисаи электролиз - чудо шудани модда дар электродҳо хангоми аз маҳлули намак, ишқор (асос) туршӣ (кислота) - хо гузаштани чараёни электрӣ инчунин ҳамтаъсири чараёни электрӣ бо модда ва чанд ҳодисаҳои дигар - эмиссияи термоэлектронӣ (хориҷ кардани электронҳо дар вақти металлҳоро тафсондан), эффекти фотоэлектрӣ (бо таъсири рӯшноӣ аз сатҳи модда қанда шудани электронҳо) ва ғайраро шарҳ дода натавонист. Ин гуна ҳодисаҳо танҳо баъди с. 1897 кашф кардани зарраи таркибии модда - *электрон*, ки массааш назар ба массаи атоми хурдтарин - гидроген анқариб 1837 маротиба хурд аст (Ҷ.Ҷ. Томсон - олими англис, лауреати мукофоти Нобелӣ, с.1906), шарҳи худро ёфтанд.

Бунёди ба ном назарияи электронии сохти модда, ки асосгузронаш олими олмонӣ П. Дрүде (1863 - 1906) ва дорандаи ҷоизаи Нобелӣ олими голландӣ Х.А. Лоренс (1853 - 1928) мебошанд, назарияи Максвеллро бо ҳосиятҳои электрии модда пайваст. Дар ин ҷода таҷрибаҳои ниҳоят моҳиронаи олими амриқоӣ Р. Милликен (1868 - 1953) оид ба чен кардани миқдори қамтарини электр-заряди элементарӣ аҳамияти хоса пайдо кард (ҷоизаи Нобелӣ, с. 1923).

Минбаъд қорқарди назарияи диэлектрик ва нимқоқилҳо ба назарияи муосири сохти модда пояи мустақам гузошт. Рушду нумӯии физика дар ин соҳа боиси кашфи усулҳои хориҷ кардани энергияи ядрӯӣ, ихтироии лазер, қорқарди технологияи навтарин гардиданд, ки техника ва фарҳанги инсониятро ба дараҷаи нави инқишоф оварданд.

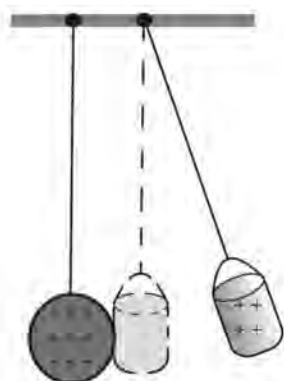
## ЭЛЕКТРОСТАТИКА

## §1.1. Электривавӣ. Қонуни бақои заряд

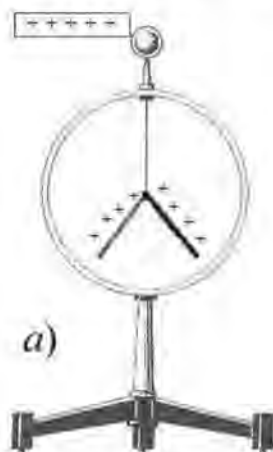
Чисмхоро бо усулҳои гуногун дорои хосияти электрӣ гардондан мумкин аст. Усули маъмулро бисёриҳо медонанд; масалан, агар шонаи пластмассагӣ бо матоии мӯйина соиш дода шавад, он коғазпораҳои хурдро ҷазб менамояд. Роҳи дигари заряднок кардани ҷисм дар он аст, ки мавриди ҷисми безарядро ба ҷисми пешакӣ заряднок расондан, ба он як миқдор электр аз ҷисми заряднок интиқол меёбад. Чунончӣ, агар силиндри хурди коғазиро дар нӯги ресмон овозон карда, ба курачаи заряднок расонем, цилиндр баъди як миқдор электр гирифта аз курача тела меҳӯрад (расми 1.1). Ба ҳамин гуна ҳодиса амали асбоби ошқорсозандаи заряднок будани ҷисм - *электроскоп* (расми 1.2, а) ва дастгоҳ барои ҷен кардани миқдори заряд - *электромметр* (расми 1.2, б) асос ёфтааст.

Агар порчаи металли безарядро ба ҷисми заряднок нарасонда, дар масофае аз он ҷойгир намоем, дар сатҳи ба ҷисм наздики порчаи металлӣ зарядҳои муқобилчинс (расми 1.3, а), дар нӯги дуртари он заряди ҳамчинс гун мешаванд. Дар мавриди заминвасла будани порчаи металлӣ дар он танҳо зарядҳои гуногунчинс боқӣ мемонанду зарядҳои ҳамчинс ба замин интиқол меёбанд (расми 1.3, б). *Зарядҳои* дар порчаи металл ҳосилшударо *индуксионӣ* (аз сухани латинии *inductio*-барангехтан) ва ҳуди ҳодисаро *индуксияи электростатикӣ* меноманд.

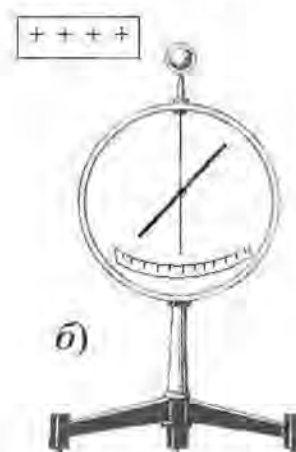
Ҳодисаҳои электрие, ки дар боло тафсир ёфтанд, дар асоси назарияи муосири сохти модда чунин шарҳ дода мешаванд. Атому молекулаҳои, ки моддаҳо аз онҳо таркиб ёфтаанд, сохтори мураккаб доранд. Дар атомҳо зарраҳои мавҷуданд, ки ғайр аз масса дорои хосияти махсуси аслии ба ном электрӣ мебошанд (бояд кайд кард, ки хосияти электрии зарра тавассути ягон мафҳуми соддатари маълум шарҳ дода намешавад ва ба саволи заряд чист? илм ҳанӯз ҷавоби қаноатбахш дода наметавонад). Ин хосият дар қатори масса рафтори атому молекулаҳоро муайян мекунад. Тавре ки дар пешгуфтор зикр ёфт, хосияти электрӣ танҳо ду навъанд; яке мусбату дигаре манфӣ.



Расми 1.1

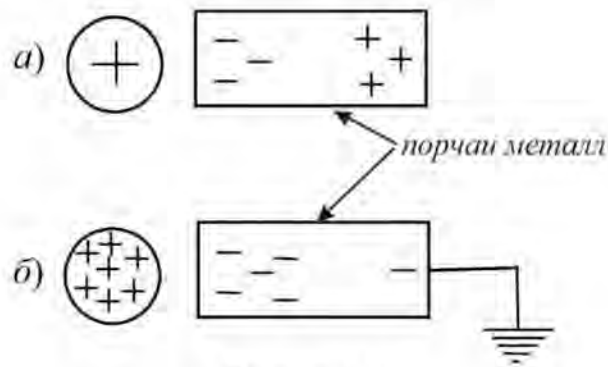


а)



б)

Расми 1.2



Расми 1.3

Дар табиат *зарраҳое* дучор меоянд, ки аз хосиятҳои электрӣ маҳруманд, яъне аз ҷиҳати электрӣ *нейтралӣ* мебошанд (аз сухани латинии *neutralis* - на ба ину на ба он мансуб). Масалан, зарраи таркибии ядроӣ атом - нейтрон (дар бобати ин зарра дар физикаи атом ва ядро маълумот оварда мешавад) ва чанд зарраҳои дигар аз қабали мезонҳо нейтраланд.

Миқдори камтарини электр, ки дар таҷриба чен карда шудааст, *заряди элементарӣ* (*бунёдӣ*) ном дорад ва онро бо ҳарфи  $e$  ишорат мекунанд ( $e = 1,60221892 \cdot 10^{-19}$  кулон  $\approx 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл; 1 Кл - воҳиди заряд дар системаи Байналмилалии воҳидҳо (СИ), мебошад, ки доир ба бузургии он дертар маълумот дода мешавад). Масалан, зарраи таркибии ҳаргуна атом - электрон дорои заряди манфии элементарӣ, заряди протон ҳамин қадар, вале мусбат аст. Миқдори электрӣ дилхоҳ ба заряди элементарӣ каратӣ:  $Q = \pm Ne$  ( $N=0, 1, 2, 3, \dots$  - ададҳои бутун) мебошад.

Мувофиқи назарияи муосири сохти модда ҳар гуна атом аз мағз - *ядро*, ки он анқариб массаи пурраи атомро дарбар мегираду андозаҳои  $10^{-14} \div 10^{-15}$  м мебошад ва мутобиқи модели на чандон сахҳ - дар атрофи ядро дар масофаи тақрибан  $10^{-10}$  м электронҳо (чун сайёраҳо дар гирди Офтоб) бо таъсири қувваҳои электромагнитии назар ба қувваҳои гравитатсионӣ абарқудрат гардишхӯранда таркиб ёфтааст. Дар ҳар атом миқдори зарядҳои мусбату манфӣ баробар буда, атоми том аз ҷиҳати электрӣ нейтрал аст.

Теъдоди электрону протонҳо дар атом ба рақами тартибии элемент дар ҷадвали даврии Д.И. Менделеев баробар аст. Аз ин рӯ атомҳои элементҳои гуногун бо теъдоди электрон ва протонҳоишон фарқ мекунанд.

Молекулаи модда аз ду ва зиёда атомҳо таркиб ёфта метавонад. Хосиятҳои кимиёвии модда бо теъдоди электронҳо дар мадори аз ядроӣ атом дуртарин воқеъгардида, ки *электронҳои валентӣ* ном доранд, муайян карда мешаванд. Ба вучуд омадани банди кимиёвӣ бо додугирифтӣ электронҳои валентӣ дар байни атомҳою молекулаҳо шарҳ меёбад.

Ҳангоми аз атомҳою молекулаҳои алоҳида ташаккул ёфтани модда баъзан як ё якчанд электронҳо аз таъсири ҳар як ядро мебароянд ва дар натиҷа ба ном *электронҳои «озод»* ба вучуд меоянд.



Ин электронҳо ҳаҷми моддаро тарк карда наметавонанд, вале дар ин ҳаҷм гӯё озодона ҳаракат мекунанд. Агар дар воҳиди ҳаҷми модда ҳар қадар теъдоди зиёди электронҳои озод мавҷуд бошад, он модда ҷараёни электриро ҳамон қадар хуб мегузаронад ва металлҳо мисоли ин гуна моддаҳо мебошанд. Ғайр аз металлҳо маҳлули оби ишқор (асос)-ҳо, инчунин гудохтаи намакҳо низ ноқилҳои хубанд, вале механизми ҷараёнгузарони онҳо назар ба металлҳо фарқ дорад (дар ин бора минбаъд муфассалтар тавакқуф хоҳем кард). Дар ғайриноқил (диэлектрик)-ҳо назар дар ноқилҳои металлӣ теъдоди электронҳои озод хеле кам аст; каҳрабо, шиша, чинӣ, парафин, равғанҳо, газҳо дар шароити муқаррарӣ, резина, аксари пластмассаҳо, оби тоза, ҷӯби хушк ва ғайраҳо диэлектриканд. Бояд қайд кард, ки дар байни ноқилҳо ғайриноқилҳо ҳудуди чиддӣ вучуд надорад, ҳар гуна модда ба ин ё он дараҷа ҷараён гузаронида метавонад (масалан, ҳарчанд оби тоза изолятори хуб аст, дар мавриди ба он маҳлул кардани як микдор намак, ишқор ё туршӣ, ин маҳлул ба ноқил табдил меёбад).

Ҳангоми ҷисмҳои гуногунро ба ҳам соиш додан маҳз электронҳои озод аз як ҷисм ба ҷисми дигар интиқол меёбанд; ҷисме, ки як микдор электронҳояшро гум мекунад, мусбату ҷисми электронҳои озод қабулнамуда манфӣ заряднок мешаванд. Ҳар қадар ҷисмҳо дорой микдори зиёдтари ин ё он ҷинси электр гарданд, қувваи ҷозиба ё теладихии электрии байни ин ҷисмҳо ҳамон қадар меафзояд. Аз ин рӯ микдори электр меъёри пурзӯр ё сусти будани қувваҳои ҳамтаъсири ҷисмҳои заряднок мебошад.

Дар шароити муқаррарӣ аксари ҷисмҳо нейтраланд, яъне дар онҳо микдори зарядҳои мусбату манфӣ баробаранд. Агар бо ягон роҳ, масалан тавассути соиш ин мувозанат вайрон карда шавад, ҷисмҳо заряднок мегарданд.

Таҷрибаҳо собит менамоянд, ки зарядҳои ҷисмҳо аз ҳеч ба вучуд намеоянду нест ҳам намешаванд, онҳо дар байни ҷисмҳои гуногуни ягон системаи ҷисмҳо тавре тақсим мегарданд, ки микдори умумии заряди система ҳар қадаре дар ибтидо бошад, ҳамон қадар боқӣ мемонад. Ин хулоса моҳияти яке аз қонунҳои табиат - *қонуни бақои зарядро* ифода менамояд. Қонуни бақои зарядро ба тарзи математикӣ чун:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_N = \sum_{i=1}^N q_i = const$$

пешниҳод карда метавонем, ки дар ин ҷо  $q_1, q_2, \dots, q_N$  -зарядҳои ҷисмҳои системаи сарбаст мебошанд. То ҳол ягон мавриди вайроншавии ин қонун ошкор нагардидааст. Пас, ду ҷисми ба ҳам соишхӯрда ба микдорҳои баробар, вале яке мусбату дигаре манфӣ заряднок мешавад.

Фарз мекунем, ки ду курачаи металли айнан якхелаи яке ба қадри  $q_1 = \pm 2 \text{ мкКл}$  ва дигаре  $q_2 = \pm 8 \text{ мкКл}$  заряднокбударо ба ҳам расонда, аз нав дуртар ҷойгир намоем, онҳо мувофиқи қонуни бақои

заряд дорой микдорҳои электрии  $q'_1 = q'_2 = \frac{q_1 + q_2}{2} = \pm 5 \text{ мкКл}$  мегарданд,

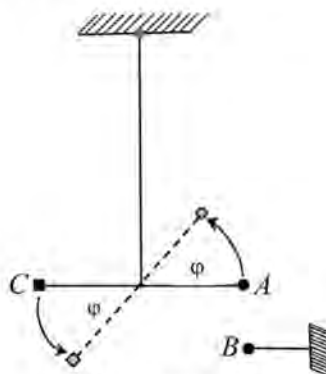
зеро курачаҳо аз якдигар бартариё надоранд (дуртар мефаҳмем, ки ғунҷоиши электрии онҳо баробаранд). Дар мавриди то расиш

курачаҳо ба кадри  $q_1 = -2 \text{ мкКл}$  ва  $q_2 = 8 \text{ мкКл}$  заряднок будан баъди расиш миқдори электри онҳо акнун  $q_1'' = q_2'' = \frac{-2+8}{2} \text{ мкКл} = 3 \text{ мкКл}$  мешавад.

Дар физикаи атому ядро нақши қонуни бақои бузург мебошад.

## §1.2. Қонуни Кулон

Тавре ки зикр ёфт, ду ҷисми заряднок (мухтасар зарядҳо) ба ҳам таъсир мерасонанд: зарядҳои ҳамном (ҳарду мусбат ё ҳарду манфӣ) аз якдигар тела меҳӯранду зарядҳои гуногунном (яке мусбату дигаре манфӣ) ҳамдигарро ҷазб менамоянд. Ба қадом бузургӣҳо вобаста будани қувваҳои ҳамтаъсироти зарядҳои нуқтавиرو Ш. Кулон миқдоран тадқиқ кард (ҷисмҳои заряднокеро, ки андозаҳоиашон назар ба фосилаи байни онҳо хеле хурд мебошанд, ба сифати *зарядҳои нуқтавӣ* қабул намудан равоост).



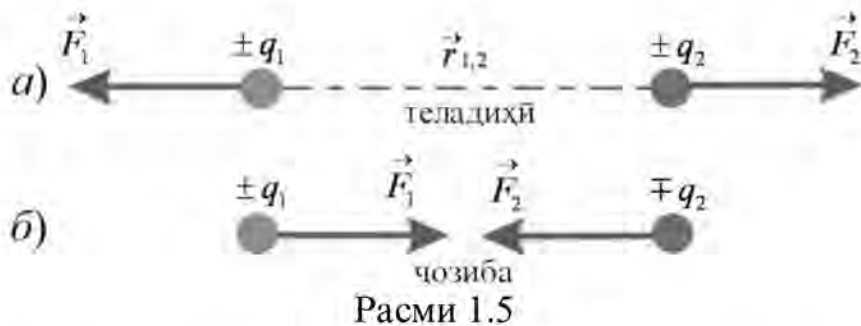
Расми 1.4

Ш. Кулон курачаҳои хурди дорои як миқдор заряди электрӣ ва тарозуи тобхӯранда\*) - ро истифода бурд, ки барои ба даст даровардани қиматҳои ба кадри кофӣ сахт мусоидат менамуданд. Ў яке аз курачаҳо, масалан курачаи А-и безаряд (расми 1.4) бо порсангаш С-ро, ки ба мисли паллаҳои тарозу дар нуғи сими борики нуқрагин овезон аст, ба курачаи беҳаракати В-и дорои миқдори заряди электрии  $q$  мерасонад. Курачаи А аз курачаи В як миқдор заряд мегираду аз он тела меҳӯрад ва ба масофае дур мешавад, ки қувваи деформатсияи чандирии тобхӯрии сим бо қувваи теладихии электрӣ ба мувозанат ояд. Дар ин маврид фосилаи байни курачаҳо ва кунҷи тобхӯрии сим  $\varphi$ -ро доништа, бузургии қувваи электриро муайян кардан имконпазир мешавад (хотиррасон менамоем, ки моменти қувваи гардишвар, дар мисоли мо, қувваи электрии ба қувваи чандирий ҳар гоҳ баробар ба кунҷи тобхӯрии сим  $\varphi$  мутаносиб аст). Бо ин гуна тадқиқот Кулон ба бузургии зарядҳои курачаҳо ва фосилаи байни онҳо мутаносиб будани қувваҳои электриро муқаррар кард.

Бояд ёдовар шуд, ки дар замони Кулон ҳанӯз бузургии зарядро чен карда наметавонистанд. Вале Кулон ин мушкилотро моҳирона бартараф кард. Агар ду курачаи айнан якандозаю якҷинса, ки яке

\*) чун тарозуи Г. Кавендиш барои муайян кардани доимии гравитатсионӣ.

дурои миқдори электри  $q$  ва дигаре безарядро ба ҳам расонем, дар асоси қонуни бақои заряд  $q_1 = q_2 = \frac{1}{2}q$  мешавад. Сипас, ба яке аз курачаҳо масалан, курачаи  $B$  ҳамин гуна курачаи сеюми безарядро мерасонем, он гоҳ миқдори электри курачаи  $B$  боз ду маротиба кам, акнун курачаҳои  $A$  ва  $B$  дорои зарядҳои  $q/2$  ва  $q/4$  мешаванд. Бо ин усул курачаҳоро то миқдори дилхоҳ заряднок қардан мумкин мебошад. Дар натиҷа Кулон қонуни ҳамтаъсиботи зарядҳои нуқравиро кашф кард, ки ҳоло номи ӯро гирифтааст: *қувваи ҳамтаъсиботи ду заряди нуқтавӣ ба ҳосили зарби бузургии зарядҳо мутаносиби роста, ба квадрати масофаи байни онҳо мутаносиби чаппа буда, ба рафти хати ростии зарядҳоро васлсозанда самт мегирад.* (расми 1.5, а, б)



Формулаи қонуни Кулон дар шакли модул чунин намуд дорад (мувофиқи қонуни сеюми динамика  $|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = F$  буданаш ба эътироф гирифта шудааст):

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \quad (1.1)$$

Дар ин ҷо  $k$  - коэффитсиенти мутаносибӣ буда, тавассути таҷриба муқаррар карда мешавад ва вобаста ба интихоби системаи воҳидҳо қимати муайян мегирад. Дар СИ қимати ин коэффитсиент:

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$$

мебошад; яъне ду заряди  $|q_1| = |q_2| = 1 \text{ Кл}$  дар вакуум дар масофаи  $1 \text{ м}$  ба якдигар бо қувваҳои абаркудрати  $F = 9 \cdot 10^9 \text{ Н}$  таъсир мекунанд. Воҳиди заряд дар системаи пештара (СГСЕ)  $1 \text{ СГС}_q$  буда, он ба  $\frac{1}{3} \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$  баробар аст. Дар ин система  $k=1$  қабул шуда буд.

Дар шакли векторӣ формулаи қонуни Кулон чунин намуд мегирад:

$$\vec{F}_2 = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}_{1,2}}{r} \quad (1.2)$$

ва дар он  $\vec{F}_2$  - қувваест, ки ба заряди  $q_2$  аз ҷониби заряди  $q_1$  таъсир менамояд,  $\vec{r}_{1,2}$  - радиус-вектори заряди  $q_2$  дар системаи сарҳисоби ибтидоӣ дар заряди  $q_1$  ҷойгиршударо мефаҳмонад. Айнан қуввае, ки

ба заряди  $q_1$  аз чониби заряди  $q_2$  таъсир менамояд, чунин пешниҳод мешавад:

$$\vec{F}_1 = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}_{2,1}}{r} \quad (1.3)$$

ва  $\vec{r}_{2,1}$  - радиус-вектори заряди  $q_1$  мебошад, агар ибтидои системаи сарҳисобро дар заряди  $q_2$  чойгир намоем ( $|\vec{r}_{1,2}| = |\vec{r}_{2,1}| = r$ ).

Аз формулаи (1.2) бармеояд, ки дар холи ҳамчунс будани зарядҳо ( $q_1 \cdot q_2 > 0$ ) векторҳои  $\vec{F}_2$  ва  $\vec{r}_{1,2}$  ба як сӯ равонаанду дар мавриди гуногунчунс будани онҳо ( $q_1 \cdot q_2 < 0$ ) ин векторҳо муқобилсамтанд (расми 1.5, а, б)

Бояд хотиррасон кард, ки ҳоло формулаи қонуни Кулонро дар шакли такмилёфта пешниҳод менамоянд, ки дар он коэффитисенти  $k$  мувофиқи таносуби:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

иваз карда мешавад ва дар он

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{Кл^2}{Н \cdot м^2} \quad (\text{ё } \Phi/м)$$

дойимии электрӣ ном дорад. Ҳамин аст, ки формулаи (1.1)-ро чунин пешниҳод кардан маъмул гаштааст:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \quad (1.4)$$

Таҷрибаҳои минбаъда собит карданд, ки бузургии қувваи ҳамтаъсироти зарядҳо дар мавриди ин зарядҳоро дар муҳити диэлектрикӣ чойгир намудан назар дар вакуум  $\epsilon$  мартаба хурд мешавад:

$$\epsilon = \frac{F_0}{F}, \quad (1.5)$$

дар ин ҷо  $F_0$  - бузургии қувваи ҳамтаъсирот дар вакууму  $F$  - ҳамин қувва дар муҳити диэлектрикӣ мебошанд. Ҳамин аст, ки  $\epsilon$  - нуфузпазирии нисбии диэлектрикии муҳит ном гирифтааст.. Аз ин рӯ қонуни Кулон дар муҳит ба намуди:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2} \quad (1.6)$$

пешниҳод мешавад.

Қиматҳои тавассути таҷрибаҳо муқаррар шудаи  $\epsilon$  - ро, ки мувофиқи (1.5) адади ҳолис (бевоҳид) аст, барои баъзе моддаҳои диэлектрикӣ дар ҷадвали 1 меоварем.

Ҷадвали 1. Нуфузпазирии нисбии диэлектрики баъзе моддаҳо

Модда	$\epsilon$	Модда	$\epsilon$
Вакуум	1,00000	Қоғазӣ хушк	2÷2,50000
Ҳаво	1,00059	Қаҳрабо	2,80000
Қарасин	2,00000	Чинӣ	4,5÷7,00000
Спирти этил	24÷27,00000	Шиша	4÷16,00000
Оби тоза	81,00000	Абрак (слюда)	7,00000
Равған	2,20000	Теллуриди сурб	400,00000



Аз тахлили чадвали 1 бармеояд, ки дар моеъҳо, қимати  $\epsilon$  барои об зиёдтарин аст ( $\epsilon = 81$ ). Беҳуда нест, ки обро барои шустушӯӣ истифода мебаранд, зеро қувваи ҷозибаи электрии байни матоъ ва ифлосӣ (чирк) - ҳоро об 81 маротиба кам мекунад ва барои онҳоро аз либосҳо дур андохтан хеле мусоид аст (собун ва хоҷаҳои шустушӯӣ бо кафкашон барои ин кор саҳми босазо доранд).

Дар мавриди номумкин будани ҳисмҳои қалонро ба сифати заряди нуқтавӣ қабул кардан он ҳисмҳоро ба ҷунун қисмҳои хурд бояд тақсим намуд, ки ҳар яки онҳоро акнун ҷунун заряди нуқтавӣ пиндоштан раво гардад. Сипас, барои ҳар як ҷуфти он зарядҳо қувваҳои ҳамтаъсиротро бо дарназардошти фосилаи байни онҳо ва самтҳо тавассути формулаҳои қонуни Кулон ба ҳисоб гирифта, мувофиқи қоидаи ҷамъи векторҳо қувваи натиҷавиро бояд муайян кард, ҳарчанд ин кор басо мушкилу ҳатто дар баъзе мавридҳо ғайриимкон аст. Хушбахтона, ба тарзи таҷрибавӣ муайян кардани қувваҳои ҳамтаъсиrotи ҳисмҳои бузурги заряднок ба туфайли абарқудрат будани ин қувваҳо чандон душвор нест.

Акнун чанд намунаи таҷрибаи амалии қонуни Кулонро пешниҳод менамоем.

**Мисоли 1.1.** Дар атоми сабуктарин – гидрогене, ки ядрояш аз якто протон (миқдори электрарош  $q_1 = +e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ , массааш  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ ) ташкил ёфтаасту мутобиқи модели начандон саҳеҳ дар гирди он якто электрон ( $q_2 = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ,  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ ) дар масофаи  $r = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}$  давр мезанад. Бузургии қувваи ҷозибаи электрӣ чӣ қадар асту он назар ба қувваи ҷозибаи гравитатсионӣ чанд маротиба фарқ мекунад?

*Маълумот.*

$$\left. \begin{aligned} m_p &= 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \\ q_1 &= +e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ m_e &= 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \\ q_2 &= -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ r &= 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м} \end{aligned} \right| \begin{array}{l} F_{\text{ел}} = ? \\ F_{\text{гр}} = ? \end{array}$$

*Ҳал*

Аввало қувваи ҷозибаи электрӣро муайян менамоем:

$$\begin{aligned} F_{\text{эл}} &= k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} = \\ &= 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}{(0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м})^2} = \\ &= 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ Н} \end{aligned}$$

Акнун ин қувваро бо қувваи гравитатсионӣ муқоиса мекунем:

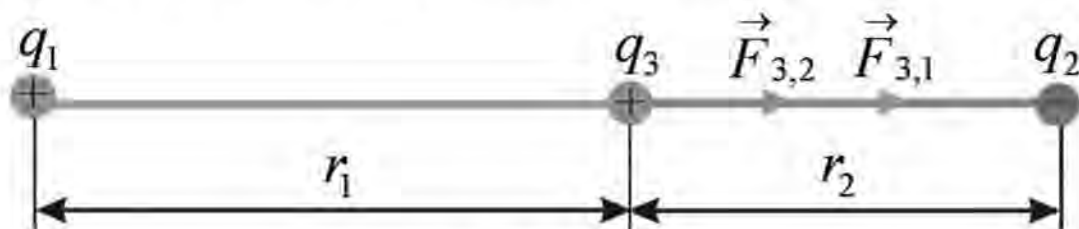
$$\frac{F_{\text{эл}}}{F_{\text{гр}}} = \frac{k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}}{G \frac{m_p \cdot m_e}{r^2}} = \frac{k |q_1| \cdot |q_2|}{G m_p \cdot m_e} = \frac{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}} = 2 \cdot 10^{39}$$

яъне, қувваи ҷозибаи гравитатсионӣ назар ба қувваи ҷозибаи электрӣ

чунон хурд аст, ки кувваи гравитатсиониро ба эътибор нагирифтанд равост.

Ҷавоб:  $\frac{F_{эл}}{F_{гп}} = 2 \cdot 10^{39}$  маротиба.

**Мисоли 1.2.** Зарядҳои  $q_1 = 40$  мкКл ва  $q_2 = -10$  мкКл аз якдигар дар масофаи  $r = 10$  см ҷойгиранд. Агар заряди  $q_3 = 4$  мкКл аз заряди  $q_2$  дар масофаи  $r_1 = 6$  см ва аз  $q_1$  дар фосилаи  $r_2 = 4$  см воқеъ гардад, ба он чӣ қадар кувваи натиҷавӣ ва ба кадом самт таъсир мекунад?



Расми 1.6

Маълумот:

$q_1 = 40$ мкКл = $4 \cdot 10^{-5}$ Кл
$q_2 = -10$ мкКл = $-10^{-5}$ Кл
$q_3 = 4$ мкКл = $4 \cdot 10^{-6}$ Кл
$r = 10$ см = 0,1 м
$r_1 = 6$ см = $6 \cdot 10^{-2}$ м
$r_2 = 4$ см = $4 \cdot 10^{-2}$ м
$F = ?$

Ҳал

Мувофиқи қонуни Кулон ба заряди  $q_3$  аз ҷониби заряди  $q_1$  кувваи электрии теладиҳии:

$$F_{3,1} = k \frac{|q_1| \cdot |q_3|}{r_1^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2} \frac{4 \cdot 10^{-5} Кл \cdot 4 \cdot 10^{-6} Кл}{(6 \cdot 10^{-2} м)^2} = 400 Н$$

таъсир менамояд, ки аз заряди  $q_2$  сӯйи рост равонааст (расми 1.6).

Ба заряди  $q_3$  аз ҷониби заряди  $q_2$  кувваи кулонии ҷозибавии:

$$F_{3,2} = k \frac{|q_3| \cdot |q_2|}{r_2^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2} \frac{4 \cdot 10^{-6} Кл \cdot 10^{-5} Кл}{(4 \cdot 10^{-2} м)^2} = 225 Н$$

таъсир мекунад, ки низ аз заряди  $q_3$  сӯйи рост равонааст. Пас, кувваи натиҷавӣ:

$$F = F_{3,1} + F_{3,2} = 400 Н + 225 Н = 625 Н$$

таъсир менамояд, ки аз заряди  $q_3$  сӯйи заряди  $q_2$  самт мегирад.



Ҷавоб:  $F = 625 \text{ Н}$ .

**Мисоли 1.3.** Зарядҳои  $q_1 = 20 \text{ мкКл}$ ,  $q_2 = 10 \text{ мкКл}$  ва  $q_3 = -30 \text{ мкКл}$  дар қуллаҳои секунҷаи росткунҷа тавре ки дар расми 1.7 а тасвир ёфтааст, ҷойгиранд. Бузургӣ ва самти қувваи натиҷавие, ки ба заряди  $q_1$  аз ҷониби ду зарядҳои дигар таъсир мекунад, ёфта шавад.

Маълумот:

$q_1 = 20 \text{ мкКл} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$
$q_2 = 10 \text{ мкКл} = 10^{-5} \text{ Кл}$
$q_3 = -30 \text{ мкКл} = -3 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$
$r_{12} = 30 \text{ см} = 0,3 \text{ м}$
$r_{13} = 60 \text{ см} = 0,6 \text{ м}$
$F_1 - ?$

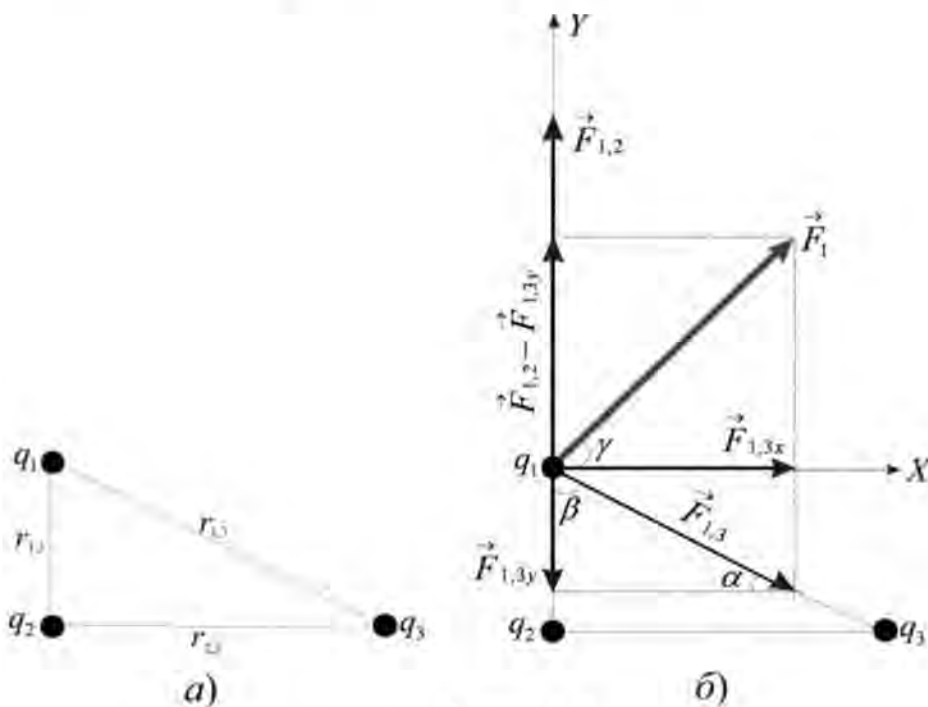
Ҳал

Ба заряди  $q_1$  аз ҷониби заряди  $q_2$  қувваи теладиҳии (расми 1,7 б):

$$F_{1,2} = k \frac{|q_3| \cdot |q_2|}{r_{1,2}^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \frac{2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл} \cdot 10^{-5} \text{ Кл}}{(0,3 \text{ м})^2} = 20 \text{ Н}$$

амудан ба боло таъсир мекунад. Ба заряди  $q_1$  аз ҷониби заряди  $q_3$  қувваи ҷозибаи  $F_{1,3}$  таъсир мерасонад, ки аз рӯи гипотенузаи секунҷа сӯйи  $q_3$  равонааст:

$$F_{1,3} = k \frac{|q_3| \cdot |q_1|}{r_{1,3}^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot 10^{-5}}{36 \cdot 10^{-2}} = 15 \text{ Н}.$$



Расми 1.7

Азбаски катети ба кунчи  $\alpha$  муқобилхобидаи секунча  $r_{21}$  ба нисфи гипотенузаи  $r_{31}$  баробар аст,  $\alpha = 30^\circ$  буданаш маълум мегардад. Пас, кунчи  $\beta = 60^\circ$  мебошад.

Акнун қувваи  $\vec{F}_{1,3}$  –ро ба ду ташкилдиханда тақсим менамоем, ки яке ба рафти тири  $X$  равона бошад:

$$F_{1,3x} = F_{1,3} \sin \beta = 15 \cdot \sin 60^\circ = 15 \cdot 0,866 = 7,5\sqrt{3} \text{ Н}.$$

Ташкилдихандаи дуюм:

$$F_{1,3y} = F_{1,3} \cos 120^\circ = -F_{1,3} \sin 30^\circ = -15 \cdot 0,5 = -7,5 \text{ Н}$$

ба муқобили рафти тири  $Y$  самт дорад. Аз ин рӯ қувваи натиҷавие, ки сӯйи меҳвари  $Y$  равонааст:

$$F_{1,y} = F_{1,2x} - F_{1,3y} = 20 \text{ Н} - 7,5 \text{ Н} = 12,5 \text{ Н}$$

мебошад. Пас, қувваи натиҷавие, ки ба заряди  $q_1$  таъсир менамояд, бо дарозии гипотенузаи секунҷаи росткунҷаи катетҳояш  $F_{1,3y}$  ва  $F_{1,y}$  тасвир карда мешавад:

$$\begin{aligned} F_1 &= \sqrt{F_{1,y}^2 + F_{1,3x}^2} = \sqrt{12,5^2 + (7,5\sqrt{3})^2} \text{ Н} = \\ &= \sqrt{156,25 + 168,75} \text{ Н} = \sqrt{325} \text{ Н} \approx 18 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Акнун ёфтани кунчи  $\gamma$ , ки вектори қувваи  $\vec{F}_1$  бо меҳвари  $X$  (самти уфуқӣ) ташкил медиҳад, душвор нест:

$$\operatorname{tg} \gamma = F_{1,y} / F_{1,3x} = 12,5 \text{ Н} / 7,5\sqrt{3} \text{ Н} \approx 0,9623;$$

аз ин ҷо  $\gamma = \operatorname{arctg} 0,9623 \approx 44^\circ$ .

Ҷавоб:  $F_1 \approx 18 \text{ Н}$ ;  $\gamma = 44^\circ$ .

### §1.3. Майдони электрӣ. Шадиҷияти майдони электрӣ

Ҷазои атрофи ҷисми заряднок назар ба ҷазои ҳамин гуна ҷисми безаряд ҳосиятҳои нав пайдо мекунад. Масалан, агар ба ҷисми заряднок ҷисми дигари хурди заряднокро, ки *заряди озмоишӣ*\*) меноманд, наздик орем, он дучори таъсирот мешавад. Ба ин муносибат мегӯянд, ки дар атрофи ҳар гуна ҷисми заряднок майдони электрӣ вучуд дорад. Ин майдонро тавассути қуввае, ки аз ҷониби майдон ба заряди озмоишӣ таъсир мекунад, ошкор месозанд. Ҳамин аст, ки ҷисмҳои

заряднок дар масофа ба ҳамдигар ба воситаи майдонҳояшон таъсир мерасонанд.

Ба заряди озмоишӣ аз ҷониби майдон ҳар қадар қувваи зиёд таъсир расонад, майдон ҳамон қадар пурзӯр буданаш маълум мегардад.

\*) Заряди озмоишӣ мисли пӯк ё қоғазпораест, ки ба оби дарё мепартоянд суръати ҷараёни онро ҷен мекунанд, ва ба ин суръат ҳеч гуна тағйироте ворид намесозад. Айнан ҳамин тавр заряди озмоишӣ ба ҷазое, ки ворид карда мешавад, ҳосиятҳои ҷазоро тағйир намедиҳад.

Майдони заряди нуктавиरो тадқиқ кардан осонтар аст. Барои ин, масалан аз заряди нуктавии  $q$  дар масофаи  $r$  заряди озмоишии  $q_0$  - ро ҷойгир месозем. Ба он қувваи кулонии:

$$F = k \frac{|q| \cdot |q_0|}{\varepsilon r^2}$$

таъсир менамояд.

Акнун агар ба ҷойи  $q_0$  бо навбат зарядҳои озмоишии  $q_1, q_2, \dots, q_n$  - ро гузорем, онҳо дучори таъсироти қувваҳои гуногуни:

$$F_1 = k \frac{|q| \cdot |q_1|}{\varepsilon \cdot r^2}, F_2 = k \frac{|q| \cdot |q_2|}{\varepsilon \cdot r^2}, \dots, F_n = k \frac{|q| \cdot |q_n|}{\varepsilon \cdot r^2}$$

мегарданд, вале нисбатҳои  $F/q_0, F_1/q_1, F_2/q_2, \dots, F_n/q_n$  ба бузургии зарядҳои озмоишӣ вобаста нестанд:

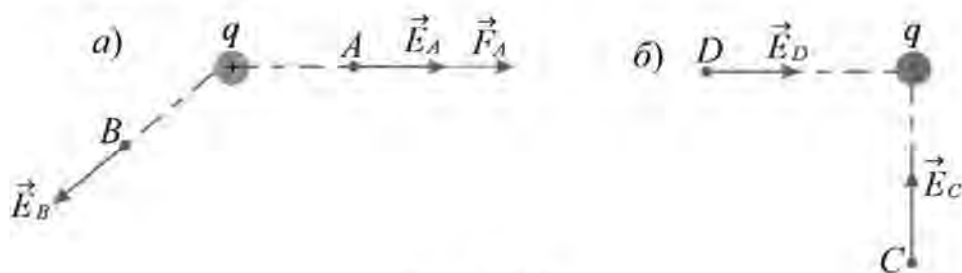
$$\frac{F}{q_0} = \frac{F_1}{q_1} = \frac{F_2}{q_2} = \dots = \frac{F_n}{q_n} = k \frac{|q|}{\varepsilon \cdot r^2}. \quad (1.7)$$

Ин нисбатҳо танҳо ба бузургии заряде, ки майдонаш тадқиқ меёбад, инчунин масофа аз ин заряд то нуқтаи муайяни майдон вобаста мебошад. Бо ин сабаб нисбати қуввае, ки ба заряди озмоишӣ аз ҷониби майдон таъсир мекунад, бар заряди озмоишӣ ҳамчун бузургии тавсифдиҳандаи қуввагии ин майдон қабул шудааст ва он *шадидияти майдон электрӣ* ном дорад. Аз ин рӯ шадидияти майдони электрӣ бузургии векторист ва онро бо ҳарфи  $\vec{E}$  ишорат кардан маълум гаштааст:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (1.8)$$

Яъне, шадидияти майдони электрӣ дар ягон нуқтаи майдон қувваеро муайян мекунад, ки ба заряди мусбати воҳидии дар ин нуқта ҷойгирбуда ( $q = 1 \text{ Кл}$ ) таъсир мерасонад.

Вектори шадидият дар нуқтаи муайяни майдон бо вектори қувваи ба заряди мусбати дар ин нуқта ҷойгирбуда таъсировар ҳамсамт аст (расми 1.8, а, б).



Расми 1.8

Воҳиди шадидият дар СИ мувофиқи формулаи (1.8) муқаррар карда мешавад ва  $1 \text{ В/м}$  (вольт бар метр) мебошад;  $1 \text{ В/м} = 1 \text{ Н/Кл}$ , яъне  $1 \text{ В/м}$  - шадидияти нуқтаи майдонест, ки дар он ба заряди  $1 \text{ Кл}$  аз ҷониби ин майдон қувваи  $1 \text{ Н}$  таъсир мекунад. (Дар системаи

воҳидҳои СГС воҳиди шадидият  $1 \text{ СГС}_E$  буд, ки ба  $3 \cdot 10^4 \text{ В/м}$  баробар гардиданаширо муқаррар кардаанд).

Ҳамин тариқ, дар майдони электрии дилхоҳ чун дар майдони электрии заряди нуқтавӣ ба ҳар гуна заряди  $q$  қуввае таъсир менамояд, ки қувваи электрӣ ном дорад ва он бо формулаи:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (1.9)$$

муайян карда мешавад.

Мувофиқи баробарии (1.7) бузургии шадидияти майдони электрии заряди нуқтавии  $q$  - ро дар масофаи  $r$  аз он бо формулаи:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q|}{\epsilon \cdot r^2} \quad (1.10)$$

муайян мекунанд.

Хотиррасон кардан лозим аст, ки майдони электрӣ навъи махсуси материя буда, ҳақиқати воқеӣ доништа мешавад. Ҷояи майдонро олими номбурдаи англис М. Фарадей ворид карда буд ва мафҳуми майдон яке аз дастовардҳои асоситарини илми муосир мебошад.

#### § 1.4. Принсипи суперпозитсияи майдонҳо. Майдони диполи электрӣ

Вазифаи асосии электростатика – қисми *электродинамика* аст, ки майдони зарядҳои ором (беҳаракат) - ро меомӯзад, аз рӯи бузургӣ ва тақсимоти манбаи майдони электрӣ - зарядҳо, муайян кардани модул ва самти шадидият дар ҳар як нуқтаи майдон мебошад. Барои ҳалли ин масъала қойидаи ҷамъбандии майдонҳо, ки *принсипи суперпозитсияи майдонҳо* (аз сухани латинии superpositio-болои ҳам гузоштан) ном дораду тавассути таҷрибаҳо муқаррар карда шудааст, нақши калон мебозад.

Агар майдони электрӣ дар атрофи системаи зарядҳо вучуд дошта бошад, он гоҳ шадидияти натиҷавӣ дар нуқтаи муайяни он ба ҳосили ҷамъи векторӣ (геометрӣ) - и шадидиятҳои ҳар як заряди система дар ҳамин нуқта баробар мебошад:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i. \quad (1.11)$$

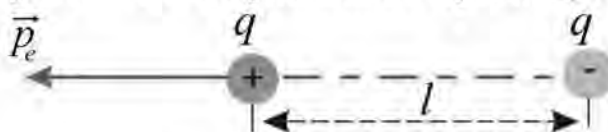
Ҳамин аст, моҳияти принсипи суперпозитсияи майдонҳо.

Ҳамчун намунаи татбиқи принсипи суперпозитсия шадидияти майдони диполи электрӣ муҳокима менамоем. Системаи ду заряди гуногунҷинси миқдоран баробар, ки аз ҳам дар фосилаи хеле хурди амалан бетағйир ҷойгиранд, *диполи электрӣ* (аз суханҳои юнонии di(s)- дучанда ва poles - кутб) ном дорад (қайд кардан бамаврид аст, ки аксари молекулаҳои ғайрисимметрӣ ба монанди CO, HCl, H<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub> ...-ро чун диполи электрӣ қабул кардан раво аст, зеро дар ин гуна молекулаҳо «марказҳои» зарядҳои мусбату манфӣ ҳамҷоя нестанд, ҳарчанд молекулаҳо зарраҳои нейтралӣанд).

Агар фосилаи байни зарядҳои дипол  $l$  бошад, бузургии

$$p_e = |q|l \quad (1.12)$$

моменти дипол ном гирифтааст ва он ҳамчун бузургии векторӣ доништа мешавад: вектори momenti диполи электрӣ  $\vec{p}_e$  аз заряди манфӣ суйи заряди мусбат самт мегирад (расми 1.9). Хати росте, ки харду зарядро васл менамояд, *меҳвари дипол* ном дорад. Воҳиди momenti дипол дар СИ 1 Кл·м буданаҳ аз ифодаи (1.12) бармеояд.



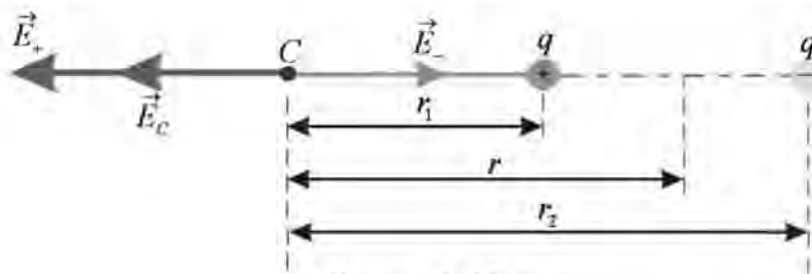
Расми 1.9

Бузургии momenti диполи электрии молекулаҳоро тавассути таҷриба муқаррар кардан имконпазир мебошад. Қиматҳои momenti диполии баъзе молекулаҳо дар ҷадвали 2 оварда шудаанд. Аз ин ҷадвал бармеояд, ки momenti диполии молекулаи об хеле калон ( $6,2 \cdot 10^{-30}$  Кл·м) аст.

Ҷадвали 2. Momenti диполи баъзе молекулаҳо

Молекула	$p_e \cdot 10^{30}$ Кл·м
CO	0,40
NB <sub>r</sub>	2,60
HCl	3,40
H <sub>2</sub> O	6,20

Аввало шадидияти майдони диполро дар нуктаи хати росте муайян менамоем, ки дар меҳвари дипол ҷойгир аст (расми 1.10).



Расми 1.10

Чунончӣ, модули шадидияти майдони заряди мусбат дар нуктаи C:

$$|\vec{E}_+| = k \frac{|q|}{r_1^2} = k \frac{|q|}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2},$$

ва заряди манфии дипол дар ҳамин нукта:

$$|\vec{E}_-| = k \frac{|q|}{r_2^2} = k \frac{|q|}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2}$$

мебошанд, ки ба ҳам муқобилсамтанд (дар ин ифодаҳо  $r$  - фосилаи байни маркази дипол ва нуктаи C мебошад). Пас, шадидияти



натичавӣ, мувофиқи принципи суперпозитсияи майдонҳо дар нуктаи  $C$ :

$$\vec{E}_C = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$$

ва модули он:

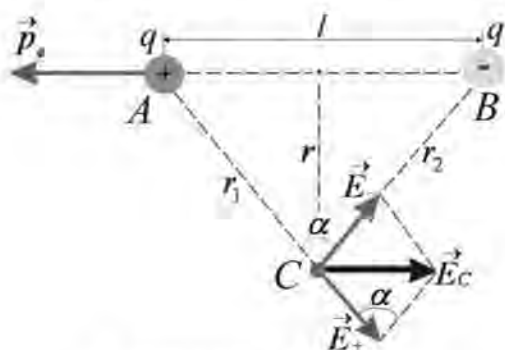
$$E_C = |\vec{E}_+| - |\vec{E}_-| = k \frac{|q|}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - k \frac{|q|}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} = k|q| \frac{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2 - \left(r - \frac{l}{2}\right)^2}{\left(r^2 - \frac{l^2}{4}\right)^2} = k \frac{2|q|lr}{\left(r^2 - \frac{l^2}{4}\right)^2}$$

буданаш маълум мегардад. Агар ба эътибор гирем, ки  $l \ll r$  аст, он гоҳ  $\left(r^2 - \frac{l^2}{4}\right)^2 \approx r^4$  ва  $|q|l = p_e$  қабул кардан мумкин аст, аз ин рӯ ифодаи зерин ҳосил мешавад:

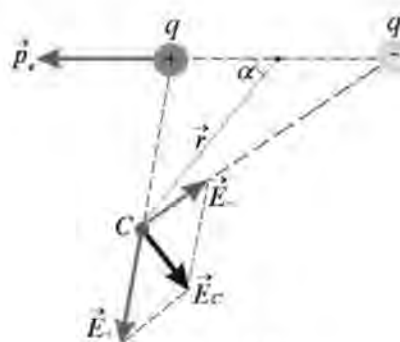
$$\vec{E}_C = k \frac{2\vec{p}_e}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\vec{p}_e}{r^3}. \quad (1.13)$$

Векторҳои  $\vec{E}_C$  ва  $\vec{p}_e$  ҳамсамт буданашон аз расмҳои 1.9 ва 1.10 намоён аст.

Акнун шадидияти майдони диполро дар нуктае меёбем, ки он дар хати ростии аз миёнҷойи меҳвари дипол гузаронидаву ба ин меҳвар амуд ҷойгир мебошад (расми 1.11).



Расми 1.11



Расми 1.12

Мувофиқи принципи суперпозитсия:

$$\vec{E}_C = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$$

ва

$$|\vec{E}_+| = |\vec{E}_-| = k \frac{|q|}{r_1^2} = k \frac{|q|}{r_2^2}$$

мебошанд. Барои муайян кардани модули  $\vec{E}_C$  ба эътибор мегирем, ки секунҷаҳои  $ABC$  ва  $CE_C E_+$  (инчунин  $CE_C E_-$ ) ба ҳам монанд мебошанд, зеро кунҷи назди куллаҳо  $\alpha$  ва ду кунҷи боқимонда низ баробаранд, аз ин рӯ таносуби зерин ҷой дорад:

$$\frac{|\vec{E}_C|}{|E_+|} = \frac{l}{r_1},$$



аз ин чо:

$$E_c = k \frac{|q|l}{r_1^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_e}{r_1^2}$$

Азбаски  $l \ll r$  мебошад,  $r_1 = \sqrt{r^2 + \frac{l^2}{4}} \approx r$  қабул кардан равоаст, аз ин рӯ барои модули шадидияти майдони электрии дипол дар нуктаи  $C$  ифодаи зерин ҳосил мешавад:

$$E_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p_e}{r} \quad (1.14)$$

Аз муқоисаи (1.13) ва (1.14) бармеояд, ки шадидияти майдони электрии дипол дар нуктаҳои хати ростии аз миёнҷойи меҳвари дипол гузаронидаву ба ин меҳвар амудӣ назар дар нуктаҳои хати ростии ба рафти меҳвар равоанбуда ду маротиба (дар ҳамон як масофаи  $r$ ) кам аст. Ба тӯфайли он, ки векторҳои  $\vec{E}_+$  ва  $\vec{E}_-$  нисбат ба  $\vec{E}_c$  симметрианд, вектори шадидияти натиҷавӣ  $\vec{E}_c$  ба  $\vec{p}_e$  муқобилсамт буданаш бармеояд. Дар мавриди умумӣ, яъне дар нуктаи дилхоҳ  $C$  (расми 1.12) аз маркази дипол (фақат ба шарт  $l \ll r$ ) модули шадидияти натиҷавии диполи электрӣ бо формулаи:

$$E_c = \frac{p_e}{4\pi\epsilon_0 r^3} \sqrt{1 + 3\cos^2 \alpha} \quad (1.15)$$

муайян карда мешавад, ки аз ҷумла ҳар ду мавриди дар боло овардари дарбар мегирад.

Ҳарчанд ҳаргуна молекула аз ҷиҳати электрӣ нейтралӣ аст, дар ҳоли ғайрисимметрӣ будан ин гуна молекулаҳо дар атрофи худ майдони электрии ба вучуд меоранд, ки шадидияти он ба куби масофа чаппа мутаносибан кам шуда меравад (ба хотир меорем, ки шадидияти майдони заряди нуктавӣ ба квадрати масофа аз он мутаносибӣ чаппа аст).

**Мисоли 1.4.** Чорто заряди микдоран баробар дар қуллаҳои квадрати тарафаш  $a$  ҷойгиранд. Шадидияти натиҷавии майдони ин зарядҳо дар нуктаи маркази ин квадрат чӣ қадар аст? Мавридҳои: 1) дар ду қулла зарядҳои мусбату дар ду қуллаи дигар манфӣ; 2) зарядҳо яке дар миён ( $q_+, q_-, q_+, q_-$ ); 3) дар се қулла зарядҳои мусбату дар яктоаш манфӣ; 4) дар се қулла зарядҳои манфию дар яктоаш мусбат; 5) дар ҳама қуллаҳо зарядҳои мусбат; 6) дар ҳар чор қулла зарядҳои манфӣ ҷойгир будан муҳокима карда шавад.

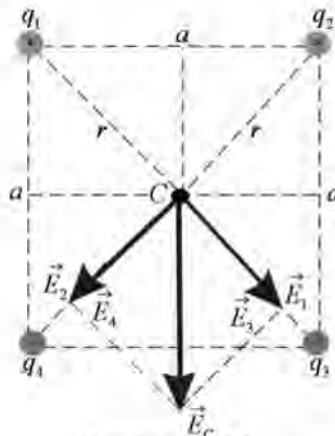
*Маълумот.*

$$\left. \begin{aligned} |q_1| &= |q_2| = |q_3| = |q_4| = |q| \\ a_1 &= a_2 = a_3 = a_4 = a \\ \vec{E}_c &= ? \end{aligned} \right|$$

*Ҳал*

Модулҳои шадидияти майдони ҳар чор заряд дар маркази квадрат ба тӯфайли баробар будани бузургии зарядҳо ва фосилаҳои онҳо то марказ ( $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r$ ) ҳамон як қимат доранд:

$$E = |\vec{E}_1| = |\vec{E}_2| = |\vec{E}_3| = |\vec{E}_4| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \quad (1)$$



Расми 1.13

Аз расми 1.13 (мувофиқи теоремаи Пифагор):

$$r^2 = \frac{a^2}{4} + \frac{a^2}{4} = \frac{a^2}{2}$$

буданаширо ба эътибор мегирем, аз ин рӯ:

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{a^2} \quad (2)$$

аст.

Агар қойидаи ёфтани самти вектори шадидиятро ба назар гирем, дар маркази квадрат сӯйи зарядҳои манфӣ векторҳои модулан ба  $2E$  баробар (ба расми 1.13 нигаред) равонаанд ва модули вектори шадидияти натиҷавӣ  $\vec{E}_C$  чун гипотенузаи секунҷаи росткунҷаи баробарпахлӯи катетҳояш  $2E$  ёфта мешавад:

$$E_C = \sqrt{4E^2 + 4E^2} = 2\sqrt{2}E = \frac{\sqrt{2}q}{\pi\epsilon_0 a^2} \quad (3)$$

Вектори  $\vec{E}_C$  аз маркази квадрат ибтидо гирифта, ба рафти хати рости аз миёнҷойи фосилаи байни зарядҳои манфӣ гузаранда равона аст.

Бо истифодаи ин натиҷаҳо ҳалли мавридҳои боқимондари ёфтани чандон душвор нест ва онҳоро ба донишҷӯёни шавқманд ба сифати машқи мустақилона тавсия медиҳему бо овардани ҷавобҳо маҳдуд мешавем: 2)  $E_C = 0$ ; 3)  $E_C = 2E$  ва  $\vec{E}_C$  сӯйи заряди манфӣ самт мегирад; 4)  $E_C = 2E$  ва  $\vec{E}_C$  сӯйи заряди манфии миёна (муқобили заряди мусбат); 5)  $E_C = 0$ ; 6)  $E_C = 0$ .

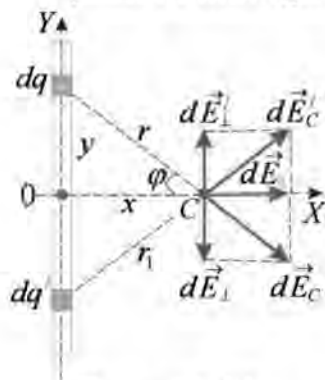
**Мисоли 1.5.** Зарядҳо дар силиндри борики рости беохир дароз (сим) мунтазам ва бо зичии хатии  $\lambda$  (лямбда хонда мешавад) ҷойгиранд. Шадидияти майдони ин цилиндр дар масофаи  $x$  (расми 1.14) аз он чӣ қадар аст?

Маълумот.

$$\left. \begin{aligned} \lambda = \frac{q}{l}, \quad x \\ \vec{E} = ? \end{aligned} \right|$$

Ҳал

Дар цилиндр қитъаи хеле хурди зарядаш  $dq$  - ро ҷудо мекунем, ки онро ба сифати заряди нуқтавӣ пиндоштан раво бошад (расми 1.14).



Расми 1.14

Модули шадидияти майдони ин заряд дар нуқтаи  $C$ :

$$|dE_C| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \quad (1)$$

мебошад. Системаи координатаҳоро тавре ҷойгир менамоем, ки меҳвари  $Y$  ба рафти сим равонаву ибтидои сарҳисоб дар нуқтаи  $O$  воқеъ гардад. Он гоҳ  $dq = \lambda dy$  буданаширо ба эътибор мегирем. Вектори  $d\vec{E}_C$  - ро ба ду ташкилдиханда ҷудо мекунем:

$$|d\vec{E}_{\parallel}| = |d\vec{E}_C| \cos\varphi; \quad |d\vec{E}_{\perp}| = |d\vec{E}_C| \sin\varphi, \quad (2)$$

ки яке  $d\vec{E}_{\parallel}$  ба самти меҳвари  $X$  равонаасту дигаре  $d\vec{E}_{\perp}$  ба он амуд. Бо сабаби беохир дароз будани сим дар он заряди нуқтавӣ  $dq$  - и аз поёни ба  $dq$  симметрии ҷойгирбуда мавҷуд аст, ки ташкилдихандаи  $d\vec{E}'_{\perp}$  ба  $d\vec{E}_{\perp}$  муқобилсамт асту ҳосили ҷамъи онҳо баробари сифр мешавад, яъне онҳо ба шадидияти натиҷавӣ саҳм надоранд ( $|E_{\perp}| = \int dE_{\perp} = 0$ ). Аз ин рӯ шадидияти натиҷавӣ  $\vec{E}$  сӯи меҳвари  $X$  равона асту ҷамъи вектории кулли  $d\vec{E}_{\parallel}$ -хоро ба туфайли мунтазам тақсим гардидани зарядҳо бо ёрии ҳисоби интегралӣ ёфтан мумкин мебошад:

$$E = \int |d\vec{E}_{\parallel}| = \int |d\vec{E}| \cos\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r^2} \cos\varphi = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dy}{r^2} \cos\varphi. \quad (2)$$

Акнун ба эътибор мегирем, ки  $y = x \operatorname{tg}\varphi$ ,  $r = \frac{x}{\cos\varphi}$ ,  $dy = \frac{x d\varphi}{\cos^2\varphi}$  мебошанд ва бо сабаби беохир будани сим кунҷи  $\varphi$  аз  $-\pi/2$  то  $+\pi/2$  кимат гирифта метавонад. Аз ин рӯ:

$$E = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 x} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \cos d\varphi = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 x} (\sin\varphi) \Big|_{-\pi/2}^{+\pi/2} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{x} \quad (1.16)$$

буданаш маълум мегардад, зеро барои нуктаи  $C$ , ки мо дар он шадидиятро мауяйн менамоем, масофаи  $x$  бетағйир аст.

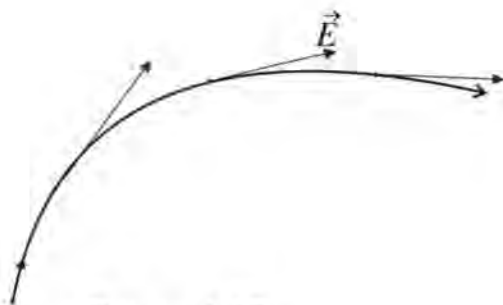
### §1.5. Хатҳои шадидият. Сели вектори шадидияти майдони электрӣ

Барои тадқиқи майдони электрӣ самт ва модули вектори шадидиятро дар ҳар як нуктаи ин майдон чун функцияи координатаҳо муқаррар кардан менамояд. Ин амал, хусусан барои майдони маҷмӯии зарядҳо чандон осон нест. Зеро дар нуктаҳои гуногун сохтасози векторҳои бисёрро талаб менамояд. Векторҳо болои ҳам хобида манзараи мураккабро ташкил дода метавонанд ва ҳисобу китоби шадидияти натиҷавӣ масъалаи мушкеле мешавад. Дар ҳалли соддатари ин масъала усули тавассути ба ном *хатҳои шадидият* ё *хатҳои қуввагӣ* тасвир сохтани майдон, ки ханӯз М. Фарадей пешниҳод карда буд, хеле мусоид аст.

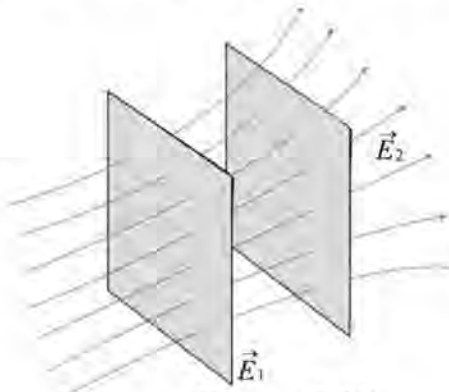
Хатҳои шадидият гуфта хатҳоеро мефаҳманд, ки вектори шадидият дар ҳар нуктаи онҳо аз рӯи расанда самт мегирад (расми 1.17).

Азбаски расанда ду самт дорад, ба хатҳои шадидият самти муайян медиҳанд. Ин хатҳо дар майдони электростатикӣ аз зарядҳои мусбат ибтидо гирифта, дар зарядҳои манфӣ тамом мешаванд ё ба беохирӣ мераванд. Хатҳои шадидият ҳеҷ гоҳ якдигарро намебуранд, вагарна дар як нуктаи буриш ҳамзамон шадидият ду самт мебошад.

Зичии хатҳои шадидиятро шартан тавре гузаронанд, ки теъдоди хатҳои сатҳи воҳидӣ ( $1 \text{ м}^2$ ) - и ба ин хатҳо амудан воқеъбударо бурида гузаранда ба модули шадидият дар он маҳал баробар бошад (расми 1.18).



Расми 1.17



Расми 1.18

Манзараи тақсимои хатҳои шадидиятро ба тарзи таҷрибавӣ намудор кардан имконпазир аст. Барои ин дар ҷое, ки тадқиқ кардани майдон зарур бошад, ягон диэлектрики моеъ, масалан равшан паҳн намуда, ба он қисмҳои хурд, аз ҷумла ҳиссаҳои якчанд миллиметрии мӯйи бурида, ярмаи дили гандум, гачмайдаҳо пош медиҳанд. Дар ин ҳиссаҳо зарядҳои индуксионӣ ба вуҷуд омада, дар натиҷаи ҷозибаю телаҳурӣ он ҳиссаҳо чун занҷир ба рафти хатҳои шадидият саф мекашанду хатҳоро гӯё намудор мегардонанд. Ҳамин аст, ки ин усулро барои тадқиқи таҷрибавии майдонҳои гуногуни электростатикӣ васеъ истифода менамоянд. Дар расми 1.19 манзараҳои бо ин усул муқаррар кардаи баъзе майдонҳо оварда шудаанд: а) заряди мусбати нуктавии танҳо; б) ду заряди нуктавии якнавъ



(мусбат), ки ба ҳам наздик ҷойгиранд; в) диполи электрӣ; г) ду лавҳаи металли параллелан ҷойгирбудаи гуногуннавъ заряднок (конденсатори ҳамвор).

Агар хатҳои шадидияти майдон параллелан ва мунтазам ҷойгир бошанд, ин гуна *майдони соддатарини электростатикиро якҷинса* меноманд. Дар расми 1.19 г мисоли майдони якҷинса (ғайр аз нӯгҳо дар конденсатори ҳамвор майдони якҷинса) оварда шудааст. Майдони якҷинсаро зарядҳои дар сатҳ мунтазам тақсимгардида ба вучуд меоранд.

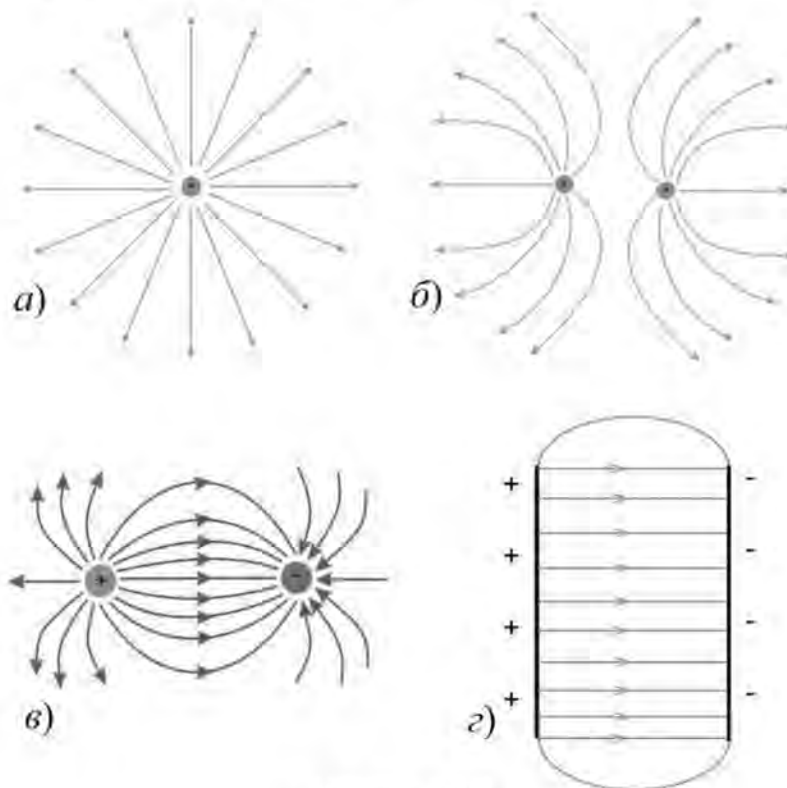
Тавре ки зикр ёфт, зичии хатҳои шадидият дар ҳар як маҳали майдон кимат (модул) - и шадидиятро дар он муайян менамояд:

$$|\vec{E}| = \frac{\text{теъдоди хатҳои сатҳи амудиро буранда}}{\text{масоҳати сатҳи ба хатҳои шадидият амуд}}$$

Ба ин муносибат дар электростатика мафҳуми *сели шадидият* чун теъдоди хатҳои сатҳи муайяно бурида гузаранда васеъ истифода мешавад. Сели шадидиятро бо ҳарфи  $\Phi_e$  ишорат менамоем. Агар сатҳ ба самти хатҳои шадидият на амудан, балки таҳти кунҷе ҷойгир бошад, сели шадидият дар майдони якҷинса бо формулаи:

$$\Phi_e = E S \cos \alpha \tag{1.17}$$

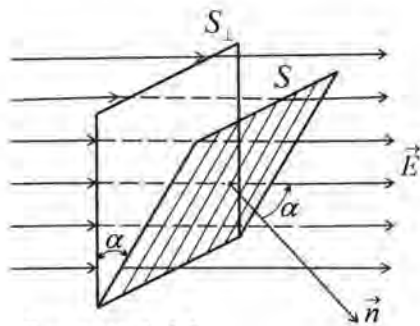
муайян карда мешавад. Дар ин формула  $\alpha$  - кунҷи байни нормал ба сатҳи  $S$  ва вектори шадидият  $\vec{E}$  мебошад (расми 1.20), дар он ду сатҳ:  $S_{\perp}$ , ки ба хатҳои шадидият амудан ва  $S$  - сатҳи ба  $S_{\perp}$  таҳти кунҷи  $\alpha$  ҷойгирбуда тасвир ёфтаанд).



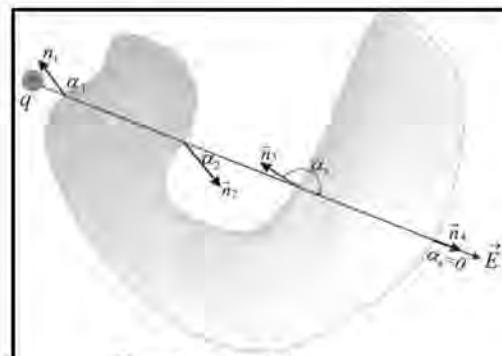
Расми 1.19

Бояд қайд кард, ки сели шадидият бузургии скалярист: агар  $\alpha < 90^\circ$  бошад, сел мусбату дар мавриди  $\alpha > 90^\circ$  он манфӣ ҳисоб

меёбад. Чунончӣ, якто хати шадидият сатҳи сарбасти шаклаш ихтиёриро бурида мегузарад (расми 1.21); одатан дар ин маврид нормал ба сатҳ аз дарун ба берун гузаронида мешавад. Дар ин расм хати шадидият сатҳи сарбастро чор маротиба бурида мегузарад:  $\alpha_1 > 90^\circ$  ( $\Phi_{e1} < 0$ ),  $\alpha_2 > 0^\circ$  ( $\Phi_{e2} > 0$ ),  $\alpha_3 > 90^\circ$  ( $\Phi_{e3} < 0$ ): хангоми ҳисоби сели натиҷавӣ онро ду маротиб мусбату ду маротибаи дигар манфӣ қабул менамоем, ки дар ҳосили ҷамъ сифр медиҳад. Пас, сели хатҳои шадидияти майдони зарядҳои аз сатҳи сарбасти шаклаш ихтиёрӣ дар берун ҷойгирбуда ҳар гоҳ баробари сифр мебошад.



Расми 1.20



Расми 1.21

Агар сатҳи  $S$  дар майдони ғайриякҷинса ҷойгир бошад, онро ба қитъаҳои хурди  $\Delta S_i$  тақсим карда, барои ҳар яке сели элементарии  $\Delta \Phi_{ei}$  - ро мувофиқи формулаи (1.17) ба ҳисоб мегиранд. Он гоҳ сели умумии тамоми сатҳро буранда:

$$\Phi_e = \sum_{i=1}^n E_i \Delta S_i \cos \alpha \quad (1.18)$$

мешавад. Ин селро одатан тавассути ҳисоби интегралӣ меёбанд:

$$\Phi_e = \int_S E dS \cos \alpha = \int_S E_n dS, \quad (1.19)$$

ки дар ин ҷо  $E_n = E \cos \alpha$  - проексияи вектори шадидият дар нормал ба ин сатҳ аст.

### §1.6. Теоремаи Гаусс ва татбиқҳои амалии он

Математик, ситорашинос, физики олмонӣ К.Ф. Гаусс (1777-1855) усули тавассути сели шадидият тадқиқи майдонҳои гуногуни электрию магнитиро пешниҳод карда буд (с. 1839). Дар ин усул теоремае, ки номи ӯро гирифтааст, нақши асосиро мебозад.

Бояд хотирнишон сохт, ки математики рус М.В. Остроградский (1801-1862) ханӯз соли 1828 ин гуна теоремаро барои сели гармӣ исбот карда буд. Ҳамин аст, ки саҳми ҳар ду олимро ба назар гирифта, онро чун *теоремаи Остроградский-Гаусс* пешниҳод кардан аз рӯи инсоф мебуд.

Теоремаи Гаусс таносуби байни сели шадидияти майдони электрӣ аз сатҳи сарбасти шаклаш ихтиёрӣ ва микдори заряди андаруни ин сатҳ воқеъгардидаро муқаррар менамояду ба тарзи математикӣ чунин ифода меёбад:



$$\Phi_e = \oint_S E_n dS = \oint_S E dS \cos \alpha = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i. \quad (1.20)$$

Дар ин ҷо  $\oint$  - аломати ҳисоби интегралӣ аз сатҳи сарбастии  $S$ ,  $\sum_{i=1}^n q_i$  - ҳосили ҷамъи алгебравии кулли зарядҳоеро мефаҳмонад, ки он сатҳ дарбар гирифтааст.

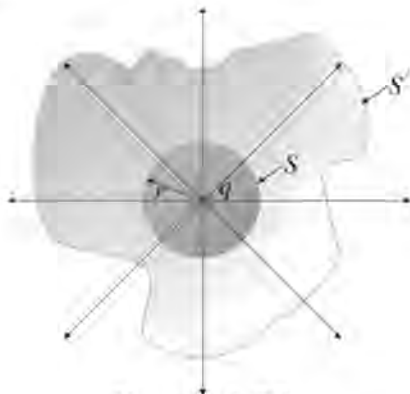
Агар сатҳи сарбаст зарядҳоро дарбар нагирад, сели шадидияти майдони онҳо аз ин сатҳ баробари сифр буданастро дар §1.5 таъкид карда будем. Ибтидои теоремаи Гаусс барои сатҳи сферавии радиусаш ихтиёрӣ, ки дар марказаш заряди нуқтавӣ ҷойгир аст, чандон душвор нест. Дарвоқеъ, кулли нуқтаҳои сатҳи сферӣ аз заряди  $q$  дар ҳамон як масофаи  $r$  ҷойгир буда, хатҳои шадидияти ин заряд аз рӯи радиусҳои сфера равонаанд ва дар ҳар нуқтаи ин сатҳ ба он амуданд (расми 1.22), яъне  $\alpha = 0^\circ$  аст. Аз ин рӯ мувофиқи (1.10):

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

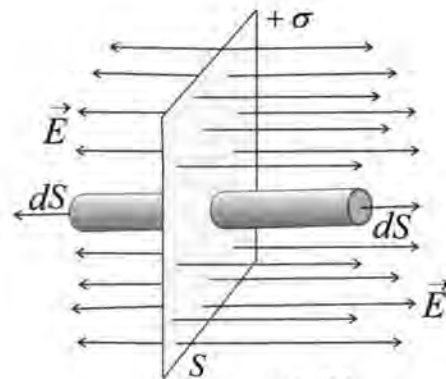
ва

$$\Phi_e = \oint_S E dS = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \oint_S dS = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{1}{\epsilon_0} q \quad (1.21)$$

мебошад. Лозим ба ёдоварист, ки сели шадидиятро теъдоди хатҳои сатҳро буранда муайян менамоем. Ҳамин аст, ки сатҳи сарбастии шаклаш ихтиёрӣ ва сатҳи сферавии зарядро дарбаргиранда бо ҳамон як теъдоди хатҳо бурида мешаванд, ки ададан мувофиқи (1.21) ба  $q/\epsilon_0$  баробар аст ва шакли сатҳи  $S'$  чандон аҳамият надорад (расми 1.22).



Расми 1.22



Расми 1.23

Агар сатҳи сарбаст системаи зарядҳои нуқтавиро дарбар гирифта бошад, барои ҳар як заряди алоҳидаи система формулаи (1.21) - ро татбиқ менамоем:

$$\Phi_{ei} = \oint_S E_i dS = \frac{1}{\epsilon_0} q_i$$

ва принсипи суперпозитсияи майдонҳоро истифода бурда,

$$\Phi_e = \oint_S E dS = \sum_{i=1}^N \oint_S E_{in} dS = \oint_S \sum_{i=1}^N E_{in} dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i$$

буданаширо тасдиқ карда метавонем.

Акнун якчанд намунаи татбиқи амалии теоремаи Гаусс барои ҳисобу китоби шадидияти баъзе майдонҳоро дар вакуум меорем:

### 1. Шадидияти майдони зарядҳои дар ҳамвории беохир мунтазам бо зичии сатҳии $\sigma = q/S$ (Кл/м<sup>2</sup>) тақсимшуда.

Дар мавриди мунтазам тақсим шудани зарядҳо, тавре ки тадқиқи майдон бо ёрии хатҳои шадидият собит менамояд, шадидияти майдони ин гуна ҳамворӣ ба он амудан равонаву ба ҳам параллеланд, яъне майдони ҳамвории беохир мунтазам заряднок якҷинса аст (расми 1.23).

Бузургии шадидияти ин ҳамвориро тавассути татбиқи теоремаи Гаусс муайян карда метавонем. Барои ин сатҳи сарбастии ёридохандаи силиндриро интихоб менамоем, ки ҳамвориро амудан бурида мегузарад (расми 1.23). Агар ба эътибор гирем, ки сели шадидият аз сатҳи паҳлӯии цилиндр баробари сифр аст, зеро хатҳои шадидият ва ташкилдохандаи цилиндр параллелан равонаанд ва сел танҳо аз ду буришгоҳи цилиндр  $dS$  вучуд дорад. Аз ин рӯ

$$\Phi_e = 2 \oint E_n dS = 2E \oint dS = 2ES = \frac{1}{\epsilon_0} q,$$

ки дар ин ҷо  $q$  - миқдори заряди ҳамворӣ аст  $q = \sigma S$  буданаширо ба назар гирифта, шадидиятро меёбем:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}. \quad (1.22)$$

Пас, шадидияти майдони ҳамвории мунтазам заряднок ба масофа вобаста набуда, танҳо бо зичии сатҳии заряди ҳамворӣ муайян карда мешавад.

### 2. Шадидияти майдони ду ҳамвории беохир параллелии мунтазам, вале гуногунҷинс заряднок.

Майдонҳои ҳар як ҳамворӣ якҷинса ва хатҳои шадидияти онҳо параллелию муқобилсамт буданаширо ба эътибор гирифта, мувофиқи принсипи суперпозитсияи майдонҳо шадидияти натиҷавиро муайян карда метавонем. (расми 1.24).

Ҳазон атрофи ҳамворихоро ба се қитъа ҷудо мекунем. Аз расми 1.24 хувайдост, ки хатҳои шадидият дар мобайни ҳамворихо (қитъаи 2) ба ҳамон як сӯй - аз заряди мусбат ба ҷониби зарядҳои манфӣ равонаанду дар берун (қитъаҳои 1 ва 3) - муқобилсамтанд, аз ин рӯ

$$|\vec{E}_I| = |\vec{E}_+| - |\vec{E}_-| = |\vec{E}_{III}| = \frac{|\sigma|}{2\epsilon_0} - \frac{|\sigma|}{2\epsilon_0} = 0,$$

$$E = |\vec{E}_{II}| = |\vec{E}_+| + |\vec{E}_-| = \frac{|\sigma|}{2\epsilon_0} + \frac{|\sigma|}{2\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0},$$

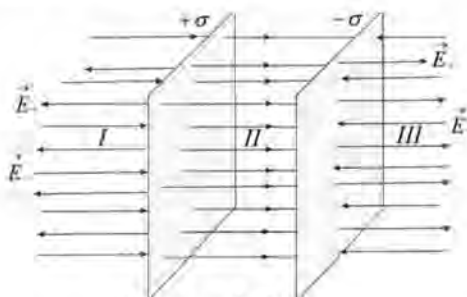
яъне

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (1.23)$$

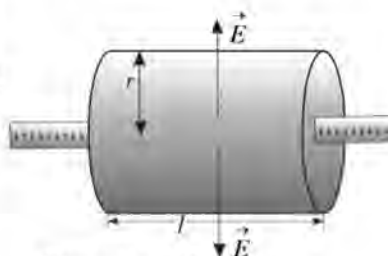
мебошад. Пас, майдони ду ҳамвории беохир параллелии гуногунҷинс заряднок танҳо дар мобайни ин ду ҳамворӣ вучуд дорад

шадидияташ назар ба шадидияти якто ҳамворӣ 2 маротиб зиёд аст (ин гуна ду лавҳаи ҳамвори металлӣ конденсатори ҳамворро ташкил карданашон таъкид шуда буд).

Ба донишҷӯёни шавқманд тавсия медиҳем, ки мавриди харду ҳамворӣ яқнавъ (харду мусбат ё харду манфӣ) заряднокро мустақилона тадқиқ намоянд.



Расми 1.24



Расми 1.25

### 3. Шадидияти майдони ноқили шаклаш силиндри борику дароз (сим) - и мунтазам бо зичии хаттии $\lambda = q/l$ (Кл/м) заряднок ( $l$ - дарозии ноқил, $q$ - заряди он).

Барои татбиқи теоремаи Гаусс ба сифати сатҳи сарбаст силиндри бо ноқил ҳаммехвари радиуси асосаш  $r$  ва дарозиаи  $l_1$  - ро интихоб менамоем (расми 1.25).

Бо сабаби мунтазам заряднок буданаш хатҳои шадидияти майдони ноқил танҳо аз сатҳи паҳлӯии цилиндр (масоҳаташ  $S_{\text{пахл.}} = 2\pi r l_1$ ) параллелан мебароянд (дар мавриди манфӣ заряднок будани ноқил хатҳои шадидият ба ин сатҳ ворид шуданашро хотиррасон менамоем). Аз ин рӯ

$$\Phi_e = \oint_{S_{\text{пахл.}}} E_n dS = E \oint_{S_{\text{пахл.}}} dS = E(2\pi r l_1) = \frac{1}{\epsilon_0} q_1$$

( $q_1$  - заряди цилиндр дарбаргирифтаи ноқил аст) ва

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r l_1} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r} \quad (1.24)$$

мебошад. Ин натиҷа формулаи (1.16)-ро тасдиқ менамояд, ки онро бо усули мураккабтар бо ёрии ҳисоби интегралӣ ҳосил карда будем (фақат дар (1.16) ба ҷойи  $r$  масофа бо  $x$  ишорат шудааст).

### 4. Майдони сатҳи сферавии радиусаш $R$ , ки мунтазам заряднок аст.

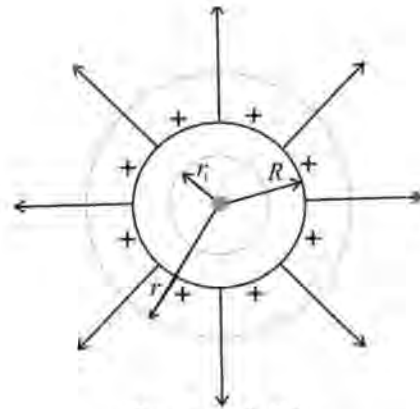
Бо сабаби мунтазам тақсим шудани зарядҳо хатҳои шадидият аз рӯи радиусҳои сфера самт мегиранд. Аз ин рӯ сели шадидият аз сатҳи сферавии ёридиҳандаи радиусаш ихтиёрии  $r > R$ -и бо сфераи заряднок ҳаммарказ (расми 1.26):

$$\Phi_e = \oint_S E_n dS = E \oint_S dS = E(4\pi r^2) = \frac{1}{\epsilon_0} q$$

ва

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (1.25)$$

буданаш маълум мегардад. Аз мукоисаи формулаҳои (1.25) ва шадидияти майдони заряди нуқтавӣ (1.10) бармеояд, ки шадидияти майдони сфераи мунтазам заряднокро чун шадидияти майдони заряди нуқтавии бузургиаш ба заряди сфера баробар ҳисоб кардан раво аст.



Расми 1.26

Агар сфераи ёридиҳандаи радиусаш  $r_1$  андаруни сфераи заряднок ҷойгир бошад ( $r_1 < R$ ) мувофиқи теоремаи Гаусс сели шадидият аз сатҳи он баробари сифр аст:  $E_1(4\pi r_1^2) = 0$ , аз ин ҷо  $E_1 = 0$  буданаш тасдиқ мешавад. Пас, андаруни сфераи заряднок майдон вуҷуд надорад. Ин хулоса барои аз таъсири майдонҳои берунӣ ҳифз намудани дастгоҳҳои электрӣ, ба хусус асбобҳои андозагири электрӣ, трансформаторҳо истифода бурда мешавад. Одатан сатҳҳои муҳофизии дастгоҳҳои электрӣ заминвасла мекунанд.

### 5. Шадидияти майдони кураи мунтазам бо зичии ҳаҷмии $\tau = q/V$ ( $\text{Кл}/\text{м}^3$ ) заряднок.

Азбаски зарядҳо андаруни кура мунтазам тақсим шудаанд, майдони кура нисбат ба марказаш симметрик ва барои ҳар гуна сатҳи сферавии ёридиҳандаи радиусаш  $r > R$  – и бо кура ҳаммарказ ҳисобу китобро тавре бояд гузаронд, ки дар мисоли 4 баён ёфта буд. Вале, акнун сфераи ёридиҳандаи радиусаш  $r_1 < R$  микдори муайяни заряди  $q_1 = \tau V_1 = \tau \frac{4}{3} \pi r_1^3$  ( $V_1 = \frac{4}{3} \pi r_1^3$  – ҳаҷми курачаи радиусаш  $r_1 < R$ ) – ро дарбар мегирад. Аз ин рӯ мувофиқи теоремаи Гаусс:

$$\Phi_{e1} = \oint_{S_1} E_{1n} dS = E_1 \cdot (4\pi r_1^2) = \frac{1}{\epsilon_0} q_1$$

ва дар натиҷа

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_1^2} = \frac{1}{3\epsilon_0} \tau r_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^3} r_1$$

буданаш маълум мегардад (мо дар ин ҷо ба эътибор гирифтаем, ки

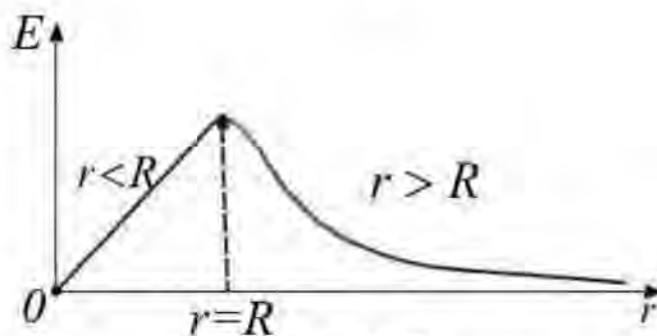
$q_1 = \tau \frac{4}{3} \pi r_1^3$  ва  $q_1 = \frac{q}{\frac{4}{3} \pi r_1^3}$  мебошад).

Ҳамин тарик, дар масофаҳои  $r > R$  шадидияти майдони кураи мунтазам заряднок радиусаш  $R$ :

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

ва дар мавриди  $r \leq R$ :

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^3} r \quad (1.26)$$



Расми 1.27

мебошад. Яъне, бо афзудани  $r$  аз марказ шадидияти майдони кураи мунтазам заряднок то сарҳади он ( $r = R$ ) хаттӣ зиёд мегардаду сипас дар масофаҳои  $r > R$  чун  $1/r^2$  кам шуда меравад (расми 1.27).

### § 1.7. Кори кӯчондани заряд дар майдони электростатикӣ

Агар заряди  $q_0$  дар майдони электростатикӣ шадидияташ  $\vec{E}$  кӯчида роҳи хурди  $dl$  - ро паймояд, он гоҳ кори қувваҳои майдон дар ин роҳ:

$$\delta A = F dl \cos \alpha$$

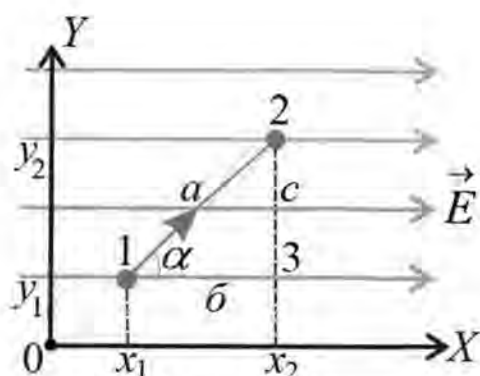
шуданаширо аз қисми механика хотиррасон менамоем, ки дар ин ҷо  $\alpha$  - кунҷи байни самтҳои қувва ва ҳаракат аст. Акнун ба эътибор мегирем, ки бузургии қувваи майдони электрӣ  $F = q_0 E$  мебошад, аз ин рӯ:

$$\delta A = q_0 E dl \cos \alpha = q_0 E_e dl \quad (1.27)$$

сабт карда метавонем. Дар ин ҷо  $E_e = E \cos \alpha$  проексияи вектори шадидият  $\vec{E}$  дар самти ҳаракат аст.

Дар майдони якҷинса ҳисоб кардани кори қувва чандон душвор нест. Фарз мекунем, ки заряди  $q_0$  аз нуқтаи 1 то нуқтаи 2 мекӯчад. Ду роҳи гуногуни кӯчиш: 1)  $1 \rightarrow a \rightarrow 2$  ва 2)  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2$  - ро интихоб менамоем (расми 1.28).





Расми 1.28

Дар роҳи аввал кори:

$$A_{1 \rightarrow a \rightarrow 2} = q_0 E s \cos \alpha$$

ичро мешавад, ки дар он  $s$  – роҳи  $1 \rightarrow a \rightarrow 2$  аст. Аз расми 1.28 хувайдост, ки  $s \cos \alpha = x_2 - x_1$  ва аз ин рӯ:

$$A_{1 \rightarrow a \rightarrow 2} = q_0 E (x_2 - x_1). \quad (1.28)$$

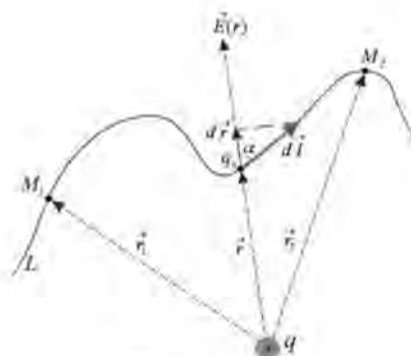
мебошад.

Роҳи дуюмро ба ду қитъаи алоҳида ҷудо карда, ҳисоби корро содда мегардонем:

$$\begin{aligned} A_{1 \rightarrow 3 \rightarrow 2} &= A_{1 \rightarrow 3} + A_{3 \rightarrow 2} = q_0 E (x_2 - x_1) \cos 0^\circ + q_0 E (y_2 - y_1) \cos 90^\circ = \\ &= q_0 E (x_2 - x_1) + 0 = q_0 E (x_2 - x_1). \end{aligned} \quad (1.28')$$

Аз муқоисаи формулаҳои (1.28) ва (1.28') бармеояд, ки кори қувва дар майдони якҷинсаи шадидияташ  $\vec{E}$  ба шакли траекторияи ҳаракат вобаста набуда, танҳо бо мавқеи нуқта дар интиҳо ва ибтидои роҳ муайян карда мешавад.

Акнун кори қуввахоро дар майдони ғайриҷинса, масалан дар майдони заряди нуқтавии  $q$  дар роҳи шаклаш ихтиёрии  $L$  (расми 1.29) ҳисоб мекунем.



Расми 1.29

Азбаски дар тӯли ин роҳ самт ва бузургии шадидият тағйир меёбанд, кори элементарӣ дар роҳи хурди  $dl$  мувофиқи (1.27) ҳисоб карда мешавад. Дар ин маврид ба эътибор мегирем, ки  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$  ва  $dl \cos \alpha = dr$  (расми 1.29) ва аз ин рӯ кори элементарӣ:

$$\delta A = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0} \frac{dr}{r^2}$$

буданаш маълум мегардад. Барои ёфтани кор дар рохи  $L$  ҳангоми кӯчиши заряди  $q_0$ , масалан аз мавқеи  $M_1$  то  $M_2$  аз ҳисоби интегралӣ истифода бурдан мусоид аст:

$$A = \int_{r_1}^{r_2} \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (1.29)$$

Яъне, кори кӯчондани заряди  $q_0$  дар майдони ғайрирякчинса низ ба шакли траекторияи ҳаракат вобаста нест ва қувваҳои электростатикӣ консервативианду ҳуди майдон потенциали мебошад.

Агар заряди  $q_0$  дар майдони атрофи системаи зарядҳо кӯчад, бо истифодаи принсипи суперпозитсияи майдонҳо барои ҳисоби кор ифодаи:

$$A = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i \left( \frac{1}{r_{1i}} - \frac{1}{r_{2i}} \right) \quad (1.30)$$

ҳосил мешавад.

Дар ҳоли кӯчидани заряди  $q_0$  ба рафти хати сарбастии шаклаш ихтиёрии  $L$  кори қувваҳои электростатикӣ мувофиқи (1.29):

$$q_0 \oint_L E_l dl = 0 \quad (1.31)$$

аст. Ин ҳулоса яке аз теоремаҳои асосии электростатика мебошад ва он шаҳодат медиҳад, ки майдони электростатикӣ потенциалист ва қувваҳои электрӣ консервативианд. Интегралӣ:

$$\oint_L E_l dl \quad (1.32)$$

ба рафти хати сарбастии  $L$  *сиркулятсияи вектори шадидият* ном дорад (аз сухани латинии *circulatio* - ҳаракати давронӣ). Аз (1.31) бармеояд, ки сиркулятсияи вектори шадидияти майдони электростатикӣ баробари сифр мебошад ва он танҳо ҳосил майдонҳои электростатикӣ аст. Минбаъд муқаррар менамоем, ки сиркулятсияи вектори шадидияти майдонҳои ғайриэлектростатикӣ, масалан майдони ба ном тӯфонӣ ё гирдбодӣ баробари сифр нест.

### §1.8. Потенциал. Фарқи потенциалҳо

Тавре ки аз курси механика медонем, кори қувваҳои консервативӣ ба тағйироти энергияи потенциали бо аломати манфӣ (яъне ҳангоми камшавии он) баробар аст:

$$A = -\Delta W_p = W_{p1} - W_{p2}. \quad (1.33)$$

Аз муқоисаи (1.29) ва (1.33) бармеояд, ки энергияи потенциалии заряди  $q_0$  дар майдони электростатикӣ заряди нуқтавии  $q$  бо саҳеҳии бузургии доимӣ (*const*) муайян карда мешавад:

$$W_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r} + const. \quad (1.34)$$

Агар ба назар гирем, ки ҳисса (дар мисоли мо заряди  $q_0$ ) аз манбаи майдон дур рафтани гирад, энергияи потенциалии он кам шуда меравад ва дар фосилаи  $r \rightarrow \infty$  ин энергияро баробари сифр қабул кардан раво аст. Пас, бузургии доимииро дар (1.34) сарфи назар карда метавонем, аз ин рӯ энергияи потенциалии заряди  $q_0$  дар майдони электростатикӣ заряди нуқтавии  $q$ :

$$W_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r} \quad (1.35)$$

мебошад ва он чун *энергияи потенциалии ҳамтаъсирот (таъсироти мутақобила)* - и ду заряди нуқтавӣ доништа мешавад.

Агар ба ҷойи заряди  $q_0$  бо навбат зарядҳои озмоишии  $q_1, q_2, \dots, q_N$  - ро гузошта мувофиқи (1.35) энергияи потенциалии онҳоро муайян намоем, ин энергияҳо фарқ доштанишонро тасдиқ карда метавонем. Вале нисбатҳои энергияи потенциалии ҳар як заряд, бар бузургии ин заряд дар нуқтаи муайяни майдон ҳамон як қимат дорад:

$$\frac{W_p}{q_0} = \frac{W_{p1}}{q_1} = \frac{W_{p2}}{q_2} = \dots = \frac{W_{pN}}{q_N} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \quad (1.36)$$

Ҳамин аст, ки нисбати энергияи потенциалии заряд  $W_p$  бар қимати ин заряд ҳамчун бузургии тавсифдиҳандаи энергетикӣ нуқтаи муайяни майдон қабул карда шудааст ва *потенциали ин нуқта* ном дорад. Потенциалро бо ҳарфи  $\varphi$  (фи) ишорат кардан маъмул гаштааст:

$$\varphi = W_p / q_0 \quad (1.37)$$

Яъне, потенциали нуқтаи маълуми майдон ададан ба энергияи потенциалие баробар аст, ки заряди воҳидӣ (1 Кл) ба он дар ин нуқта доро мешавад. Аз ин рӯ потенциал бузургии скалярӣ ва истифодаи он барои тавсифи майдон назар ба шадидият (бузургии векторӣ) бартарихи назаррас дорад.

Воҳиди потенциалро мувофиқи (1.37) муқаррар мекунанд ва дар СИ он 1 *вольт* (мухтасар 1 В) мебошад: 1 В - потенциали нуқтаи майдонест, ки дар он заряди озмоишии 1 Кл дорои энергияи потенциалии 1 *Ҷ* мегардад: 1 В = 1 *Ҷ*/Кл. Дар амалия воҳидҳои каратии вольт – 1 кВ =  $10^3$  В; 1 МВ =  $10^6$  В низ истифода мешаванд.

Потенциали нуқтаро доништа, энергияи потенциалии заряди дар ин нуқта ҷойгирбударо муайян кардан душвор нест:

$$W_p = q_0 \varphi \quad (1.38)$$

Мувофиқи (1.36) *потенциали майдони заряди нуқтавии  $q$*  дар фосилаи  $r$  аз он бо формулаи:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \quad (1.39)$$

муайян карда мешавад.

*Потенциали нуқтаи маълуми майдони системаи зарядҳоро* ҳамчун бузургии скалярӣ бо формулаи:

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{r_i} \quad (1.40)$$

дарёфтани имконпазир аст (хотиррасон мекунем, ки заряди ҳаргуна ҷисми калон чун маҷмӯи зарядҳои нуқтавӣ доништа мешавад).

Ифодаи (1.38) – ро ба эътибор гирифта, кори кӯчондани зарядро мувофиқи (1.33) ба воситаи фарқи потенциалҳои ду нуқтаи майдон пешниҳод намудан мусоид аст, зеро фарқи потенциалҳо бо ёрии асбоби ба ном *вольтметр* чен карда мешавад:

$$A = -\Delta W_p = W_{p1} - W_{p2} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1.41)$$

Аз ин ҷо

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q_0} \quad (1.42)$$

буданаш маълум мегардад. Яъне, фарқи потенциалҳои ду нуқтаи майдон қореро муайян менамояд, ки барои заряди воҳидӣ (1 Кл) - ро аз нуқтаи якум то нуқтаи дуюм қўчондан бояд иҷро кард.

Одатан фарқи потенциалҳоро бо ҳарфи  $U$  ишорат мекунам ва онро *шиддат* низ меноманд (минбаъд мефаҳмем, ки шиддат маънои васеътар дорад):

$$A = q_0 U. \quad (1.43)$$

Мувофиқи формулаи (1.41) ё (1.43) қор, инчунин энергияро баъзан (хусусан дар физикаи атом ва ядро) бо воҳидҳои махсуси ба номи *электрон-вольт* (мухтасар  $\text{эВ}$ ) - ҳо ифода мекунам: 1  $\text{эВ}$  - қорест, ки ҳангоми якто электронро дар байни ду нуқтаи фарқи потенциалҳояшон 1 В қўчондан бояд иҷро намуд:

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Ҷ}.$$

Воҳидҳои қаратии электрон - вольт низ мавриди истифода қарор меёбад:

$$\begin{aligned} 1 \text{ кэВ} &= 10^3 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-16} \text{ Ҷ}; \\ 1 \text{ МэВ} &= 10^6 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Ҷ}; \\ 1 \text{ ГэВ} &= 10^9 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ Ҷ}. \end{aligned}$$

Қайд қардан бамаврид аст, ки қимати миёнаи энергияи ҳаракати ҳароратии молекулаҳо  $kT$  ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ҷ/К}$  дойимии Болсман) дар температураи ҳона  $T = 300 \text{ К}$  ( $t = 27^\circ\text{C}$ ) бо электронвольт чунин ифода меёбад:

$$kT = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ҷ/К} \cdot 300 \text{ К} = 4,14 \cdot 10^{-21} \text{ Ҷ} \approx 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ эВ} = \frac{1}{40} \text{ эВ}.$$

**Мисоли 1.6.** Электронҳо дар кинескопи телевизион бо шиддати  $U = 20 \text{ кВ}$  тезонида мешаванд. Дар ҳоли суръати ибтидоии электронҳоро баробари сифр қабул намудан суръати ниҳии онҳо дар кинескоп то кадом қимат мерасад?

*Маълумот:*

$$\left. \begin{aligned} q &= |e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ U &= 20 \text{ кВ} = 2 \cdot 10^4 \text{ В} \\ m_e &= 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \\ g_0 &= 0 \\ g &= ? \end{aligned} \right\}$$

*Ҳал*

Мувофиқи қонуни бақои энергия қори майдони электрӣ ба тағйироти энергияи кинетикии электрон баробар аст:

$$A = qU = \Delta W_r = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}.$$

Аз ин қор:

$$g = \sqrt{\frac{2qU}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 2 \cdot 10^4 \text{ В}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} = 8,4 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$



Ҷавоб:  $\vartheta = 8,4 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ .

**Мисоли 1.7.** Зарядҳои  $q_1 = +20 \text{ мкКл}$  ва  $q_2 = -30 \text{ мкКл}$  тавре ҷойгиранд, ки дар расми 1.30 тасвир ёфтааст. Потенциали нуқтаи  $C$  дар майдони ин зарядҳо чӣ қадар мебошад?

Маълумот:

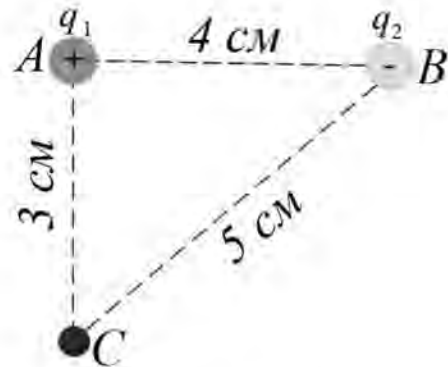
$$q_1 = +20 \text{ мкКл} = +2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$$

$$q_2 = -30 \text{ мкКл} = -3 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$$

$$AC = r_1 = 3 \text{ см} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$BC = r_2 = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$\varphi_C = ?$$



Расми 1.30

Ҳал

Зарядҳои  $q_1$  ва  $q_2$  - ро чун зарядҳои нуқтавӣ қабул менамоем, он гоҳ мувофиқи (1.40):

$$\begin{aligned} \varphi_C &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1}{r_1} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} \right) = 9 \cdot 10^9 \left( \frac{2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}}{3 \cdot 10^{-2} \text{ м}} + \frac{(-3 \cdot 10^{-5} \text{ Кл})}{5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} \right) = \\ &= \frac{9}{15} \cdot 10^6 \text{ В} = 0,6 \cdot 10^6 \text{ В} = 0,6 \text{ МВ} = 600 \text{ кВ} \end{aligned}$$

буданаш маълум мегардад.

Ҷавоб:  $\varphi_C = 600 \text{ кВ}$ .

### § 1.9. Таносуби байни потенциал ва шадидият

Дар мавриди маълум будани қимати потенциали нуқтаҳои гуногуни майдони электрӣ шадидияти ин нуқтаҳо ёфтани мумкин аст. Агар ба эътибор гирем, ки шадидияти майдон  $\vec{E}$  бо қувваи ба заряд таъсировар ва потенциал бо энергияи он заряд муайян карда мешавад, ин ду бузургӣ бояд ба ҳам мутаносиб бошанд. Дарвоқеъ, қори қувваҳои майдон барои қўчонидани заряд дар роҳи хурди  $dl$  бо формулаи  $\delta A = q_0 E_e dl$ , аз тарафи дигар, ҳамин қорро тавассути камшавии энергияи потенциалӣ бо формулаи:

$$\delta A = -dW_p = -d(q_0 \varphi) = -q_0 \frac{\partial \varphi}{\partial l} dl$$

муайян қардан мумкин аст. Аз ин рӯ:

$$q_0 E_e dl = -q_0 \frac{\partial \varphi}{\partial l} dl,$$

пас,



$$\vec{E}_e = -\frac{\partial\varphi}{\partial l} \quad (1.44)$$

мебошад. Яъне, проексияи вектори  $\vec{E}$  дар ягон меҳвари  $l$  бо аломати минус ба ҳосилаи хусусии потенциал дар ин меҳвар баробар аст. Ба ин муносибат ифодаҳои зерин ҷой доранд:

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}; E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}; E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}. \quad (1.45)$$

Ёдовар мешавем, ки мувофиқи қоидаҳои математика баробарии зеринро тартиб додан раво аст:

$$\vec{E} = \vec{i}E_x + \vec{j}E_y + \vec{k}E_z = -\left(\vec{i}\frac{\partial\varphi}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial\varphi}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right).$$

Дар ин ҷо  $|\vec{i}| = |\vec{j}| = |\vec{k}| = 1$  ҳамчун модулҳои векторҳои воҳидии мувофиқан ба самтҳои меҳварҳои координатӣ раво донида мешаванд. Ифодаи дар қавсайн ҷойгирбуда *градиенти потенциал* аст ва онро бо  $grad\varphi$  ишорат мекунанд:

$$\vec{E} = -grad\varphi. \quad (1.46)$$

Яъне, шадидияти майдони электрӣ бо тағйироти потенциал бар воҳиди дарозӣ, ки ба рафти хатҳои шадидият рост меояд, муайян мегардад. Аломати минус дар (1.46) нишон медиҳад, ки вектори шадидият ба тарафи камшавии потенциал раво аст.

Агар майдон якҷинса  $U$ -шиддати байни ду нуқтаи масофаи байнашон  $d$  бошад (ба (1.28) ниг.) онгоҳ

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{d} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U}{d}, \quad (1.47)$$

аз ин ҷо:

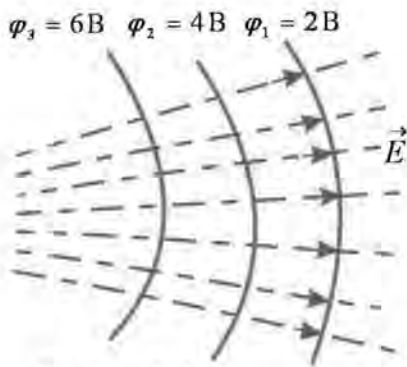
$$U = Ed \quad (1.48)$$

аст. Аз ин рӯ, бо дарназардошти он, ки дар майдони якҷинса  $E = const$  мебошад, ҳар қадар фосилаи байни ду нуқта афзудан гирад, шиддати байни онҳо низ зиёд мешавад.

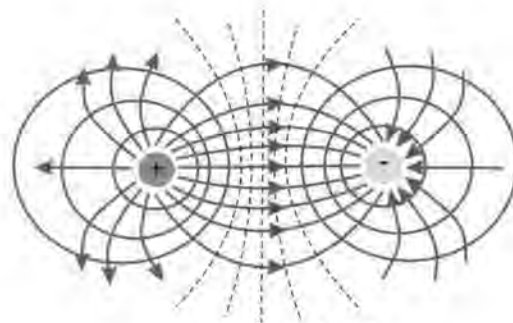
Воҳиди шадидиятро дар СИ маҳз мувофиқи (1.47) муқаррар мекунанд ва  $1 \text{ В/м}$  – шадидияти нуқтаи майдонест, ки дар он ба ҳар як метри дарозии хатти қуввагӣ шиддати  $1 \text{ В}$  рост меояд.

Барои тасвири аёнии майдонҳои электрӣ дар баробари хатҳои шадидият мафҳуми *сатҳҳои эквипотенциалӣ*, яъне сатҳҳое, ки дар ҳар як нуқташон потенциал ҳамон як қимат дорад, истифода мешавад. Яке аз хусусиятҳои ин сатҳҳо дар он аст, ки ҳаракати зарядҳо ба рафти ин сатҳҳо иҷро карро талаб намекунад, аз ин рӯ хатҳои шадидият ҳар гоҳ ба сатҳҳои эквипотенциалӣ амудан сӯйи камшавии потенциал равоанд. Дар расми 1.31 хатҳои шадидияти майдоне штрихонида (рах-рах) шудаанду буришгоҳҳои сатҳҳои эквипотенциалӣ бо хатҳои яклуфт тасвир ёфтаанд. Дар расми 1.32 ин гуна хатҳо барои диполи электрӣ оварда шудаанд. Барои зарядҳои нуқтавӣ сатҳҳои эквипотенциалӣ сфераҳои ядро  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$

буданаш ба ин гувоҳӣ медиҳад.



Расми 1.31



Расми 1.32

Бояд қайд кард, ки дар ҳар як майдон теъдоди зиёди сатҳҳои эквипотенциалӣ гузаронидан мумкин аст. Вале одатан онҳоро қадре мегузаронанд, ки фарқи потенциалҳои ҳар гуна ду сатҳи эквипотенциалии ҳамсоя ҳамон як қимат дошта бошад (ба расми 1.31 нигаред). Он гоҳ зичии сатҳҳои эквипотенциалӣ ба тарзи аёнӣ шадидиятро дар нуктаҳои гуногуни майдон муайян менамояд.

**Мисоли 1.8.** Дар байни ду лавҳаи металли уфуқан дар фосилаи  $d=5$  мм чойгирбудаи фарқи потенциалҳои  $U=100$  В чакраи равшани радиусааш  $r=1,43$  мкм - и манфӣ заряднок дар мувозанат мебошад. Зичии равшан  $D=800$  кг/м<sup>3</sup> аст. Муайян намоед, ки чакра чандто электрони «зиёдати» дорад. Агар дар натиҷаи бо афканишоти ултрабунафш шуоъборон кардан чакра нисфи электронҳои талаф диҳад, он бо кадом шитоб ба ҳаракат мебарояд?

Маълумот:

$$d = 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$U = 100 \text{ В}$$

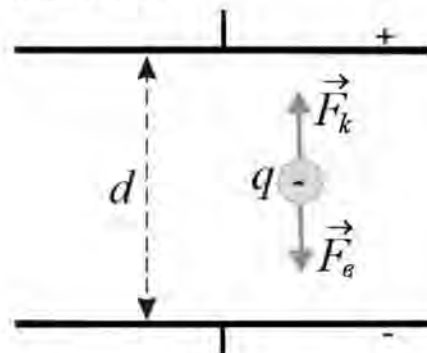
$$r = 1,43 \text{ мкм} = 1,43 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$D = 800 \text{ кг/м}^3$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\Delta N = \frac{1}{2} N$$

$$N - ? \quad a - ?$$



Расми 1.33

Ҳал

Ба чакра қувваи вазнинии:

$$F_g = mg = DVg = \frac{4}{3} \pi r^3 Dg$$

ва қувваи электрии:

$$F_{эл} = qE = q \frac{U}{d}$$

таъсир мекунанд, ки муқобилсамтанд (расми 1.33). Мувофиқи шарти мувозанати  $\vec{F}_{эл} + \vec{F}_g = 0$  ё худ:

$$q \frac{U}{d} = \frac{4}{3} \pi r^3 D g$$

буданаширо ба эътибор гирифта, заряди чакра ва аз ин рӯ теъдоди электронҳои «зиёдати» - аширо муайян карда метавонем:

$$N = \frac{q}{|e|} = \frac{4 \pi r^3 D g d}{3 e U} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot (1,43 \cdot 10^{-6} \text{ м})^3 \cdot 800 \text{ ёд/м}^3 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 100 \text{ В}} \approx 30.$$

Дар холи талаф ёфтани нисфи ин теъдоди электронҳо қувваи электрӣ ду маротиба кам мегардаду чакра бошитоб (қувваҳо дойимианд) ба поён мефурояд. Шитоби ҳаракати чакраро мувофиқи қонуни асосии динамика муайян кардан мумкин аст:

$$m a = m g - q_1 \frac{U}{d},$$

ки дар ин чо  $q_1 = \Delta N e = 15 e = 15 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} = 2,4 \cdot 10^{-18} \text{ Кл}$  мебошад. Пас,

$$a = g - \frac{q_1 U}{m d} = g - \frac{q_1 U}{\frac{4}{3} \pi r^3 D d} = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} - \frac{2,4 \cdot 10^{-18} \text{ Кл} \cdot 100 \text{ В}}{4 \cdot 3,14 \cdot (1,43 \cdot 10^{-6} \text{ м})^2 \cdot 800 \text{ кг/м}^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}} =$$

$$= 4,9 \text{ м/с}^2 \approx 5 \text{ м/с}^2.$$

Ҷавоб:  $N = 30$ ;  $a \approx 5 \text{ м/с}^2$ .

### §1.10. Ҳисоб кардани фарқи потенциалҳо ба воситаи шадидият

Бо истифодаи формулаҳои ҳисоби қори қўчондани заряд дар майдони электрӣ:

$$A = q_0 \int_1^2 E_e dl; \quad A = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2)$$

таносуби зеринро муқаррар кардан душвор нест:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E_e dl = \int_1^2 E dl \cos \alpha. \quad (1.49)$$

Яъне, шадидияти майдон  $E$  - ро доништа, фарқи потенциалҳои ду нуқтаи майдонро муайян кардан имконпазир аст. Инро бо овардани чанд мисоли мушаххас нишон медиҳем.

**1. Майдони ҳамвории беҳири мунтазам заряднок.** Шадидияти ин гуна майдон бо формулаи (1.22) ҳисоб карда шуданаши ва дар ин маврид  $dl = dr$  буданаширо доништа (вектори шадидият ба ҳамворӣ амуд аст), фарқи потенциалҳои ду нуқтаи майдонро дарёфта метавонем:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E dr = E \int_{r_1}^{r_2} dr = \frac{|\sigma|}{2 \epsilon_0} (r_2 - r_1).$$

Агар ба назар гирем, ки зичии сатҳии зарядҳо  $\sigma = q/S$  ва фосилаи кӯтохтарини байни ду нуктаи майдон  $r_2 - r_1 = d$  мебошад, фарқи потенциалҳои нуктаи майдони якҷинса:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{qd}{2\varepsilon_0 S}$$

буданаш маълум мегардад.

**2. Майдони ду ҳамвории беохири параллелии мунтазам, вале гуногуннавъ заряднок.** Ҳисоби фарқи потенциалҳо дар ин маврид ҳам чун барои як ҳамвориву лекин (дар мобайни ҳамворихо) ду маротиб зиёдтар, яъне

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}(r_2 - r_1) = \frac{q}{\varepsilon_0 S}d \quad (1.50)$$

мебошад.

**3. Майдони сатҳи сферавии мунтазам заряднок.** Тавре ки маълум аст, шадидияти майдони ин гуна сатҳ дар масофаҳои  $r \geq R$  ( $R$  - радиуси сфера) чун шадидияти майдони заряди нуктавӣ

( $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2}$ ) муайян карда мешавад. Аз ин рӯ мувофиқи (1.49):

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E(r)dr = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.51)$$

мебошад. Агар  $r_1 = r$ ,  $r_2 = \infty$  бошад, он гоҳ

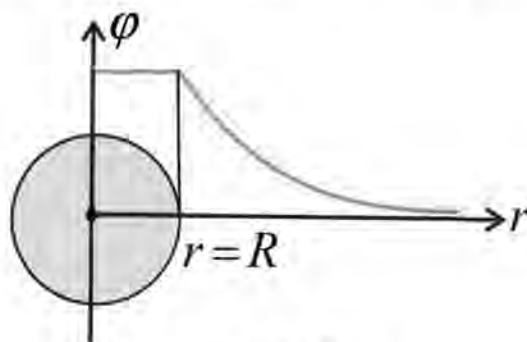
$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r}$$

буданаш маълум мегардад (шумо онро бо формулаи потенциали майдони заряди нуктавӣ (1.36) муқоиса намоед).

Андаруни сфераи заряднок, инчунин дар сатҳи он потенциал ҳамон як қимат дорад ва бо формулаи:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{R}$$

муайян карда мешавад ва он ба тарзи графикӣ дар расми 1.34 тасвир ёфтааст.



Расми 1.34

**4. Майдони кураи ҳаҷман мунтазам зарядноки радиусаш  $R$ .** Шадидияти майдони ин гуна кура дар берун аз он чун шадидияти



майдони заряди нуқтавӣ муайян карда шуданаширо хотиррасон менамоем. Аз ин рӯ фарқи потенциалҳои ду нуқтаи дар масофаҳои  $r_1$  ва  $r_2$  аз маркази кура воқеъгардидаро ( $r_1 > R$ ,  $r_2 > R$ ,  $r_2 > r_1$ ) мувофиқи (1.51) дарёфта метавонем. Вале дар нуқтаи ихтиёрии андаруни кура ҷойгирбуда ( $r < R$ ) шадидият бо формулаи (1.26) муайян карда шуданаширо ба эътибор гирифта, *фарқи потенциалҳои ду нуқтаи дар масофаҳои  $r_1$  ва  $r_2$  аз маркази кура ( $r_1 < R$ ,  $r_2 < R$ ) воқеъгардидаро дар асоси (1.49) дарёфтан мумкин аст:*

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \int_{r_1}^{r_2} E(r) dr = \frac{q}{8\pi\epsilon_0} (r_2^2 - r_1^2) \quad (1.53)$$

**5. Майдони силиндри борики беохир (сим) - и мунтазам заряднок.** Шадидияти ин майдон дар масофаи  $r$  аз меҳвари цилиндр бо формулаи (1.24) муайян карда шуданаширо хотиррасон менамоем. Пас, фарқи потенциалҳои ду нуқтаи ин майдон мувофиқи (1.49) дар нуқтаҳои масофаашон  $r_1$  ва  $r_2$ :

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E(r) dr = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

дарёфта мешавад.

### § 1.11. Ноқилҳо дар майдони электрӣ

Ду навъ ноқилҳо: *ноқилҳои ҷинси I* (асосан металлҳо ва ҳӯлаҳои онҳо); *ноқилҳои ҷинси II* (маҳлулҳои намак, ишқор, туршӣ ё кислота, гудохтаи намакҳо ва ғайра, ки мухтасар *электролитҳо* - аз электр ва сухани юнонии *lytos* - таҷзия, ҷудо шудан) - ро фарқ мекунамд.

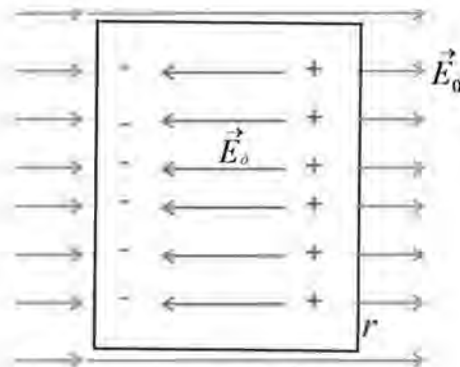
Дар ноқилҳои ҷинси I ҳомилони зарядҳои электронҳои озод мебошанд. Электронҳои озод чун зарраҳои хурдтарини моддаҳо бо таъсири қувваҳои ниҳоят кам зуд ба ҳаракат мебароянд. Оид ба ноқилҳои ҷинси II, ки дар онҳо ҳомилони заряд ионҳои мусбату манфианд, минбаъд маълумот оварда мешавад.

Хотиррасон кардан ба маврид аст, ки электронҳои озод дар шароити муқаррарӣ мисли молекулаҳои гази идеалӣ рафтор мекунамд - ин фаразия асоси назарияи классикии ба истилоҳ *назарияи электронӣ* мебошад, аз ин рӯ онҳо дар ҳаракати бенизоми ҳароратианд.

Мавриди дар майдони электрии берунӣ ҷойгир намудани порчаи металл электронҳои озоди он бо таъсири ин майдон ҳамчун зарядҳои манфӣ ба муқобили самти шадидият ба ҳаракати нигаронида (ботартибона) мебароянд. Аз ин рӯ дар сатҳҳои ба самти вектори  $\vec{E}_0$  амуд зарядҳои миқдоран баробари гуногунҷинс (дар сатҳе, ки хатҳои шадидияти майдони беруна ворид мешаванд, зарядҳои мусбат) ҳам мешаванд (расми 1.35). Дар натиҷа андаруни порчаи металл майдони дохилии электрии  $\vec{E}_0$  ба вуҷуд меояд, ки ба вектори  $\vec{E}_0$  муқобилсамт асту майдони беруниро суст мегардонад. Кӯчиши электронҳои озод то даме идома меёбад, ки майдони дохилӣ майдони берунаро ба мувозанат орад (компенсатсия намояд). Дар ин



маврид шадидияти натиҷавӣ андаруни порча баробари сифр аст, ҳарчанд он заряднок мешавад (тавре ки зикр ёфт ин ҳодиса индуксияи электростатикӣ ном гирифтааст). Агар ин порчаи металлро аз майдон дур андозем, зарядҳои мусбату манфӣ аз нав мунтазам тақсим гардида, ноқил аз бори электрӣ ҳалос мешавад, яъне ба ҳолати муқаррариаш бармегардад.



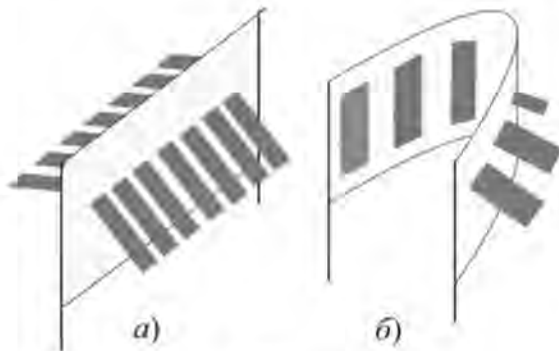
Расми 1.35

Тӯли вақте ки дар давоми он ноқили дар майдони электрӣ ҷойгир карда заряднок мешавад, чунон кам аст, ки зарядҳои дар ноқил ҳосилгардида фаврӣ ба мувозанат меоянд. Ҳамин аст, ки андаруни ноқил ҳамон замон шадидияти натиҷавӣ  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_o = 0$  ва сатҳи ноқил эквипотенциалӣ мешавад. Агар дар дохили ноқили заряднок майдон вуҷуд надошта бошад, зичии ҳаҷмии заряд дар он ҷо бояд баробари сифр гардад. Аз ин рӯ зарядҳои ангеzonидашуда танҳо дар сатҳи берунии ноқил бояд ҷойгир шаванд. Пас, дар дохили ноқили дарунҳолии зарядноки ба мувозанатомада майдони электрӣ вуҷуд надорад. Ба ин ҳодиса *муҳофизати электростатикӣ* асос ёфтааст. Масалан, агар ягон асбобро андаруни ғилофи металлӣ ҷойгир намоем ё он асбобро бо тӯри металлӣ гирдпеч созем, ба нишондоди ин асбоб майдонҳои берунаи электрӣ таъсире намерасонанд.

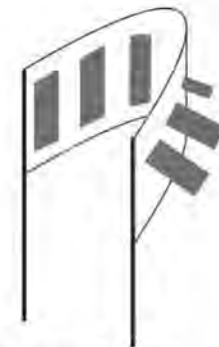
Савол ба миён меояд, агар ба ноқили безаряд як миқдор заряд диҳем, ин зарядҳо дар сатҳи ноқил чӣ тавр ҷойгир мешаванд? Барои ба ин савол ҷавоб дарёфтани тӯраки металиро, ки ба дастаҳои ғайриноқилӣ маҳкам асту дар он варақчаҳои қоғазӣ часпонда шудаанд, заряднок мекунем. Агар ин тӯраки заряднокро аз дастаҳо яш қашида рост дорем (расми 1.36, а), варақчаҳо аз тарафи тӯрак якхела дур мешаванд (ҳар як варақча гуё электроскоп мебошад). Яъне зарядҳо дар сатҳи мунтазам тақсим гардидаанд. Дар мавриди қачу ҳалқашакл кардан (расми 1.36, б) варақчаҳо танҳо дар тарафи берунии тӯрак дур мешаванду бас. Ба тӯрак ҳар гуна шакли қачӣ дода боварӣ ҳосил карда метавонем, ки зарядҳо танҳо дар тарафҳои барҷастаи сатҳ ҷой мегиранд ва чунон тақсим мешаванд, ки дар мавзӯҳои қачиашон қалон (радиуси қачӣ хурд) зарядҳо зиёдтаранд (расми 1.36).

Ҳамин тариқ, зарядҳо танҳо дар сатҳи берунии ноқили қурашакл мунтазам тақсим мешаванд. Дар мавриди шакли ихтиёрӣ доштани ноқил зичии сатҳии заряд ва аз ин рӯ шадидияти майдон дар назди сатҳи қачиаш қалон бузургтар мебошад. Зичии заряд дар

чойҳои барҷастаю нӯгтези ноқили заряднок (расми 1.37) зиёд аст, ҳарчанд тамоми сатҳи ноқил эквипотенсиалист. Ноқилҳои нӯгтез зуд-зуд зарядашонро гум мекунанд. Дар назди нӯгҳои тези ноқили заряднок ба ном «боди электрӣ» ба вуҷуд меояд: агар шамъ ба ин гуна нӯг наздик оварда шавад, боди зикрѐфта гӯё онро «пуф» мекунад (расми 1.39). Сабаб дар он аст, ки бо таъсири майдони пурзӯри нӯги тез дар молекулаҳои нейтралӣ ҳаво зарядҳои индуксионӣ (ангезонида) ба вуҷуд омада, ба мисли чизҳои майда (нахҳои мӯй) ба қисми заряднок ҷазб мешаванду ба нӯг расида ҳамчун зарядноку аз он дур мераванд. Дар натиҷа «боди электрӣ» ба вуҷуд меояд.

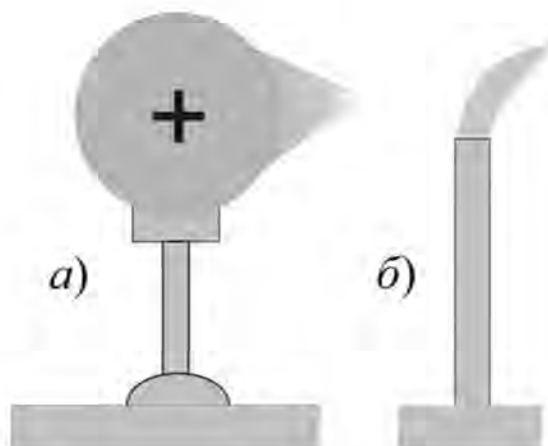
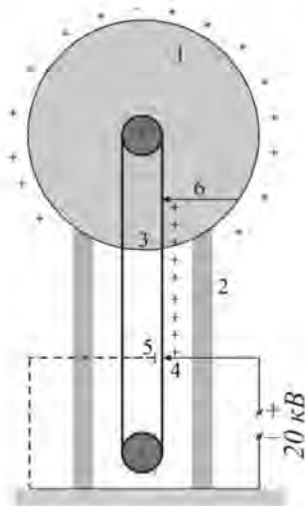


Расми 1.36



Расми 1.37

Ҳосияти танҳо дар сатҳи берунӣ чойгир шудани зарядҳо дар сохти дастгоҳе, ки барои ҳосил кардани шиддатҳои хеле баланд таъйин гардидаанд ва *генераторҳои электростатикӣ* ном доранд, мавриди истифода қарор меёбанд. Яке аз ин гуна генераторҳоро бори нахуст олими амрикоӣ Р. Ван-де Грааф (1901-1967) ихтироъ кардаст, ки он аз ноқили дарунхолии курашакли 1 (расми 1.38) ба пояҳои диэлектрики 2 маҳкамбуда иборат аст. Навори резинии ҳаракатманди 3 аз манбаи шиддат бо ёрии системаи нӯгтези 4, ки ба яке аз қутбҳои манбаъ пайвасту қутби дигараш заминвасла аст, заряднок мешавад. Лавҳаи заминваслаи 5 ҷоришавии зарядҳоро метезонад. Системаи дигари нӯгтези 6 зарядро аз навор гирифта ба кураи дарунхोलӣ интиқол медиҳад ва онҳо дар сатҳи берунии кура чойгир мешаванд. Бо ин усул миқдори зиёди зарядро дар кура ғун карда, шиддати яқчанд миллион волтро ҳосил намудан имконпазир аст.



Генераторҳои баландшиддати электростатикӣ пештар танҳо дар физикаи атому ядро барои суръатфизои протонҳо татбиқ ёфта буданд. Ҳоло ингуна генераторҳо дар саноати нимноқилӣ, афканиши шуоъҳои рентгении дарозии мавҷашон хеле кӯтоҳ, дефектоскопия (нуқсонсанҷӣ), технологияи радиатсионӣ ва ғайра қорбасти карда мешаванд.

### §1.12. Диэлектрикҳо дар майдони электрӣ

Ҳангоми омӯختани қонуни Кулон ба эътибор гирифтаем, ки қувваҳои ҳамтаъсироти электрӣ дар муҳити диэлектрикӣ назар дар вакуум  $\epsilon$  маротиба ва аз ин рӯ шадидияти майдони электрӣ низ ҳамин қадар кам мешаванд:

$$\epsilon = \frac{F_0}{F} = \frac{qE_0}{qE} = \frac{E_0}{E}. \quad (1.55)$$

Пеш аз ҳама бояд хотиррасон кард, ки ба диэлектрик ё изолятор (ғайриноқил)-ҳо моддаҳои дар шароити муқаррарӣ, яъне ҳангоми температураҳои начандон баланд ва мавҷуд набудани майдонҳои пурзӯри электрӣ таъдоди электронҳои озодашон ниҳоят камбуда мансубанд. Резина, чинӣ, шиша, аксар пластмасҳо, чӯби хушк, оби тоза, газҳо ва ғайра моддаҳои диэлектрикианд.

Бархилофи ноқилҳо зарраҳои заряднок дар тамоми ҳаҷми диэлектрикҳо озодона ҳаракат карда наметавонанд, онҳо танҳо қудрати аз ҷойҳои муқимашон ба масофаҳои нисбат ба фосилаҳои байниатомӣ на он қадар зиёд майл хӯрда метавонанду бас. Ҳамин аст, ки зарраҳои зарядноки моддаҳои диэлектрикиро *баста ё алоқаманд* меноманд. Бо ин сабаб диэлектрикҳо дар майдони электрии беруна назар ба ноқилҳо рафтори хосса зоҳир менамоянд. Барои шарҳ додани ин гуна хусусиятҳои диэлектрикҳо сохти дохилии онҳо бояд ба эътибор гирифт.

Вобаста ба сохти дохилии молекулаҳои онҳо қулли диэлектрикҳо ба се гурӯҳ ҷудо мекунанд. Гурӯҳи аввали диэлектрикҳо моддаҳои ташкил медиҳанд, ки молекулаҳои онҳо сохти симметрӣ доранд: марказҳои зарядҳои мусбату манфии онҳо ҳамҷояанд. Ба ин гуна диэлектрикҳо  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  ва ғайраҳо мансубанд, яъне моменти диполи молекулаҳои онҳо баробари сифр мебошад. Тасвири нақшагии молекулаҳои чунин диэлектрикҳо дар расми 1.40 оварда шудааст (нимкураҳои сафед шартан зарядҳои мусбату нимкураҳои сиёҳ - зарядҳои манфиро нишон медиҳанд).



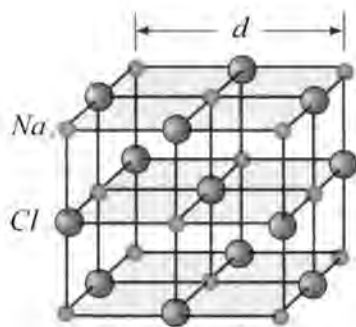
Расми 1.40

Ба гурӯҳи дигар диэлектрикхое тааллуқ доранд, ки дар молекулаҳои марказҳои тақсими зарядҳои мусбату манфӣ ҳамчун нестанд ва ин гуна молекулаҳо чун диполҳои электрӣ қабул кардан раво аст, яъне онҳо кутбноқанд. Ҳарчанд моментҳои диполи молекулаҳои ин гурӯҳи диэлектрикҳо ба сифр баробар нестанд, онҳо ба сабаби ҳаракати ҳароратӣ дар порчаи диэлектрик бенизом ҷойгир шудаанду momenti диполи натиҷавии порча сифр аст.

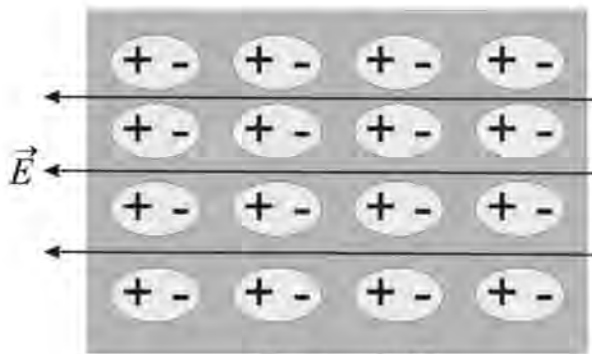
Гурӯҳи сеюми диэлектрикҳо моддаҳои кристаллии ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KBr}$ ,  $\text{LiF}$ , ...) ташкил медиҳанд, ки молекулаҳои сохти ионӣ доранд. Дар қуллаҳои панҷараҳои фазовии шаклашон ба ҳар як кристалли ионӣ хоси андозаҳои гуногун бо тартиби муайян ионҳои мусбату манфӣ ҷойгиранд ва кристалли том нейтрал аст. Масалан, дар панҷараи фазовии кристалли намаки ошӣ ( $\text{NaCl}$ ) ионҳо бо навбат дар қуллаҳои гӯё кубчае тавре ки дар расми 1.41 тасвир ёфтааст, ҷойгир шудаанд (мувофиқи маълумоти таҳлили рентгеноструктурӣ даври ин панҷара, яъне тарафи кубча  $d=56,3$  нм мебошад).

Ҳангоми чунин кристаллро дар майдони электрии берунаи якҷинса ҷойгир кардан он қадре дучори деформатсия мегардаду дар натиҷа momenti диполи ангеzonида ба вуҷуд меояд.

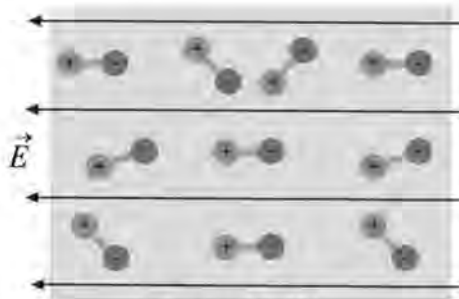
Агар диэлектрикҳои гурӯҳи аввал дар майдони якҷинсаи беруна воқеъ гарданд, бо таъсири майдон зарядҳои мусбат ба самти шададияти майдону зарядҳои манфӣ ба муқобили ин самт қадре майл меҳӯранд ва молекулаҳо дар натиҷа дорои momenti диполӣ мешаванд (расми 1.42).



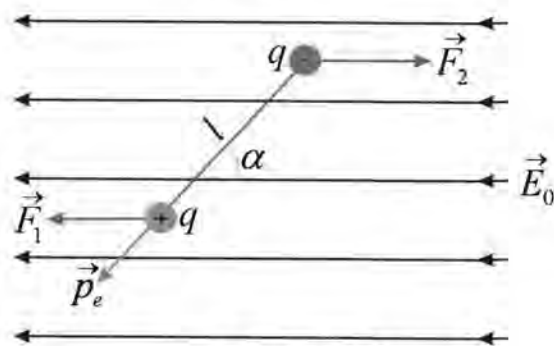
Расми 1.41



Расми 1.42



Расми 1.43



Расми 1.44

Дар мавриди диэлектрикҳои гурӯҳи дуюмро дар майдони якҷинсаи беруна ҷойгир кардан моментҳои диполи молекулаҳои



кутбнок бештар ба самти шадидияти ин майдон нигаронида мешаванду порчай диэлектрик кутбнок мегардад. (расми 1.43).

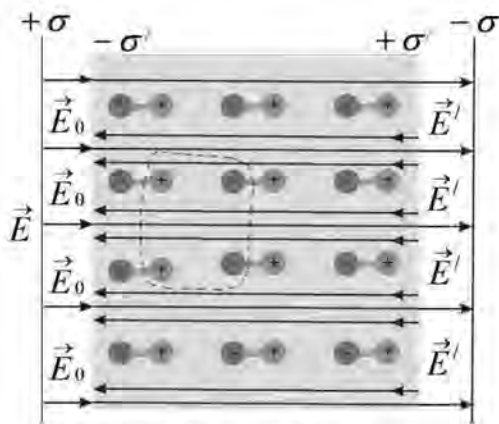
Ҳамин тарик, чойгир кардани ҳар се гурӯҳи диэлектрикҳо дар майдони электрии беруна дар порчай диэлектрик ба пайдо гардидани моменти диполии ангеzonидаи натиҷавӣ меоварад, ки ин ҳодиса *поляризация* (гӯё кутбнокшавӣ)-и диэлектрик ном гирифтааст. Агар майдони беруна якҷинса бошад, ба ҳар як дипол аз ҷониби майдони шадидияташ  $\vec{E}_0$  қувваҳои модулан баробари:

$$|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = |q|E_0,$$

вале аксулсамт (чуфти қувваҳо) таъсир менамоянд ва дар натиҷа дипол гардиш меҳӯраду моменти диполиаш сӯи майдон нигаронида мешавад (расми 1.44).

Дар майдони ғайриякҷинса қувваҳои  $\vec{F}_1$  ва  $\vec{F}_2$  модулан баробар нестанд, аз ин рӯ дипол ғайр аз ҳаракати чархзанӣ кардан бо таъсироти қувваи натиҷавӣ, ки модулаш ба фарқи модулҳои ин қувваҳо баробар аст, ба ҷойҳои шадидияти майдон зиёдтарбуда мекӯчад (ба ҷисмҳои заряднок ҷазб шудани ҷизҳои майда, нахҳои мӯй, ки дар ин бора дар муқаддима сухан рафта буд, маҳз бо ин гуна кӯчиш шарҳ меёбад).

Агар порчай диэлектрикро дар майдони якҷинсаи берунаи шадидияташ  $\vec{E}_0$  чойгир намоем, молекулааш хоҳ бекутбу хоҳ кутбнок, инчунин ионӣ бошад, монанди дипол рафтор мекунаду сӯи шадидият нигаронида мешавад, векторҳои моментҳои диполҳо бештар бонизом самт мегиранд. Ҳарчанд ҳаракати бетартибонаи ҳароратии молекулаҳо ба тартиби комил даромадани диполҳо ҳалал мерасонад. Аз ин рӯ чойгиршавии пурраи бонизомии диполҳо рӯй намедихад ва ба қадри пурзӯр гардидани майдони беруна диполҳо ҳарчӣ бештар ба самти шадидияти майдон нигаронида мешаванд. Дар натиҷа дар сатҳҳои ба ҳам рӯ ба рӯи ба самти шадидияти  $\vec{E}_0$  амудӣ чойгирбудаи диэлектрик зарядҳои гуногунҷинси микдоран баробари компенсатсия нагардидаи зичии сатҳиашон  $-\sigma'$  ва  $+\sigma'$  ба вучуд меоянд (расми 1.45).



Расми 1.45

Ҳарчанд дар ҳаҷми ихтиёрии диэлектрик ҳосили ҷамъи зарядҳои баста баробари сифр мебошад (дар расми 1.45 ин гуна ҳаҷм дар порчаи диэлектрик бо хатҳои штрихӣ ҷудо карда шудааст).

Пас, порчаи диэлектрики дар майдони берунаи шадидияташ  $\vec{E}_0$  ҷойгирбуда ба диполи азимҷуссае табдил меёбад, ки моменти диполиаш:

$$\vec{P} = |\sigma'|SL \quad (1.56)$$

мебошад ( $S$  - масоҳати сатҳе, ки дар он зарядҳои ангеzonидашудаи  $-\sigma'$  ва  $+\sigma'$  ба вучуд меоянд,  $L$  - гафсии порчаи диэлектрик).

Барои тавсифи ҳолати кутбнокшавии диэлектрикҳо бузургии ба истилоҳ *вектори поляризация* ( $\vec{P}$ ) истифода мешавад, ки он ба ҳосили ҷамъи моментҳои диполи куллии молекулаҳои дар ҳаҷми диэлектрик мавҷуда баробар аст:

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^N \vec{P}_{ei}}{\Delta V} \quad (1.57)$$

Аз ин рӯ вектори поляризация дар мавриде, ки муҳокима мешавад,

$$|\vec{P}| = \frac{|\sigma'|SL}{\Delta V} = |\sigma'| \quad (1.58)$$

буданаш маълум мегардад.

Шадидияти майдони зарядҳои бастаи ангеzonидашуда  $\vec{E}'$  (зичии, сатҳиашон  $|\sigma'|$ ) ба шадидияти майдони зарядҳои озод  $\vec{E}_0$  муқобилсамт аст, аз ин рӯ шадидияти майдони натиҷавӣ  $\vec{E}$ -ро модулан бо формулаи:

$$E = E_0 - E' \quad (1.59)$$

муайян карда метавонем.

Тавре ки таҷрибаҳо собит менамоянд, барои гурӯҳҳои зиёди диэлектрикҳо вектори поляризация ба шадидияти майдони натиҷавӣ дар диэлектрик ( $\vec{E}$ ) хаттӣ вобаста мебошад:

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}. \quad (1.60)$$

Дар ин ҷо  $\chi$  (каппа хонда мешавад) коэффитсиенти вобастагӣ буда, *пазируфти диэлектрикии модда* (ба лафзи русӣ «диэлектрическая восприимчивость») ном дорад.

Агар ба эътибор гирем, ки:

$$E' = \frac{|\sigma'|}{\epsilon_0} \quad (1.61)$$

мебошад, ифодаи (1.59)-ро бо дарназардошти (1.58) ва (1.61) чунин пешниҳод карда метавонем:

$$E = E_0 - \frac{|\sigma'|}{\epsilon_0} = E_0 - \frac{P}{\epsilon_0} = E_0 - \chi E,$$

ё ки

$$\epsilon_0 E_0 = \epsilon_0 E + P. \quad (1.62)$$

Аз ин рӯ:

$$(1 + \chi)E = E_0 \quad (1.63)$$

буданаш маълум мегардад. Ин формуларо бо (1.55) муқоиса карда хулоса мегирем, ки нуфузпазирии нисбии диэлектрикӣ:

$$\varepsilon = 1 + \chi. \quad (1.64)$$

мебошад.

Барои тавсифи майдон дар диэлектрикҳо бузургии вектории ба ном *индуксияи электрӣ* ё худ *ангезаи электрӣ*, ки бо ҳарфи  $\vec{D}$  ишорат мешавад, мавриди истифода қарор меёбад:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}_0 = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1.65)$$

мебошад.

Бо дарназардошти (1.60) ва (1.64) ин бузургӣ бо вектори шадидияти майдони натиҷавӣ дар диэлектрик  $\vec{E}$  чунин таносуб дорад:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}. \quad (1.66)$$

Аз ифодаи (1.65) бармеояд, ки вектори  $\vec{D}$  танҳо бо шадидияти майдони беруна  $\vec{E}_0$ , яъне тақсимооти зарядҳои озод муайян карда мешавад. Дарвоқеъ, теоремаи Гаусс барои вектори индуксияи электрӣ чунин намуд мегирад:

$$\oint_S \vec{D}_n dS = \oint_S \varepsilon_0 E_{0n} dS = \sum_{i=1}^n q_{i\text{Озод}} = q_{\text{Озод}}. \quad (1.66)$$

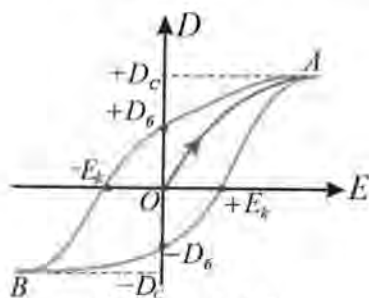
Ин формуларо бо теоремаи Гаусс (1.20) муқоиса намоед.

### § 1.13. Сегнетоэлектрикҳо. Эффеќти пийезоэлектрӣ

Дар як қатор диэлектрикҳо, аз ҷумла намаки сегнетӣ (ин истилоҳ ба шарафи кашшофи намаки  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , ки онро соли 1672 олими фаронсавӣ П. Сейнет (Seignette) муқаррар карда буд, чунин номида мешавад), титанати барий ( $\text{BaTiO}_3$ , ин намакро с.1994 олими советӣ Б.М. Вул кашф намудааст) ва чандеи дигар, нуфузпазирии нисбӣ  $\varepsilon$  қиматҳои ғайриҷашмдошт қалон, то даҳҳо ҳазор мегирад. Зиёда аз ин,  $\varepsilon$  ба шадидияти майдони берунаи электрӣ вобастагӣ дорад. Ҳамин аст, ки диэлектрикҳои ба чунин хосиятҳо доро *сегнетоэлектрикҳо*, баъзан *ферроэлектрикҳо* (бо сабаби ба ферромагнетикҳо шабоҳат зоҳир карданашон) ном гирифтаанд.

Сегнетоэлектрикҳо назар ба дигар диэлектрикҳо боз бо як хусусияти аҷибе фарқ мекунанд: дар онҳо ҳангоми набудани майдони берунаи электрӣ низ поляризатсияи диэлектрикӣ вучуд дошта метавонад. Пайдоиши *поляризатсияи худ ба худ (спонтанӣ)* дар сегнетоэлектрикҳо, масалан намаки сегнетӣ бо нигарониши гуруҳҳои гидроксилӣ таркиби молекулаҳои он шарҳ меёбад. Дар ҳаҷми сегнетоэлектрикҳо соҳаҳои начандон қалон (андозаҳои онҳо 0,01-0,1 мм) мавҷуданд, ки *доменҳо* (аз фаронсавии лотиниасоси мулк, қаламрав) ном гирифтаанд ва дар онҳо моментҳои диполи молекулаҳо дар натиҷаи ҳамтаъсири зӯри зарраҳо ба ҳамон як сӯ самт доранд. Агар дар ибтидо сегнетоэлектрик дар майдони берунаи электрӣ воқеъ нагардида бошад, доменҳо чун нақшаи кошинкорӣ бетартибона ҷойгиранду дар натиҷа сегнетоэлектрик қутбнок нест. Ин гуна сегнетоэлектрикҳо дар майдони берунаи электрии

шадидияташ  $\vec{E}$  чойгир намуда, вобаста ба он тағйироти вектори индуксияи электрӣ  $\vec{D}$  - ро ба қайд мегирам. Аввало ин вобастагӣ ба рафти хати  $OA$  (расми 1.46) меафзояд, сипас он аз қимати калони  $D_c$  (индуксияи сершудаи электрӣ) сар карда, ба таври хаттӣ (чун диэлектрики муқаррарӣ) тағйир меёбад. Ҳангоми индуксия ба қимати  $D_c$  расидан тамоми доменҳо суйи вектори  $\vec{E}$  нигаронида мешаванд. Агар минбаъд  $E$ -ро кам намоем, хати вобастагии  $D = f(E)$  на ба рафти  $AO$ , балки ба рафти  $AD_6$  паст мефурояд ва дар мавриди  $E=0$  индуксияи электрӣ қимати  $D_6$  (поляризацияи боқимонда)-ро мегирад. Барои барҳам додани поляризацияи боқимонда вектори  $\vec{E}$ -ро ба самти муқобил гардонда, то қимати  $\vec{E}_k$ -и ба истилоҳ *қувваи коэрситивӣ* (аз сухани латинии нигоҳдоранда) зиёд кардан лозим меояд. Агар минбаъд ба ҳамин минвол  $E$  афзудан гирад, индуксияи электрӣ то нуқтаи  $B$  (гӯё тасвири нуқтаи  $A$  дар ойна) ба тарафи муқобил зиёд шуда меравад. Сипас, агар  $E$  кам карда шавад, вобастагии  $D = f(E)$  ба рафти аз  $B$  то  $-D_6$ - и микдоран ба  $D_6$  баробар, минбаъд ба рафти  $-D_6 E_k A$  тағйир меёбад. Ин гуна вобастагии мураккаби  $D = f(E)$  - ро *ҳалқаи гистерезис* (дурусттараш *хистерезис* - аз юнонии қафо мондан, таъхир кардан) меноманд. Аз ин вобастагӣ, ки ба ҳар як сегнетоэлектрик шакли хос дорад, бузургии дойимӣ намондани  $\varepsilon$  бармеояд ва  $\varepsilon = f(E)$  буданаш маълум мегардад.



Расми 1.46

Бояд қайд кард, ки дар температураҳои муайян сегнетоэлектрикҳо қимати зиёди  $\varepsilon$ -ро нигоҳ медоранду дар температураи ба ҳар як сегнетоэлектрик хос, *ки нуқтаи Кюри* ном дорад, сегнетоэлектрик ба диэлектрики муқаррарӣ табдил меёбад. Чунончӣ, намаки сегнетӣ ҳосиятҳои аҷибӣ худро дар температураҳои аз  $-20$  то  $+25$  °C, титанати барий бошад, дар интервалҳои аз температураҳои хеле паст то  $+125$  °C нигоҳ медорад.

Ҳангоми истифодаи сегнетоэлектрикҳо дар амал (онҳо хусусан барои тайёр кардани конденсаторҳои ғунҷоиши электриашон хеле зиёд қорбаст мешаванд) бояд ба эътибор гирифт, ки агар баъзе аз онҳоро якбора қутбнок намуда, ба ҳоли худ гузорем, заряднокиашон муддати тӯлонӣ, ҳатто солҳо боқӣ мемонад. Ин гуна диэлектрикҳо *электретҳо* ном гирифтаанд ва онҳо шабеҳи магнитҳои дойимианд. Усули ҳосил кардани электретҳоро олими японӣ Эгути с. 1922 пешниҳод намуда буд. Омехтаи мум ва катрон (зифт)-ро гудохта, онро дар майдони электрӣ то пурра саҳт шудан нигоҳ медоранд. Дар ин ҳол моменти диполи ангефондашуда гӯё «ях» мекунад ва



диэлектрик ба электрет табдил меёбад. Маҳз ҳамин гуна диэлектрикҳо дар ҳақиқат кутбнок мешаванд ва ин ҳолати онҳо солҳо боқӣ мемонад. Агар электрет аз таъсироти ҳаво эмин нигоҳ дошта нашавад, чанд вақт нагузашта, он аз ҳаво ионҳоро ба худ ҷазб менамояд ва қабати кимиёвӣ ба вучуд меояду кутбҳоро панаҳ мекунад. Албатта гудохтани электретҳо боиси гум шудани кутбнокии онҳо мегардад.

Дар хотима хотиррасон кардани ҳодисаи дигари боиси тавачҷӯх ба диэлектрикҳоро раво медонем. Чанде аз диэлектрикҳо, ба мисли квартс, турмалин, намаки сегнетӣ, титанати барий на танҳо бо таъсироти майдони электрӣ, балки хангоми деформатсия (ёзидан ё фишурдан)-и онҳо низ кутбнок мешаванд. Ин ҳодиса *эффeкти пийезоэлектрӣ* (аз юнонии *piezo* – фишор меоварам) ном гирифтааст. Ҳодисаи пийезоэлектриро бародарон Пийер ва Жак Кюриҳо с. 1880 кашф карда буданд.

Хангоми деформатсияи баъзе кристаллҳо майли гурӯҳҳои молекулаҳо рӯй медиҳад, ки дар натиҷа ионҳои мусбати панҷараи фазовӣ ба як сӯй, ионҳои манфӣ суйи дигар мекӯчанду боиси вайроншавии симметрияи кристалл мегарданд. Дар натиҷа кутбнокшавии диэлектрик рӯй медиҳад.

Ҳодисаи баръакси пийезоэлектрӣ низ мушоҳида мешавад: дар ҳоли пийезоэлектрикро дар майдони берунаи электрӣ ҷойгир намудан деформатсияи он рӯй медиҳад, яъне пийезоэлектрик фишурда ё ёзиш мехӯрад.

Ҳам эффeкти пийезоэлектрӣ ва ҳам ҳодисаи баръакси он дар техника татбиқи васеъ ёфтаанд. Масалан, ҳодисаи аввал барои чен кардани фишорҳои зудтағйирёбанда (манометрҳои пийезоэлектрӣ), дигаре барои ангезонидани лаппишҳои ултрасадоӣ, ки дар соҳаҳои гуногуни техника, хусусан тиб, ҳарбӣ, инчунин барои устувор нигоҳ доштани лаппишҳои баландбасомади электрӣ истифода мешаванд, зеро устувории лаппишҳои хусусии механикии масалан пийезоквартс хеле баланд аст.

### §1.14. Ғунҷоиши электрӣ

Маълум аст, ки агар ба зарфҳои шакл ва андозаҳои гуногун (расми 1.47) микдорҳои баробари моеъ, масалан об андозем, савияҳои моеъҳо ( $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ) фарқ мекунанд. Монанди ҳамин, дар мавриди ба ноқилҳои гуногун интиқол додани ҳамон як микдори заряд, тавре ки таҷрибаҳо нишон медиҳанд, потенциалҳои ноқилҳо нобаробар мешаванд. Ин хусусияти электрии ноқилҳо бо бузургии маҳсуси ба истилоҳ *ғунҷоиши электрӣ* ё *электроғунҷоиш* тавсиф меёбад.

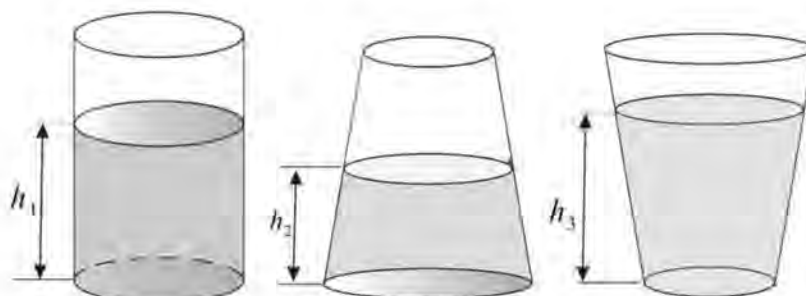
Барои ҳар як ноқили танҳо (аз ҷисмҳои дигар хеле дур воқеъгардида) бузургии потенциали он ба микдори заряди интиқолёфта мутаносибан тағйирот мепазирад. Коэффитсиенти мутаносибии байни заряди ноқил ва потенциали он бо ҳарфи  $C$  ишорат карда мешавад ва *ғунҷоиши электрии ноқил* ном гирифтааст:

$$\varphi = \frac{1}{C} q. \quad (1.65)$$

Агар ноқил дар ибтидо то ба потенциали  $\varphi_1$  заряднок бошад, ҳангоми ба он заряди иловагӣ додан потенциалаш то  $\varphi_2$  тағйир меёбад, дар ин маврид

$$\Delta\varphi = \frac{1}{C} \Delta q \quad (1.66)$$

мешавад.



Расми 1.47

Ҳамин тариқ, ғунҷоиши электрии ноқили танҳо бо формулаҳои:

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad (1.67)$$

ё

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta \varphi} \quad (1.68)$$

муайян карда шуданаш мумкин аст. Яъне, ғунҷоиши электрии ноқил ададан ба миқдори заряде баробар мебошад, ки потенциали ноқилро ба 1 В тағйир медиҳад.

Ёдовар шудан бамаврид аст, ки ҳарчанд ғунҷоиши ноқил бо нисбати зарядаш бар тағйироти потенциали он муайян карда мешавад, ғунҷоиш ба миқдори заряд ва потенциали ин ноқил вобаста нест. Ғунҷоиши ноқил ба шаклу андозаҳои ин ноқил, инчунин ба хосиятҳои электрии муҳити атрофи ноқил вобаста аст, зеро бо таъсири майдони ноқили заряднок дар муҳити атроф бо сабаби индуксияи электростатикӣ зарядҳо анgezонида мешаванд, ки ба тағйироти потенциали он ноқил оварда метавонад. Дарвоқеъ, потенциали ноқили сферашакли радиусаш  $R$  мувофиқи формулаи (1.52) бо дарназардошти нуфузпазирии муҳити атрофи он:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon R} \quad (1.69)$$

аст, аз ин рӯ ғунҷоиши электрии ин ноқили сферашакл бо формулаи:

$$C = \frac{q}{\varphi} = 4\pi\epsilon_0 \epsilon R \quad (1.70)$$

муайян карда мешавад. Яъне ғунҷоиши электрии ноқили сферашакл танҳо бо радиуси он ва бузургии нуфузпазирии нисбии диэлектрикии муҳити атрофи он вобаста мебошад.

Воҳиди ғунҷоиши электрӣ мувофиқи формулаи (1.67) ё (1.68) муқаррар карда мешавад ва он дар СИ 1 *фарад* (мухтасар 1  $\Phi$  ба шарафи М. Фарадей ном гирифтааст:

$$1 \Phi = 1 \text{ Кл/В},$$

яъне, 1  $\Phi$ -гунчоиши ноқилест, ки агар ба он заряди 1 Кл-ро интиқол диҳем, потенциалаш ба 1 В тағйир меёбад.

Акнун ба эътибор мегирем, ки  $4\pi\epsilon_0 = \frac{1}{9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2}$  (ё  $\Phi/\text{м}$ ) асту

дар мавриди  $\epsilon = 1$  будан (ноқил дар вакуум, амалан дар ҳаво воқеъ гардидааст), мувофиқи (1.70)  $C=1 \Phi$  ба ноқили сферашакли радиусаш

$$R = \frac{1\Phi}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м} = 9 \cdot 10^6 \text{ км}$$

рост меояд. Яъне, 1  $\Phi$  гунчоиши хеле бузург аст, аз ин рӯ дар амалия ҳиссаҳоҳидҳои зерини гунчоиши электрӣ истифода мешаванд:

$$\begin{aligned} 1 \text{ пикофарад (1 п}\Phi) &= 10^{-12} \Phi; \\ 1 \text{ нанофарад (1 н}\Phi) &= 10^{-9} \Phi; \\ 1 \text{ микрофарад (1 мк}\Phi) &= 10^{-6} \Phi. \end{aligned}$$

Ба донишҷӯёни шавқманд, тавсия дода мешавад, ки гунчоиши электрии кураи ба Замин баробарро муайян созанд ва анқариб ба 711 мк $\Phi$  будани он боварӣ ҳосил намоянд.

### §1.15. Конденсаторҳо

Дар электро- ва радиотехника, хусусан техникаи лазерӣ гунқардани миқдори зиёди заряд лозим меояд. Барои ин мақсад истифодаи гунчоиши ноқилҳои танҳо созгор нест. Тавре ки аз §1.14 бармеояд, барои ҳосил кардани гунчоиши 1  $\Phi$  сферае лозим аст, ки радиусаш назар ба радиуси Замин 1400 маротиба калон бошад. Аз ин рӯ системаи ду ё якчанд ноқилҳо мавриди истифода қарор меёбад.

Ду ноқили аз ҳам бо қабати тунуки диэлектрик ҷудо дорои гунчоиши зиёди электрӣ буда метавонанд. Ин гуна системаи ноқилҳо *конденсатор* ном дорад (аз сухани латинии зич, ғализ қардан). Истифодаи системаи аз ду ноқил иборат чунин шарҳ меёбад. Агар ба ноқили танҳои то потенциали  $\varphi$  заряднок (масалан мусбат) ноқили дигари безарядро наздик оварем (расми 1.48), дар ноқили дуюм дар натиҷаи индуксияи электростатикӣ зарядҳо ангезонида мешаванд. Дар сатҳи ба ноқили якум наздиктар зарядҳои муқобилчинс (дар мисоли мо манфӣ) ҷамъ мешаванду майдони ноқили якумро сустан ва аз ин рӯ потенциали онро кам мекунанд, ҳарчанд дар сатҳи дуртари ноқили дуюм зарядҳои ба заряди ноқили якум ҳамчинс (дар мисоли мо мусбат) ангезонидаву потенциали ноқили якумро қадре афзун мегардонанд. Дар натиҷа потенциали ноқили якум  $\varphi' < \varphi$  мешавад ва аз ин рӯ мувофиқи формулаи (1.67) гунчоиши система хеле афзуда метавонад.



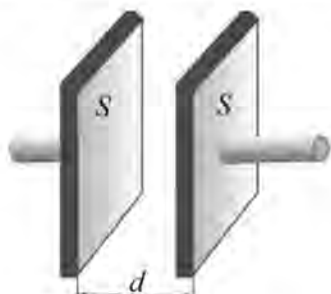
Расми 1.48

Ғунҷоиши ҳар гуна конденсатор бо нисбати заряди яке аз ноқилҳо (рӯяҳо) бар фарқи потенциалҳои байни рӯяҳо муайян карда мешавад:

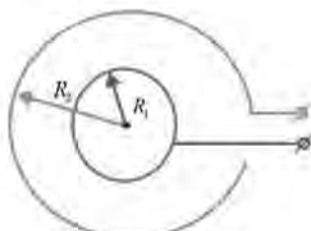
$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U} \quad (1.71)$$

Вобаста ба шакли ноқилҳо конденсаторҳои ҳамвор, сферӣ ва цилиндрӣ фарқ мекунанд.

**Конденсатори ҳамвор.** Конденсатори соддатарине, ки аз ду лавҳаи металлӣ параллелан ҷойгирбудаи масоҳати ҳар яке  $S$  ва бо қабати тунуки диэлектрик, аз ҷумла ҳавои ғафсиаш  $d$  аз ҳам ҷудо таркиб ёфтааст (расми 1.49), конденсатори ҳамвор мебошад. Бештар конденсатори ҳамворро аз ду навори нафиси металлӣ (фолга)-и бо қабати тунуки қоғазӣ рағанолаш ё парафинӣ ҷудо ва ба шакли чоркунҷа ё ғалтакмонанд печонидаи бо ягон моддаи саҳти муҳофизатӣ, масалан сафол, пластмасса рӯйпӯш тайёр мекунанд. Саҳти пурраи ин гуна конденсатор хеле бузургу фосилаи байни рӯяҳо ба ғафсии диэлектрики қоғазӣ баробар аст.



Расми 1.49



Расми 1.50



Расми 1.51

Азбаски дар байни ду рӯяи параллелии гуногунҷинс заряднок шиддат мувофиқи формулаи (1.50) муайян карда мешавад, бо дарназардошти қабати диэлектрики байни онҳо ғунҷоиши конденсатори ҳамвор:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} \quad (1.72)$$

буданаш маълум мегардад.

Бояд қайд кард, ки дар амалия намуди махсуси конденсатори ҳамвор *конденсаторҳои электролитӣ* низ истифода мешавад. Дар ингуна конденсаторҳо масоҳати рӯяҳо чандон бузург нест, вале фосилаи байни онҳо бо ғафсии қабати кимиёвие муайян карда мешавад, ки аз 10 то 100 атом иборат буда метавонад. Аз ин рӯ  $d$  ҷунун хурд аст, ки мувофиқи (1.72) ин гуна конденсатор дорои ғунҷоиши зиёд мегардад. Дар ин маврид қабати тунуки кимиёвӣ то замоне боқӣ мемонад, ки майдони электрӣ самти муайян дошта бошад. Ҳамин аст, ки дар конденсатори электролитӣ қутбҳо хатман нишон дода мешаванд ва ҳангоми пайваст дар схемаҳои электрӣ риояи қутбҳо хатмист, вагарна конденсатор ба зудӣ аз кор мебарояд.

**Конденсатори сферавӣ** аз ду сфераи ҳаммаркази радиусҳои  $R_1$  ва  $R_2$ , ки андаруни якдигар ҷойгиранд (расми 1.50) ва аз ҳам бо



кабати диэлектрики ғафсиаш  $d=R_2-R_1$  чудобуда таркиб меёбад. Мувофиқи формулаи (1.52) потенциалҳои сфераҳои заряднок:

$$\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \epsilon R_1} |q|; \quad \varphi_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \epsilon R_2} |q|;$$

буданаширо доништа, фарқи потенциалҳояшонро муайян кардан душвор нест:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 \epsilon} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

Аз ин рӯ гуногониши конденсатори сферавӣ дар асоси (1.71) бо формулаи

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0 \epsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1} \quad (1.73)$$

муайян карда мешавад.

**Конденсатори силиндрӣ** аз ду силиндри дарунхолии ҳаммехвари радиусҳояшон  $R_1$  ва  $R_2$ , дарозияшон  $l$  - и андаруни якдигар бо кабати диэлектрики ғафсиаш  $d=R_2-R_1$  чудобуда (расми 1.51) таркиб ёфтааст. Фарқи потенциалҳои ин ду силиндри бо зичии хаттии  $\lambda = |q|/l$  заряднок мувофиқи (1.54) бо дарназардошти кабати диэлектрики байни онҳо бо формулаи:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 \epsilon} \ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{|q|}{2\pi\epsilon_0 \epsilon l} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

муайян карда мешавад. Аз ин рӯ гуногониши конденсатори силиндрӣ:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon l}{\ln(R_2/R_1)} \quad (1.74)$$

буданаш маълум мегардад.

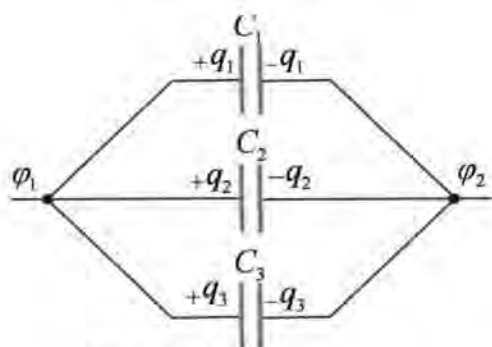
Ҳамин тариқ, аз муқоисаи формулаҳои (1.72)-(1.74) бармеояд, ки гуногониши конденсаторҳо ба шаклу андозаҳои рӯяҳо, фосилаи байни онҳо ва нуфузпазирии диэлектрики байни рӯяҳо  $\epsilon$  вобаста мебошад. Аз ин рӯ барои зиёд кардани гуногониши конденсаторҳо ҳамчун диэлектрик сегнетоэлектрикҳоро истифода мебаранд.

Хотиррасон кардан бамаврид аст, ки миқдори заряди дар конденсатор ғуншаванда на танҳо ба шаклу андозаҳои рӯяҳояш, балки вобаста ба ғафсии диэлектрики байни рӯяҳо бо шиддати рахнавии ин диэлектрик маҳдуд мегардад. Гап дар он аст, ки ҳар як диэлектрик вобаста ба  $\epsilon$  хосиятҳои худро то шиддатҳои муайяни байни рӯяҳо хифз менамояд. Дар *шиддати* ба истилоҳ *рахнавӣ* бо таъсироти майдони пурзӯри электрӣ аз баъзе молекулаҳои диэлектрик электронҳои баста канда мешаванду зарядҳои озод ба вучуд меоянд ва онҳо сабабгори аз диэлектрик гузаштани ҷараён мегарданд. Тавре ки мегӯянд, диэлектрик рахна мешаваду конденсатор қобилияти ғун кардани зарядҳоро гум менамояд. Ҳамин аст, ки дар ҳар як конденсатор дар қатори бузургии гуногонишаш то кадом шиддат заряднок кардани он сабт меёбад.

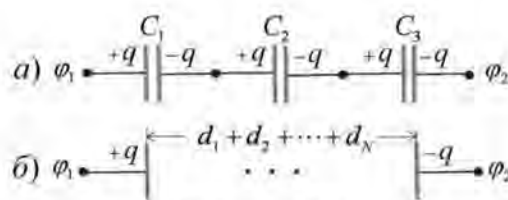
## §1.16. Пайвасти конденсаторҳо

Барои ҳосил кардани ғунҷоишҳои зарурӣ бо истифодаи конденсаторҳои мавҷудай ғунҷоиш ва шиддати кориашон маълум пайвасти онҳо дар батарея, яъне ғуруҳбандӣ сохтан татбиқ меёбад. Асосан ду усули пайвасти параллелӣ ва пай дар пайро қорбасти менамоянд. Бояд хотиррасон кард, ки дар схемаҳои электрии конденсаторро бо рамзи  $\parallel$  тасвир месозанд.

**Пайвасти параллелӣ.** Ин усулро дар мисоли пайвасти се то конденсатор намоиш медиҳем. Агар рӯяҳои чапи конденсаторҳо дар як нуқта, рӯяҳои ростии онҳо дар нуқтаи дигар васл карда шаванд, пайвасти параллелӣ ташкил меёбад (расми 1.52).



Расми 1.52



Расми 1.53

Дар ҳоли ин гуна батареяро ба манбаи шиддаташ  $U$  васл сохтан, ҳар як рӯяи ин конденсаторҳо мувофиқи ғунҷоишашон зарядҳои  $|q_1| = C_1 U$ ,  $|q_2| = C_2 U$ , ва  $|q_3| = C_3 U$  - ро ғун мекунанд. Он гоҳ заряди умумии аз манбаъ интиқолифта:

$$q_{\text{ум}} = q_1 + q_2 + q_3$$

ва аз ин рӯ

$$C_{\text{ум}} = C_1 + C_2 + C_3. \quad (1.75)$$

Яъне, ҳангоми пайвасти параллелии конденсаторҳо ғунҷоиши умумӣ:

$$C_{\text{ум}} = \sum_{i=1}^n C_i \quad (1.76)$$

мешавад. Агар  $N$ -то конденсаторҳои якандозаи ғунҷоишашон  $C_1 = C_2 = \dots = C_N = C$ -ро параллелан васл созем,

$$C_{\text{ум}} = NC \quad (1.77)$$

шуданаширо истифода бурда метавонем.

Ҳамин тариқ, конденсаторҳоро параллелан пайвасти карда, ғунҷоиши натиҷавии зиёдтарро дастрас гардондан имконпазир аст. Ин ҳулоса бо он шарҳ меёбад, ки дар пайвасти параллелӣ масоҳатҳои рӯяҳо чамъ мешаванд.

**Пайвасти пай дар пай.** Агар рӯяи ростии конденсатори якум бо рӯяи чапи конденсатори дуюм, рӯяи ростии конденсатори дуюм бо рӯяи чапи конденсатори сеюм ва ҳоказо васл бошанд, пайвасти пай дар пайи конденсаторҳо ҳосил мешавад (расми 1.53 а). Дар ҳоли ба рӯяи чапи конденсатори якум интиқол додани заряди  $+q$  дар рӯяи ростии он

ба тӯфайли индуксияи электростатикӣ заряди  $-q$ , аз ин рӯ дар рӯи рости конденсатори дуум заряди  $+q$  (то манбайи шиддат васл сохтан онҳо безаряд буданд) ва ҳоказо, дар рӯи рости конденсатори сеюм заряди  $-q$  ангезонида мешавад. Ҳамин тариқ, ҳангоми пайвасти пай дар пай миқдори зарядҳои ҳама рӯяҳои конденсаторҳои батарея модулан баробаранд. Шиддати ингуна батареяи конденсаторҳоро (ғунҷоиши ҳар як конденсатор гуногун доништа мешавад) чунин пешниҳод кардан мумкин аст:

$$U_{\text{ум}} = \varphi_1 - \varphi_2 = (\varphi_1 - \varphi'_1) + (\varphi'_1 - \varphi'_2) + (\varphi'_2 - \varphi_2) = U_1 + U_2 + U_3 \quad (1.78)$$

Яъне, ҳангоми пайвасти пай дар пайи конденсаторҳо шиддати батарея ба ҳосили ҷамъи шиддатҳои ҳар як конденсатор баробар аст. Аз ин рӯ баробарии зеринро сабт кардан раво аст:

$$\frac{q_{\text{ум}}}{C_{\text{ум}}} = \frac{|q_1|}{C_1} + \frac{|q_2|}{C_2} + \frac{|q_3|}{C_3}$$

ё ки

$$\frac{1}{C_{\text{ум}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (1.79)$$

Пас, дар мавриди  $N$ -то конденсаторҳоро бо ин усул пайваст намудан:

$$\frac{1}{C_{\text{ум}}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i} \quad (1.80)$$

мешавад. Аз ин рӯ, агар  $N$ -то конденсаторҳои якандоза:

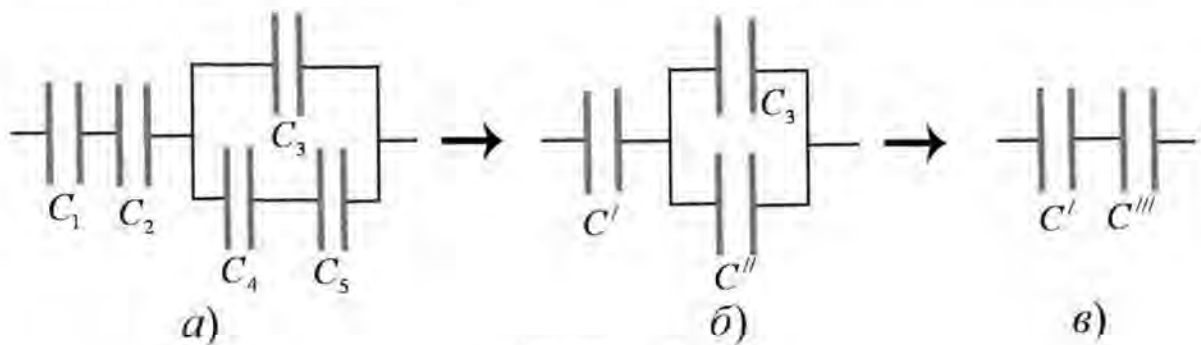
$C_1 = C_2 = \dots = C_N = C$  – ро пай дар пай васл созем:

$$C_{\text{ум}} = \frac{C}{N} \quad (1.81)$$

буданаш бармеояд.

Аз формулаҳои (1.79)-(1.81) маълум мешавад, ки ҳангоми пайвасти пай дар пайи конденсаторҳо ғунҷоиши натиҷавии ҳатто назар ба ғунҷоиши аз ҳама хурдтарини конденсатори батарея камтарро ҳосил кардан мумкин аст. Ин ҳулоса бо он шарҳ меёбад, ки пайвасти пай дар пайи конденсаторҳо ба аз ҳам дур андохтани рӯяҳои ҳамон як конденсатор мувофиқ меояд (расми 1.53 б).

Дар занҷирҳои мураккаби электрӣ пайвасти омехтаи конденсаторҳо низ дучор меояд, ки онро ба усулҳои пай дар пай параллелӣ овардан мумкин аст. Дар расми 1.54 а намунаи чунин пайваст тасвир ёфтааст.



Расми 1.54

Бигузур  $C_1 = C_2 = \dots = C_5 = C = 6 \text{ мкФ}$  бошад, он гоҳ онро аввало бо схемаи 1.54 б, ки дар он  $\frac{1}{C'} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ ;  $\frac{1}{C''} = \frac{1}{C_4} + \frac{1}{C_5}$  ва аз ин рӯ

$C' = C'' = \frac{C}{2} = 3 \text{ мкФ}$  мешавад, иваз карда метавонем. Дар натиҷа схемаи 1.54, в ҳосил мешавад, ки дар он  $C''' = C_3 + C'' = 6 + 3 = 9 \text{ мкФ}$  аст.

Ҳамин тариқ, мувофиқи расми 1.54 в:

$$\frac{1}{C_{\text{ум}}} = \frac{1}{C'} + \frac{1}{C''}$$

ё ки

$$C_{\text{ум}} = \frac{C' \cdot C''}{C' + C''} = \frac{3 \cdot 9}{3 + 9} = \frac{3 \cdot 9}{12} = \frac{9}{4} = 2,25 \text{ мкФ}$$

буданаш маълум мегардад.

**Мисоли 1.14.** Конденсаторҳои ғунҷоишашон  $C_1 = 3 \text{ мкФ}$  ва  $C_2 = 6 \text{ мкФ}$  - ро, ки параллелан пайвастанд, пай дар пай васл созем, ғунҷоиши натиҷавӣ чанд маротиба тағйир меёбад?

*Маълумот.*

$$\left. \begin{array}{l} C_1 = 3 \text{ мкФ} \\ C_2 = 6 \text{ мкФ} \\ C_{\text{най}} / C_{\text{пар}} = ? \end{array} \right\}$$

*Ҳал*

Ҳангоми параллелан пайвастан будани конденсаторҳои мазкур:

$$\begin{aligned} C_{\text{пар}} &= C_1 + C_2 = 3 \text{ мкФ} + 6 \text{ мкФ} \\ &= 9 \text{ мкФ} \end{aligned}$$

буда, дар мавриди пай дар пай васл кардани онҳо:

$$C_{\text{най}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{3 \text{ мкФ} \cdot 6 \text{ мкФ}}{3 \text{ мкФ} + 6 \text{ мкФ}} = 2 \text{ мкФ}$$

ва аз ин рӯ:

$$\frac{C_{\text{най}}}{C_{\text{пар}}} = \frac{2}{9},$$

яъне дар натиҷа ғунҷоиш 4,5 маротиба кам мешавад.

*Ҷавоб.*  $\frac{C_{\text{най}}}{C_{\text{пар}}} = \frac{2}{9}$ .

**Мисоли 1.15.** Фазои байни рӯяхои конденсатори ҳавоии ҳамвор, ки масоҳати ҳар яке  $S$ , фосилаи байнашон  $d$  мебошад, қисман ба диэлектрики нуфузпазирии нисбиаш  $\varepsilon$  пур карда мешавад. Пас аз он ғунҷоиши ингуна конденсатор чӣ гуна тағйир меёбад? Ду мавриди алоҳида: а) диэлектрик то нисфи рӯяхоро пур мекунад; б) диэлектрик то нисфи ҳаҷми фазоро дарбар мегирад, муҳокима карда шавад.



Маълумот.

$$\left. \begin{array}{l} S, d, \varepsilon \\ C \\ C_0 - ? \end{array} \right\}$$

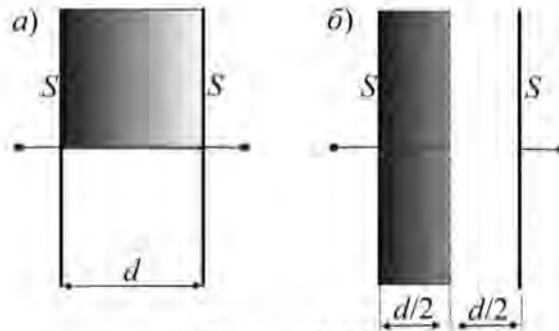
Ҳал

Дар мавриди аввал (расми 1.55, а) конденсаторро чун ду конденсатори параллелан пайвасти ғунҷоишашон:

$$C = C_1 + C_2,$$

ки ғунҷоиши ҳар яке:

$$C_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S/2}{d} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{2d}; \quad C_2 = \frac{\varepsilon_0 S/2}{d} = \frac{\varepsilon_0 S}{2d},$$



Расми 1.55

қабул кардан мумкин аст, аз ин рӯ

$$C = C_1 + C_2 = \frac{(\varepsilon + 1)\varepsilon_0 S}{2d} = \frac{\varepsilon + 1}{2} C_0$$

мебошад (дар ин ҷо  $C_0 = \varepsilon_0 S/d$  - ғунҷоиши ибтидоии конденсатори ҳамвори ҳавоист). Яъне, ғунҷоиши натиҷавӣ  $\frac{\varepsilon + 1}{2}$  маротиба меафзояд.

Дар мавриди дуюм (расми 1.55, б) конденсаторро чун ду конденсатори пай дар пай васли ғунҷоиши ҳар яке:

$$C'_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d/2} = \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}; \quad C'_2 = \frac{\varepsilon_0 S}{d/2} = \frac{2\varepsilon_0 S}{d},$$

қабул кардан рост меояд. Аз ин рӯ:

$$C' = \frac{C'_1 C'_2}{C'_1 + C'_2} = \frac{4\varepsilon_0^2 \varepsilon S^2}{d^2} \cdot \frac{d}{2\varepsilon_0 S(\varepsilon + 1)} = \frac{2\varepsilon}{\varepsilon + 1} \cdot \frac{\varepsilon_0 S}{d} = \frac{2\varepsilon}{\varepsilon + 1} C_0$$

буданаш маълум мегардад. Яъне, ғунҷоиши натиҷавӣ  $\frac{2\varepsilon}{\varepsilon + 1}$  маротиба назар ба ғунҷоиши ибтидоӣ меафзояд.

Ҷавоб. а)  $\frac{C}{C_0} = \frac{\varepsilon + 1}{2}$ ; б)  $\frac{C}{C_0} = \frac{2\varepsilon}{\varepsilon + 1}$ .

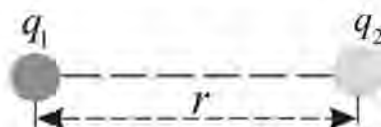
### §1.17. Энергияи майдони электростатикӣ

Мафҳуми энергия дар физика аҳамияти хосса дорад. Пеш аз ҳама, қонуни бақои энергия ҳама вақт амал мекунад. Сониян, омӯхтани ҳодисаҳои электрӣ аз диди энергетикӣ ҳаллу фасли бисёр масъалаҳои ин соҳаро содда мегардонад. Аз ин рӯ баъзе мавридҳои

бо энергияи электрӣ алоқамандро баррасӣ намудан аз фойида холи нест.

**Энергияи системаи зарядҳои нуқтавӣ.** Тавре ки дар §1.8 зикр ёфт, ҳисми зарядҳои дар майдони электрӣ воқеъгардида дорои энергия мебошад. Ҳар як заряди система бо сабаби он, ки дар майдони зарядҳои боқимондаи ин система ҷойгир аст, бояд бо миқдори энергияе тавсиф дода шавад.

Мавриди системаи аз ду заряди нуқтавии  $q_1$  ва  $q_2$  таркибёфта ро муҳокима менамоем (расми 1.56).



Расми 1.56

Заряди  $q_1$  дар майдони заряди  $q_2$  воқеъ гардидааст, аз ин рӯ он мувофиқи (1.38) дорои энергияи потенциалии:

$$W_1 = q_1\varphi_1 \quad (1.82)$$

мебошад, ки дар ин ҷо:

$$\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{\epsilon r} \quad (1.83)$$

потенциали майдони заряди  $q_2$  дар нуқтае, ки заряди  $q_1$  воқеъ гардидааст. Аз ин рӯ:

$$W_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{\epsilon r} \quad (1.84)$$

мебошад. Айнан ҳамин тавр, дар навбати худ заряди  $q_2$  дар майдони заряди  $q_1$  ҷойгир аст, дорои энергияи потенциалии:

$$W_2 = q_2\varphi_2 \quad (1.85)$$

ва мисли (1.83):

$$\varphi_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{\epsilon r}, \quad (1.86)$$

инчунин:

$$W_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{\epsilon r} = W_1$$

буданаш тасдиқ мешавад.

Бояд хотиррасон кард, ки:

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{\epsilon r} \quad (1.87)$$

чун энергияи потенциалии ҳамтаъсиротии системаи ду заряди нуқтавии  $q_1$  ва  $q_2$  доништа мешавад. Дар асоси (1.82) ва (1.85) энергияи системаро чун:

$$W = \frac{1}{2}(q_1\varphi_1 + q_2\varphi_2) \quad (1.88)$$

пешниход кардан маъмул гаштааст. Хамин гуна мулохизарониро барои системаи аз  $N$ -то заряди нуқтавӣ таркибёфта раво дидан табиист, аз ин рӯ системаи мазкур дорои энергияи

$$W = \frac{1}{2}(q_1\varphi_1 + q_2\varphi_2 + \dots + q_N\varphi_N) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^N q_i\varphi_i \quad (1.89)$$

(дар ин ҷо  $\varphi_i$  потенциали майдони зарядҳои боқимонда дар нуқтаи заряди  $q_i$  воқеъгардида) мебошад.

**Энергияи ноқили заряднок.** Заряднокшавии ноқилро чун раванди мунтазам афзудани миқдори электри он баррасӣ намудан раво аст. Вале баробари афзудани миқдори электри ноқил мувофиқан потенциали он низ баланд мешаваду барои минбаъд ба ин ноқил интиқол додани заряди иловагӣ ҳамон аломат зидди қувваҳои ҳамтаъсирот ҳарчӣ қори зиёдтарро иҷро кардан лозим меояд. Барои ба қадри  $d\varphi$  афзудани потенциали ноқил қори элементарии  $\delta A = qd\varphi$ -ро бояд иҷро кард. Бо дарназардошти  $q = C\varphi$  ба қадри аз 0 то  $\varphi$  афзудани потенциали ноқил қор бо формулаи:

$$A = \int_0^{\varphi} C\varphi d\varphi = \frac{1}{2}C\varphi^2 = \frac{1}{2}q\varphi = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}$$

ба ҳисоб гирифта мешавад. Ин қор, тавре ки маълум аст, боиси тағйироти энергия мегардад. Ба туфайли дар ибтидо безаряд будани ноқил барои энергияи ноқили заряднок ифодаи зеринро пешниход қарда метавонем:

$$W = \frac{1}{2}q\varphi = \frac{1}{2}C\varphi^2 = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}. \quad (1.90)$$

Бояд қайд кард, ки сатҳи ҳар гуна ноқили заряднок эквипотенциалӣ мебошад, аз ин рӯ миқдори электри ноқилро чун системаи зарядҳои нуқтавӣ:

$$q = \Delta q_1 + \Delta q_2 + \dots + \Delta q_N = \sum_{i=1}^N \Delta q_i$$

дониста, мувофиқи формулаи (1.89) энергияи онро ба ҳисоб гирифтани мумкин аст:

$$W = \frac{1}{2}(\Delta q_1\varphi + \Delta q_2\varphi + \dots + \Delta q_N\varphi) = \frac{1}{2}\varphi\sum_{i=1}^N \Delta q_i = \frac{1}{2}q\varphi,$$

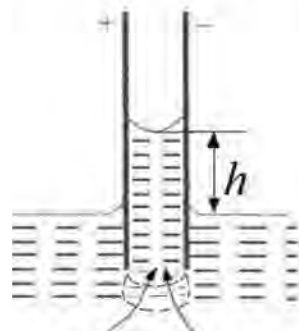
ки бо натиҷаи ҳисоби қор мувофиқи (1.90) рост меояд.

**Энергияи конденсатори заряднок.** Ҳама мулохизаҳои оид ба энергияи ноқили заряднок рондаамонро ба конденсатори заряднок низ раво дониста метавонем. Зеро раванди заряднокшавии конденсаторро чун қори қўшондани заряд аз як рӯя то рӯяи дигар ҳисоб кардан мумкин аст. Барои муқаррар кардани энергияи конденсатор дар формулаи (1.90) иваз намудани потенциал ба шиддати байни рӯяҳо қофист:

$$W = \frac{1}{2}qU = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}. \quad (1.91)$$

Ба ин муносибат бо ҳодисае шинос мешавем, ки бо энергияи конденсатори заряднок алоқаманд аст. Агар рӯяҳои конденсатори

хамвори ҳавоии то  $+q$  ва  $-q$  заряднокро қадре ба диэлектрики моеъ гӯтонем (расми 1.57), як қисми фазои байни рӯяхоро моеъ ишғол менамояд, он яъне назар ба сатҳи диэлектрики моеъ то ба баландии  $h$  болотар мебарояд.



Расми 57

Агар ҳиссаи бо моеъ ишғолкардаи сатҳи рӯяхо  $x$  бошад, масоҳати ин қисм  $xS$  ва масоҳати қисми боқимондаи ҳавоӣ  $(1-x)S$  мешавад. Ин гуна системаро чун ду конденсатори параллелан пайваस्तбудаи гунҷоши умумиашон:

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\varepsilon_0(1-x)S}{d} + \frac{\varepsilon\varepsilon_0Sx}{d} = \frac{\varepsilon_0S}{d} + \frac{(\varepsilon-1)x\varepsilon_0S}{d} = C_0 + (\varepsilon-1)xC_0 > C_0$$

ҳисоб кардан равог. Энергияи ин система  $W = \frac{q^2}{2C}$  назар ба энергияи

конденсатори ҳавоӣ  $W_0 = \frac{q^2}{2C_0}$  кам ва аз ин рӯ қисман бо диэлектрики

моеъи нуфузпазириаш  $\varepsilon > 1$  пур шудани фазои байни рӯяхо аз ҷиҳати энергетикӣ мусоидтар мебошад. Пас, диэлектрик ба конденсатор ҷаббидаву савияи он ба қадри  $h$  болотар мебарояд. Ин боиси афзудани энергияи потенциалии диэлектрик дар майдони ҷозиба мегардад. Дар натиҷа савияи диэлектрик дар баландии  $h$  барқарор мешавад, ки ба минимуми энергияи умумӣ (дар майдонҳои электрию ҷозиба) мувофиқ меояд. Ин ҳодиса чунин шарҳ меёбад: молекулаҳои диэлектрик дорои моменти диполианд ё ин момент тавлид меёбад. Дар натиҷа бо сабаби дар қанорҳои рӯяхо майдони электрӣ ғайриҷинса буданаш диэлектрики поляризатсиягардида ба соҳаҳои зӯртари майдон, яъне андаруни фазои байни рӯяхо (ба мисли коғазпораҳо ба шонаи заряднок) ҷазб карда мешавад. Ба диэлектрик ҳамзамон қувваҳои электрию вазнинӣ таъсир мекунанд ва он ба қадре боло мебарояд, ки ин ду қувва ба мувозанат оянд.

**Энергияи майдони электростатикӣ.** Савол меояд, ки оё энергияи барои ноқил ва конденсатори заряднок муқарраршуда ба зарядҳо ё майдони дар атрофи ин зарядҳо мавҷуда мансуб аст? Барои ба ин савол ҷавоб дарёфтани дар ифодаи (1.91) ба ҷойи ғуҷоиши конденсатор формулаи (1.72)-ро баргузор менамоем:

$$W = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} U^2 = \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2 Sd = \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2 V. \quad (1.92)$$

Дар ин ҷо ба эътибор гирифта шуд, ки  $U = Ed$  ва  $Sd = V$ -ҳаҷми диэлектрики фазои байни рӯяхоро ишғолкарда аст.



Агар мафҳуми *зичии ҳаҷмии* энергияро мувофиқи формулаи:

$$w = W / V \quad (1.93)$$

ворид созем, он гоҳ аз (1.92) бармеоҷад, ки

$$w_E = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 \quad (1.94)$$

мебошад. Яъне, зичии ҳаҷмии энергияи майдони электрӣ бо бузургии тавсифдиҳандаи қуввагии майдон - шадидият муайян карда мешавад. Аз ин рӯ табиист, ки зичии ҳаҷмии энергия (1.94) ба майдони электрӣ тааллуқ доштанаширо тасдиқ намоем.

**Мисоли 1.16** Конденсатори ғунҷоишаш  $C_1 = 2 \text{ мкФ}$ - ро, ки аз манбайи шиддаташ  $U = 12 \text{ В}$  заряднок шудааст, аз манбаъ чудо карда, ба конденсатори безаряди ғунҷоишаш  $C_2 = 3 \text{ мкФ}$  параллелан васл сохтанд. Шиддати конденсаторҳо пас аз васлсозӣ муайян карда шавад. Дар ин ҳангом чӣ қадар энергия хориҷ мегардад?

*Маълумот.*

$$C_1 = 2 \text{ мкФ} = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$C_2 = 3 \text{ мкФ} = 3,0 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$U_1 = 12 \text{ В}$$

$$U_2 = ? \quad \Delta W = ?$$

*Ҳал*

Ҳангоми параллелан пайвастанӣ конденсаторҳо (баъди аз манбаъ чудо кардан) конденсатори яқум як микдор зарядашро ба конденсатори дуюм интиқол медиҳад ва ин раванд то баробар шудани шиддати ҳарду конденсатор идома меёбад.

Мувофиқи қонуни бақои заряд баробарии:

$$q_1 = q'_1 + q_2$$

ҷой дорад, ки дар ин ҷо  $q_1 = C_1 U_1$  - заряди ғунҷардаи конденсатори яқум то васлсозӣ,  $q'_1 = C_1 U_2$  ва  $q_2 = C_2 U_2$  - зарядҳои конденсаторҳо баъди васлсозӣ мебошанд.

Аз ин рӯ:

$$C_1 U_1 = C_1 U_2 + C_2 U_2 = (C_1 + C_2) U_2$$

шуданаширо доништа, шиддати матлуб  $U_2$ -ро муайян карда метавонем:

$$U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_1 = \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}}{5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}} \cdot 12 \text{ В} = 4,8 \text{ В}.$$

Тағйироти энергия, яъне микдори гармие, ки ҳангоми васлсозӣ хориҷ мегардад, ба фарқи энергияҳо то ва баъди васлсозӣ баробар буданаш мувофиқи қонуни бақои энергия бармеоҷад:

$$\begin{aligned} \Delta W = W_2 - W_1 &= \frac{1}{2} (C_1 + C_2) U_2^2 - \frac{1}{2} C_1 U_1^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \cdot (4,8 \text{ В})^2 - \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \cdot 12 \text{ В} = \\ &= (57,6 - 144) \cdot 10^{-6} \text{ Ҷ} = -86,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ҷ} = -86,4 \text{ мкҶ}. \end{aligned}$$

Яъне, баъди пайвастанӣ конденсаторҳо энергия ба қадри 86,4 мкҶ кам мешавад, ки бо паридани шарораву хориҷ гардидани микдори гармии  $Q = |\Delta W|$  шарҳ меёбад.

Ҷавоб:  $U_2 = 4,8 \text{ В}$ ;  $\Delta W = -86,4 \text{ мкҶ}$ .

### Машқи 1

1.1. Масса ва заряди кулли электронҳои тамоми молекулаҳои 1 л об чӣ қадаранд?

( $\approx 0,3 \text{ г}$ ;  $53 \text{ МКл}$ )

1.2. Ду курачаи айнан якхела, ки яке дорои заряди  $q_1 = 6 \text{ нКл}$  ва дигаре  $q_2 = -38 \text{ нКл}$  мебошанд, ба ҳам расонда ба масофае дур карданд. Баъд аз ин ҳар яке аз курачаҳо дорои чандто электрони зиёдати гаштанд?

( $N_1 = N_2 = 10^{11}$ )

1.3. Курачаҳои айнан якхелаи дорои зарядҳои  $q_1 = 2q$  ва  $q_2 = 8q$  - ро, ки дар масофае ҷойгир буданд, ба ҳам расонида боз ба ҳамон масофа дур карданд. Бузургии қувваҳои ҳамтаъсирот баъди ин амал чанд маротиба тағйир ёфт?

( $\approx 1,6$  маротиба меафзояд)

1.4. Ду курачаи хеле хурди айнан якхелаи массаашон  $m_1 = m_2 = m = 25 \text{ мг}$  дар нуғи ресмонҳои дарозиҳояшон баробари  $l_1 = l_2 = l = 30 \text{ см}$  овезонанд. Курачаҳоро қадре заряднок карданд, ки дар натиҷа ресмонҳо аз хати амудӣ ба кунҷи  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha = 45^\circ$  дур шуданд. Зарядҳои курачаҳо чӣ қадарӣ будаанд?

( $q_1 = q_2 = q = 7 \text{ нКл}$ )

1.5. Ду курачаи зарядноки айнан якхеларо дар нуғи ресмонҳои дарозиашон баробар овезон карда ба карасин ( $\varepsilon = 2$ ) ғўтонданд. Кунҷи каноршавии ресмонҳо ба туфайли теладиҳии кулонӣ дар ҳаво ва дар карасин бетағйир монд. Аз ин маълумот зичии моддаи курачаҳо муайян кард шавад.

( $D_0 = 1,6 \text{ г/см}^3$ )

1.6. Заряди нуктавии  $q = 5 \text{ нКл}$  аз ду заряди  $q_1 = q_2 = 20 \text{ нКл}$  дар фосилаҳои  $r_1 = 3 \text{ см}$  ва  $r_2 = 4 \text{ см}$  ҷойгир аст. Қувваи натиҷавие, ки ба заряди  $q$  таъсир менамояд, чӣ қадар мебошад?

( $\approx 1,5 \text{ мН}$ )

1.7. Шадидияти майдони зарядҳои нуктавии  $q_1 = -10 \text{ нКл}$  ва  $q_2 = 40 \text{ нКл}$ , ки фосилаи байнашон  $r = 8 \text{ см}$  аст, дар нуктаи аз заряди якум дар масофаи  $r_1 = 3 \text{ см}$  ва аз заряди дуюм дар масофаи  $r_2 = 6 \text{ см}$  воқеъгардида муайян карда шавад.

( $175 \text{ кВ/м}$ )

1.8. Шадидияти майдони диполи электрии моменташ  $p = 1,5 \text{ нКл} \cdot \text{м}$  дар нуктае ёфта шавад, ки аз миёнҷойи дипол дар масофаи  $r = 10 \text{ см}$  воқеъ гардида, радиус-вектораш бо меҳвари дипол кунҷи  $\alpha = 60^\circ$  ташкил медиҳад.

( $132 \text{ кВ/м}$ ).

1.9. Курачаи пӯлодини радиусааш  $r=1$  мм (зичиаш  $D_r=7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) ба глитсерин ( $D_r=1,26 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) ғўтонда шудааст. Агар курача дар майдони якчинсаи электрии шадидияташ  $E=500$  кВ/м, ки амудан ба боло равона мебошад, муаллақ монад, микдори заряди курача чӣ қадар будааст?

( $\approx 0,5$  нКл)

1.10. Шадидияти майдони электростатикиро дар нуктае ёбед, ки дар хати ростии зарядҳои  $q_1=10$  нКл ва  $q_2=-40$  нКл васлсозанда дар фосилаи  $r_1=3$  см аз заряди манфӣ воқеъ гардидааст. Масофаи байни зарядҳо  $l=12$  см мебошад.

( $E=200$  кВ/м)

1.11. Майдони электростатикиро ду ҳамвории параллелии беохирӣ мунтазам бо зичии сатҳии  $\sigma_1=5$  нКл/м<sup>2</sup> ва  $\sigma_2=3$  нКл/м<sup>2</sup> заряднокбуда ба вучуд овардаанд. Шадидияти майдонро: а) дар байни ҳамворихо ва б) дар беруни ҳамворихо муайян намоед.

( $E_a=113$  В/м;  $E_b=282,5$  В/м)

1.12. Кураи шишагини радиусааш  $R=10$  см ( $\epsilon=7$ ) бо зичии ҳаҷмии  $\rho=10$  нКл/м<sup>3</sup> заряднок карда шудааст. Шадидияти майдони электростатикӣ кура: 1) дар фосилаи  $r_1=5$  см аз маркази кура; 2) дар сатҳи кура; 3) дар масофаи  $r_2=15$  см аз маркази кура ёфта шавад.

( $E_1=2,7$  В/м;  $E_2=5,38$  В/м;  $E_3=16,74$  В/м)

1.13. Майдони электростатикиро силиндри борики дарози бо зичии хатии  $\lambda=10$  нКл/см заряднок ба вучуд овардааст. Протон ( $q=|e|$ ) аз цилиндр дар масофаи аз  $r_1=2$  см то  $r_2=5$  см дур мешавад. Қори майдонро муайян намоед.

( $16,5$  кэВ)

1.14. Майдони электрӣ дар атрофи силиндри беохирӣ радиусааш  $r=1$  см, ки бо зичии хатии  $\lambda=10$  нКл/см заряднок мебошад, ба вучуд оварда шудааст. Фарқи потенсиалҳо дар нуктаҳои аз сатҳи цилиндр дар масофаҳои  $r_1=2$  см ва  $r_2=5$  см ҷойгирбудаи майдон ёфта шавад.

( $25$  кВ)

1.15. Дар майдони якчинсаи электростатикӣ шадидияташ  $E_0=500$  кВ/м лавҳаи ҳамвори беохирӣ параллелии мармарин ( $\epsilon=10$ ) амудан ба хатҳои шадидият ҷойгир карда шудааст: 1) шадидияти майдон андаруни лавҳа; 2) модули вектори поляризация; 3) зичии сатҳии зарядҳои алоқамандро муайян намоед.

(1)  $E=50$  кВ/м; 2)  $P=43,8$  мкКл/м<sup>2</sup>; 3)  $\sigma' = 43,8$  мкКл/м<sup>2</sup>)

1.16. Электрони сураъаташ  $v_0=1,8 \cdot 10^6$  м/с ба майдони якчинсаи электрӣ ба самти вектори шадидият муқобилан зада мебарояд. Электрон чӣ қадар фарқи потенсиалҳо  $U$  - ро гузашта, дорои энергияи  $W_f=13,6$  эВ мегардад (оё электрон бо ин қадар энергия ҳангоми бархӯрд бо атоми гидроген онро ионизатсия карда метавонад)?

( $U=3,87$  В)

1.17. Кураи металли радиусаш  $R=1$  см дорой заряди  $q=10$  нКл мебошад. Потенсиали майдони электростатикии кура: 1) дар сатҳи кура; 2) дар масофаи  $r=2$  см аз сатҳи кура муайян карда шавад.  
( $\varphi_1 = 9$  кВ;  $\varphi_2 = 3$  кВ)

1.18. Фазои байни рӯяхои конденсатори ҳамвор, ки то шиддати  $U = 300$  В заряднок мебошад, бо кахрабо ( $\varepsilon = 3$ ) пур карда шудааст. Фосилаи байни рӯяхо  $d=1$  см мебошад. 1) Шадиияти майдон дар кахрабо; 2) зичии сатҳии зарядҳо дар рӯяхои конденсатор; 3) зичии зарядҳои алоқамандро дар кахрабо ёбед.  
( 1)  $E=30$  кВ/м; 2)  $\sigma = 0,8$  мкКл/м<sup>2</sup>; 3)  $\sigma_{\text{пол}} \approx 0,5$  мкКл/м<sup>2</sup>)

1.19. Ду конденсатори ҳамвори ҳавоии ғунҷоишашон баробар, ки параллелан пайвастанд, то шиддати  $U_1 = 350$  В зарядноку сипас фазои яке аз онхоро бо абрак ( $\varepsilon = 6$ ) пур карданд. Шиддати ин система чӣ қадар шуд?  
( $U_2 = 100$  В)

1.20. Конденсатори ҳамвори масоҳати ҳар як рӯяаш  $S = 100$  см<sup>2</sup> то шиддати  $U = 150$  В заряднок карда шудааст. Агар фосилаи байни рӯяхо  $d = 12$  мм бо абрак ( $\varepsilon = 6$ ) пур бошад, микдори заряди дар ин конденсатор ғуншуда чӣ қадар аст?  
(6,64 нКл)

1.21. Аз конденсаторҳои ғунҷоишашон  $C_1 = 3$  мкФ;  $C_2 = 6$  мкФ ва  $C_3 = 9$  мкФ чӣ қадар ғунҷоишҳо ҳосил кардан мумкин мебошад?

(15 мкФ; 12 мкФ; 11 мкФ; 8,25 мкФ; 4,5 мкФ; 2,5 мкФ; 1,6 мкФ)

1.22. Агар конденсаторҳои ғунҷоишашон  $C_1 = 3$  мкФ; ва  $C_2 = 6$  мкФ, ки параллелан пайвасту то шиддати  $U = 100$  В заряднокро пай дар пай васл созем, шиддаташон ва микдорҳои зарядашон чӣ қадарӣ мешаванд?

( $U_1 = 300$  В;  $U_2 = 150$  В;  $q_1 = q_2 = 900$  мкКл)

1.23. Кураи радиусаш  $R_1 = 2$  см-и заряднокро ба кураи безаряди радиусаш  $R_2 = 3$  см расонда сипас чудо карданд. Энергияи кураи дуҷум  $W_2 = 0,4$  Ҷ буданаш маълум гардид. Кураи яқум то расиш чӣ қадар заряд доштааст?

(2,7 мкКл)

1.24. Конденсатори ҳамвори масоҳати ҳар як рӯяаш  $S = 100$  см<sup>2</sup>, фосилаи байни рӯяхояш  $d = 5$  мм-ро заряднок карда, сипас безаряд гардонданд. Дар ин маврид микдори гармии  $q = 4,19$  Ҷ хорич шуд. Конденсатор то кадом шиддат заряднок будааст?

(21,7 кВ)

1.25. Зарядҳои баробари  $q = 10$  нКл дар куллаҳои квадрати тарафҳояш  $a = 10$  см ҷойгиранд. Энергияи потенсиалии ҳамтаъсироти ҳар як заряд дар майдони се зарядҳои дигар чӣ қадар мебошад?

(24,4 мкҶ)



## ҚОНУНҲОИ ЧАРАЁНИ ДОЙИМӢ

## §2.1. Чараёни электрӣ. Қувваи чараён. Зичии чараён

Соли 1800 ходисаи беназири дорои ахамияти калони амалӣ ба вуқӯъ омад. Олими итолиёвӣ А. Волта (1745-1827) батареяи аввалини электриро ихтироъ ва бо ёрии он маротиби нахуст сели устувори зарраҳои заряднок, яъне чараёни дойимии электриро ҳосил намуд. Ин боиси дар техника бунёд ёфтани соҳаи нав-электротехника гардид, ки тамаддуни моро ба куллӣ тағйир дода, ба марҳилаи нави инкишофи инсоният оғоз бахшид. Ҳоло ҳаёти моро бе чараёни электрӣ тасаввур кардан ғайриимкон аст.

*Чараёни электрӣ* гуфта ҳаракати ботартибона (нигаронида)-и зарраҳои заряднокро мефаҳманд. Ин зарядҳо барандагон (хомилон)-и чараён доништа мешаванд. Истилоҳи «чараёни электрӣ»-ро олими фаронсавӣ А.М. Ампер (1775-1836) с.1820 ворид намуд. Маҳз бо пешниҳоди Ампер самти ҳаракати зарраҳои мусбат заряднок ба сифати самти чараён қабул карда шуд.

Барои сурат гирифтани чараён мавҷудияти зарраҳои зарядноки ҳаракатманд (озод), майдони электрие, ки бо таъсири он ин зарраҳо ба ҳаракат мебароянд, заруранд.

Моддаҳое, ки дорои хомилони сершумори чараёнанд ва дар онҳо ҳаракати бемайлони зарраҳо имконпазир аст, *ноқилҳо* ном гирифтанд. Симҳои металлӣ, маҳлули намак, ишқор (асос), туршӣ (кислота), инчунин ғудохтаи намакҳо, ки *электролитҳо* (аз юнонии *lytos*-қобили таҷзия) номида мешаванд, ноқилҳои хубанд. Симҳои металлро ба ноқилҳои чинси якӯму электролитҳоро ба ноқилҳои чинси дуҷум мансуб медонанд. Ин фарқият дар он асос аст, ки бо баланд шудани температура дар ноқилҳои чинси якӯм ба чараён мамонияти зиёдтар ба вуҷуд меояд, чӣ тавре ки мегӯянд, муковимати ин навъ ноқилҳо меафзояд. Вале муковимати ноқилҳои чинси дуҷум, дар ин ҳол, баръакс, кам мешавад.

Тавассути таҷрибаҳо муқаррар шудааст, ки дар симҳои металлӣ, инчунин нимноқилҳо (ниг. §2.10) хомилони чараён зарраҳои манфӣ зарядноки таркибии атомҳо-электронҳо ва дар ноқилҳои чинси дуҷум ионҳои мусбату манфӣ (ниг. §2.8) мебошанд.

Моддаҳое ҳастанд, ки чараёни электриро амалан намегузаронанд ва онҳо *диэлектрикҳо* (англ. dielektrik, аз юнонии *dia*-тавассути, андаруни... ва *elektrik*-электрӣ) ё худ *изоляторҳо* (аз фаронсавии *isoler*-чудо) ном гирифтаанд. Резина, чинӣ (фарфор), шиша, шохӣ, қаҳрабо, аксари пластмассаҳо, чӯби хушк, оби тоза (дистиллятсия ё тақтиршуда), газҳо, аз ҷумла ҳавои хушк ва ғайра диэлектрикҳои хубанд. Бояд таъкид кард, ки дар байни ноқилҳою диэлектрикҳо ҳудуди қатъӣ гузоштан шартист.

Чараёни электриро миқдоран бо бузургии скалярие тавсиф медиҳанд, ки *қувваи чараён* ном гирифтааст. Қувваи чараён бо миқдори электр ё заряде муайян карда мешавад, ки дар тӯли  $1\text{ с}$  аз бурришгоҳи ноқил мегузарад. Агар дар муддати кӯтоҳи вақти  $dt$  аз

бурришгоҳи арзии ноқил заряди  $dq$  гузарад, қувваи ҷараёнро, ки одатан бо ҳарфи  $I$  ишорат намудан маъмул гаштааст, бо формулаи:

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad (2.1)$$

яъне чун ҳосилаи якӯми бузургии заряд нисбат ба вақт муайян мекунад. Воҳиди қувваи ҷараён дар СИ яке аз ҳафт воҳиди асосӣ-1 *ампер* (мухтасар  $1 A$ ) мебошад. Он тавассути қувваи ҳамтаъсироти магнитии ду ноқили ҷараёндори рости параллелӣ муқаррар карда мешавад (ниг §3.5).

Тақсимооти қувваи ҷараён дар бурришгоҳи ноқилро бо бузургии вектории ба истилоҳ *зичии ҷараён* тавсиф медиҳанд. Вектори зичии ҷараён (онро бо ҳарфи  $\vec{j}$  ишорат мекунад) ба самти суръати ҳаракати ботартибонаи зарраҳои мусбат заряднок равона мебошад. Модули вектори зичии ҷараёнро бо формулаи:

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}} \quad (2.2)$$

муайян менамоянд. *Воҳиди зичии ҷараён дар СИ* мувофиқи (2.2)  $1 A/m^2$  буданаш маълум аст. Баъзан *воҳиди ғайрисиستمавии зичии ҷараён*  $1 A/mm^2 = 10^6 A/m^2$  мавриди истифода қарор меёбад. Чунончӣ, меъёри зичии ҷараён дар симҳои мисин анқариб  $8 A/mm^2$ , дар симҳои алюминӣ  $3,5-5 A/mm^2$ , умуман зичии зиёдтарини аз ҷиҳати техникӣ имконпазир:

$$j_{\max} = 10 \frac{A}{mm^2} = 10^7 \frac{A}{m^2}$$

буданаш тавассути таҷрибаҳо муқаррар шудааст.

Агар самт ва қувваи ҷараён бо мурури замон дигар нашаванд, онро *ҷараёни дойимӣ* медонанд, вагарна оид ба ҷараёни тағйирёбанда сухан меронанд. Дар ҳоли ду ҷисми потенциалхояшон гуногун заряднокро бо ноқиле васл намудан аз як ноқил ба дигараш то баробар шудани потенциалхояшон ҷараёни кӯтоҳмуддати тағйирёбанда мегузарад. Ҳамин аст, ки барои дар муддати тӯлонӣ аз ноқил катъ наёфтани ҷараён дойимӣ мондани фарқи потенциалҳои нӯгҳои ноқилро таъмин бояд кард.

Қувваи ҷараёни дойимиро бо формулаи:

$$I = \frac{q}{t} \quad (2.3)$$

муайян кардан мумкин аст, зеро ҳангоми  $I = \text{const}$

$$q = \int_0^t I dt = It \quad (2.4)$$

буданаш маълум мегардад.

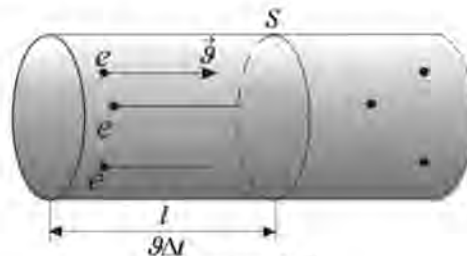
Мувофиқи тасаввуроти он, ки дар симҳои металлӣ ҷараёнро ҳаракати электронҳои озод ташкил менамояд, қувва ва зичии ҷараёнро чунин муайян кардан мумкин аст.

Бо таъсироти майдони электрӣ дар ноқили металлӣ электронҳо ба самти муқобили шадидияти майдон бо суръати миёнае ҳаракат мекунад, ки ба шадидияти майдон мутаносиб аст:

$$\langle v \rangle = bE. \quad (2.5)$$

Дар ин ҷо  $b$ -коэффитсиенти мутаносибӣ буда, *ҳаракатмандии зарраи заряднок* ном дорад ва бо суръате муайян карда мешавад, ки зарра ба

он дар майдони шадидияташ вохидӣ ( $1 \text{ В/м}$ ) соҳиб мегардад. Аз ин рӯ вохиди ҳаракатмандӣ дар СИ  $1 \frac{\text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$  мебошад. Аз бурришгоҳи арзии  $S$ -и ноқил (дар расми 2.1 ин бурришгоҳ штрихонида шудааст) дар тӯли вақти  $\Delta t$  кулли электронҳои дар ҳаҷми китъаи дарозиаш  $\Delta l = g\Delta t$ -и ноқил воқеъгардида мегузаранду бас.



Расми 2.1

Аз ин рӯ қувваи ҷараён:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{Ne}{\Delta t} = \frac{neS\Delta l}{\Delta t} = ne g S \quad (2.6)$$

ва зичии он:

$$j = n\vec{a}g \quad (2.7)$$

буданаш маълум мегардад, ки дар ин формулаҳо  $n = \frac{N}{\Delta V} = \frac{N}{S\Delta l}$  – *концентратсияи зарядҳои озод* (дар симҳои металлӣ ин зарраҳои электронҳои озоди зарядашон  $q = |e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  мебошанд). Формулаи (2.7) - ро дар мавриди умумӣ барои зарраҳои заряднокӣ микдори электронашон  $q$  ва суръати ҳаракати ботартибонаи онҳо  $\vec{g}$  дар шакли векторӣ чунин пешниҳод кардан мумкин аст:

$$\vec{j} = nq\vec{g}. \quad (2.8)$$

**Масъалаи 2.1.** Меъёри зичии ҷараён дар сими мисин  $j = 8 \text{ А/мм}^2$  буданашро доништа, муайян намоед, ки дар тӯли  $1 \text{ с}$  аз бурришгоҳи  $S = 1 \text{ мм}^2$  чандто электрон мегузарад ва суръати ҳаракати ботартибонаи электронҳо дар ин маврид чӣ қадар мебошад.

*Маълумот.*

$j = 8 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2} = 8 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$
$S = 1 \text{ мм}^2 = 10^{-6} \text{ м}^2$
$\Delta t = 1 \text{ с}$
$N = ? \quad g = ?$

*Ҳал*

Мувофиқи таърифи қувваи ҷараён:

$$I = \frac{N|e|}{\Delta t}, \text{ аз ин ҷо:}$$

$$N = \frac{I\Delta t}{|e|} = \frac{jS\Delta t}{|e|} = \frac{8 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot 1 \text{ с}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 5 \cdot 10^{13} \text{ электрон.}$$

*Ҷавоб:*  $N = 5 \cdot 10^{13}$  электрон.

Формулаи зичии ҷараён имкон медиҳад, ки суръати ҳаракати ботартибонаи электронҳо дар сими мисин муайян карда шавад. Барои

ин бояд ба эътибор гирифт, ки дар ҳоли аз ҳар атом якто электрони озод ташкил ёфтаниш концентратсияи электронҳои озод:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\nu N_A}{V} = \frac{m N_A}{V M} = \frac{D N_A}{M}, \quad (2.9)$$

ки барои сими мисин  $D = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  - зичии сими мисин,  $M = 63,54 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{мол}}$  - массаи молии мис,  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ мол}^{-1}$  - адади Авогадро:

$$n = \frac{8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ мол}^{-1}}{63,54 \cdot 10^{-3} \text{ кг/мол}} = 8,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$$

ва аз ин рӯ:

$$g = \frac{j}{n|e|} = \frac{8 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2}{8,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{с}} = 6 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$$

мебошад.

Бояд кайд кард, ки ин қимати суръати ҳаракати ботартибонаи электронҳо назар ба суръати ҳаракати ҳароратии онҳо ( $g_T = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$ );  $T=300 \text{ К}$ -температураи ҳона,  $m=9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ -массаи электрон,  $k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ҷ/К}$ -дойимии Болсман)  $g_T = 10^5 \text{ м/с}$ ) хеле кам аст. Вале баробари васл кардани калидҳои занҷир фаврӣ ба қор даромадани дастгоҳҳои электрӣ, аз ҷумла фурузон гаштани чароғҳои электрӣ бо он шарҳ дода мешавад, ки ҳамтаъсири майдони электрию зарраҳои заряднок бо суръати ба суръати рӯшноӣ дар вакуум ( $c=3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ ) баробар интиқол меёбад.

**Масъалаи 2.2.** Қувваи ҷараён дар ноқил аз  $I_0 = 0,5 \text{ А}$  дар тӯли  $\tau = 10 \text{ с}$  то  $I = 2 \text{ А}$  мунтазам меафзояд. Микдори электрии аз бурришгоҳи ноқил дар ин муддат интиқолёфтаре муайян намоед.

Маълумот:

$$\left. \begin{array}{l} I_0 = 0,5 \text{ А} \\ \tau = 10 \text{ с} \\ I = 2 \text{ А} \\ q = ? \end{array} \right\}$$

Ҳал

Мувофиқи таърифи қувваи ҷараён:

$$I = \frac{dq}{dt},$$

аз ин ҷо:

$$q = \int I dt.$$

Тағйироти мунтазами қувваи ҷараён далели он аст,  $I = I_0 + kt$  (дар ин ҷо  $k = \frac{I - I_0}{t}$  - суръати тағйироти ҷараён) ва он дар ин маврид:

$$k = \frac{2 - 0,5}{10} = 0,15 \frac{\text{А}}{\text{с}}$$

буданиш маълум мегардад.



Пас,

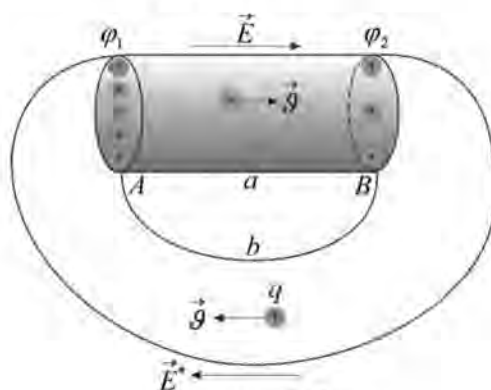
$$q = \int_0^{\tau} (I_0 + kt) dt = I_0 \tau + \frac{k\tau^2}{2} = 0,5 \cdot 10 + \frac{0,15 \cdot 100}{2} = 5 + 7,5 = 12,5 \text{ Кл.}$$

мебошад.

Ҷавоб:  $q=12,5 \text{ Кл.}$

## §2.2. Манбаъҳои ҷараён. Қувваи электроҳаракатдиҳандаи манбаъҳои ҷараён. Шиддат

Фарз мекунем, ки дар нӯғҳои нокили  $AB$  (расми 2.2) потенциалҳои гуногун, масалан  $\varphi_1 > \varphi_2$  ба вуҷуд оварда шудаанд. Онгоҳ шадидияти майдони электрӣ сӯйи камшавии потенциал, яъне аз нӯғи  $A$  ба  $B$  самт мегирад. Агар шартан қабул намоем, ки ҷараёнро дар ин нокил ҳаракати зарраҳои мусбат заряднок ташкил медиҳанд, бо таъсири майдон зарраҳо аз нӯғи  $A$  ба  $B$  бо роҳи  $AaB$  мекӯчанд. Дар натиҷа фарқи потенциалҳо кам шудан мегирад. Ҳамин, ки ин фарқ баробари сифр мегардад, ҷараён қатъ меёбад. Аз ин рӯ барои тӯлонӣ гузаштани ҷараён, тавре ки қайд карда будем, фарқи потенциалҳоро бетағйир нигоҳ доштан лозим меояд. Барои ин ҳар микдори заряд, ки аз нӯғи  $A$  ба  $B$  кӯчонда мешавад, аз нав ба нӯғи  $A$  бо роҳи  $BbA$  баргардондан зарур аст.



Расми 2.2

Агар ба эътибор гирем, ки кори қувваҳои электростатикӣ ба рафти ҳар гуна хати сарбаст баробари сифр мебошад (ниг. §1.7) барои дар нӯғҳои нокил нигоҳ доштани фарқи потенциалҳо қувваҳои табиаташон ғайриэлектрӣ (онҳоро мухтасар *қувваҳои ғайр* меноманд) бояд амал намоянд. Қувваҳои ғайр дар дастгоҳҳое ба вуҷуд оварда мешаванд, ки *манбаъҳои ҷараён* ном гирифтаанд. Ин гуна қувваҳо аз ҳисоби навъҳои ғайриэлектрии энергия дар клемма (гира)-ҳои манбаъ кори ба вуҷуд овардану нигоҳ доштани фарқи потенциалҳоро иҷро мекунанд. Чунончӣ, дар элементҳои галванӣ\*, аккумуляторҳо фарқи потенциалҳо аз ҳисоби энергияи реаксияҳои оксиду барқарор-

\*) Аз номи Л. Галвани (1737-1798)-олим духтури итолиёвӣ, ки аввалин шуда чунбиши беихтиёри мушакҳои қурбоқаро хангоми ба металлҳои гуногунчинса - мису оҳан расонданашонро ошкор сохтааст ва ин ҳодиса минбаъд боиси сохта шудани батареяи электрӣ гардида буд, ҳарчанд моҳияти ҳодисаи мазкурро маънидод карда натавонист; маҳз А. Волта ба ин моҳият сарфаҳм рафт.

шавии байни лавҳаҳои металлӣ (электродҳо) ва электролитҳо ҳосил мегарданд (дар батареяи аввалинаш А. Волта дар байни диск-курсҳои болои ҳам сутунворчидаи металлӣ гуногунчинса-нукрагину руҳӣ коғаз ё матойи ба маҳлули намак ё туршӣ тар гузоштаву аз курсҳои канорӣ ду сим бароварда буд, ки дар нӯгҳояшон фарқи потенциалҳои ба кадри кофӣ ошкоршаванда вучуд дошт).

Сабабгори ба вучуд омадани фарқи потенциалҳо дар генераторҳои нерӯгоҳҳои электрии обӣ (НБО)-ҳо истифодаи энергияи механикии оби дар обанборҳо чамъшуда, дар электростансияҳои ҳароратӣ-энергияи дохилии сӯзишвориҳои гуногун (гази табиӣ, ангишт ва ғайра), дар нерӯгоҳҳои атомӣ-реаксияҳои ядрой, дар батареяҳои офтобӣ энергияи рӯшноӣ мебошанд.

Барои тавсифи энергетикӣ манбаъҳои ҷараён бузургии ба ном *қувваи электроҳаракатдиҳанда* (мухтасар ҚЭХ харчанд мувофиқ нест, вале таърихан ҳамин ном ворид шуда монд) мавриди истифода қарор меёбад ва онро бо ҳарфи  $\mathcal{E}$  (эпсилон) ишорат кардан маъмул гаштааст.

Қувваи электроҳаракатдиҳанда бо қори қувваҳои ғайр ( $A_{г}$ ), ки барои кӯчондани заряди мусбати воҳидӣ (+1 Кл) дар занҷирҳои электрӣ иҷро мегардад, муайян карда мешавад:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{г}}{q} \quad (2.10)$$

ҚЭХ-ро мисли фарқи потенциалҳо:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{эл}}{q} \quad (2.11)$$

дар СИ бо вольтҳо ифода мекунанд.

Одатан шадидияти майдони қувваҳои ғайрро бо ҳарфи  $\vec{E}^*$  ишорат мекунанд. Дар ин ҳол ҚЭХ-ро чун сиркулятсияи вектори  $\vec{E}^*$  ба рафти хати сарбаст (занҷири электрӣ) пешниҳод кардан мумкин аст:

$$\mathcal{E} = \oint_L E_l^* dl = \oint_L E^* dl \cos \alpha, \quad (2.12)$$

ки дар ин ҷо  $\alpha$  - кунҷи байни векторҳои  $\vec{E}^*$  ва кӯчиш  $d\vec{l}$  мебошад.

Дар қитъаҳои занҷирҳои электрӣ дар як вақт ҳам қувваҳои электростатикӣ ва ҳам қувваҳои ғайр амал карда метавонанд. Ба ин муносибат барои тавсифи қори муштараки ин қувваҳо бузургии ба ном *шиддат* ( $U$ ) мавриди истифода қарор меёбад:

$$U = \frac{A_{эл}}{q} + \frac{A_{гайр}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}. \quad (2.13)$$

Пас, мафҳуми шиддат назар ба фарқи потенциалҳо умумитар буда, ҳангоми дар қитъаи занҷир амал накардани қувваҳои ғайр (манбаъҳои ҷараён) шиддат ба фарқи потенциалҳо баробар аст.

### §2.3. Қонунҳои Ом

Олими олмонӣ Г.С. Ом (1787-1854) солҳои 1826-1827 қонунҳои ҷараёни дойимиро аввало таҷрибавӣ, сипас назариявӣ муқаррар кард,

ки онҳо ҳоло номи ўро гирифтаанд. Хотиррасон намудан ҷоиз аст, ки маҳз Г.С. Ом мафҳуми қувваи электроҳаракатдихандаро ба илм ворид намуд.

**1. Қонуни Ом барои қитъаи якҷинсаи занҷир.** Дар қитъаи занҷир, ки манбаъҳои ҷараён амал намекунанд (ин гуна қитъаро якҷинса меноманд), қувваи ҷараён ба шиддати қитъа мутаносиби роста мебошад:

$$I = kU, \quad (2.14)$$

дар ин ҷо  $k$ -коэффитсиенти мутаносибӣ буда, *нокилият* ном гирифтааст. Воҳиди нокилият дар СИ *1-сименс* ном дорад (мухтасар *1-См*), ба шарафи электротехники олмонӣ, ки бо ҳамроҳии И. Голске телеграфи электрӣ ихтироъ кардааст:

$$1\text{См}=1\text{А/В}.$$

Бузургии баръакси нокилият *муқовимати электрӣ* номида мешавад ва онро бо ҳарфи  $R$  (инчунин  $r$ ) ишорат мекунанд:

$$R = 1/k. \quad (2.15)$$

Ҳамин аст, ки қонуни Ом барои қитъаи занҷир чун:

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.16)$$

пешниҳод мешавад.

Воҳиди муқовиматро дар СИ мувофиқи (2.16) муқаррар мекунанд ва он *1 Ом* ном гирифтааст:

$$1\text{ Ом}=1\text{ В/А},$$

яъне *1 Ом* муқовимати ноқилест, ки ҳангоми шиддат дар нӯгҳои он  $1\text{ В}$  будан аз ин ноқил ҷараёни қуввааш  $1\text{ А}$  мегузарад. Дар амалия воҳидҳои қаратии *Ом* низ истифода мешаванд ( $1\text{ кОм}=10^3\text{ Ом}$ ,  $1\text{ МОм}=10^6\text{ Ом}$ ). Ҳарчанд муқовиматро мувофиқи (2.16) бо формулаи:

$$R = \frac{U}{I} \quad (2.17)$$

муайян кардан мумкин аст, муқовимати ноқил ба шиддат ва қувваи ҷараён вобаста нест. Тавре ки таҷрибаҳо нишон медиханд, муқовимати ноқилҳо ба моддае, ки аз он ноқил тайёр карда мешавад, андозаҳои геометрӣ ва ҳолати ин ноқил (асосан температура он) вобастагӣ зоҳир менамояд. Чунончӣ, барои ноқилҳои цилиндршакли дарозиашон  $l$  масоҳати бурришгоҳи арзиашон  $S$  ин вобастагӣ чунин пешниҳод мешавад:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (2.18)$$

Дар ин ҷо  $\rho$ -*муқовимати ҳос* ном дорад ва он муқовимати ноқили дарозиаш  $l=1\text{ м}$ , масоҳати бурришгоҳи арзиаш  $S=1\text{ м}^2$  аст (он одатан бо  $\text{мм}^2$  ифода меёбад). Аз ин рӯ *воҳиди муқовимати ҳос* дар СИ  $1\text{ Ом}\cdot\text{м}$ , дар амалия инчунин воҳиди ғайрисистемавӣ:  $1\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}=10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$  истифода мешавад.

Тавре ки таҷрибаҳо нишон медиханд, муқовимати ҳос барои ҳар як модда қимати муайян дораду дар аксар маврид ба температураи ноқилҳои металлӣ вобастагии хаттӣ зоҳир менамояд:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (2.19)$$

ки дар ин чо  $\rho_0$  - муқовимати хос дар  $0\text{ }^\circ\text{C}$  ( $273,15\text{ K}$ ),  $\alpha$  - коэффитсиенти температуравии муқовимат,  $t$ -температураи ноқил дар шкалаи амалии Байналмилалӣ буда, бо  $^\circ\text{C}$  ифода меёбад.

Дар чадвали зерин барои муқоиса қиматҳои муқовимати хос ва коэффитсиенти  $\alpha$  - и баъзе моддаҳо (дар  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ) оварда шудаанд.

Бо назардошти (2.19) муқовимати аксар ноқилҳои металлӣ низ ба температура хаттӣ вобаста аст:

$$R = R_0(1 + \alpha t). \quad (2.20)$$

Ба ин вобастагӣ асос карда *термометрҳои муқовиматӣ* сохта мешаванд.

Чадвали 3. Муқовимати хос ва коэффитсиенти температуравии баъзе моддаҳо

Модда	$\rho \cdot 10^8\text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\alpha \cdot 10^4\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Модда	$\rho \cdot\text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\alpha \cdot 10^4\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
<i>а) Ноқилҳо</i>			<i>б) Нимноқилҳо</i>		
Нукра	1,6	36	Германий ( $27^\circ\text{C}$ )	0,43	
Мис	1,7	39	Силитсий ( $27^\circ\text{C}$ )	$2,3 \cdot 10^3$	
Алюминий	2,8	49	<i>в) диэлектрикҳо</i>		
Волфрам	5,5	45	Чӯби хушк	$10^9 \div 10^{10}$	
Охан	9,7	60	Шиша	$10^9 \div 10^{12}$	
Платина	10,8	39	Резина	$10^{13} \div 10^{15}$	
Симоб	98	90	Ҳаво ( $0\text{ }^\circ\text{C}$ )	$10^{15} \div 10^{18}$	
Нихром (67,5% Ni, 1,5% Mn, 16% Fe, 15% Cu)	110	40	Кахрабо	$10^{15} \div 10^{18}$	

Олими голландӣ Г. Камерлинг-Оннес (1853-1926) хангоми сард гардонидани симоб то температурҳои пасттар аз  $4\text{ K}$  ( $-269\text{ }^\circ\text{C}$ ) маротиби нахуст ошкор сохт, ки муқовимати симоб якбора то сифр кам мешавад. Ин ҳодиса *фавқуннокилият* ном гирифтааст. Сонитар маълум гардид, ки чанде аз металлҳои дигар низ дар температураҳои ниҳоят паст (тампатураи гелийи моеъ), ки *температураи гузариши* ( $T_g$ ) ном дарад, ба ҳолати фавқуннокилият меоянд. Дар чадвал температураи гузариши баъзе металлҳо оварда шудааст.

Чадвали 4. Температураи гузариши баъзе моддаҳо ба ҳолати фавқуннокилият

Модда	$T_g, \text{ K}$	Модда	$T_g, \text{ K}$
Сурб	7,2	Алюминий	1,2
Тантал	4,4	Рух	0,9
Симоб	4,2	Молибден	0,9
Қальай	3,7	Магний	0,7

Ҳодисаи фавқуннокилиятро назарияи муосир-механикаи квантӣ шарҳ дода тавонист. Дар ин чо да саҳми олимони амрикоӣ Ч. Бардин (с.т. 1908), Л. Купер (с.т. 1930), Ч.Р. Шриффер (с.т. 1931), ки соли 1957 назарияи микроскопии фавқуннокилиятро барпо намуданд, хеле калон аст (Ҷоизаи Нобелӣ с. 1972).

Соли 1966 муқаррар карда шуд, ки баъзе маснуоти сафолӣ дар температураҳои баландтар аз  $100\text{ K}$  (то  $200\text{ K}$ ) ба ҳолати



фавкуннокилият мегузаранд, харчанд ин ходиса шархи худро наёфтааст. Хамин буд, ки дар солҳои охир фавкуннокилияти баландхароратӣ бошиддат омӯхта мешавад ва дар температураи хонагӣ дастрас гардидани фавкуннокилият дар электротехника ва энергетика боиси як табаддулоти ҷиддие шуда метавонад.

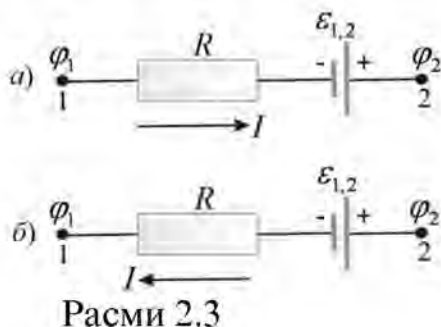
**2. Қонуни Ом барои қитъаи ғайриякҷинсаи занҷир.** Агар дар қитъаи 1 – 2-и занҷир (расми 2.3) манбаъҳои ҷараён амал намоянд, он ғайриякҷинса доништа мешавад. Дар ҳоли муқовимати истеъмолгарони энергия дар қитъа, яъне муқовимати *борбастро* бо  $R_{1,2}$  (он муқовимати худӣ манбаъ  $r$ -ро низ дар бар мегирад) ифода намудан, мувофиқи таърифи шиддат:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E}_{1,2}$$

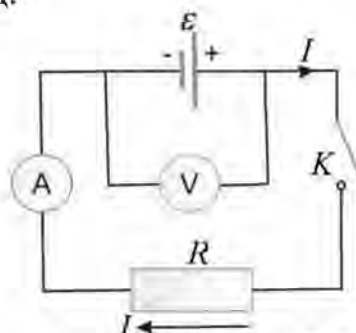
буданаширо ба эътибор гирифта, бо дар назардошти (2.16) баробарии зеринро сабт карда метавонем:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E}_{1,2}}{R_{1,2}}, \quad (2.21)$$

ки он ифодаи *қонуни Ом барои қитъаи ғайриякҷинса* мебошад. Дар ин формула ҳангоми ба рафти ҷараёни қитъа амал кардан манбаъ (ҷараёни манбаъ вусъатдиҳанда аз қутби мусбати он самт мегирад) ҚЭХ  $\mathcal{E}_{1,2}$  бо аломати «+» (расми 2.3, а) ва дар акси ҳол (расми 2.3, б) ҚЭХ-ро бо аломати «-» гирифтани мебошад.



Расми 2.3



Расми 2.4

**3. Қонуни Ом барои занҷири пурра (сарбаст).** Агар нуқтаҳои 1-2-и қитъаро бо ноқил васл созем (одатан муқовимати ноқилҳои васлсозӣ ба эътибор гирифта намешавад),  $\varphi_1 = \varphi_2$  буданаширо ба назар мегирем, он гоҳ баробарии (2.21)-ро чун:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \quad (2.22)$$

пешниҳод карда метавонем, ки он ифодаи математикии *қонуни Ом барои занҷири пурра* (ё сарбаст) мебошад. Дар расми 2.4 занҷири соддатарини пурра тасвир ёфтааст, ки дар он амперметри  $A$  қувваи ҷараёни занҷир, вольтметри  $V$  шиддатро дар қитъаи берунаи занҷир (*борбасти*  $R$ ) чен мекунад ва  $K$ -калиди банду возгардонии занҷир аст. Дар ифодаи (2.22)  $r$  - муқовимати дохилии манбаи ҷараён мебошад. Бояд таъкид кард, ки бузургҳои  $\mathcal{E}$  ва  $r$  барои ҳар як манбаъ қимати муайян доранд.

Дар мавриди афзудани  $R$  шиддати он:

$$U = \mathcal{E} - Ir \quad (2.23)$$

паст мефурояд, зеро қувваи чараён дар занҷир мувофиқи (2.22) кам мешавад. Ҳангоми  $R \rightarrow \infty$  (дар ниҳоят калиди  $K$  воз будан) қувваи чараёни занҷир  $I \rightarrow 0$  ва  $U \approx \mathcal{E}$  қабул кардан раво аст. Яъне, дар мавриди сарбаст набудани занҷир вольтметри бевосита ба клеммаҳои манбаъ васлбуда ҚЭХ-и манбаъро нишон медиҳад. Ҳар қадар муқовимати дохилии ин вольтметр зиёд бошад, нишондоди он ба ҚЭХ-и манбаъ наздиктар мешавад.

Дар ҳоли кам шудани  $R$  қувваи чараён меафзояд, дар натиҷа  $U$  паст фуromaдан мегирад ва дар мавриди  $R \rightarrow 0$  (ин маврид *расиши кӯтоҳ* ном гирифтааст), аз занҷир қувваи чараёни зиёдтарин:

$$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{r} \quad (2.24)$$

гузашта, то ба гудозиши симҳои васлсозӣ оварда мерасонад (эҳтиёт бояд шуд, зеро кутбҳои шабакаи шахрӣ  $U=220$  В-ро бо симҳои муқовиматашон ночиз-симҳои ғафс васл кардан хатарнок аст!). Ба ҳодисаи расиши кӯтоҳ асос намуда, *муҳофизакҳо* (ибора аз металлҳои зудгудоз) сохта шудаанд.

**Масъалаи 2.3.** Ҳангоми ба аккумулятор бевосита васл кардани муқовимати  $R_1=16$  Ом қувваи чараёни занҷир  $I_1=1$  А ва дар мавриди ба он пайвастании муқовимати  $R_2=8$  Ом қувваи чараёни занҷир  $I_2=1,8$  А шуд. ҚЭХ-и манбаъ ва муқовимати дохилии он муайян карда шавад.

*Маълумот.*

$$\left. \begin{array}{l} R_1 = 16 \text{ Ом} \\ I_1 = 1 \text{ А} \\ R_2 = 8 \text{ Ом} \\ I_2 = 1,8 \text{ А} \\ \hline \mathcal{E} - ? \quad r - ? \end{array} \right\}$$

*Ҳал*  
Мувофиқи қонуни Ом барои занҷири пурра:

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + r}; \quad I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2 + r}$$

мебошанд, пас:

$$I_1(R_1 + r) = I_2(R_2 + r)$$

$$1 \text{ А} \cdot (16 \text{ Ом} + r) = 1,8 \text{ А} \cdot (8 \text{ Ом} + r)$$

Аз ин ҷо:

$$r = \frac{16 \text{ В} - 14,4 \text{ В}}{0,8 \text{ А}} = \frac{1,6}{0,8} \text{ Ом} = 2 \text{ Ом}$$

ва

$$\mathcal{E} = I_1(R_1 + r) = 1 \text{ А} (16 \text{ Ом} + 2 \text{ Ом}) = 18 \text{ В}.$$

*Ҷавоб:*  $r = 2 \text{ Ом}$ ;  $\mathcal{E} = 18 \text{ В}$ .

**Масъалаи 2.4.** Муқовимати дохилии манбаи чараён дорои бо муқовиматҳои ду вольтметр ҳамқиёс мебошад. Яке аз вольтметрҳои ба клемма (сикконак)-ҳои манбаъ бевосита васлбуда шиддати  $U_1=10$  В ва дар мавриди вольтметри дигарро ба ҳамин манбаъ пайваस्त кардан он

шиддати  $U_2=15$  В-ро, дар холи хар ду вольтметрро пай дар пай васлу ба хамон манбаъ чун пештара пайвастан вольтметри якум шиддати  $U_3=4$  В ва вольтметри дуюм  $U_4=12$  В-ро нишон медиханд. Аз ин маълумот ҚЭХ-и манбаъро муайян намоед.

*Маълумот.*

$$\left. \begin{array}{l} U_1 = 10 \text{ В} \\ U_2 = 15 \text{ В} \\ U_3 = 4 \text{ В} \\ U_4 = 12 \text{ В} \\ \hline \mathcal{E} = ? \end{array} \right|$$

*Ҳал*

Дар мавриди аввал қонуни Ом барои занҷири сарбаст чунин сабт карда мешавад:

$$\mathcal{E} = I_1(R_{V1} + r), \quad (1)$$

ки дар ин ҷо  $I_1$ -қувваи ҷараёни занҷир,  $R_{V1}$ -муқовимати дохилии вольтметри якум,  $r$ -муқовимати дохилии манбаъ мебошанд.

Мувофиқи нишондоди ин вольтметр:

$$I_1 R_{V1} = 10 \text{ В}; \quad (2)$$

айнан хангоми ба манбаъ васл кардани вольтметри дуюм:

$$\mathcal{E} = I_2(R_{V2} + r); \quad (3)$$

$$I_2 R_{V2} = 15 \text{ В}; \quad (4)$$

дар холи харду вольтметрро пай дар паю сипас ба сикқонакҳои манбаъ васл сохтан:

$$\mathcal{E} = I_3(R_{V1} + R_{V2} + r); \quad (5)$$

$$I_3 R_{V1} = 4 \text{ В}; \quad I_3 R_{V2} = 12 \text{ В} \quad (6)$$

сабт намудан равоаст равоаст. Аз муқоисаи баробарҳои (1)-(6) бармеояд, ки:

$$R_{V2} = 3R_{V1} \quad (7)$$

мебошад. Пас, бо дарназардошти баробарҳои (2) ва (4):

$$\frac{I_1}{I_2} = 2 \quad (8)$$

буданаш маълум мегардад. Аз ин рӯ мувофиқи (1) ва (3):

$$\mathcal{E} = I_2 R_{V2} + I_2 r = 15 \text{ В} + I_2 r; \quad (9)$$

$$\mathcal{E} = I_1 R_{V1} + I_1 r = 10 \text{ В} + I_1 r \quad (10)$$

мебошанд, ки ҳалли муштараки онҳо бо дарназардошти (8), (9) ва (10):

$$\frac{\mathcal{E} - 10 \text{ В}}{\mathcal{E} - 15 \text{ В}} = 2, \text{ аз ин ҷо } \mathcal{E} = 20 \text{ В}$$

буданаш маълум мегардад.

*Ҷавоб.*  $\mathcal{E} = 20 \text{ В}$ .

## §2.4. Кор ва иқтидори чараён. Қонуни Ҷоулу Ленс

Коре, ки манбайи чараён ба рафти занчири сарбаст заряди  $dq$ -ро кӯчонда иҷро менамояд, мувофиқи таърифи ҚЭХ ва қувваи чараён:

$$dA = \mathcal{E}dq = \mathcal{E}I dt \quad (2.25)$$

мебошад. Ин корро ба вақти  $dt$ , ки дар тӯли он иҷро мешавад, тақсим карда, *иқтидор (тавоноӣ)-и пурраи* вусъат додаи манбаъро дарёфта метавонем:

$$P_0 = \frac{dA}{dt} = \frac{dq}{dt} \mathcal{E} = I\mathcal{E}. \quad (2.26)$$

Бо дарназардошти (2.22) *иқтидори пурраро* ба намуди:

$$P_0 = \frac{\mathcal{E}^2}{R+r} \quad (2.27)$$

пешниҳод кардан мумкин аст. Дар истеъмолгарони энергия (борбастҳо) танҳо ҳиссае аз ин иқтидор вусъат меёбад:

$$P = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2}{(R+r)^2} R, \quad (2.28)$$

ки *иқтидори фойданок* мебошад. Қисми дигараш асосан барои гарм кардани манбаъ, инчунин симҳои васлсозӣ сарф мегардад бефоида аст.

Нисбати иқтидори фойданок бар иқтидори пурра *коэффитсиенти кори фойданок (ККФ)* мебошад:

$$\eta = \frac{P}{P_0} = \frac{U}{\mathcal{E}} = \frac{R}{R+r}. \quad (2.29)$$

Маҳз аз ҳисоби иқтидори фойданок ҳангоми аз ноқили муковиматаш  $R$  гузаштани чараёни қуввааш  $I$  ин ноқил гарм мешавад ва миқдори гармиеро, ки дар тӯли вақти гузаштани чараён ( $t$ ) хориҷ мегардад, мувофиқи *қонуни Ҷоулу Ленс* муайян карда метавонем:

$$Q = I^2 R t = I U t = \frac{U^2}{R} t. \quad (2.30)$$

Иқтидори чараён:

$$P = \frac{Q}{t} = I^2 R = I U = \frac{U^2}{R} \quad (2.31)$$

мебошад. Тавассути ин формула қувваи чараён ва муковимати чароғҳои электроиро муайян кардан мумкин аст, ки дар онҳо ҳиссаи ночизи он (анқариб 5%) ба рӯшноӣ табдил меёбад.

Гарм шудани ноқилҳо ҳангоми аз он гузаштани чараёнро чунин шарҳ додан мумкин аст. Ҳомилони чараён бо таъсири майдони электрӣ дорои энергияи кинетикии зиёдтарин (илова бар энергияи кинетикии ҳаракати бетартибона ё хароратӣ) гардида, ҳангоми бархӯрдҳо бо ионҳои панчараҳои кристаллӣ дар ноқилҳои металлӣ, бо молекулаҳои нейтралӣ дар электролитҳо интиқол медиҳанд, ки боиси бо амплитудаҳои калон лаппиш хӯрдани ионҳо дар панчара, бо суръатҳои зиёдтар ба ҳаракат даромадани молекулаҳои нейтралӣ мегарданд, ки дар натиҷа гармӣ хориҷ мешавад. Дарвоқеъ, ҳамин бархӯрдҳо сабабгори муковимати ноқилҳо мебошад, зеро ҳар як



бархӯрд боиси дар айни замон дар бурришгоҳи арзии ноқил кам шудани миқдори заряд, яъне қувваи ҷараён мегардад.

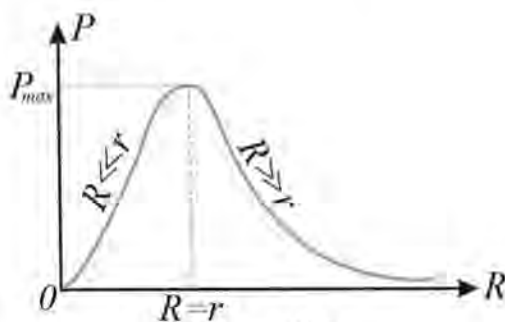
Ҷоиз аст таъкид намоем, ки аз ҳисоби иқтидори фойиданок дастгоҳҳои электрӣ (масалан муҳаррикҳои троллейбусу трамвайҳо ва мошинҳои дигари электрӣ) ба кор дароварда мешаванд, реаксияҳои кимиёвӣ дар аккумуляторҳо (заряднок кардани онҳо), истехсоли металлҳо (масалан алюминий дар заводи алюминийи ш. Турсунзода) амалӣ мешаванд.

Иқтидоре, ки манбаъ вусъат медиҳад, ба муқовимати барбаст  $R$  вобаста мебошад. Он ҳангоми расиши кӯтоҳ ( $R=0$ ) қимати зиёдтарин мегирад, вале дар ин маврид иқтидор пурра дар дохили манбаъ вусъат меёбад ва тамоман бефойида аст (манбаъ гарм мешаваду бас). Ба ин муносибат савол ба миён меояд, ки дар кадом шароит иқтидори фойиданок қимати зиёдтарин (максималӣ) мегираду истифодаи он беш аз пеш мусоидтар мешавад?

Барои ба ин савол ҷавоб дарёфтани аз ифодаи (2.27) нисбат ба  $R$  ҳосила гирифта ба сифр баробар мекунем (шарти экстремуми функсия):

$$\frac{\partial P}{\partial R} = \varepsilon^2 \frac{(R+r)^2 - 2(R+r)R}{(R+r)^4} = \varepsilon^2 \frac{R+r-2R}{(R+r)^3} = 0.$$

Аз ин ҷо ҳангоми  $R=r$  дорой қимати зиёдтарин шудани иқтидори фойиданокро муқаррар менамоем. Ҳамин аст, ки вобастагии  $P$  ба муқовимати борбаст  $R$  ба тарзи графикӣ чун дар расми 2.5 оварда шуда тасвир меёбад.



Расми 2.5

Яъне, ба қадри афзудани  $R$  иқтидори фойиданок  $P$  аввало то қимати зиёдтарин гирифтаниш меафзояд (қитъаи  $OP_{max}$ ). Дарвоқеъ, барои қиматҳои хурдтари муқовимати борбаст ( $R \ll r$ ) ифодаи (2.27) - ро чун:

$$P \approx \frac{\varepsilon^2 R}{r}$$

пешниҳод карда метавонем, ки рафти қитъаи  $OP_{max}$ -ро шарҳ медиҳад. Баъди дар шарти  $R=r$  қимати зиёдтарин гирифтани  $P$  дар мавриди  $R \gg r$  ифодаи (2.28)-ро ба намуди:

$$P \approx \frac{\varepsilon^2}{R}$$

оварда, хулоса баровардан душвор нест, ки бо афзоиши минбаъдаи  $R$  иқтидори фойиданок кам шуда меравад.

**Масъалаи 2.5.** Манбайи чараён дар мавридҳои бевосита ба муковиматҳои берунаи  $R_1=5 \text{ Ом}$  ва  $R_2=0,2 \text{ Ом}$ , пайваст кардан иқтидорҳои баробарро вусъат медиҳад. ККФ - и манбаъ дар ин мавридҳо ёфта шавад.

Маълумот:

$$\left. \begin{array}{l} R_1 = 5 \text{ Ом} \\ R_2 = 0,2 \text{ Ом} \\ P_1 = P_2 \\ \eta_1 - ? \quad \eta_2 - ? \end{array} \right\}$$

Ҳал  
Иқтидорҳои, ки дар муковиматҳо вусъат меёбанд:

$$I_1^2 R_1 = I_2^2 R_2,$$

аз ин ҷо:

$$\frac{I_2}{I_1} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} = 5$$

буданаширо доништа, муковимати

дохилии манбаъро бо дар назардошти қонуни Ом барои занҷири пурра муайян кардан душвор нест:

$$\mathcal{E} = I_1(R_1 + r) = I_2(R_2 + r);$$

ё ки

$$\frac{R_1 + r}{R_2 + r} = \frac{I_2}{I_1} = 5,$$

аз ин ҷо  $r=1 \text{ Ом}$ .

Пас,

$$\eta_1 = \frac{R_1}{R_1 + r} = \frac{5 \text{ Ом}}{5 \text{ Ом} + 1 \text{ Ом}} = 0,83$$

$$\eta_2 = \frac{R_2}{R_2 + r} = \frac{0,2 \text{ Ом}}{1,2 \text{ Ом}} = 0,167 \approx 0,17$$

Ҷавоб.  $\eta_1 = 83\%$ ;  $\eta_2 = 16,7\% \approx 17\%$ .

## §2.5. Қойидаҳои Кирхгоф

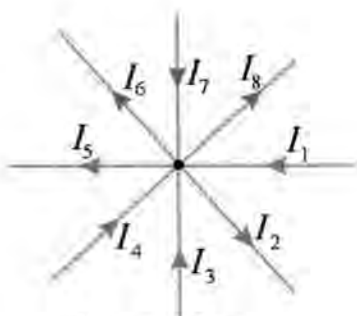
Олими олмонӣ Г.Р. Кирхгоф (1824-1887) қонуниятҳои дар занҷирҳои мураккаби шохадор қорӣ шудани чараёнро омӯхта, солҳои 1845-1847 барои ҳисобу китоби ин гуна занҷирҳо ду қойидаеро пешниҳод намуд, ки номи ӯро гирифтаанд.

Дар ҳар гуна занҷирҳои шохадоре, ки аз муковиматҳои гуногун ташкил ёфтаанду дар онҳо манбаъҳои чараён амал мекунанд, бо татбиқи қонунҳои Ом (§2.3) ва қонуни бақои заряд (§1.1) қувваи чараён ва фарқи потенциалҳоро дар ҳама қитъаҳои занҷир дарёфттан мумкин аст. Аммо масъала бо истифодаи ду қойидаи Кирхгоф хеле содда ҳал мешавад.

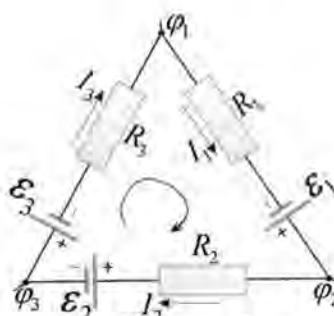
Қойидаи якум ба гиреҳҳои занҷир тааллуқ дорад. *Гиреҳ* гуфта нуктаи бурриши зиёда аз ду ноқили чараёнро мефаҳманд, ки шартан қувваи чараёнҳои ба гиреҳ воридшаванда мусбату аз гиреҳ бароянда манфӣ ҳисоб меёбанд.

**Қойидаи якӯми Кирхгоф.** Суммаи алгебравии қувваи ҷараёнҳо дар ҳар гуна гиреҳи занҷир баробари сифр (0) аст:

$$\sum_{k=1}^N I_k = 0. \quad (2.31)$$



Расми 2.6



Расми 2.7

Чунончӣ, барои гиреҳе, ки дар расми 2.6 тасвир ёфтааст, қойидаи якӯм чунин сабт мешавад:

$$I_1 - I_2 + I_3 + I_4 - I_5 - I_6 + I_7 - I_8 = 0.$$

Бояд таъкид кард, ки қойидаи якӯм натиҷаи қонуни бақои заряд аст. Дарвоқеъ, дар ҳар гуна гиреҳи занҷири ҷараёнҳои доимӣ заряд бояд ҳам ё кам нагардад, вагарна потенциали гиреҳ дигар мешавад, ки ба тағйирёбии қувваҳои ҷараён меоварад.

**Қойидаи дуҷуми Кирхгоф.** Суммаи алгебравии афтиши шиддатҳо дар ҳар қитъаҳои алоҳидаи контури сарбастии занҷир ба суммаи алгебравии ҚЭҲ - хое, ки дар ин контур амал мекунанд, баробар аст:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{i=1}^N \mathcal{E}_i \quad (3.32)$$

Дарвоқеъ, барои қитъаҳои контури сарбасте, ки дар расми 2.7 тасвир ёфтааст, қонуни Ом (2.21) намудҳои зерин дорад:

$$I_1 R_{1,2} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_1;$$

$$I_2 R_{2,3} = \varphi_2 - \varphi_3 - \mathcal{E}_2;$$

$$I_3 R_{3,1} = \varphi_3 - \varphi_1 - \mathcal{E}_3.$$

Ин муодилаҳоро аъзо ба аъзо ҳамчун намуда, ифодаи зеринро ҳосил мекунем:

$$I_1 R_{1,2} + I_2 R_{2,3} + I_3 R_{3,1} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_3,$$

ки тасдиқи қойидаи дуҷуми Кирхгоф мебошад.

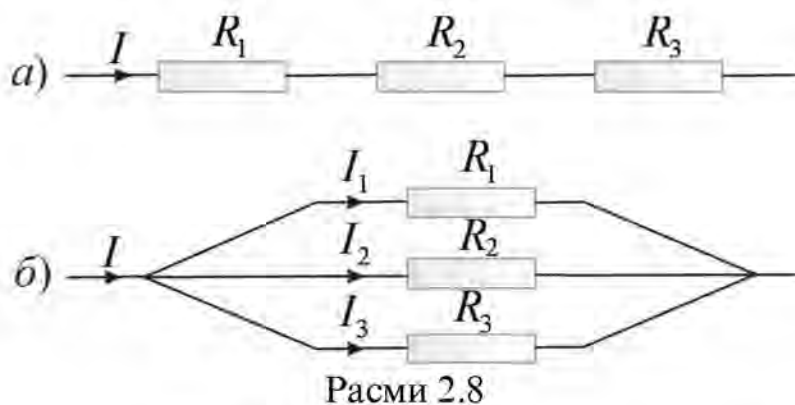
Ҳангоми татбиқи қойидаи дуҷуми Кирхгоф аввало бояд самти гашти контурро ихтиёрӣ интихоб кард ва дар ҳоли бо ин самт мувофиқ омадани самти ҷараёни қитъа афтиши шиддат ( $I_k R_k$ ) дар он бо аломати «+», вагарна бо аломати «-» гирифта мешавад. Таъкид кардан ҷойиз аст, ки агар самти ҷараён дар қитъаҳои алоҳидаи контур маълум набошад, онро ихтиёрӣ, вале оқилона бояд нишон дод (ҳама ҷараёнҳо ба гиреҳ ворид нашаванд ё аз он набароянд!).

Агар ба самти гардиши контур аз қутби манфии манбайи чараён ба қутби мусбати он гузарем, ҚЭХ - и манбаъ мусбату дар акси ҳол манфӣ ҳисоб меёбад.

Хотирнишон сохтан бамаврид аст, ки агар баъди ҳисобу китоби занҷир қувваи чараёни ягон китъа бо аломати «-» ҳосил шавад, ин натиҷа далели он аст, ки самти ихтиёран интихобкардаи чараёни китъа дар асл муқобил будааст.

Пеш аз он, ки намунаҳои татбиқи қоидаҳои Кирхгофро барасӣ намоем, аз барномаи мактаби миёна пайвасти пай дар пай ва параллели резисторҳоро ёдрас мешавем: ҳангоми *пайвасти пай дар пайи резисторҳо\** (расми 2.8, а), муқовимати натиҷавӣ ба ҳосили ҷамъи муқовимати резисторҳои алоҳида баробар аст:

$$R_{\text{ум}} = R_1 + R_2 + \dots + R_N = \sum_{k=1}^N R_k. \quad (2.33)$$



Расми 2.8

Дар мавриди пайвасти  $N$ -то резистори муқовиматашон баробари

$$R_{\text{ум}} = NR. \quad (2.34)$$

Ҳангоми тарзи пайвасти пай дар пайи резисторҳо қувваи чараёни кулли онҳо ҳамон як қимат дорад:

$$I_1 = I_2 = \dots = I_N = I$$

ва афтиши шиддати умумӣ ба ҳосили ҷамъи афтиши шиддат дар резисторҳои алоҳида баробар аст:

$$U_{\text{ум}} = U_1 + U_2 + \dots + U_N = \sum_{k=1}^N U_k.$$

Дар тарзи пайвасти параллелии резисторҳо (расми 2.8, б) муқовимати натиҷавӣ мувофиқи формулаи:

\*)Аз сухани англисии resistor - муқовимат нишон додан омадааст ва резистор гуфта ноқили муқовиматаш маълумро мефаҳманд.  
 $R$ , муқовимати умумӣ назар ба муқовимати якто резистор  $N$ маротиб зиёд мешавад:



$$\frac{1}{R_{ym}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k} \quad (2.35)$$

муайян карда мешаваду афтиши шиддат дар хама резисторҳо ҳамон як қимат дорад:

$$U_{ym} = U_1 = U_2 = \dots = U_N = U.$$

Вале қувваи ҷараёни умумӣ ба ҳосили ҷамъи қувваҳои ҷараёни резисторҳои алоҳида баробар аст:

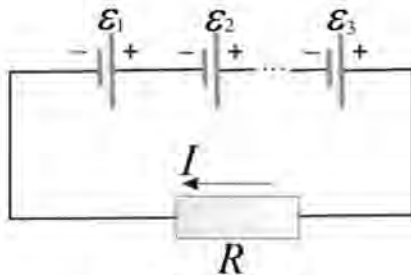
$$I_{ym} = I_1 + I_2 + \dots + I_N = \sum_{k=1}^N I_k$$

Дар ҳоли пайвасти параллелии  $N$ -то резисторҳои муқовиматашон баробар муқовимати натиҷавӣ назар ба муқовимати якто резистор  $N$  маротиб кам мешавад:

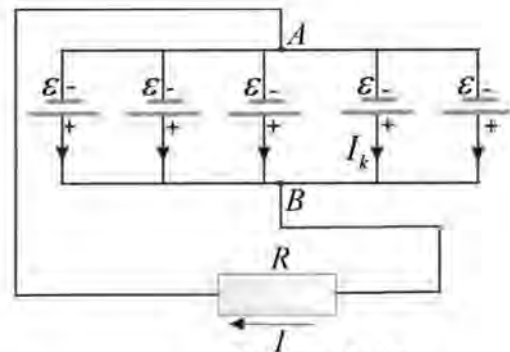
$$R_{ym} = \frac{R}{N}. \quad (2.36)$$

Акнун чанд намунаи мушаххаси татбиқи амалии қойидаҳои Кирхгофро меоварем.

**а) Пайвасти пай дар пайи манбаъҳои ҷараён.** Дар ин тарзи пайваст қутби мусбати манбаи якум бо қутби манфии манбаи дуюм, қутби мусбати ин манбаъ бо қутби манфии манбаи сеюм ва ҳоказо васл мешаванд ва ҷараёни занҷир аз муқовимати берунаи  $R$  (борбаст) мегузарад (расми 2.9).



Расми 2.9



Расми 2.10

Мувофиқи қойдаи дуҷуми Кирхгоф ифодаи зеринро сабт карда метавонем:

$$I(R + r_1 + r_2 + r_3) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3,$$

Аз ин ҷо:

$$I = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{R + r_1 + r_2 + r_3}. \quad (2.37)$$

Дар ҳоли  $N$ -то манбаъҳои айнан якхела ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_N = \varepsilon$ )-ро пай дар пай васл кардан қувваи ҷараёни борбаст бо формулаи зерин муайян карда мешавад:

$$I = \frac{N\varepsilon}{R + Nr}, \quad (2.37)$$

ки дар ин ҷо  $r$ -муқовимати дохилии яке аз манбаъҳост.

**б) Пайвасти параллелии манбаъҳои ҷараён.** Дар ин тарзи пайваст кулли кутбҳои мусбати манбаъҳо дар як нукта (нуктаи  $B$  расми 2.10) ва кутбҳои манфӣ дар нуктаи дигар ( $A$ ) васланд.

Бояд таъкид кард, ки танҳо манбаъҳои ҚЭХ ( $\mathcal{E}$ ) ва муқовимати дохилиашон якандоза ( $r$ )-ро параллелан пайваст кардан мебояд, зеро дар мавриди манбаъҳои ҚЭХ - ҳояшон нобаробарро параллелан васл кардан манбаи ҚЭХ - аш хурд барои манбаҳои ҚЭХ - ашон зиёд истеъмолгари энергияву боиси хароб гардидани батарея мешаванд.

Акнун барои занҷири ҳар як манбаъ қойидаҳои якҷумла дуҷумла Кирхгофро татбиқ менамоем:

$$(IR)_k + rI_k = \mathcal{E}_k$$

ва ҳамаи ин гуна муодилаҳоро барои кулли манбаъҳо татбиқу онҳоро аъзо ба аъзо ҷамъ мекунем ва бо назардошти он, ки  $\sum_{k=1}^N (IR)_k = NIR$ ,

$\sum_{k=1}^N I_k = I$ ;  $\sum_{k=1}^N \mathcal{E}_k = N\mathcal{E}$  мебошанд, аз ин рӯ барои тарзи пайвасти параллелии зикрқфта муодилаи зерин ёфт мешавад:

$$NIR + Ir = N\mathcal{E},$$

аз ин ҷо:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + (r/N)}. \quad (2.39)$$

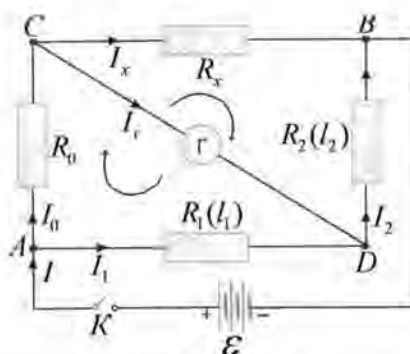
Пас, ҳангоми пайвасти параллелии манбаъҳои ҚЭХ ва муқовимати дохилиашон якандоза-и батарея ба ҚЭХ-и якто манбаъ, вале муқовимати дохилиаш  $r/N$  мутобиқи (2.38), яъне назар ба муқовимати дохилии якто манбаъ  $N$  маротиба кам мебошад. Чунин тарзи пайвасти манбаъҳо дар мавриди  $R \ll r$  будан манфиатнок аст. Дарвоқеъ, ҳангоми  $R \ll r$  (2.39) - ро ба намуди

$$I = N \frac{\mathcal{E}}{r} \quad (2.40)$$

пешниҳод карда метавонем. Яъне, дар ин маврид қувваи ҷараён дар занҷир назар ба қувваи ҷараён, ки якто манбаъ ҳосил мекунад,  $N$  маротиба меафзояд.

**в) Муайян кардани муқовимати ноқилҳо бо усули дастгоҳи таҷрибавии Уитстон\*).** Дар ин усул муқовимати номаълум ( $R_x$ ), муқовимати маълум  $R_0$ , (қимати он аз магазини муқовиматҳо интихоб карда мешавад), инчунин муқовиматҳои  $R_1$  ва  $R_2$  (муқовимати ду қитъаи дарозиашон мувофиқан  $l_1$  ва  $l_2$ -и сими якҷинсаи муқовимати ҳосаш зиёд, масалан сими нихромӣ, ки *реохорд* ном дорад ва аз рӯйи он лағжонаки бо галванометр васлбударо давондан мумкин аст) ба сифати тарафҳои чоркунҷа (расми 2.11) пайваст мебошанд. Ба яке аз диагоналҳо галванометри ҳассос (нуктаҳои  $C$  ва  $D$ ), дар диагонали дигар (нуктаҳои  $A$  ва  $B$ ) манбаи ҷараён васланд (қувваҳои ҷараён ва самтҳои онҳо дар расми 2.11 нишондода шудаанд).

\*) Ч. Уитстон (1802-1875)-олими англис, ки с. 1843 усули саҳеҳ чен кардани муқовимати ноқилҳоро ихтироъ намуд ва ин усул бо номи кӯпрукча (ё пулак)-и Уитстон маъмул гаштааст.



Расми 2.11

Мувофиқи қоидаи якуми Кирхгоф барои нуқтаҳои

$$C: I_0 - I_r - I_x = 0; \quad (1)$$

$$D: I_1 + I_r - I_2 = 0 \quad (2)$$

ва қоидаи дууми Кирхгоф барои контури сарбастии  $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ :

$$I_0 R_0 - I_r R_r - I_1 R_1 = 0, \quad (3)$$

дар ин ҷо  $I_r$ -қувваи ҷараён дар галванометр,  $R_r$ -муқовимати он ва баробари сифр будани тарафи рости (3) далели дар контур амал накардани манбаи ҷараён мебошад. Айнан барои контури сарбастии  $C \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow C$  қоидаи дууми Кирхгоф чунин сабт меёбад:

$$I_x R_x - I_2 R_2 - I_r R_r = 0. \quad (4)$$

Муқовиматҳои  $R_0$ ,  $R_1$  ва  $R_2$  - ро қадре интихоб мекунанд, ки аз галванометр ҷараён нагузарад ( $I_r = 0$ ), он гоҳ:

$$I_x = I_0; \quad I_1 = I_2; \quad (5)$$

$$I_x R_x = I_2 R_2; \quad I_0 R_0 = I_1 R_1 \quad (6)$$

мешаванд. Ақсун баробариҳои (6) - ро аъзо ба аъзо тақсим мекунем:

$$\frac{I_x R_x}{I_0 R_0} = \frac{I_2 R_2}{I_1 R_1} \quad (7)$$

ва баробариҳои (5) - ба эътибор мегирем. Дар натиҷа таносуби зерин ҳосил мешавад:

$$R_x = R_0 \frac{R_2}{R_1}. \quad (8)$$

Агар ба назар гирем, ки  $R_1$  ва  $R_2$  муқовиматҳои қитъаҳои ҳамон як сим (*реохорд*) мебошанд:

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{S}; \quad R_2 = \rho \frac{l_2}{S}, \quad (9)$$

дар ин ифодаҳо  $\rho$  - муқовимати ҳосил сим,  $S$  - масоҳати бурришгоҳи он аст. Аз ин рӯ таносуби (8) намуди зерин мегирад:

$$R_x = R_0 \frac{l_2}{l_1} \quad (10)$$

Ҳамин аст формулае, ки тавассути он муқовимати номаълуми  $R_x$  - ро муқаррар кардан мумкин аст.

**Масъалаи 2.6.** Дар расми 2.12 батареяҳо дорои ҚЭХ – ҳои  $\mathcal{E}_1 = 110 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 220 \text{ В}$ , муқовиматҳои  $R_1 = R_2 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 500 \text{ Ом}$  мебошанд. Амперметр чӣ қадар қувваи ҷараёноро нишон медиҳад? (муқовиматҳои дохилии манбаъ ва амперметр сарфи назар карда шаванд).

Маълумот:

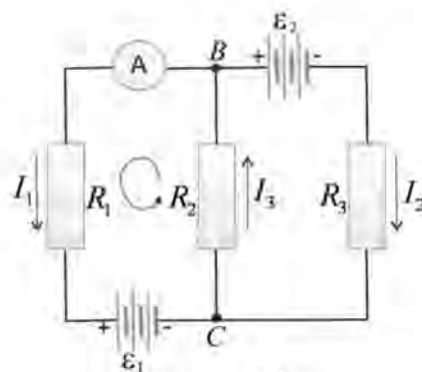
$$\mathcal{E}_1 = 110 \text{ В}$$

$$\mathcal{E}_2 = 220 \text{ В}$$

$$R_1 = R_2 = 100 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 500 \text{ Ом}$$

$$I_1 = ?$$



Расми 2.12

Ҳал

Мувофиқи қоидаи якуми Кирхгоф дар нуктаи С:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1)$$

аст. Татбиқи қоидаи дуҷуми Кирхгоф барои ду контури сарбаст, ки ҳар яке манбаъ ва ду муқовимат ( $\mathcal{E}_1, R_1, R_3$  ва  $\mathcal{E}_2, R_2, R_3$ ) - ро дарбар мегирад, дар ҳоли самти гардишро дар аввала ба муқобили рафти ақрабаки соату дар контури дигар ба рафти ақрабаки соат интиҳоб кардан ду муодилаи зеринро медиҳад:

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_1; \quad I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_2 \quad (2)$$

ё

$$100I_1 + 500I_3 = 110; \quad 100I_2 + 500I_3 = 220. \quad (3)$$

Муодилаҳои (3) - ро аъзо ба аъзо ҷамъ мекунем:

$$100(I_1 + I_2) + 100I_3 = 330. \quad (4)$$

Бо дар назардошти (1) ин муодиларо ба намуди  $1100I_3 = 330$  оварда, қувваи ҷараёни  $I_3$  - ро муайян карда метавонем:

$$I_3 = \frac{330}{1100} = 0,3 \text{ А.}$$

Акнун бо истифодаи муодилаи якуми (3) дарёфтани  $I_1$ , ки онро амперметр нишон медиҳад, душвор нест:

$$I_1 = \frac{110 - 500I_3}{100} = \frac{110 - 150}{100} = -0,4 \text{ А.}$$

Аломати минус дар қимати  $I_1$  далели он аст, ки самти дар расми 2.12 интиҳобкардаи  $I_1$  ба асл муқобил будааст.

Ҷавоб:  $I_1 = -0,4 \text{ А.}$

## §2.6. Намуди дифференсиалии қонунҳои Ом ва Ҷоулу Ленс

Қонуни Ом дар намуди (2.16) ва формулаи (2.18) танҳо барои ноқилҳои цилиндришакл татбиқ карда мешаванд. Вале дар амалия масъалаҳои дарёфтани қувваҳои ҷараён дар ноқилҳои пахнову



шаклашон гуногун, масалан электролитхо, ки андаруни ваннахо чойгиранд, ба миён меоянд. Дар ин мавридхо формулаҳои зикрѐфта созгор нестанд. Ҳамин аст, ки қонуни Омро дар намуди дигар пешниҳод мекунанд ва он барои ҳалли масъалаҳои ҳисобу китоби ҷараён дар муҳитҳои ҷараёнгузари шаклашон ихтиѐрӣ мувофиқ бошад.

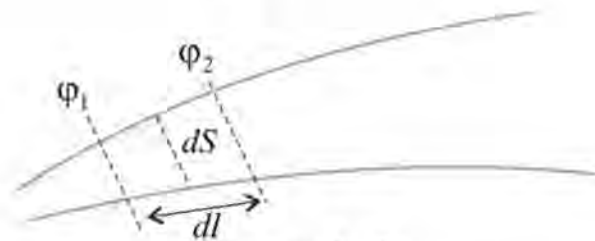
Фарз мекунем, ки муҳити ҷараёнгузар шакли дар расми 2.13 тасвирѐфта дорад.

Дар китъаи начандон қалони дарозиаши  $dl$  ду сатҳи эквипотенсиалии потенциалҳои  $\varphi_1$  ва  $\varphi_2$ -ро фикран ҷудо мекунем. Агар масоҳати бурришгоҳи миёнҷойи муҳит  $dS$  бошад. Қонуни Ом (2.16) ва формулаи (2.18) - ро дар ин маврид ба намуди:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\rho \left( \frac{dl}{dS} \right)}$$

пешниҳод карда метавонем. Бузургии ба ном *нокилияти хосро*, ки одатан онро бо ҳарфи  $\gamma$  ишорат мекунанд:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (2.41)$$



Расми 2.13

ворид сохта ба этибор мегирем, ки қувваи ҷараён тавассути зичии ҷараён  $j$ :

$$I = jdS$$

ва шадидияти майдони электрӣ:

$$|\vec{E}| = -\frac{d\varphi}{dl}$$

мебошанд. Аз ин рӯ қонуни Ом намуди зерин мегирад:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}. \quad (2.42)$$

Дар ин ифода дар назар дошта шуд, ки зичии ҷараён ва шадидият бузургҳои векторианд ва андаруни муҳитҳои ҷараёнгузари изотропӣ (хосиятҳои онҳо дар ҳама самтҳо бефарқ) дар ҳамон як нуқта ҳамсамтанд, ҳарчанд дар муҳитҳои анизотропӣ (муҳитҳое, ки хосиятҳои онҳо дар самтҳои гуногун тафовут доранд), масалан, дар аксар кристаллҳо векторҳои  $\vec{j}$  ва  $\vec{E}$  ҳамсамт набуданашон мумкин аст.

Таносуби (2.42) ҳамчун *намуди дифференсиалии қонуни Ом* дониста мешавад ва он аз (2.16) - *намуди интегралӣ қонуни Ом* фарқ мекунад, зеро ҳолати электрии муҳитро дар ҳамон як нуқта тавсиф медиҳад.

**Масъалаи 2.7** Аз ноқили мисини диаметраш 2,0 мм чараёни куввааш 5,0 А чорист. Зичии чараён ва шадидияти майдони электрӣ андаруни ин ноқил муайян карда шавад.

Маълумот:

$$d = 2,0 \text{ мм} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$I = 5 \text{ А}$$

$$\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$j - ? \quad E - ?$$

Ҳал

Мувофиқи таъриф:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{I}{\pi d^2} = \frac{4I}{\pi d^2} =$$

$$= \frac{4 \cdot 5}{3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2} \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \approx 1,6 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

Аз ифодаи намуди дифференсиалии қонуни Ом (2.42) бармеояд, ки:

$$E = \rho \cdot j = 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 1,6 \cdot 10^6 \text{ В/м} = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ В/м}$$

мебошад ва аз ин натиҷа маълум мешавад, ки бо таъсири майдонҳои хеле суст ҳам чараён ба вучуд овардан мумкин аст.

Ҷавоб.  $j \approx 1,6 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ ;  $E = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ В/м}$ .

Акнун қонуни Ҷоулу Ленс (2.30)-ро низ дар намуди дифференсиалӣ пешниҳод мекунем. Барои ин (2.30)-ро ба порчаи хеле хурди муҳити чараёнгузари масоҳати арзиаш  $dS$  ва дарозияш  $dl$  татбиқ менамоем:

$$\delta Q = (jdS)^2 \rho \frac{dl}{dS} dt = \gamma E^2 dl dS dt$$

Агар ба эътибор гирем, ки  $dl dS = dV$  -элементи хурди ҳаҷми муҳити чараёнгузар мебошад ва

$$w = \frac{\delta Q}{dV dt} \quad (2.43)$$

миқдори гармиест, ки дар муддати 1 с дар воҳиди ҳаҷми муҳит хориҷ мегардад, яъне *зичии иқтидор* мебошад. Ҳамин аст, ки қонуни Ҷоулу Ленсро дар намуди дифференсиалӣ:

$$w = \gamma E^2 \quad (2.44)$$

мебошад.

## §2.7. Назарияи классикии электронӣ

Бо мақсади муқаррар кардани табиати чараёни электрӣ олими олмонӣ К. Рикке (1845-1915) аз се цилиндри якандозаи сатҳи асосҳояшон хеле суфтаи пай дар пайи дар контакт (тамос) - и хуби электрӣ будаи алюминӣ, сипас мисин ва боз алюминӣ дар тӯли анқариб як сол (с. 1901) чараёни электрии дойимӣ сар дода, аз онҳо умуман бо қадри  $3,5 \cdot 10^6 \text{ Кл}$  заряд гузаронд. Вале нақли модда ошкор нагардид. Дар цилиндриҳо ғайр аз андаруни якдигар воридшавии диффузиони моддаҳо дигар тағйироте боқӣ намонд. Маълум гардид, ки чараён дар ноқилҳои металлӣ ҳаракати атомҳо (дурусттараш ионҳо) нест.

Олимони рус Л.И. Манделштам (1879-1944) ва Н.Д. Папалекси (1880-1947) соли 1911 нӯғҳои ноқили дар шакли ғалтак печондашударо ба телефон пайвастанду ғалтакро дар атрофи меҳвараш бо суръати калон гардиш дода, якбора аз ҳаракат боздоштанд ва аз телефон гузаштани ҷараёни кӯтоҳмуддатро ошкор сохтанд (дар ғӯшаки телефон садои хашар-хушур шунида шуд). Аз ин таҷриба олимони хулоса гирифтанд, ки дар металл зарраҳои озоди зарядноке ҳастанд ва онҳо баъди аз гардиш боздоштани ғалтак (чун одамони дар автобус ростистода хангоми фаврӣ тормоз хӯрдани он) ба туфайли инерсия ҳаракаташонро муддате идома медиҳанд. Вале ин таҷриба имкон надод, ки табиати он зарраҳо муқаррар карда шавад.

Олими амрикоӣ Р.Ч. Толмен (1881-1948) таҷрибаи Манделштаму Папалекси ва аз ин пештар гузаронидаи ҳамватанаш В. Стюарт (1828-1887)-ро такмил дода, с. 1916 ба ҷойи телефон ғалванометри ҳассосро васл сохт ва миқдори заряди ҳос ( $q/m$ )-и зарраҳои озоди тавассути инерсия ҳаракатмандро ҷен кард. Маълум гардид, ки заряди ҳоси он аз зарраҳо ба электронҳои ханӯз с. 1897 кашф кардаи олими англис Ч.Ч. Томсон (1856 - 1940) мувофиқ меояд. Ҳамин тавр ҷараёни электриро дар металлҳо ташкил додани ҳаракати электронҳо муқаррар карда шуд.

Натиҷаҳои таҷрибаҳои дар боло зикрфтаро ба эътибор гирифта, олими олмонӣ П.К. Друде (1863-1906) асосҳои назарияи классикии электронии борҳо ёдрасшударо бунёд кард (с. 1900). Минбаъд назарияи электрониро олими нидерландӣ Х.А. Лоренс (1858-1926) такмил дод. Ҳамин аст, ки назарияи классикии электрониро назарияи Друде - Лоренс низ меноманд.

Назарияи классикии электронӣ мавҷудияти электронҳои озодро чунин шарҳ медиҳад. Хангоми ташаккули панҷараи кристалии металл дар натиҷаи ҳамтаъсирот атомҳо як ё якчанд электронҳошонро гум карда, яъне ба ионҳои мусбат табдил ёфта дар қуллаҳои панҷара ҷойгир мешаванд. Электронҳои аз таъсири ядроҳо раҳогардида дар ҳаҷми порчаи металл ҳамчун «моликияти умумӣ» парешон мешаванд ва ба ҳаракати бетартибонаи ҳароратӣ медароянду чун гази идеалӣ рафтор мекунанд. Агар ҳатто ҳар як атом яктои электронҳои озодро ба вучуд орад ҳам, шумораи ин гуна электронҳо дар воҳиди ҳаҷм, яъне консентратсияи онҳо хеле бузург мешавад (чунончи, дар мис  $n = 8,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$  аст). Ба ин гази идеалии электронӣ ҳама қонунҳои назарияи молекулавӣ-кинетикиро татбиқ кардан раво аст. Масалан, суръати ҳаракати ҳароратии электронҳо

$$g = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$
 дар температураи хона ( $T = 300 \text{ К}$ ,  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ ) анқариб  $10^5 \text{ м/с}$  буданаш маълум мегардад, ки назар ба суръати ҳаракати бетартибонаи электронҳо хангоми аз металл гузаштани ҷараён  $g$  (ба масъалаи 2.1 ниг) хеле зиёд аст.

Тавассути ҳаракати ҳароратӣ электронҳо аз як бархӯрд бо ионии панҷараи кристаллӣ то бархӯрди дигар дарозии миёнаи дави озод  $\langle l \rangle$  - ро дар тӯли вақти:

$$\tau = \frac{\langle l \rangle}{g + g_T} = \frac{\langle l \rangle}{g_T}$$

мегузарад.

Бо сабаби  $\mathcal{G} \ll \mathcal{G}_T$  буданаш ҳангоми дар майдони электрии шадидияташ  $E$  ҳаракати ботартибона кардани электрон бузургҳои  $\langle l \rangle$  ва  $\langle \tau \rangle$  тағйироти назаррасе намепазиранд.

Назарияи классикии электронӣ бисёр қонуниятҳои ҷараёни дойими сифатан хуб шарҳ медиҳад. Бо баъзеи онҳо шинос мешавем.

**Қонуни Ом.** Ҳангоми дар нӯғҳои ноқил гузоштани фарқи потенциали бетағйир ба электрон қувваи дойимии  $F = eE$  таъсир мекунад ва дар натиҷа он дорои шитоби:

$$a = \frac{eE}{m}$$

мешавад. Дар ҳоли бархӯрд бо ион электрон тамоми энергияи кинетикии бо таъсироти майдон дорро гашташро ба ион медиҳад. Дар натиҷа электрон то бархӯрди навбатӣ собитшито ба ҳаракат карда, суръаташро аз 0 то  $\mathcal{G}_{\max}$  меафзояд:

$$\mathcal{G}_{\max} = a\tau = \frac{eE}{m}\tau. \quad (2.45)$$

Ин гуна ҳаракати аз як бархӯрд то бархӯрди дигар қитъа-қитъаи электронро чун ҳаракати мунтазами суръаташ ба суръати миёнаи ҳаракати собитшито ба баробар ҳисобидан раво аст:

$$\langle \mathcal{G} \rangle = \frac{0 + \mathcal{G}_{\max}}{2} = \frac{eE\tau}{2m} = \frac{e\langle l \rangle}{2m\mathcal{G}_T} E.$$

Аз ин рӯ зичии ҷараён мувофиқи (2.7):

$$j = ne\langle \mathcal{G} \rangle = \frac{ne^2\langle l \rangle}{2m\mathcal{G}_T} E \quad (2.46)$$

буданаш маълум мегардад. Ин ифодаҳо бо қонуни Ом дар намуди дифференсиалӣ (2.42) муқоиса карда, барои ноқилият ва муқовимати хос формулаҳои зеринро меёбем:

$$\gamma = \frac{ne^2\langle l \rangle}{2m\mathcal{G}_T}; \quad \rho = \frac{2m\mathcal{G}_T}{ne^2\langle l \rangle}. \quad (2.47)$$

Аз ин ҷо ҳулосаи муҳиме бармеояд, ки сабабгори муқовимати ноқилҳо бархӯрдҳои сершумори электронҳо бо ионҳо ( $n = 10^{28} \div 10^{29} \text{ м}^{-3}$ ) ва байни худ мебошанд, ки дар натиҷа электронҳо дар айни замон аз бурришҳои ноқил мувофиқан камтар мегузаранд.

**Қонуни Ҷоулу Ленс.** Ҳангоми бархӯрд бо ион, тавре ки зикр ёфт, электрон энергияи кинетикии дар тӯли вақти  $\tau$  дорро гашташро ба ион медиҳад:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{m\mathcal{G}_{\max}^2}{2} = \frac{m}{2} \left( \frac{eE\tau}{m} \right)^2 = \frac{e^2\tau^2}{2m} E^2. \quad (2.48)$$

Ҳамин аст, ки ионҳо ба ҳаракати лапшишноки амплитудааш афзоянда медароянд ва дар натиҷа металл гарм мешавад.

Энергияи (2.48) - ро ба консентратсияи электронҳо  $n$  зарб ва тӯли вақти  $\tau$  тақсим карда, миқдори гармии дар воҳиди ҳаҷми ноқил дар воҳиди вақт хориҷ гардида, яъне зичии иқтидорро меёбем:



$$w = \frac{ne^2\tau}{2m} E = \frac{ne^2 \langle l \rangle}{2m\vartheta_T} E^2 = \gamma E^2. \quad (2.49)$$

Дар натиҷа қонуни Ҷоулу Ленс (2.44) дар намуди дифференциалӣ ҳосил мешавад.

**Қонуни Видеману Франс.** Металлҳо қобилияти хуби ҷараёну хамзамон гармигузаронӣ доранд. Ба ин муносибат олимони олмонӣ Г. Видеман ва Р. Франс с. 1853 тавассути таҷриба қонунро кашф карданд, ки номи онҳоро гирифтааст. Мувофиқи ин қонун нисбати коэффитсиенти гармигузаронӣ ( $\lambda$ ) бар ноқилияти хос ( $\gamma$ ) барои ҳама металлҳо дар ҳамон як температура қимати якандоза дошта, ба температураи термодинамикӣ ( $T$ ) мутаносибан меафзояд:

$$\frac{\lambda}{\gamma} = \beta T. \quad (2.50)$$

Дарвоқеъ, мувофиқи назарияи молекулавӣ-кинетикӣи гази идеалӣ коэффитсиенти гармигузаронӣ:

$$\lambda = \frac{1}{3} mn \vartheta_T \langle l \rangle c_V \quad (2.51)$$

мебошад, ки дар ин ҷо ҳамчун зичии газ ҳосили зарби  $mn$  омадааст ва агар гармиғунғоиши хоси газ:

$$c_V = \frac{3}{2} \frac{k}{m} \quad (2.52)$$

буданаширо ба эътибор гирем, барои  $\lambda$  ифодаи

$$\lambda = \frac{1}{2} n \vartheta_T k \langle l \rangle \quad (2.53)$$

ҳосил мешавад (дар ин ҷо  $k$ -дойимии Болсман аст). Азбаски

$$\frac{m \vartheta_T^2}{2} = \frac{3}{2} k T$$

мебошад, таносуби зерин ҷой дорад:

$$\frac{\lambda}{\gamma} = 3 \left( \frac{k}{e} \right)^2 T = 2,23 \cdot 10^{-8} T, \quad (2.54)$$

ки тасдиқи қонуни Видеман - Франс аст. Дар он ҳамчун коэффитсиенти мутаносибӣ:

$$\beta = 3 \left( \frac{k}{e} \right)^2 = 2,23 \cdot 10^{-8}$$

омадааст, вале ин қимат ба натиҷаи таҷриба чандон саҳеҳ мувофиқат намекунад. Дар асоси назарияи муосири квантӣ:

$$\beta = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k}{e} \right)^2 = 2,45 \cdot 10^{-8}$$

мебошад, ки қимати таҷрибавиро пурра тасдиқ мекунад. Хотирнишон кардан бамаврид аст, ки назарияи классикӣи электронӣ ғайр аз ин камбудӣ дар шарҳи таносуби байни муқовимати хос  $\rho$  ва температура  $T$  натиҷаи нодуруст мебахад. Дарвоқеъ, аз (2.47) бармеояд, ки  $\rho$  ба  $\vartheta_T$

ва дар навбати худ  $\vartheta_\tau$  ба  $\sqrt{T}$  мутаносиб мебошад, ҳол он ки таҷриба мувофиқи (2.19)  $\rho$  ба  $T$  мутаносиб буданаширо нишон медиҳад. Зиёда аз он, аз қимати таҷрибавии  $\rho$  бармеояд (ба чадвали § 2.3 овардашуда ниг.), ки мувофиқи назарияи классикии электронӣ тӯли вақти аз як бархӯрд бо ион то бархӯрд бо иони дигар  $\tau$  бояд тақрибан  $10^{-14}$  с ва аз ин рӯ дар ҳоли  $\langle \vartheta \rangle = 10^{-4}$  м/с будан дарозии роҳи озоди электронҳо бояд  $\langle l \rangle = \langle \vartheta \rangle \tau \approx 10^{-18}$  м шавад, ки назар ба масофаи байни ду иони наздиктарин, яъне даври панҷара  $d \approx 10^{-10}$  м хеле хурд аст. Ин номувофиқатӣ чунин шарҳ меёбад. Дар асоси назарияи квантӣ электронҳо дар металл бо суръатҳои  $\vartheta = 0,01c$  ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с - суръати рӯшноӣ дар вакуум, чунончӣ, дар мис  $\vartheta \approx 2 \cdot 10^6$  м/с) ҳаракат мекунанд. Аз ин рӯ электронҳои озодро дар металл чун гази идеалӣ пиндоштан начандон ба воқеият мувофиқ аст.

## §2.8. Ҷараёни электрӣ дар моеъҳо

Ҳангоми аз ноқилҳои металлӣ гузаштани ҷараёни электрӣ, тавре ки зикр ёфт, ягон тағйироти кимиёвие рӯй наметрифтад. Вале дар мавриди аз маҳлулҳои намак, ишқор (асос), туршӣ (кислота), инчунин ғудохтаи намакҳо сар додани ҷараён баъзе равандҳои кимиёвӣ сурат мегиранд. Маҳлулҳои зикр ёфта *электролитҳо* (аз суханҳои юнонии электр ва *lytos*-таҷзия ё ба ҷузъҳо ҷудошавӣ) ном гирифтаанд ва онҳоро ба *ноқилҳои ҷинси дуҷум* мансуб медонанд (бар хилофи ноқилҳои ҷинси якҷум-ноқилҳои металлӣ), зеро ҳангоми гарм кардани электролитҳо ноқилиятшон меафзояд, яъне муқовимати онҳо кам мешавад.

Барои бо тағйиротҳои кимиёвӣ дар электролитҳо шинос шудан равандҳои дар маҳлули обии намак, ишқор ва туршиҳо ба вучуд меомадаро баррасӣ менамоем. Дар ин навъ маҳлулҳо ҳанӯз ҷараён нагузашта бо таъсири майдони электрии молекулаҳои кутбноки об (ин гуна молекулаҳо, тавре ки дар §1.4 хотиррасон намудем, чун диполи электрӣ қабул намудан равост) таҷзияи молекулаҳои электролитҳо ба вучуд меояд, ки *диссоциатсияи электролитӣ* (аз юнони dissociation - канда ё ҷудошавӣ) ном дорад. Диссоциатсия ва дараҷаи он, яъне теъдоди молекулаҳо, ки дар моддаи маҳлулшуда ба ионҳо ҷудо гардидаанд, ба температура, консентратсияи маҳлул ва нуфузпазирии диэлектрии моеи маҳлулкунанда  $\epsilon$  (дар об  $\epsilon = 81$  буданаширо хотиррасон менамоем) инчунин хосиятҳои кимиёвии модда вобаста аст. Чунончӣ, ҳама туршиҳо дар маҳлули обӣ иони мусбати гидроген ( $H^+$ ) - ро медиҳанд. Масалан туршии гӯгирд ( $H_2SO_4$ ) мувофиқи муодилаи:



туршии намакин ( $HCl$ ) бошад, ба тарзи:



диссоциатсия мешавад.

Барои асосҳо ташкилҳои гидроксил ( $OH$ ) хос аст. Чунончӣ:



Дар ин муодилаҳо аломати  $\leftarrow$  ҳодисаи баръакси диссоциатсия-рекомбинатсияи ионҳо-аз ионҳои мусбату манфӣ ташкил ёфтани молекулаҳои нейтралро мефаҳмонад (аз лотиниҳои ге-амали баръакс ва combinatio - пайваст шудан истилоҳи рекомбинатсия ҳосил гардидааст).

Агар ба зарфи электролитдошта (ваннаи электролитӣ) ду лавҳаи металлӣ, ки *электродҳо* (якero ба кутби мусбати манбайи чараёни дойимӣ васл месозанду онро *анод*, дигарero ба кутби манфии он пайваст мекунанд ва *катод*) меноманд гӯтонда онҳоро ба манбайи чараёни дойимӣ (расми 2.14) васл намоем, аз маҳлул чараёни электрӣ мегузарад (онро бо ёрии амперметри  $A$  қайд кардан мумкин аст): ионҳои мусбат сӯйи катоду ионҳои манфӣ ҷониби анод ба ҳаракати ботартибона мебароянд. Пас, *ноқилияти* электролитҳо *ионӣ* мебошад. Дар ин маврид гузаштани чараён пайваста бо интиқоли модда сурат мегирад: ионҳои мусбат ба катод расида, камбудии электронҳояшонро пур мекунанд ва ба атом ё молекулаи нейтралӣ табдил меёбанду дар сатҳи катод менишинанд (дар кимиё ин ҳодиса *реаксияи барқароршавӣ* ном гирифтааст). Айнан ҳамин тарз, ионҳои манфӣ электронҳои зиёдатишонро ба анод мебаранду дар натиҷа атом ё молекулаи нейтралӣ ҳосил мекунанд ва дар сатҳи он ҷойгир мешаванд (*реаксияи оксидшавӣ*). Ҳамин аст, ки дар электродҳо модда ҷудо мегардад. Ин ҳодиса *электролиз* (аз суханҳои юнонии *электр* ва *lysis* - таҷзия) ном дорад.

Қайд кардан бамаврид аст, ки А. Волта ханӯз с. 1800 электролизи намак, олимони англис Э. Карлейл (1768-1840) ва У. Николсон (1753-1815) обро электролиз карда, ба электрокимиё асос гузошта буданд.

Олими англис М. Фарадей (1791-1867) ҳодисаи электролизро омӯхта, ба тарзи таҷрибавӣ (1833-1834) муқаррар кард, ки массаи ҳар гуна моддаи ҳангоми электролиз дар электрод ҷудошуда ба миқдори заряде, ки аз электролит мегузарад, мутаносиби роста аст:

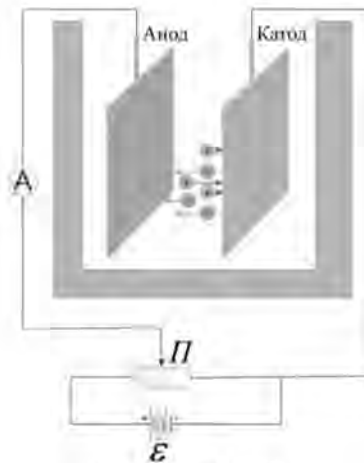
$$m = kQ. \quad (2.58)$$

Дар ин формула, ки чун *қонуни якуми Фарадей оид ба электролиз* маъмул мебошад,  $k$ -коэффитсиенти мутаносибӣ буда, *эквиваленти электрокимиёвии модда* ном дорад. Он ададан ба массаи моддае баробар аст, ки ҳангоми аз электролит гузаштани заряди  $q = 1 \text{ Кл}$  дар электрод ҷудо мешавад ва дар СИ бо  $\text{кг/Кл}$  - ҳо ифода меёбад. Эквиваленти электрокимиёвӣ ба ҳар як модда хосса аст. Чунончӣ, барои нукра- $k = 1,18 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$ , мис- $k = 0,3294 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$ , гидроген- $k = 0,1045 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$ , оксиген- $k = 0,08293 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$  буданаширо ба тарзи таҷрибавӣ муқаррар кардаанд.

Агар ба эътибор гирем, ки барои чараёни дойимӣ  $q = It$  ( $I$ -қувваи чараён,  $t$ -тӯли вақти аз маҳлул гузаштаи ин чараён) мебошад, формулаи (2.58)-ро ба намуди:

$$m = kIt \quad (2.59)$$

пешниҳод карда метавонем.



Расми 2.14

Фарадей инчунин кашф кард, ки эквиваленти электрохимии модда ба массаи молӣ ( $M$ ) ва валентнокии модда ( $Z$ ) вобаста аст:

$$k = C \frac{M}{Z}. \quad (2.60)$$

Дар ин ҷо  $C$ -коэффитсиенти мутаносибӣ буда, бузургии баръакси он  $F = 1/C$ -адади Фарадей ном дорад. Ифодаи:

$$X = \frac{M}{Z} \quad (2.61)$$

эквиваленти кимиёвӣ модда ёд мешавад. Аз ин рӯ нисбати эквиваленти кимиёвӣ барои ҳама моддаҳо ҳамон як кимат дорад:

$$\frac{k}{X} = \frac{k_1}{X_1} = \frac{k_2}{X_2} = \dots = const = \frac{1}{F}. \quad (2.62)$$

Ифодаи (2.62) чун қонуни дуҷуми Фарадей оид ба электролиз маъмул аст ва дар он  $F$ -адади Фарадей ном гирифтааст. Ҳар ду қонуни электролизро муттаҳид кардан душвор нест:

$$m = \frac{M}{ZF} q = \frac{M}{nF} It. \quad (2.63)$$

Аз ин рӯ, агар  $q$ -миқдори заряде бошад, ки ҳангоми аз маҳлул гузаштани он массаи дар электрод ҷудошудаи моддаи яқвалентӣ ( $Z=1$ ) ба массаи молии ин модда баробар гардад,  $q=F$  буданаширо муқаррар менамоем. Ҳамин тариқ, адади Фарадей миқдори зарядеро муайян мекунад, ки ҳангоми аз маҳлул гузаштани он дар электрод як мол модда ҷудо мешавад. Таҷрибаҳо нишон доданд, ки:

$$F = 96484,5 \frac{Кл}{мол} \approx 96500 \frac{Кл}{мол} \quad (2.64)$$

мебошад.

Назарияи электронӣ имкон медихад, ки қонунҳои ба тарзи таҷрибавӣ кашфкардаи электролиз шарҳ дода шаванд. Дарвоқеъ, массаи моддаи дар электрод ҷудогардида ба ҳосили зарби массаи ҳар як ион  $m_0$  ва теъдоди ионҳо  $N_i$ , ки дар тӯли вақти гузаштани ҷараён  $t$  ба электрод омада мерасанд:

$$m = N_i m_0 \quad (2.65)$$

ва массаи ион бошад, ба



$$m_0 = \frac{M}{N_A} \quad (2.66)$$

баробар аст ( $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ мол}^{-1}$ -дойимии Авогадро). Аз тарафи дигар, теъдоди ионҳои ба электрод омадарасида:

$$N_i = \frac{q}{q_0}, \quad (2.67)$$

ки дар он  $q$ -миқдори заряди дар тӯли вақти  $t$  аз электролит гузаштаву  $q_0 = ne$  заряди ион ( $e$ -заряди элементарӣ ё бунёдӣ) мебошад.

Ҳангоми диссоциатсияи молекулаҳои аз атомҳои эквалентӣ иборатбуда ( $n=1$ ) ионҳои якзарядӣ ташкил меёбанд. Масалан, дар мавриди диссоциатсияи молекулаҳои намаки ошӣ ( $NaCl$ ) ионҳои  $Na^+$  ва  $Cl^-$ , диссоциатсия молекулаҳои даҳани фаранг ( $CuSO_4$ ) боиси ба вучуд омадани ионҳои дузарядии  $Cu^{++}$  ва  $SO_4^{--}$  мегарданд ( $n=2$ ).

Ба формулаи (2.56) ифодаҳои (2.66) ва (2.67)-ро гузошта ба эътибор мегирем, ки  $q = It$ ,  $q_0 = Ze$  мебошад, аз ин рӯ таносуби зеринро ҳосил мекунем:

$$m = \frac{M}{ZeN_A} It. \quad (2.68)$$

Пас, эквиваленти электрокیمیёвӣ:

$$k = \frac{1}{eN_A} \frac{M}{n} \quad (2.69)$$

ва адади Фарадей:

$$F = N_A e \quad (2.70)$$

буданаш маълум мегардад. Дар асоси электролиз бузургии заряди элементарӣ  $e$ -ро ёфтани имконпазир аст:

$$e = \frac{F}{N_A} = \frac{M}{mZN_A} It. \quad (2.71)$$

Бояд хотиррасон кард, ки олими ирландӣ С.Ч. Стоней (1826-1911) аввалин шуда с. 1874 гоҷи қимати дискретӣ (аз сухани лотинии discretus-алоҳида, иборат аз қисмҳои алоҳида) доштани миқдори электрро (на зарраро!) пайхаст намуда (с. 1881), барои заряди элементарӣ истилоҳи «электрон» - ро пешниҳод карда буд (с. 1891).

Ҳамин тариқ, ҷараёни электрӣ дар электролитҳо аз ҳаракати муқобилсамти ионҳои мусбату манфӣ иборат мебошад. Вале бояд қайд кард, ки ҳар як ионро молекулаҳои об (маҳлулгардонанда) мепӯшонанд ва ба ном қабати гидратиро ташкил медиҳанд. Қабати гидратӣ рекомбинатсияи ионҳоро мушқил мегардонаду ҳаракати ионҳоро суст мекунад. Пас, амалан дар маҳлул на ион, балки курачаи аз иону қабати гидратии гирди онро печонида (мухтасар *солват*-аз сухани лотинии *solvere* -маҳлул кардан) мекӯчад. Ба ин гуна солват кувваҳои соиши дохилӣ, ки бузургиашонро ба суръати солват мутаносиб доништан равоаст ( $F_c = -r\mathcal{G}$ ,  $r$  - коэффитсиенти мутаносибист) ва дар майдони электрӣ кувваи  $F_s = qE$  низ таъсир мекунанд. Дар мавриди ба мувозинат омадани ин кувваҳо солват ба ҳаракати мунтазам мебарояду дар натиҷа аз электролит ҷараёни

дойимӣ мегузарад. Пас, дар ин маврид суръати ҳаракати солватҳо ба шадидияти майдони электрӣ мутаносиб мебошад:

$$\mathcal{G} = bE. \quad (2.72)$$

Коэффитсиенти мутаносибӣ  $b$  ҳаракатмандии ион ном гирифтааст. Ҳаракатмандӣ бо суръате муайян карда мешавад, ки ион дар майдони электрии шадидияташ  $1V/m$  ба он доро мегардад. Ҳамин аст, ки ҳаракатмандӣ дар СИ бо  $\frac{m^2}{c \cdot V}$  ифода меёбад. Ҳаракатмандии ионҳои гуногун фарқ доранд. Дар ҷадвал ҳаракатмандии ионҳои баъзе моддаҳо оварда шудаанд, ки онҳоро тавассути таҷриба муайян кардаанд.

Ҷадвали 5. Ҳаракатмандии баъзе ионҳо

Ион	$b, m^2/(c \cdot V)$	Ион	$b, m^2/(c \cdot V)$
$H^+$	$3,263 \cdot 10^{-7}$	$OH$	$1,802 \cdot 10^{-7}$
$K^+$	$0,669 \cdot 10^{-7}$	$Cl$	$0,677 \cdot 10^{-7}$
$Na^+$	$0,440 \cdot 10^{-7}$	$NO_3$	$0,639 \cdot 10^{-7}$

Зичии ҷараёни электрӣ дар электролит:

$$j = q_+ n_+ \mathcal{G}_+ + q_- n_- \mathcal{G}_- = qn\alpha(\mathcal{G}_+ + \mathcal{G}_-) = qn\alpha(b_+ + b_-)E = \gamma E \quad (2.73)$$

мебошад. Аз ин рӯ нокилияти ҳосил электролитҳоро чун

$$\gamma = qn\alpha(b_+ + b_-) \quad (2.74)$$

пешниҳод кардан раво аст, зеро ионҳо чуфт-чуфт ҳосил мешаванду  $q_+ n_+ = q_- n_- = qn\alpha$  аст ( $\alpha$ -коэффитсиенти диссоциатсия мебошад). Пас, ифодаи (2.73)-ро чун муодилаи қонуни Ом барои электролитҳо (дар шакли дифференциалӣ) маънидод карда метавонем.

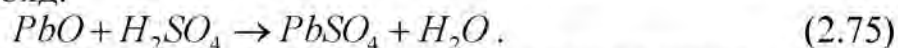
Акнун баъзе татбиқҳои техникаии электролизро хотиррасон менамоем.

Металли дар соҳаҳои гуногуни техника, хусусан авиатсия васеъ истифодашаванда-алюминийро маҳз тавассути электролиз истеҳсол мекунанд: аз боксит (ҳамчун ашёи хом) обро бадар андохта,  $Al_2O_3$  (гилҳок) ба даст мебароранду ба он криолит  $Na_2AlF_6$  (барои паст фурувардани температураи гудозиши гилҳок) омехта, сипас гилҳокро бо ёрии ҷараёни қуввааш даҳҳо килоампер мегудозанд (температура дар ин омехта то  $900^\circ C$  расонда мешавад). Ин гудохта чун электролит хизмат мекунад (ҳамин аст, ки заводҳои алюминиро, заводи алюминии тоҷик дар шаҳри Турсунзода яке аз онҳост, дар шафати электростансияҳои пуриктидор месозанд, масалан, НБО (ГЭС)-и Норақ, ки заводи алюминии ш. Турсунзодаро бо энергияи электрӣ таъмин менамояд, дорои иқтидори анқариб  $3 ГВт$  буданаширо хотиррасон мекунем).

Дар саноат металлҳоро бо ёрии электролиз тоза мекунанд. Ин раванд рафинатсия (аз фаронсавии raffiner-тоза кардан) ном гирифтааст: металли дорои унсурҳои бегона (ғашҳо)-ро ба сифати анод истифода карда, онро ба маҳлули ягон намаки ин металл ё гудохтааш мегӯтонанд ва чун катод (одатан графит) гирифта

мешавад. Дар натиҷа метали тоза ба руйи графит менишинаду омехтаҳои ғайр дар маҳлул таҳшин мегарданд.

Амали аккумуляторҳо, ки вазифаи онҳо анқариб ба ҳама маълум мебошад, ба ҳодисаи электролиз асос ёфтааст. Ҳангоми тайёр кардани аккумуляторҳои техникӣ ба қуттии панҷараи сурбӣ ҳамираи аз  $PbO$ -окси сурб омода сохта мемоланд. Дуто аз ин гуна лавҳаҳо ба маҳлули туршии сулфат ( $H_2SO_4$ ) меғўтонанд. Дар натиҷа реаксияи зерин ба вуҷуд меояд:



Агар ба ин гуна лавҳаҳои ба маҳлул ғўтонидашуда фарқи потенциалҳои доимӣ (аз манбаи беруна) васл намоем (ин амал заряднок кардани аккумуляторҳо ном дорад), электролиз сурат мегираду дар анод оксиген, дар катод гидроген хориҷ мегардад. Дар натиҷа сурб ба перекс (диоксид)-и сурб табдил меёбад. Ҳамин аст, ки электродҳо гуногунчинса шудаву дар байни онҳо фарқи потенциалҳои анқариб  $2\text{ В}$  ба вуҷуд меояд ва ҳангоми ба истеъмолгари энергия васл кардани онҳо ҷараёни безарядшавӣ сурат мегираду сурб бо туршии сулфат ба реаксия даромада, сулфиди сурбро ташкил менамояд.

Бо усули электролитӣ сатҳи як металл бо қабати тунуки метали дигар асосан бо мақсади аз зангзанӣ (коррозия) эмин доштан пӯшонда мешавад: никеландудан, хромандудан, нукрапӯш кардан мисолҳои ин гуна раванд мебошанд. Барои ин метали пӯшонанда чун анод, маснуоти рӯйпӯшшаванда ба сифати катод хизмат мекунанд.

Дар саноати полиграфӣ барои чопи барҷаста лавҳаи дар рӯяш ҳарфҳо чидашуда (қолаби чопӣ-клише), инчунин муссаваҳо бо қабати ғафси метали (оҳан, руҳ, сурб, алюминий) мепӯшонанд, ки бо зудӣ кӯчонда мешаванд. Ин усул *галванопластика* (аз номи олими номбурдаи итолиёвӣ Л. Галвани ва юнонии plastik ё-гачқорӣ, ҳайкалтарошӣ, ки бо ҷараёни элементи галванӣ алоқаманд буданашро нишон медиҳад) ном гирифтааст. Ғайр аз ин, тавассути усули электролитӣ бо қабати одатан метали, масалан биринҷӣ (хӯлаи мис бо қалъагӣ ва металлҳои дигар-сурб, алюминӣ) сир давондани ҳайкалҳо, нимпайкарҳо, ки онҳо аввало аз гач ё оҳану бетон тайёр мекунанду сипас барои гузаштани ҷараён бо графит мепӯшонанд. Ин усул *галваностегия* (аз юнони stegē-андудан) ном дорад.

**Масъалаи 2.8.** Ҳангоми бо тарзи электролитӣ истехсол кардани алюминий ваннаҳои истифода мешаванд, ки таҳти шиддати  $U=5\text{ В}$  амал мекунанд. Агар аз ванна ҷараёни қуввааш  $I=60\text{ кА}$  сард дода шавад, барои истехсоли  $m=1\text{ т}$  алюминий чанд вақт лозим аст ва сарфи энергияи электрӣ дар ин раванд чӣ қадар мебошад?

Маълумот:

$$U = 5 \text{ В}$$

$$I = 60 \text{ кА} = 6 \cdot 10^4 \text{ А}$$

$$m = 1 \text{ т} = 10^3 \text{ кг}$$

$$k = 0,093 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$$

$$t - ? \quad W - ?$$

Ҳал

Мувофиқи қонуни якуми электролиз:

$$m = kIt$$

аст. Аз ин рӯ:

$$t = \frac{m}{kI} = \frac{10^3 \text{ кг}}{0,093 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл} \cdot 6 \cdot 10^4 \text{ А}} = 1,8 \cdot 10^5 \text{ с} = 2,1 \text{ шабонарӯз}$$

Энергияе, ки дар ин истехсолот сарф мешавад:

$$W = IUt = 6 \cdot 10^4 \cdot 5 \cdot 1,8 \cdot 10^5 \text{ Ҷ} = 54 \cdot 10^9 \text{ Ҷ} = 15 \text{ МВт-соат}$$

аст.

Ҷавоб:  $t = 2,1$  шабонарӯз;  $W = 15$  МВт-соат.

**Маъалаи 2.9.** Чузъи мошинро бо қабати хроми ғафсиаш 50 мкм бояд пӯшонд. Агар барои ин сирдавонӣ меъёри зичии чараён 2 кА/м<sup>2</sup> бошад, аз ванна чанд вақт чараён сар додан лозим аст?

Маълумот:

$$h = 50 \text{ мкм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$k = 0,18 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$$

$$D = 7,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$j = 2 \text{ кА/м}^2 = 2 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$$

$$t - ?$$

Ҳал

Мувофиқи қонуни якуми электролиз:

$$m = kIt$$

мебошад. Массаро ба воситаи зичӣ ( $D$ ) ифода мекунем:  $m = DV$ , ки дар ин ҷо  $V$ -ҳаҷми қабати хромпӯш аст.

Агар ба эътибор гирем, ки ин ҳаҷм:

$$V = Sh$$

( $S$  - масоҳати чузъи мошин) мебошад, ифодаи зерин ҳосил мешавад:

$$DS h = kIt$$

Аз ин рӯ:

$$t = \frac{DS h}{kI} = \frac{Dh}{kj} = \frac{7,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{0,18 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл} \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2} = 1000 \text{ с} \approx 16,7 \text{ дақ.}$$

мебошад.

Ҷавоб:  $t = 1000 \text{ с} \approx 16,7 \text{ дақ.}$

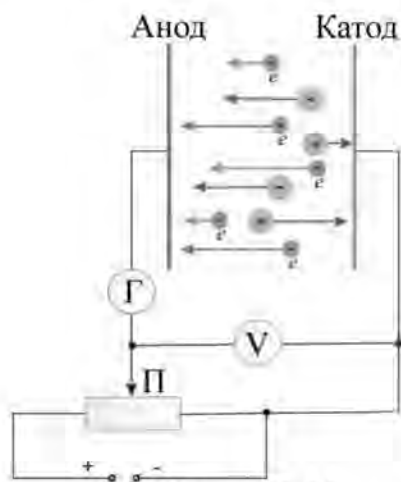
## §2.9. Чараёни электрӣ дар газҳо

Газҳо дар шароити муқаррарӣ чараёни электроиро намегузаронанд. Ин ҳол чунин шарҳ меёбад: атому молекулаҳои газ нейтраланду дар он зарраҳои озоди заряднок - ҳомилони чараён амалан вучуд надоранд. Вале бо таъсири беруна нокилияти газҳо



ба вучуд овардан мумкин аст. Чунончӣ, агар рӯяҳои конденсатори ҳамвори диэлектрикаш хаворо ба манбайи чараёни дойимӣ ҳатто тавассути галванометри хасос васл созем ҳам (расми 2.15), он гузаштани чараёно нишон намедихад.

Вале дар мавриди фазои байни рӯяҳо (онҳо акнун аноду катод мебошанд) ворид сохтани шӯълаи шамъ галванометр гузаштани чараёно қайд менамояд. Аз ҳисоби гармии шӯъла атому молекулаҳои газ дорои энергияи зиёди кинетикӣ гардида, ҳангоми бархӯрдҳои ҳамдигарӣ электронҳои бо ядроҳо суст алоқаманд аз таъсири онҳо мебароянду чун электронҳои озод рафтор мекунанд. Дар натиҷа атом ё молекула ба иони мусбат табдил меёбад. Баъзе атому молекулаҳо ин гуна электронҳоро «забт» мекунанду боиси ба вучуд омадани ионҳои манфӣ мешаванд. Ин ҳодиса *ионизатсия* (ионофарӣ) ном гирифтааст. Яъне шӯълаи шамъро чун манбайи ионофар шуморидан равост. Шуоъҳои радиоактивӣ ( $\alpha$ -,  $\beta$ -, ва  $\gamma$ -зарраҳо), шуоъҳои рентгенӣ ва ултрабунафш низ қобилияти хуби ионофарӣ доранд, ҳамин аст, ки онҳоро *афконишоти ионофар* меноманд.



Расми 2.15

Бо таъсири майдони электрии байни рӯяҳои конденсатор ионҳои манфӣ ва электронҳои озод суйи анод, ионҳои мусбат ҷониби катод ба ҳаракати бонизом медароянд (истилоҳи ион аз сухани юнонии  $\dot{\text{ion}}$ - ҳаракатманд омадааст). Дар натиҷа галванометр гузаштани чараёно нишон медиҳад. Аз ин рӯ чараёни электрӣ дар газҳо аз ҳаракати нигаронидаи ионҳои мусбату манфӣ инчунин электронҳои озод иборат мебошад. Ҳодисаи аз газҳо гузаштани чараёни электрӣ *тахлия* (аз арабии халос шудан, ба лафзи русӣ разряд-аз заряди электрӣ халосӣ ёфтани) ном гирифтааст, зеро ионҳои манфӣ ба анод расида, электронҳои забткардашонро ба он медиҳанду безаряд, яъне ба атом ё молекулаи нейтралӣ табдил меёбанд. Ионҳои мусбат ба катод наздик омада, камбудии электронҳояшонро пур мекунанду низ ба атом ё молекулаи нейтралӣ мубаддал мешаванд. Ин гуна тахлия дар ҳаҷми калон ҳангоми барқзанӣ рӯй медиҳад. Яъне, барқ ҳодисаи соф атмосферист: абрҳо дар натиҷаи гарму сардшавии қабатҳои гуногуни ҳаво таҳти фишор ба ҳаракат медароянд ва тавассути сойиши ҳамдигарӣ то дараҷаи баланд заряднок мешаванд (миқдори заряди онҳо то 200 Кл мерасад).

Ҳамин аст, ки хангоми барқзанӣ шиддати байни абрҳо инчунин абрҳою замин то  $10^9 В$  мерасаду ба рафти каналҳои муковиматашон бо ин ё он сабаб камшуда аз хаво чараёнҳои кувваашон то  $10^6 А$  мегузаранд. Яъне иқтидоре, ки хангоми ҳар як барқзанӣ вусъат меёбад ( $10^{14} \div 10^{15} Вт$ ) назар ба иқтидори НБО-и Норақ ( $3 \cdot 10^9 Вт$ ) миллионҳо маротиба зиёд аст. Дар натиҷа ба рафти каналҳо афрӯзиш ва гулдурӯси ба ҳама шинос-раёд ба вучуд меояд.

Барои тадқиқи хусусиятҳои чараёни электрӣ дар газҳо, яъне таҳлиияи газӣ схемаи занҷире, ки дар расми 2.15 тасвир ёфтааст, мусоид мебошад.

Пеш аз ҳама хотирнишон сохтан ҷоиз аст, ки энергияи камтарини барои ионизатсияи атому молекулаҳо заруриро *энергияи ионизатсия* ( $W_i$ ) меноманд. Энергияи ионизатсияро одатан бо электрон - волтҳо ифода мекунанд ( $1 эВ = 1,6 \cdot 10^{-19} Ҷ$  аст). Энергияи ионизатсияи атому молекулаҳои моддаҳои гуногун фарқ доранд. Масалан, энергияи ионизатсияи атоми гидроген  $13,6 эВ$  буданаш муқаррар карда шудааст. Ин атом аз ядро ва якто электрон таркиб ёфтааст ва барои он электронро аз таъсири ядро баровардан мувофиқи қонуни бақои энергияи газии гидрогениро ба дараҷае тафсондан мебояд, ки бо баробарии зерин муайян карда мешавад:

$$\frac{3}{2}kT = W_i = 13,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} Ҷ$$

(дар ин ҷо  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} Ҷ/К$ -дойимии Болсман аст). Аз ин рӯ

$$T \approx 10^5 К$$

буданаш маълум мегардад.

Дар ҷадвал энергияи ионизатсияи атому молекулаҳои баъзе моддаҳоро меорем, ки тавассути таҷрибаҳо муқаррар карда шудаанд.

Ҷадвали 6. Энергияи ионизатсияи баъзе моддаҳо

Модда	Na	Hg	Se <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ne	He
$W_i, эВ$	5,12	10,4	11,3	12,15	14,4	15,4	15,8	21,48	24,45

Фарз мекунем, ки *интенсивияти ионизатор*, яъне теъдоди ҷуфти ионҳое, ки дар воҳиди ҳаҷми газ дар воҳиди вақт тавлид меёбанд, бетағйир мемонанд. Ҷоиз аст хотиррасон намоем, ки ионизатсия бо ҳодисаи баръакс – рекомбинатсия-тавлид ёфтани атому молекулаҳои нейтралӣ низ ҷӯр мешавад. Акнун бо ёрии потенциометри  $\Pi$  (расми 2.15) шиддати байни аноду катодро тағйир дода (бузургии ин шиддатро тавассути вольтметр кайд кардан мумкин аст), *тавсифоти вольт-амперии таҳлиия*, яъне вобастагии кувваи чараёни аз газ гузаранда ба шиддатро баррасӣ менамоем. Ин тавсифот ба тарзи графикӣ дар расми 2.16 пешниҳод шудааст: ба кадри баланд шудани шиддат кувваи чараён тадричан, аввало хаттӣ (қитъаи  $OA$ ) меафзояд, яъне мувофиқи қонуни Ом тағйир меёбад. Ин гуна вобастагиро чун дар электролитҳо ба намуди:

$$j = ne(b_+ + b_-)E \quad (2.76)$$

пешниҳод кардан мумкин аст. Дар ин ҷо  $n$ -теъдоди ҷуфти ионҳое, ки дар воҳиди ҳаҷм дар воҳиди вақт ионизатор ба вучуд

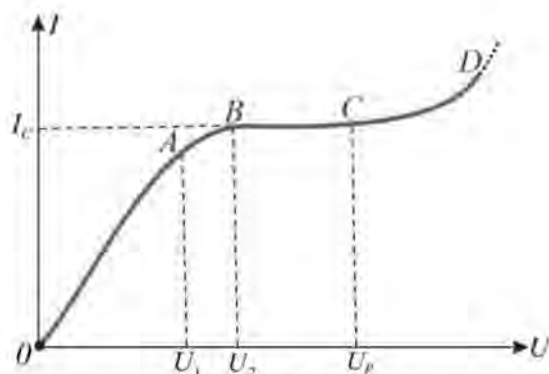
меорад,  $b_+$ ,  $b_-$  ҳаракатмандии ионҳои мусбату манфӣ ва электронҳо,  $E=U/d$ -шадидияти майдони байни электродҳо ( $U$ -шиддати байни онҳо,  $d$ -масофаи байни электродҳо) мебошад.

Дар китъаи  $AB$  рекомбинатсияи ионҳо хеле кам шуда меравад, ҳарчанд дар китъаи  $OA$  он назаррас буд. Сипас, дар китъаи  $BC$  қувваи ҷараён дигар ба шиддат вобаста нест: тамоми ҷуфти ионҳое, ки ионизатор ба вуҷуд меорад, бидуни рекомбинатсия ба электродҳо омада мерасанд. Қувваи ҷараёни ба ин китъа мувофиқро *ҷараёни сершуда* меноманд.

Зичии ҷараёни сершударо чун:

$$j_c = \frac{ned}{t} \quad (2.77)$$

пешниҳод кардан мумкин аст, ки дар он  $d$ -масофаи байни электродҳо мебошад.



Расми 2.16

Баъди шиддат аз қимати  $U_R$ , ки *шиддати раҳнаві* ном гирифтааст, гузаштан қувваи ҷараён якбора афзуда меравад. Тахлияе, ки то қимати  $U_R$  сурат мегирад, *тахлияи номустақил* дониста мешавад, зеро баробари қатъ ёфтани амали ионизатор ин тахлия хомӯш мегардад. Барои дар қиматҳои аз  $U_R$ -и шиддат баландтар якбора афзудани қувваи ҷараён ду омил нақши асосӣ мебозанд: 1) электронҳои озод дар майдони электрии пурқувват қадре шитоб мегиранд, ки дорои энергияи кинетикии барои ионизатсияи атому молекулаҳои газ кофӣ мешаванд ва дар натиҷа теъдоди зиёди ҷуфти ионҳои мусбату манфӣ тавлид меёбанду ҳатто баъди хотима ёфтани амали ионизатор аз газ ҷараёни зиёд гузаштан мегирад. 2) электронҳое, ки аз катод бо зарбаи ионҳои мусбат қанда бароварда мешаванд. Дар ин маврид *тахлия мустақил* номида мешавад, зеро аз ҳисоби афканишоти радиоактиви кишри замин, инчунин бо таъсироти шуоъҳои кайҳонӣ дар газ ионҳои мусбату манфӣ тавлид меёбанд, ки боиси бе ионизатор сурат гирифтани тахлия мегарданд.

Тавре ки тадқиқотҳо нишон медиҳанд, қимати раҳнавии шиддат ба табиати кимиёвии газ ва фишори он вобаста аст. Чунончи, дар ҳаво ҳангоми фишори нормалӣ қимати шадидияте, ки ба раҳнашавии он меорад, анқариб  $3 \text{ МВ/м}$  мебошад.

**Масъалан 2.10.** Барои ионизатсия кардани гази гелий, ки энергияи ионизатсияи атомҳояш  $W_i = 24,45 \text{ эВ}$  аст, ҳангоми

ионизатсияи зарбатӣ электрон бояд дорои кадом суръати камтарин бошад?

*Маълумот:*

$$W_i = 24,45 \text{ эВ} = 39,12 \cdot 10^{-19} \text{ Ҷ}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$g_{\max} - ?$$

*Ҳал*

Мувофиқи қонуни бақои энергия энергияи камтарини кинетикии электрон бояд ба энергияи ионизатсияи атом-ҳои гелий баробар гардад:

$$W_{k\min} = W_i$$

ё худ

$$\frac{m g_{\min}^2}{2} = W_i$$

Аз ин ҷо

$$g_{\min} = \sqrt{\frac{2W_i}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 39,12 \cdot 10^{-19} \text{ Ҷ} \cdot \text{м}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} \approx 2,9 \cdot 10^6 \text{ м/с}$$

*Ҷавоб:*  $g_{\min} \approx 2,9 \cdot 10^6 \text{ м/с}$

**Масъалаи 2.11.** Агар фосилаи электродҳои конденсатор  $d=5 \text{ см}$  бошад, хангоми зичии ҷараёни сершуда  $j_c=32 \text{ мкА/м}^2$  будан ионизатор дар  $1 \text{ м}^3$  - и фазои байни электродҳо дар  $1 \text{ с}$  чанд чуфт ион тавлид менамояд?

*Маълумот:*

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

$$j_c = 32 \text{ мкА/м}^2 = 32 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2$$

$$\frac{n}{t} - ?$$

*Ҳал*

Мувофиқи таърифи қуваии ҷараёни сершударо бо формулаи:

$$I_c = \frac{Ne}{t}$$

муайян кардан мумкин аст, ки дар ин ҷо  $N$  - теъдоди чуфти ионҳое, ки ионизатор дар тӯли вақти  $t$  дар фазои байни электродҳо тавлид менамояд. Азбаски

$$N = nV = nSd,$$

$n$  - теъдоди чуфти ионҳое, ки ионизатор дар воҳиди ҳаҷм ба вучуд меорад,  $S$  - масоҳати ҳар як рӯя,  $d$  - фосилаи байни рӯяҳо:

$$I_c = \frac{neSd}{t}$$

аст ва аз ин рӯ

$$\frac{n}{t} = \frac{I_c}{ed} = \frac{32 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2}{5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 4 \cdot 10^{15} \frac{1}{\text{м}^3 \text{ с}}$$

буданаш маълум мегардад.



Ҷавоб:  $\frac{n}{t} = 4 \cdot 10^{15} \frac{1}{\text{м}^3 \text{с}}$ .

Акнун бо баъзе навъҳои тахлияи мустақили газҳо, ки аҳамияти муҳими амалӣ доранд, шинос мешавем.

**1) Тахлияи тоҷӣ.** Дар майдони ғайриҷинсаи электрӣ, хусусан дар фазои атарофи электродҳои қачишон зиёд, масалан ноқилҳои нӯгтез хангоми афзудани шиддат то киматҳои рахнавии он (шадидияти майдон анқариб  $30 \text{ кВ/см}$  будан) аввало дар назди ноқили нӯгтез, сипас электроди ҳамвор тахлияе сурат мегирад, ки дар натиҷа нурафканиши тоҷшакл мушоҳида мешавад ва номи ин навъ тахлия аз ҳамин ҷост.

Бояд хотирнишон сохт, ки ҳар гуна нурафканиши хангоми тахлияи газӣ бо ионизатсияи зарбатӣ ва рекомбинатсияи ионҳо алоқаманд аст.

Тахлияи тоҷӣ одатан дар атрофи симҳои баландшиддат сурат гирифта, ба талафоти энергияи интиқолшаванда меоварад. Ҳамзамон тахлияи тоҷӣ барои ҳосил кардани ионҳо дар филтр (полоишидихандагон)-и газҳои саноатӣ, ҳавои ҷанголд, масалан заводҳои семент истифода мешавад. Зарраҳои ин гуна газҳо тавассути кубурҳои лӯлашакл, ки дар меҳварашон ноқили борики тахлияи тоҷӣ барангезанда ҷойгиранд, боло мебароянду дучори майдони электрии бо ионҳо пур мегарданд ва ба онҳо часпида зарядноку бо таъсироти майдон ба деворҳои кубур наздик меоянд ва дар онҳо тахшину бо ёрии дасгоҳҳои пневматикӣ ҷамъ оварда мешаванд.

**2) Тахлияи шароравӣ. Камони электрӣ.** Ба қадри афзудани шиддати байни электродҳои дар ҳаво ҷойгирбуда, хангоми шадидияти  $30 \text{ кВ/см}$  мавзёе, ки тавассути зарбаҳои электронҳои ионҳои бо таъсироти афканишоти радиоактивии қишри замин, шуоъҳои қайҳонӣ ионизатсия ҳосил мешаванд, васеъ гардида, фазои байни электродҳо бо каналҳои борики равшани пур аз ионҳо чун ноқили қувваи ҷараёнаш бо зудӣ афзоянда мепайванданд. Фосилаи газӣ байни электродҳо рахна мешавад-шарора мепарад. Номи шароравӣ гирифтани ин навъ тахлия аз ҳамин ҷост.

Тармаҳои электронию ионӣ дар каналҳои шароравӣ боиси баланд шудани дараҷаи ҳарорат, яъне температура то даҳҳо ҳазор градус ва афзудани фишор то садҳо атмосфера меоварад. Ҳамин аст, ки хангоми паридани шарора садои қасар-қусур-тарқишҳои хурд-хурди қандашаванда рӯй медиҳад. Оид ба тахлияи шароравии табиӣ дар ҳаҷми қалон воқеъшаванда-барқ пештар маълумоти муҳтасар дода будем.

Азбаски шарора электродҳо чун ноқилҳо мепайванданд, дар натиҷа фарқи потенциалҳои онҳо якбора кам мешавад, тахлия қатъ меёбад. Сипас аз нав фарқи потенциалҳо барқарор мегардаду рахнашавии нави газ сар мезанад.

Агар баъди сар задани шарора электродҳо ба ҳам наздик оварем, тахлия бефосила мешавад. Хангоми иқтисори кофӣ доштани манбаи ҷараён ва тафсидани катод то температурае, ки аз катод теъдоди зиёди электронҳо қанда шуда мебароянд (ин ҳодиса *ЭМИССИЯ*

термоэлектронӣ ном гирифтааст) тахлияи шароравӣ ба камони электрӣ табдил меёбад, нурафшонии камоншакл мушоҳида мегардад. Нурафшонӣ аз он сабаб камоншакл мешавад, ки хавои тафсон ба туфайли конвексия ба боло мебарояд.

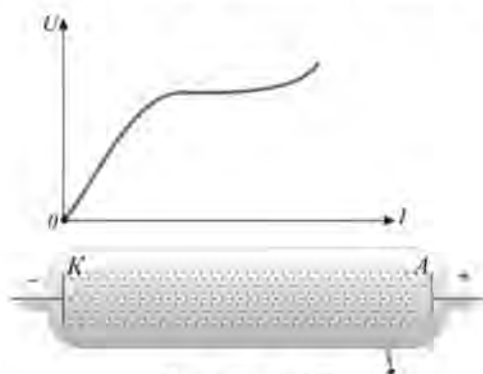
Тахлияи камониро тавассути манбаъҳои шиддаташон нисбатан паст низ ҳосил кардан мумкин аст. Барои ин, масалан, электродҳои ангиштиро ба ҳам мерасонанд. Онҳо дар натиҷаи гузаштани ҷараён то дараҷаи баланд метафсанд. Сипас электродҳоро қадре дур андохта камони электрӣ ҳосил мекунанд. Аз катода тафсида сели электронҳо баромада анодро зарраборон мекунанд, дар натиҷа он то дараҷаи хеле баланд ( $\approx 4000 \text{ K}$ ) метафсад.

Камони электрӣ барои кафшеру буридани металлҳо, истехсоли пӯлодҳои баландсифат (дар кӯраҳои камонӣ), ба сифати манбаъҳои хуби рӯшноидихӣ (прожекторҳо, аппаратҳои проексионӣ) татбиқи васеъ ёфтааст. Камони электрии дар бӯғҳои симобӣ рӯйдиханда ҳамчун манбаи пурзӯри афканишоти ултрабунафш (ба ном *ҷароғҳои квартсӣ*) дар тиб васеъ истифода мешавад. Камони электрии симобии фишораш хеле баландро дар таҳлили спектрӣ ҳамчун манбаи рӯшноӣ қорбасти менамоянд.

**3) Тахлияи лахчавӣ.** Ин навъ тахлия хангоми фишорҳои паст ба вучуд меояд. Агар андаруни найчаи шишагини дарозиаш 30-50 см ду электрод (катода  $K$  ва анода  $A$ , расми 2.17) ҷойгир карда, бо ёрии хавокаш фишорро паст фурувардан гирем, дарозии миёнаи роҳи озоди иону электронҳо  $\langle l \rangle$  қалон мешаваду дар натиҷа онҳо хангоми шадидиятҳои кам мувофиқи қонуни бақои энергия:

$$A = qE \langle l \rangle = W_k = W_i \quad (2.78)$$

дарои энергияи кинетикии барои ионизатсияи зарбатӣ кофӣ мегарданд. Дар фишорҳои 2-4 мм сут. сим. ва фарқи потенциалҳои якҷанд сад вольт аввало электродҳо гӯё бо шнури борики алвонҷхӯрандаи равшан васл мешаванду сипас тамоми фазои байни онҳоро тахлияи нурафшон гӯё бе аланга сӯзанда фаро мегирад.



Расми 2.17

Ҳамин аст, ки ин навъ тахлия лахчавӣ ном дорад. Тадқиқотҳо нишон доданд, ки дар назди катод афтиши якбораи шиддат ба вучуд меояд (расми 2.17), зеро дар фазои назди катод (онро *торикии катодӣ* меноманд) электронҳо бо сабаби хурд будани массаашон тезтар шитоб гирифта, дар роҳи ҳаракати худ микдори зиёди ионҳои мусбатро ташкил медиҳанд (сутуни мусбати наздианодӣ) ва сӯйи анод

мекӯчанд. Ҳарчанд ҳангоми тахлияи лахчавӣ катод сард мемонад, барои сар задани тахлия катодно зарраборон кардани ионҳои мусбат ва аз он зада баровардани як миқдор электронҳо нақши босазо дорад. Ҳамин аст, ки катодно бо моддаҳои кори бароварди электронашон кам (оид ба кори бароварди электронҳо дар §2.10, маълумот оварда мешавад), масалан барий ё тсезий пӯшонда, бо интихоби газе, ки бо он найчаро пур мекунанд, тахлияи лахчавиро дар шиддатҳои хеле паст, ҳатто бо шиддати шабакаи шахрӣ ба вучуд овардан мумкин аст. Аз ҳама муҳимаш ранги тахлия ба таркиби газ вобаста мебошад. Масалан, неон бо ранги сурху норинҷӣ, ксенон-ранги зард, аргон-ранги сабзи кабутчатоб ва ғайра нурафшонӣ мекунанд. Ҳамин аст, ки тахлияи лахчавӣ дар лампаҳои рекламавӣ, инчунин ба ном *чароғҳои рӯз* истифода мешавад. Дар чароғҳои рӯз тахлия дар бӯғҳои симоб пайваста бо афканишоти ултрабунафш сурат мегирад. Андари ни ин гуна найчаҳо бо интихоби таркиби махсуси модда-люминофор мемоланд, ки он шуоъҳои ултрабунафшро фуру бурда, рӯшноии таркибаш ба нурҳои офтоб наздику ба чашм форама меафкананд ва номи чароғи рӯз гирифтани онҳо аз ҳамин ҷост. Чароғҳои рӯз назар ба лампаҳои муқаррарии тафсиш самараноктар ва коршоямияшон (3-4 маротиба) тӯлонитар мебошад.

**4) Плазма.** Плазма гуфта гази қисман ё пурра ионизатсияшударо мафаҳманд, ки дар он концентратсияҳои ионҳои мусбату манфӣ амалан баробаранд, яъне газ куллан нейтралест (плазма сухани иониони *plazma* буда, ташаккулёфта маънидод карда мешавад).

Гази дараҷаи ионизатсияаш баланд ҳолати махсуси модда аст, ки аз гази муқаррарӣ, моеъ ё кристаллҳо фарқи калон дорад. Ҳамин аст, ки плазма чун ҳолати ҷорӯми агрегатии модда ба ҳисоб меравад. Плазма ноқилияти калони электрӣ дорад. Чараёнро дар плазма асосан ҳаракати электронҳо ташкил медиҳад, зеро ҳаракатмандии онҳо назар ба ҳаракатмандии ионҳо зиёдтар аст.

*Плазми баландҳарорат* ( $\approx 10^8$  K)-ро, ки одатан дар қабри Офтоб (температураи сатҳи берунаи Офтоб анқариб 6000 K буданаширо хотиррасон мекунем) ва ситорагон вучуд дорад. Плазми тахлиявиро фарқ менамоянд: он ҳангоми аз газ гузаштани чараён ташкил меёбад. Зарраҳои заряднок (электрон ва ионҳо)-и плазми тахлиявӣ дар майдони шитобдихандаи электрӣ дорои қиматҳои миёнаи энергияи кинетикии гуногун мебошанд. Аз ин рӯ *температураҳои электронӣ*  $T_e$  ва *ионӣ*  $T_i$ -ро фарқ мекунанд, аниқтараш  $T_e > T_i$  аст. Пас, плазми тахлиявӣ дар мувозинати ҳароратӣ нест.

Омухтани хосиятҳои физикавии плазма аз як тараф бисёр проблемаҳои астрофизикаро ҳал менамояд, зеро дар фазои қойинот плазма аз ҳама ҳолатҳои паҳншуда буда, масалан атрофи Заминро минтақа (тасма)-ҳои плазма ихота кардаанд, инчунин ионосфера асосан аз плазма таркиб ёфтааст. Аз тарафи дигар, имконияти идора кардани реаксияҳои термоядроиро фароҳам меоварад, зеро ҳадафи асосии тадқиқотҳои синтези термоядроии ядроҳои сабук плазми баландҳарорат мебошад.

*Плазми пастҳарорат* ( $\leq 10^5$  K) дар лазерҳои газӣ, табдилдихандаҳои термоэлектронӣ дар генераторҳои ба ном



магнитогидродинамикӣ (мухтасар МГД-генераторҳо) татбиқи васеъ ёфтааст.

## §2.10. Чараёни электрӣ дар нимноқилҳо

1. **Ноқилияти хусусии нимноқилҳо.** Дар соҳаҳои гуногуни электроникаи муосир моддаҳои татбиқи васеъ ёфтаанд, ки *нимноқилҳо* ном гирифтаанд. Ба нимноқилҳо асосан элементҳои гурӯҳҳои 4, 5 ва 6-уми ҷадвали даврии Менделеев: бор – *B*, карбон – *C*, силитсий – *Si*, фосфор – *P*, гүгирд – *S*, галлий – *Ga*, германий – *Ge*, марги муш ё худ арсений – *As*, селен – *Se*, қалъагӣ – *Sn*, сурма – *Sb*, теллур – *Te*, индий – *In*, аксар минералҳо (масалан  $SiO_2$ ), сулфидҳо, теллуридҳо, селенидҳои металлҳо ва ғайра мансубанд.

Мувофиқи муқовимати ҳосашон ( $\rho = 10^5 \div 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) нимноқилҳоро дар мобайни металлҳо ( $\rho = 10^{-6} \div 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) ва диэлектрик ё худ изоляторҳо ( $\rho = 10^5 \div 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) ҷойгир карда метавонем. Вобаста ба температура нимноқилҳо хусусиятҳои аҷиб зоҳир менамоянд. Чунончӣ, ноқилияти ҳоси нимноқилҳо ( $\gamma = 1/\rho$ ) вобаста ба температура  $T$  мувофиқи қонунияти:

$$\gamma = \gamma_0 e^{-\frac{W_a}{kT}} \quad (2.78)$$

тағйир меёбад, ки дар ин ҷо  $\gamma_0$ -ноқилияти ҳос дар  $0^\circ\text{C}$  ( $273 \text{ K}$ ),  $k$ -дойимии Болсман,  $W_a$ -ба номи *энергияи активатсияи атом* (энергияи барои қандани банди кимиёвӣ зарур) мебошад.

Агар ҳангоми ба ҳар  $1^\circ\text{C}$  гарм кардан муқовимати ҳоси металлҳо танҳо ба 0,3 % кам шавад, ноқилияти ҳоси нимноқилҳо 5–6 % меафзояд. Дар температураҳои паст нимноқил чун диэлектрик рафтор мекунад, вале дар температураҳои баланд фарқияти чараёнгузаронии металлҳою нимноқилҳо назарногир мешавад.

Ба нимноқилҳо омехтаҳои ғайр (маҳлут ё ғашҳо) ворид сохта, ноқилияти онҳоро хеле зиёд кардан мумкин аст. Чунончӣ, ба қадри 0,001 % бо атомҳои бор иваз кардани атомҳои силитсий ноқилияти силитсий миллионҳо маротиба меафзояд.

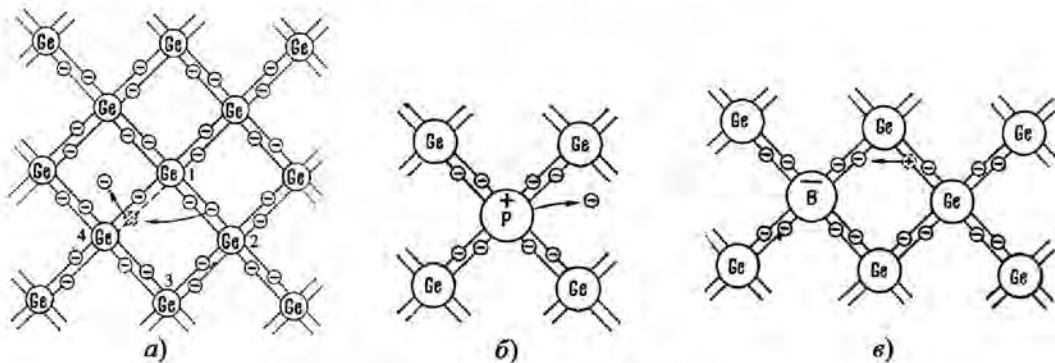
Бо таъсири дигари беруна, аз қабилӣ бо рӯшноӣ ё афқанишоти радиоактивӣ шуоъборон кардан, ноқилияти нимноқилҳоро ба қадри назаррас тағйир додан имконпазир мебошад.

Барои шарҳ додани хосиятҳои зикрфта ва хусусиятҳои дигари нимноқилҳо сохтори дохилии онҳоро баррасӣ намудан лозим меояд. Мо ин масъаларо дар мисоли нимноқилҳое, ки дар электроникаи муосир татбиқи васеъ ёфтаанд – германий ва силитсий (энергияи активатсияи онҳо мувофиқан 0,77 эВ ва 1,1 эВ буданашон муқаррар карда шудааст), муҳокима менамоем.

Масалан, дар кристалли германий 32 электрони ҳар як атомаш тавре тақсим шудаанд, ки дар қабати берунии атом чорто электрони валентӣ ҷойгиранд ва атом тавассути ин электронҳо бо чорто атоми ҳамсоя банди кимиёвӣ ташкил менамояд. Дар натиҷа тамоми атомҳои кристалл дар ҳамтаъсири дастаҷамъона буда, дар гиреҳҳои панҷараҳои шаклашон дуруст нигоҳ дошта мешаванд. Дар расми 2.18  $a$  ин гуна ҳамтаъсири шартан дар порчаи нимноқил тасвир ёфтааст, ки он сздаҳо атомро дарбар мегирад. Дар температураи хона



( $T=300\text{ K}$ ) энергияи кинетикии электронҳои банд мувофиқи формулаи  $\varepsilon_k = \frac{3}{2}kT$  анқариб  $0,04\text{ эВ}$ -ро ташкил медиҳад ва барои кандани бандҳои кимиёвӣ кофӣ нест. Ҳамин аст, ки дар температураҳои паст тамоми электронҳои атомҳо дар бандҳои кимиёвӣ ҷойгиранд ва электронҳои озод анқариб вучуд надоранд, аз ин рӯ нимноқил чун диэлектрик рафтор мекунад.



Расми 2.18

Бо ягон таъсироти беруна, масалан нимноқилро тафсонда, ё онро шуоъборон карда, электрони банди кимиёвиро ба электрони озод табдил додан имконпазир аст. Дар расми 2.18 *a* ин гуна электронҳои озод дар назди атомҳои 1, 2, 3, 4-ум нишон дода шудаанд. Ҷойи холии электронҳои озодгардида гӯё зарраи мусбат заряднок аст ва онро шартан «сӯрохча» (баъзан ҷавф) меноманд. Дар расми 2.18 *a* ин гуна ҷойҳо бо доирачаи штрихонида тасвир ёфтаанд ва «сӯрохча» ном гирифтани онҳо аз ҳамин ҷост. Ба ин сӯрохча аз атомҳои ҳамсоя электрон ҷахида гузашта, онро пур карда метавонад (гӯё сӯрохча бархам мекӯрад, тавре ки мегӯянд, рекомбинатсия мешавад), вале ҳамзамон сӯрохча ба атоми ҳамсоя мекӯчад. Яъне сӯрохчаҳо ҳаракатманд мебошанд.

Агар порчаи нимноқилро дар майдони берунаи электрӣ ҷойгир намоем (чуноне ки аз расми 2.18 *a* тасвир ёфтааст, электронҳо ба тарафи ҷапу сӯрохчаҳо ҷониби рост мекӯчанд), сӯрохчаҳо ҳамчун заряди мусбат ба самти шадидияти ин майдону электронҳои озод ба самти муқобили шадидият ба ҳаракати бонизом медароянд, яъне аз нимноқил ҷараён мегузарад.

Ҳамин тариқ, дар нимноқилҳо ҳангоми ташкил ёфтани электронҳои озоду сӯрохчаҳо ҷараёни электрӣ чун ҳаракати бонизоми онҳо ба вучуд омада метавонанд, ки *ноқилияти хусусии нимноқилро* ташкил медиҳанд.

Бояд қайд кард, ки дар ноқилияти хусусии нимноқилҳо ҳаракатмандии электронҳои озод зиёдтар асту ҳаракатмандии сӯрохчаҳо камтар, зеро ҷахиши электронҳои банд аз як атом ба атоми дигар чандон ҳодисаи беихтиёр нест (тавре ки тадқиқотҳо нишон доданд, дар германий ҳаракатмандии электронҳои озод  $b_e = 0,03\text{ м}^2/(В \cdot с)$ , ҳаракатмандии сӯрохчаҳо  $b_e = 0,019\text{ м}^2/(В \cdot с)$  мебошад), зеро барои кандани бандҳои кимиёвӣ кори ба энергияи активатсияи атом баробарро иҷро кардан мебояд.

**2. Ноқилияти махлутӣ.** Бо усули ба нимноқил ворид сохтани атомҳои ғайр (омехтаҳои махлутӣ) тавре ки зикр ёфт, теъдоди электронҳои озоду сӯроҳчаҳоро хеле зиёд, кардан имконпазир аст. Дарвоқеъ, агар ба ҷойи якто атоми чорвалентаи германий ё силитсий тавассути диффузия атоми панҷвалентӣ (масалан фосфор, марги муш) ворид созем (расми 2.18, б), якто электрони иловагии озод (ба замми электронҳои озоди ҳамчун ҳомилони ноқилияти хусусӣ мавҷудбуда) ташкил меёбад. Омехтаҳои бо ин навъ воридкардари *омехтаи донорӣ* (аз сухани латинии ҳадя кардан, додан) ва ноқилияти бо ин тарз ҳосилшавандари *ноқилияти  $n$ -тип* (ё навъ) меноманд (аз сарҳарфи сухани латинии *negativus*-манфӣ).

Дар мавриди ба ҷойи атоми *Ge* ё *Si* ворид сохтани атоми севалентӣ (масалан бор-*B*, галлий *Ga*) якто банди холӣ, яъне якто сӯроҳчаи иловагӣ ҳосил мешавад (расми 2.18, в). *Омехтаҳои* бо ин тарз воридсохтари *акцепторӣ* (аз сухани латинии *acceptor*-қабулкунанда) ва ноқилияти бо ин усул ҳосилшавандари *ноқилияти  $p$ -тип* (аз сарҳарфи сухани латинии *positivus*-мусбат) меноманд. Яъне, дар ноқилияти *p*-тип нақши асосиро электронҳои озоду дар ноқилияти *p*-тип ин гуна нақшо сӯроҳчаҳо мебозанд.

Ноқилияти махлутӣ аз ноқилияти хусусӣ бо он фарқ мекунад, ки ноқилияти махлутиро ҳомилони як аломату ноқилияти хусусиро ҳомилони ду аломат ташкил медиҳанд.

Хотиррасон кардан бамаврид аст, ки дар ҳарду навъи ноқилият ҷараёно ҳаракати бонизоми ҳамон электронҳо ташкил медиҳад.

Ноқилияти махлутиро концентратсияи ҳомилони ҷараён (электронҳои озоду сӯроҳчаҳо) ва ҳаракатмандии онҳо муайян менамоянд. Аз ин рӯ ин навъ ноқилиятро мувофиқи дархост танзим додан имконпазир мебошад ва афзалияти муҳимтарини он назар ба ноқилияти хусусӣ маҳз дар ҳамин аст.

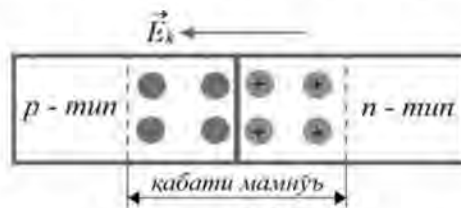
**3. Диоди нимноқилӣ.** Агар нимноқили *n*-типро бо нимноқили *p*-тип васл созем, системаи ба ном *p-n* гузариш ҳосил мешавад, ки онро *диоди нимноқилӣ* меноманд (аз юнонии *di(s)*-ду қарат), ки асбоби дуэлектродӣ буданаширо мефаҳмонад. Ин гузариш аҳамияти калон дорад, зеро амали бисёр асбобҳои нимноқилӣ ба он асос ёфтааст.

Усулҳои гуногуни ҳосил кардани *p-n* гузариш мавҷуданд. Яке аз онҳо, ки бештар қорбаст мешавад, чунин аст. Ба рӯи лавҳаи нимноқилӣ, масалан германий, ки ноқилияташ *n*-тип аст, як порча индий ҷойгир карда, андаруни кӯра (печка) мегузоранд. Дар температураи баланд (анқариби 500 °C) индий ғудохта, ҷӯшпайванди лавҳаи германий мешавад ва дар он соҳаи ноқилияташ *p*-типро ба вуҷуд меорад. Ба ҳуди лавҳаи германий ва «қатраи» сахтшудаи индий ду ноқили васлсозӣ кафшер мекунад.

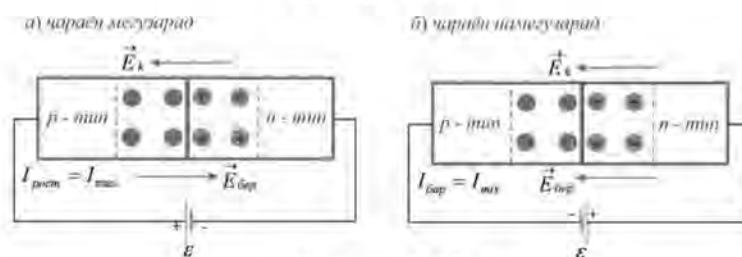
Дар *p-n* гузариш ҳар яке аз нимноқилҳо дар алоҳидагӣ аз ҷиҳати электрӣ нейтраланд. Вале дар натиҷаи васл аз ҳудуди расиш (контакт ё худ тамос)-и онҳо тавассути диффузия теъдоди ками электронҳои озод аз нимноқили *n*-тип ба *p*-тип гузашта, як миқдор сӯроҳчаҳоро пур (рекомбинатсия) мекунад. Дар натиҷа нимноқили *n*-тип дорои заряди мусбату нимноқили *p*-тип манфӣ заряднок мешавад, яъне фарқи потенциалҳои контактӣ ташкил меёбад. Ин

фарки потенциалҳо дар худуди расиш қабати тунуки ғафсиаш якчанд микрометрро, ки қабати бандкунанда ё мамнӯъ номида мешавад, ба вучуд меоварад. Ҳамин аст, ки дар он қабат майдони электрии шадидияташ  $\vec{E}_k$  вусъат меёбад (расми 2.19) ва ба диффузияи минбаъдаи электронҳо сӯрохҳо монеъ мешавад ва қабати мамнӯъ ном гирифтани аз ҳамин ҷост. Агар ғафсии қабати мамнӯъ  $d=10^{-6}$  м (1 мкм) бошад, дар ҳоли 1 В будани фарқи потенциалҳои контакти шадидияти майдони зикрѐфта  $\vec{E}_k = 10^6$  В/м мешавад.

Хусусияти муҳими  $p-n$  гузариш ноқилияти яктарафа доштаниаш аст. Дарвоқеъ, агар ба нимноқили  $p$ -типи диод қутби мусбати манбайи беруна ( $\epsilon$ ) ва ба нимноқили  $n$ -тип қутби манфии онро васл созем, майдони беруна  $\vec{E}_{бер}$  майдони қабати мамнӯъ  $\vec{E}_k$ -ро суст мекунад, амалан барҳам медиҳад (расми 2.20, а). Дар натиҷа аз диод ҷараёни зиёдтарини ба ном *ҷараёни рост*  $I_{рост} = I_{max}$  мегузарад. Баръакс, вақте ки ба нимноқили  $p$ -тип қутби манфию ба нимноқили  $n$ -тип қутби мусбати манбайи беруна ( $\epsilon$ )-ро васл созем, (расми 2.20, б), акнун шадидияти майдони беруна  $\vec{E}_{бер}$  бо майдони қабати мамнӯъ  $\vec{E}_k$  ҳамсамт аст боиси аз диод гузаштани ҷараёни қуввааш камтарини ба номи *ҷараёни баръакс*  $I_{баръакс} = I_{min}$  (ҳамагӣ якчанд микроампер) мешавад, ки амалан баробари сифр мебошад.



Расми 2.19



Расми 2.20

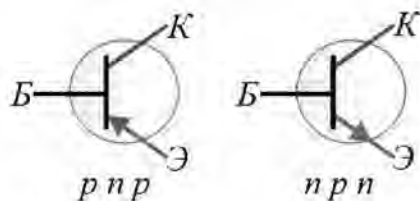
Ҳамин аст, ки диоди нимноқилӣ барои ба ҷараёни дойимӣ баргардонидани ҷараёнҳои тағйирёбанда (ин гуна ҷараёнҳо барои интиқол хеле мусоиданд) қорбаст мешаванд ва амали кулли *ростгардонҳо* (ба лафзи русӣ *выпрямительҳо*) ба ин хусусияти диоди нимноқилӣ асос ѐфтааст.

**4. Транзистор.** Соли 1948 олимони амрикоӣ У. Шокли, Ч. Бардин ва У. Браттейн асбоби нимноқилиеро ихтироъ карданд, ки бо номи ба бисёриҳо шиноси *транзистор* (аз суханҳои англисии trans (fer) – нақл кардан, интиқол додан resistor-муқовимат) маъмул гаштааст. Барои тадқиқи хосиятҳои нимноқилҳо ва кашфи *эффeкти танзисторӣ* соли 1956 олимони номбурда сазовори ҷоизаи Нобелӣ гардиданд.

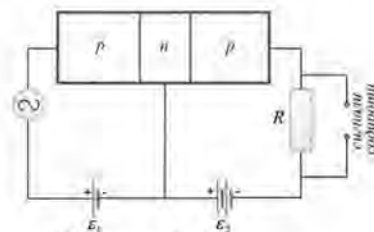


Транзистори соддатарин аз монокристалли германий ё силитсий иборат мебошад, ки дуто  $p$ - $n$  гузариш дорад. Масалан, дар  $pnp$ -транзистор нокилияти қисми мобайнӣ (ба ном *база*—аз фаронсавии асос, поя)  $n$ -тип асту ду қисми паҳлӯгиаш дорои нокилияти  $p$ -тип мебошад, ки яке *эмиттер* (аз сухани латинии афкандан, баровардан) ва дигаре *коллектор* (аз сухани латинии чамъоваранда) ном гирифтаанд. Транзисторҳои  $pnp$  низ мавҷуданд (расми 2.21, ки дар он тасвири схемавӣ ва ишорати шартии транзисторҳо оварда шудаанд).

Амали транзисторро дар мисоли  $pnp$ -транзистор, ки чун дар расми 2.22 тасвирёфта пайваст мебошад, баррасӣ менамоем. Ба яке аз  $p$ - $n$  гузаришҳо, масалан гузариши чап тавассути батареяи  $\mathcal{E}_1$  шиддати рост, дар гузариши рост бо ёрии батареяи  $\mathcal{E}_2$  шиддати зиёди баръакс васл карда мешавад. Чараёне, ки аз  $p$ -соҳаи чап (эмиттер) ба база самт мегирад, асосан аз ҳаракати сӯрохчаҳо иборат аст. Сӯрохчаҳо аз  $n$ -соҳаи хеле тунук (бараш якчанд микрометр) анқариб дучори рекомбинатсия нагардида (94–97 %) ба соҳаи  $p$ -и рост (коллектор) мечаҳанд, тавре ки мегӯянд, *инжексия* (аз фаронсавии пошхӯрӣ) мешаванд. Азбаски коллектор тавассути муқовимати хеле калони  $R_k$  ба қутби манфии  $\mathcal{E}_2$  васл мебошад, сӯрохчаҳо сӯйи ин қутб ҳаракаташонро идома дода, дар  $R_k$  афтиши шиддати баланди баромад (содиротӣ)—ро ба вучуд меоранд. Тағйироти ками шиддат дар гузариши чап аз ҳисоби сигнали пасти воридотӣ (масалан сигналҳои радио, телевизион) ба вучудодада сабабгори тағйироти мувофиқи зиёди чараён дар занҷири коллектор ва аз ин рӯ шиддати баланд дар  $R$  (сигнали баромад ё содиротӣ) вусъат меёбад. Ҳамин аст *эффекти транзисторӣ*. Пас, транзистор ҳамчун *тақвиятдиҳанда*, яъне *қувватфизои* сигналҳои суғат хизмат мекунад. Транзисторҳо чӯзъҳои асосии қувватфизоҳои электронии муосир мебошанд.



Расми 2.21



Расми 2.22

Миниатюризатсияи дастгоҳҳои муосири электронӣ имкон медиҳад, ки дар якто *чипи* (аз англисии chip—кристаллҷаи нимнокилии дорои схемаҳои интегралӣ ё худ микросхема) андозааш анқариб 1 см ҳазорҳо диод, транзисторҳо ҷойгир карда шаванд ва ҳамчун протсессорҳои компютерҳо хизмат намоянд.

## §2.11. Хатарҳои чараёни электрӣ

Ҳангоми ногаҳон ба симҳои лучи шиддатдори электрӣ расидани узвҳои одам дар ҳоли бо замин ё тавассути ноқил ба замин васл буданаш аз тани одам чараён гузашта метавонад, зеро қисми одам барои чараёни электрӣ нокили хубест. Чараён аз тани одам гузашта, якчанд равандҳои ба худ хосеро ба вучуд меоварад, ки ба саломатии одам таъсироти хатарнок аст. Хафнокии чараён ба қувваи он, тӯли



таъсирот, роҳи гузариш, дойимӣ ё тағйирёбанда, басомади чараёни тағйирёбанда ва ҳолати организми одам вобаста мебошад. Агар чараён ба воситаи дил, шуш ва ҳучайраҳои системаи марказии асаб гузарад, хавфи он бештар мешавад.

Каму беш гузаштани чараён ба муковимати ҷисми одам вобаста аст. Муковимати одамҳои гуногун фарқ дорад. Агар пӯст безахм ва хушк бошад, муковимати он аз 3 000 то 100 000 Ом буда метавонад. Қисми зиёди муковимати одамро пӯст ташкил медиҳад. Муковимати ҷисми одам бе пӯст ҳамагӣ 300-500 Ом мебошад. Аз ин рӯ шиддати пасти 36-42 В сабабгори таъсироти хатаровари чараён гардида метавонад.

Чараёни тағйирёбандаи қуввааш 5-7 мА сӯзиши пӯст ва қадре гарангшавиро ба вучуд меорад. Ин қадар чараён чандон хавфнок нест, лекин мавриди муддати дароз гузаштанаш сабабгори нобоварӣ ва гарангии одам мешавад. Ҳангоми гузаштани чараёни 8-10 мА дастҳо ба дард медароянду рағҳо ва мушакҳо кашиш мехӯранд. Чараёнҳои тағйирёбандаи басомадаш саноатӣ (50 Ҳс)-и қуввааш 10-15 мА ва дойимии қуввааш 50-80 мА дарди тоқатнопазир ба вучуд меорад. Дар ҳоли 25-50 мА будани чараёни тағйирёбанда на фақат мушакҳои даст, балки мушакҳои бадан ва қафаси сина осеб мебинанд, рағҳои хунгард фишурда мешаванд, фишори хун меафзояду зарардида аз хуш меравад. Таъсири дарозмуддати ин қадар чараён сабабгори қатъ шудани нафаскашиву ҳалокати одам мегардад. Ҳол он, ки ҳангоми шиддати 220 В қувваи чараёни аз тани одам гузаранда

$$I = \frac{220 \text{ В}}{3000 \text{ Ом}} \approx 70 \text{ мА} \text{ мешавад.}$$

Чараёни тағйирёбандаи 100 мА ва аз он зиёдтару чараёни дойимии қуввааш 300 мА ниҳоят хавфнок ҳисоб меёбад.

Бо зиёд кардани басомади чараёни тағйирёбанда (1-2 кҲс) хатари чараён якбора кам мешавад ва дар басомадҳои 450-500 кҲс хавфи таъсироти чараён барҳам мехӯрад. Зеро дар ин маврид ба туфайли скин-эффект чараёни тағйирёбанда ба сатҳи пӯсти муковиматаш баланд мегузарад ва ба мушакҳову рағҳои хунгард таъсир намерасонад.

Тавре ки тадқиқот нишон медиҳад, таъсироти чараёни дойимӣ назар ба чараёни тағйирёбанда 4-5 маротиба сустар мебошад.

Ҳамин тариқ, аз чараёни электрӣ эҳтиёт шуданро набояд фаромӯш сохт, ба симҳои луч бе боварии қатъӣ даст расондан мумкин нест. Барои одами ба симҳои лучи чараёндор расидаро ҷудо кардан аз диэлектрикҳои боэтимод бояд истифода бурд. Пеш аз ҳама, бо ёрии масалан табари дастааш ҷӯбин, ё бо дасти резинпӯш сими чараёндорро буррида, одами зарардидаро аз чараён ҷудо кардан мебояд. Ба одами аз таъсири чараён осебёфта баъд аз чараён ҷудо кардан ҳарчӣ зудтар нафасгирии сунъиро ба қор андохта, ба қадри имкон ёрии таъчириро даъват намудан лозим аст. Ба ҳеч вачҳ аз амалиёти насанҷида (аз қабилҳои одами зарардидаро то гулӯ ба хок гӯр кардан) набояд истифода бурд. Аз ин рӯ бо қойидаҳои ёрии аввалини беҳатарӣ огоҳ будани ҳар як фард хатмист.

## Машқи 2

2.1. Аз ноқили алюминий диаметраш  $d = 2$  мм чараёни қуввааш  $I = 6,28$  А мегузарад. Зичии чараён, суръати миёнаи ҳаракати бонизоми электронҳо дар ноқил чӣ қадар аст? Муайян намоед, ки аз бурришгоҳи арзии ноқил дар тӯли  $l = 5$  дақ чандто электрон мегузарад. Ба эътибор гиред, ки зичии алюминий  $D = 2700$  кг/м<sup>3</sup>, адади Авогадро  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  мол<sup>-1</sup>, массаи молии алюминий  $M = 27 \cdot 10^{-3}$  кг/мол мебошад.

$$(j = 2 \cdot 10^6 \text{ А/мм}^2; \langle \mathcal{V} \rangle = 2 \cdot 10^4 \text{ м/с}; N_e = 12 \cdot 10^{21})$$

2.2. Аз сими алюминий диаметраш  $d = 0,5$  мм чараёни қуввааш  $I = 0,5$  А мегузарад. Агар муқовимати хоси алюминий  $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м бошад, ба электрони озод дар ин сим чӣ қадар қувваи электрӣ таъсир мекунад?

$$(\approx 10^{-20} \text{ Н})$$

2.3. Муқовимати печакҳои ғалтаки ноқилии мисин дар температураи  $t_1 = 14^\circ\text{C}$  ба қадри  $R_1 = 10$  Ом буданаш маълум аст. Ҳангоми аз ғалтак гузаштани чараён муқовиматаш  $R_2 = 12,2$  Ом шуданашро муқаррар карданд. Печакҳои ғалтак то кадом температураи  $t_2$  гарм шудааст? Коэффитсиенти температуравии муқовимат барои мис  $\alpha = 4,15 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  буданашро ба эътибор гиред.

$$(t_2 \approx 70^\circ\text{C})$$

2.4. Мила (стержен)–и оҳанин бо милаи ангиштие, ки ҳамон қадар ғафсӣ дорад, васл шудааст. Ҳангоми чӣ гуна нисбат доштани дарозии милаҳо ( $x = l_1/l_2$ ) муқовимати умумӣ ба температура вобаста намешавад? Коэффитсиенти температуравии муқовиматҳои оҳану ангишт мувофиқан  $\alpha_1 = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ;  $\alpha_2 = -0,8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  ва муқовимати хоси ин моддаҳо дар  $0^\circ\text{C}$  мувофиқан  $\rho_{01} = 8,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м,  $\rho_{02} = 4 \cdot 10^{-6}$  Ом·м мебошанд.

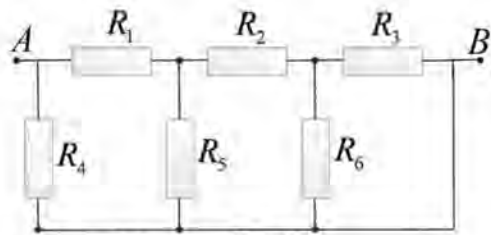
$$(x = 6)$$

2.5. Муқовимати умумии қитъаи АВ-и занҷири дар расми 2.23 тасвирёфта муайян карда шавад, агар  $R_1 = 1$  Ом,  $R_2 = 3$  Ом,  $R_3 = R_4 = R_6 = 2$  Ом ва  $R_5 = 4$  Ом бошад.

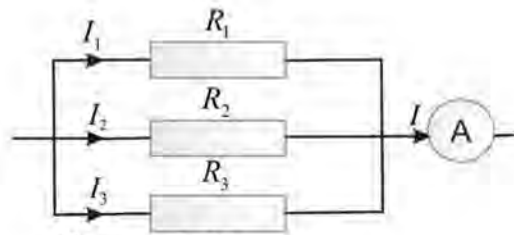
$$(R_{AB} = 1,2 \text{ Ом})$$

2.6. Дар расми 2.24 амперметр чараёни қуввааш  $I = 1,5$  А - ро нишон медиҳад. Агар аз муқовимати  $R_1$  чараёни қуввааш  $I_1 = 0,5$  А гузарад ва муқовиматҳо  $R_2 = 2$  Ом,  $R_3 = 6$  Ом бошанд, қувваи чараёнҳои аз муқовиматҳои  $R_2$  ва  $R_3$  ҷоришаванда, инчунин муқовимати  $R_1$ -ро муайян намоед.

$$(R_1 = 3 \text{ Ом}; I_2 = 0,75 \text{ А}; I_3 = 0,25 \text{ А})$$



Расми 2.23



Расми 2.24

2.7. Волтметри ба муковимати  $R_1 = 70 \text{ Ом}$  пай дар пай васлбуда хангоми ба шабакаи шиддаташ  $U = 240 \text{ В}$  пайваст кардан шиддати  $U_1 = 100 \text{ В}$ -ро нишон медиҳад. Дар мавриди хамин волтметрро бо муковимати  $R_2 = 30 \text{ Ом}$  пай дар паю боз ба ҳамон шабака пайвастан нишондоди волтметр чӣ қадар мешавад?

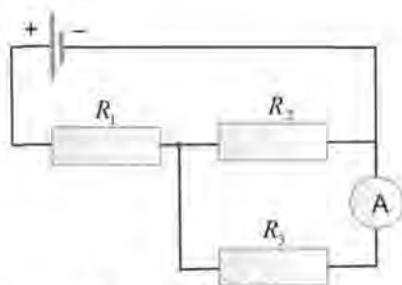
( $U_2 = 150 \text{ В}$ )

2.8. Хангоми пай дар пай васл кардани муковиматҳои  $R_1$  ва  $R_2$  қувваи ҷараён назар ба пайвасти параллели онҳо 6,25 маротиба хурд мебошад. Муковиматҳои ин ноқилҳо чанд маротиба фарқ мекунанд?

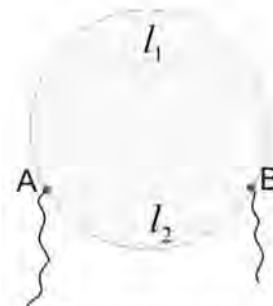
(4 маротиба)

2.9. Шиддат дар сикқонак (клемма)-ҳои манбаъ  $U = 2,1 \text{ В}$ , муковиматҳо  $R_1 = 5 \text{ Ом}$  ва  $R_2 = 3 \text{ Ом}$  мебошанд (расми 2.25). Амперметр чӣ қадар қувваи ҷараёнро нишон медиҳад?

( $I_2 = 0,2 \text{ А}$ )



Расми 2.25



Расми 2.26

2.10. Галванометри муковимати дохилиаш  $R_g = 0,99 \text{ Ом}$  қувваи ҷараёни на зиёдтар аз  $I_g = 10 \text{ мкА}$ -ро чен карда метавонад. Барои бо ин асбоб чен намудани қувваи ҷараёни то  $I = 1 \text{ мА}$  чӣ қадар муковимати иловагӣ (шунт) ва онро чӣ гуна пайвастан мебояд?

( $R_{ш} = 0,01 \text{ Ом}$ )

2.11. Ба волтметри муковимати дохилиаш  $R_v = 1500 \text{ Ом}$  чӣ қадар муковимати иловагӣ (шунт) ва онро чӣ гуна пайвастан лозим аст, ки қимати як таксимоташ  $n = 5$  маротиба афзояд?

( $R_{ш} = 0,01 \text{ Ом}$ )

2.12. Аз порчаи ноқили муковиматаш  $R = 10 \text{ Ом}$  ҳалқае сохта шудааст. Симҳои ҷараёнгузарро дар кадом нуктаҳои  $A$  ва  $B$ -и ҳалқа

(расми 2.26) бояд васл намуд, ки муковимати натиҷавӣ  $r = 1 \text{ Ом}$  шавад? Нисбати дарозии ин қитъаҳо  $l_1/l_2$  чӣ қадар бояд бошад?

$$(R_1 = 8,9 \text{ Ом}; R_2 = 1,1 \text{ Ом}; l_1/l_2 \approx 8)$$

2.13. Муковимати ғалтаки симаш мисин  $R = 10,8 \text{ Ом}$ , массаи сим  $m = 3,41 \text{ кг}$  мебошад. Дарозии сим  $l$  ва диаметри он  $d$ -ро муайян намоед. Ба эътибор гиред, ки муковимати хоси мис  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  ва зичии он  $D = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

$$(l = 100 \text{ м}; d = 1 \text{ мм})$$

2.14. Барои ҳосил кардани гармидиҳандаи иқтидораш  $P = 1 \text{ кВт}$ , ки ба шиддати шабакаи шахрӣ ( $U = 220 \text{ В}$ ) таъйин шудааст, чанд печай сими нихромии диаметраш  $d = 1 \text{ мм}$ -ро ба силиндри чинигини радиусааш  $r = 2 \text{ см}$  печонидан лозим аст? Муковимати хоси нихром  $\rho = 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  буданаширо ба эътибор гиред.

$$(N = 242)$$

2.15. Микдори гармие, ки дар воҳиди вақт дар воҳиди ҳаҷми сими мисини зичии чараёнаш  $j = 120 \text{ кА/м}^2$  хориҷ мегардад, чӣ қадар аст? Муковимати хоси мис  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  буданаширо ба эътибор гирифта шавад.

$$(245 \text{ Ҷ/м}^3 \cdot \text{с})$$

2.16. Аз манбайи шиддаташ  $U = 10 \text{ кВ}$  ба масофаи  $l = 5 \text{ км}$  чараёни электрии иқтидораш  $P = 5 \text{ 000 кВт}$ -ро нақл кардан мебошад. Талафоти иқтидор дар симҳо набояд аз 1% зиёд гардад. Диаметри симҳои мисине, ки тавассути онҳо энергия нақл карда мешавад, чӣ қадарро интихоб намудан лозим аст? Муковимати хоси мис  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

$$(d \approx 3 \text{ мм})$$

2.17. Чойники электрии дорои оби ҳаҷмаш  $V = 0,6 \text{ л}$ , температураи аввалааш  $t_0 = 15^\circ \text{С}$ -ро ба шабакаи шахрӣ ( $U = 220 \text{ В}$ ) васл сохта, аз он чудо намуданро фаромӯш карданд. Агар муковимати гармидиҳандаи чойник  $R = 16 \text{ Ом}$  бошад, баъди чанд вақти пайвасти чойник ( $\tau$ ) оби чойник чӯшида пурра ба буғ табдил меёбад? ККФ-и чойник  $\eta = 60\%$ , гармигунҷоиши хоси об  $c = 4,2 \text{ кҶ/(кг} \cdot ^\circ \text{С)}$  ва гармии хоси буғгардонии он  $L = 2,3 \text{ МҶ/кг}$  буданаширо ба эътибор гиред

$$(\tau \approx 1,5 \text{ дақ.})$$

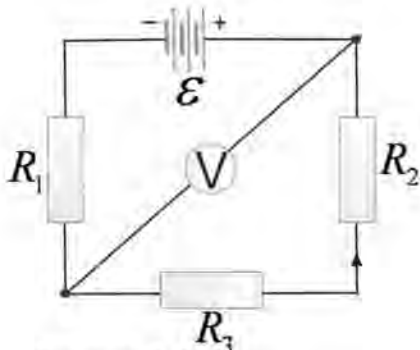
2.18. Ҳангоми чараёни қуввааш  $I_1 = 3 \text{ А}$  дар қитъаи берунии занҷири аккумулятор иқтидори  $P_1 = 18 \text{ Вт}$  ва дар мавриди чараёни қуввааш  $I_2 = 1 \text{ А}$  иқтидори  $P_2 = 10 \text{ Вт}$  вусъат меёбад. Аз ин маълумот ҚЭХ-и аккумулятор, муковимати дохилии он ва ККФ дар ҳар ду маврид муайян карда шавад.

$$(\varepsilon = 12 \text{ В}, r = 2 \text{ Ом}, \eta_1 = 50\%, \eta_2 = 83\%)$$

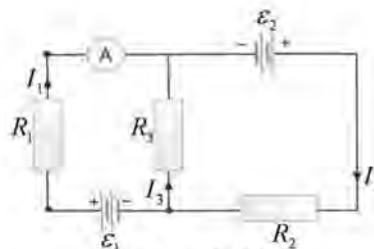


2.19. Дар расми 2.27 муковиматҳои  $R_1 = R_2 = R_3 = 100 \text{ Ом}$ , вольтметр шиддати  $U_V = 200 \text{ В}$ -ро нишон медиҳад. Агар муковимати вольтметр  $R_V = 800 \text{ Ом}$  бошад, ҚЭХ-и манбаъро муайян намоед. Муковимати дохилии манбаъро ба этибор нагиред.

$$(\mathcal{E} = 325 \text{ В})$$



Расми 2.27



Расми 2.28

2.20. Ба занҷири генератори ҚЭХ-аш  $\mathcal{E} = 200 \text{ В}$  муковиматҳои  $R_1 = 200 \text{ Ом}$  ва  $R_2 = 1000 \text{ Ом}$  пай дар пай васланд. Дар нӯгҳои  $R_2$  вольтметр пайваस्त мебошад ва он шиддати  $U_2 = 160 \text{ В}$ -ро нишон медиҳад. Муковимати вольтметр чӣ қадар аст? Муковимати дохилии манбаъ ба этибор гирифта нашавад.

$$(R_V = 4 \text{ кОм})$$

2.21. Муковимати  $R$ -ро батареяи аз  $N$  элементҳои якхела таркибёфта бо чараён таъмин менамояд. Хангоми чӣ қадар будани муковиматҳои дохилии ҳар як элемент ( $r$ ) қувваи чараён ҳам дар мавриди параллелан ва ҳам пай дар пай васл кардани элементҳо баробар ( $I_{\text{пар}} = I_{\text{пай}}$ ) мешавад?

$$(r = R)$$

2.22. Се чароғаки автомобилии параллелан пайваस्त, ки ҳар яке ба шиддати  $6,3 \text{ В}$  ва чараёни қуввааш  $0,3 \text{ А}$  таъйин шудааст, ба воситаи реостат аз аккумулятори ҚЭХ-аш  $9 \text{ В}$  ва муковимати дохилиаш  $1 \text{ Ом}$  ғизо мегиранд. Агар яке аз чароғакҳо аз кор барояд («сӯзад») барои мисли пештара фурузон шудани чароғакҳои боқимонда муковимати реостатро чӣ қадар бояд тағйир дод?

(ба  $1,5 \text{ Ом}$  зиёд кардан мебояд)

2.23. ҚЭХ-и батареяҳо  $\mathcal{E}_1 = 2 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 4 \text{ В}$ , муковимати  $R_1 = 0,5 \text{ Ом}$ , афтиши шиддат дар муковимати  $R_2$  ба  $U_2 = 1 \text{ В}$  баробар аст (расми 2.28). Нишондоди амперметр муайян карда шавад.

$$(I_1 = 2 \text{ А})$$

2.24. Қувваҳои чараён дар китъаҳои алохидаи кўпрукчаи Уитстон (расми 2.29) ба шарте ёфта шавад, ки аз галванометр мавҷудияти чараёнро нишон надиҳад ( $I_r = 0$ );  $\mathcal{E} = 2 \text{ В}$ ,  $R_1 = 30 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 45 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 200 \text{ Ом}$  бошад. Муковимати дохилии манбаъ ба этибор гирифта нашавад.

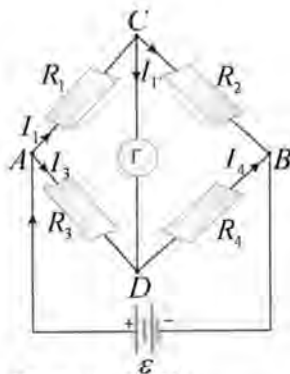
$$(I_1 = I_2 = 0,0267 \text{ А}; I_3 = I_4 = 0,004 \text{ А})$$

2.25. Микдори электри конденсатори гунҷоишаш  $C=10 \text{ мкФ}$ -ро, ки ба занҷири дар расми 2.30 тасвирёфта васл шудааст, муайян намоед. Аз резистори  $R=20 \text{ Ом}$  чараёни қуввааш  $I=1 \text{ А}$  мегузарад ва ҚЭХ-и манбаъ  $\varepsilon=12 \text{ В}$  аст. Муқовимати дохилии манбаъро ба эътибор нагиред.

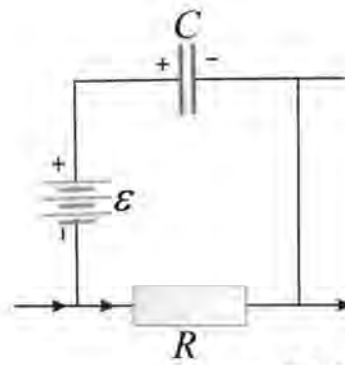
$$(Q = 320 \text{ мкКл})$$

2.26. Манбаъҳои чараёни ҚЭХ-ашон  $\varepsilon_1=12 \text{ В}$  (муқовимати дохилаш  $r_1=5 \text{ Ом}$ ) ва  $\varepsilon_2=8 \text{ В}$  ( $r_2=1 \text{ Ом}$ ) ба муқовимати  $R=20 \text{ Ом}$  тавре ки дар расми 2.31 тасвир ёфтааст, пайвастанд. Афтиши шиддат дар муқовимати  $R$  чӣ қадар аст?

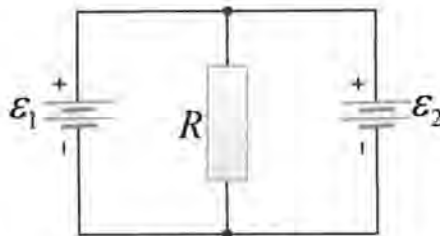
$$(U = 8,32 \text{ В})$$



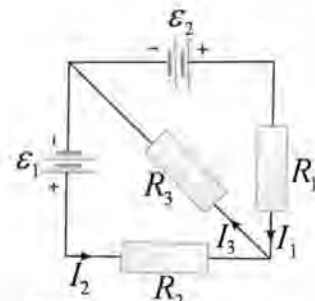
Расми 2.29



Расми 2.30



Расми 2.31



Расми 2.32

2.27. Завнчире, ки дар расми 2.32 тасвир ёфтааст, манбаъҳои ҚЭХ-ашон  $\varepsilon_1=2,1 \text{ В}$ ,  $\varepsilon_2=1,9 \text{ В}$  ва муқовиматҳои  $R_1=45 \text{ Ом}$ ,  $R_2=R_3=10 \text{ Ом}$ -ро дарбар мегирад. Қувваҳои чараёнҳои  $I_1$ ,  $I_2$  ва  $I_3$  муайян карда шаванд.

$$(I_1 = 0,04 \text{ А}; I_2 = 0,01 \text{ А}; I_3 = 0,03 \text{ А})$$

2.28. Никелондудани маснуоти металли сатҳаш  $S=120 \text{ см}^2$  дар тӯли  $t=5 \text{ соат}$  бо чараёни қуввааш  $I=0,03 \text{ А}$  сурат гирифт. Гафсии кабати никел  $h$  муайян карда шавад. Ба эътибор гиред, ки массаи молии никели дувалента  $M=58,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/мол}$  ва зичии он  $D=8,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Адади Фарадей  $F=9,648 \cdot 10^4 \text{ Кл/мол}$  мебошад.

$$(h = 15,5 \text{ мкм})$$

2.29. Барои тавассути электролиз ҳосил кардани  $V = 2,5$  л гидрогени фишораш  $p = 100$  кПа дар температураи  $t = 25^\circ\text{C}$  чӣ қадар энергия сарф мешавад? Электролиз дар шиддати  $U = 5$  В сурат мегирад ва ККФ-и дастгоҳ  $\eta = 75\%$  мебошад. Эквиваленти электрокیمیёвии гидроген  $K_H = 1,04 \cdot 10^{-8}$  кг/Кл, массаи молии он  $M = 2 \cdot 10^{-3}$  кг/мол ва дойимии универсалии газ  $R_0 = 8,31$  Ҷ/(мол·К) буданашро ба эътибор гиред.

( $W = 130$  кҶ)

2.30. Ҳангоми электролизи об аз электролити ванна микдори электри  $q = 10^3$  Кл мегузарад. Оксигени ҷудошуда тахти фишори  $p = 129$  кПа буда, ҳаҷми  $V = 0,25$  л-ро ишғол менамояд. Температураи оксиген дар ин шароит чӣ қадар аст? Эквиваленти электрокیمیёвии оксиген  $K_O = 8,3 \cdot 10^{-8}$  кг/Кл, массаи молии он  $M = 32 \cdot 10^{-3}$  кг/мол ва дойимии универсалии газ  $R_0 = 8,31$  Ҷ/(мол·К) буданаш ба эътибор гирифта шавад.

( $T = 1500$  К)

2.31. Бо таъсири ионизатор дар фазои байни рӯяхои конденсатори ҳамвори ҳавой, ки ба манбаи шиддаташ дойимӣ васл аст, дар тӯли 1 с дар ҳар  $1$  м<sup>3</sup> ба қадри  $2,5 \cdot 10^8$  ҷуфт ионҳои яқвалентӣ ба вучуд оварда мешавад. Агар масоҳати ҳар як рӯяи конденсатор  $10$  см<sup>2</sup> ва фосилаи байни рӯяҳо  $2$  см бошад, қувваи ҷараёни сершуда чӣ қадар аст?

( $8 \cdot 10^{-16}$  А)

2.32. Фарқи потенциалҳои байни абру замин ба  $10^7$  В мерасад. Агар микдори электри дар ин маврид ангишифта  $200$  Кл ва тӯли дурахшони барқ  $10^{-6}$  с бошанд, иқтидори ҳангоми ҳар як барқзани вусъатёфтаре муайян намоед.

( $10^{15}$  Вт =  $10^9$  МВт)

## МАЙДОНҲОИ МАГНИТӢ

## §3.1. Ҳодисаҳои магнитӣ

**1. Магнит. Акрабаки магнитӣ.** Аз қадимулайём маълум будааст, ки чинсҳои кӯҳии аз маъдани оҳан (мувофиқи маълумоти ҳозира 31% оҳан ва 69% оксиген) таркибёфтаи аз назди шаҳри қадимии Магнесияи Осиёи Хурд дастрасшуда ҳамдигарро ҷазб менамоянд ва онҳо *магнит* ном гирифтаанд. Магнитҳо ҷисмҳои оҳаниро ба худ мекашанд, ҳамин аст, ки онҳоро ба тоҷикӣ оҳанрабо меноманд. Ҳар гуна магнит хоҳ наълшаклу хоҳ тахташакл бошанд, ду нӯг доранд, онҳоро *кутбҳои магнитӣ* меноманд. Қобилияти ҷозибавии магнитҳо маҳз дар кутбҳо зиёдтар зоҳир мегардад. Яке аз кутбҳо *шимолию* дигаре *ҷанубӣ* ном гирифтаанд, зеро магнити дойимии сабуке, ки дар атрофи тақягоҳи нӯгтези бо маркази массаҳояш мувофиқомада озодона гардиш хӯрда метавонад-*акрабаки магнитӣ*-бо як нӯгаш дар холи дар наздаш набудани магнитҳои дигари паркувват сӯйи кутби шимоли географии Замин ва аз ин рӯ кутби муқобил ба тарафи кутби ҷанубии он нигаронида мешавад. Кутбҳои магнитиро бо сарҳарфи суҳанҳои англисии North-шимол-*N* ва South-ҷануб-*S* ишорат кардан маъмул гаштааст.

Акрабаки магнитӣ қисми асосии асбоби муҳимтарини магнитӣ-*кутбнамо-компас* (аз суҳанҳои олмонию итолиёвии *бо қадам андоза кардан*) мебошад. Хотирнишон кардан бомаврид аст, ки дар таърих ихтироъкори кутбнамо сабт наёфтааст, вале дар маъхазҳои мансуб ба садаи XI оид ба кутбнаморо истифода бурдани баҳрнавардони чинӣ маълумот оварда шудааст. Саёҳатчи машҳури итолиёвӣ Марко Поло (1254-1324) гӯё кутбнаморо ба Аврупо оварда бошад. Лекин таърихшиносони аврупоии садаи XII кашфиёти кутбнаморо ба арабҳо нисбат додаанд.

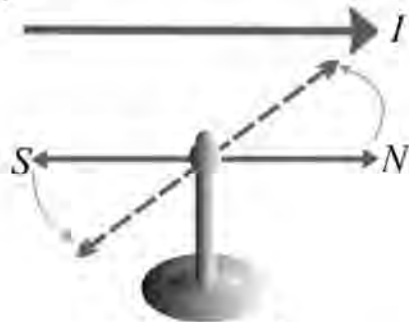
Ҳанӯз дар замони қадим медонистанд, ки кутбҳои ҳамноми магнитӣ ( $N \rightarrow N$  ва  $S \rightarrow S$ ) якдигарро тела медиҳанду кутбҳои гуногунном ( $N$  ва  $S$ ) ҳамдигарро ҷазб менамоянд. Ҳамин аст, ки кутби ҷанубии магнитии Замин дар нимкураи шимолӣ ва кутби шимолии магнитии он дар нимкураи ҷанубӣ воқеъ гардидаанд, яъне кутбҳои геомагнитӣ бо кутбҳои географӣ ҳамчоя нестанд. Тавре ки дар пешгуфтори китоб зикр ёфт, магнити азимҷусса будани Замиро У.Гилберт дар китобаш «Дар бораи магнит, ҷисмҳои магнитӣ ва Замин-магнити бузург» собит намуда буд.

Ҳоло муқаррар карда шудааст, ки меҳвари магнитии Замин нисбат ба меҳвари ҷарҳзании он ба қадри  $11,5^\circ$  майл хӯрдааст ва онро *майли магнитӣ* меноманд. Масалан, ин майл барои шаҳри Москва  $6,5^\circ$ -ро ташкил медиҳад. Кутби ҷанубии геомагнитӣ дар шимоли Канада ба қадри 1500 км дуртари кутби географӣ ҷойгир мебошад.

**2. Ҳамбастагии ҳодисаҳои электромагнитӣ. Таҷрибаҳои Эрстед.** То ибтидои садаи XIX назарияи ҷиддие доир ба табиати ҳодисаҳои магнитӣ ва алоқамандии онҳо бо ҳодисаҳои электрӣ пешниҳод нагардида буд. Азбаски магнит ба ҷисми зарядноки моддаш



гайримагнитӣ таъсире нашофт, ин ҳодисаҳо ба якдигар новобаста пиндошта мешуданд. Вале кашфиёти профессори донишгоҳи Копенгаген (Дания) Х.Х. Эрстед (1777-1851) соли 1820 сеҳри ҳодисаҳои магнитиро барканд. Ӯ ҳангоми намоиши таъсири хароратии ҷараёни электрӣ ба донишҷӯён ногаҳон мушоҳида намуд, ки ақрабаки магнитии ноҳост дар назди ноқил ба он параллелан ҷойгирбуда (расми 3.1) баробари сар додани ҷараён майл хӯрда, сӯйи ноқил нигаронида мешавад ва бо қатъ ёфтани ҷараён он ба мавқеи аввалааш бармегардад.



Расми 3.1

Эрстед бо ин кашфиёташ аввало алоқаманд будани ҳодисаҳои электрию магнитиро, ки ба ҳамбастагии онҳо боварии қатъӣ дошт (хатто ҳашт сол пеш аз ин кашфиёташ дар ин бора масъалагузорӣ ҳам карда будааст) ошкор сохт ва минбаъд ба тадқиқотҳои ҷиддио асосноки доир ба табиати магнитҳову ҳамтаъсири магнитии ҷараёнҳои электрӣ хидоят кард. Чунончӣ, олими фаронсавӣ А.М. Ампер (1775-1836) ҳамон соли 1820 муқаррар кард, ки ба ноқили ҷараёндор аз ҷониби магнитҳои дойимӣ қувва таъсир менамояд ва он ҳоло *қувваи амперӣ* ном гирифтааст, инчунин ду ноқили ростии параллелии ҷараёндор дар ҳоли ҳамсамт будани ҷараёнҳо ҳамдигарро дар масофа ҷазб менамоянд дар мавриди антипараллелӣ равон будани ҷараёнҳо якдигарро тела медуҳанд. Гузашта аз ин, Ампер хосиятҳои магнитҳои дойимиро бо мавҷудияти ҷараёнҳои молекулавӣ дар онҳо шарҳ дод. Агар ба хотир орем, ки мувофиқи назарияи муосир хосиятҳои магнитии моддаҳо бо электронҳои дар атрофи ядро даврзананда алоқаманд мебошанд, ба пешгӯйҳои Ампер дар хайрат мемонем.

**3. Майдони магнитӣ. Хатҳои магнитӣ.** Агар дар ягон нуқтаи фазо ба ақрабаки магнитӣ қувваҳои ба самти муайян нигаронида таъсир намоянд, мегӯянд, ки дар он ҷо майдони магнитӣ мавҷуд аст. Ба ин муносибат тасдиқ кардан равост, ки дар атрофи магнитҳои дойимӣ ва ҷараёнҳои электрӣ майдони магнитӣ вучуд дорад ва ҳамтаъсири онҳо тавассути майдони магнитӣ рӯй медуҳад.

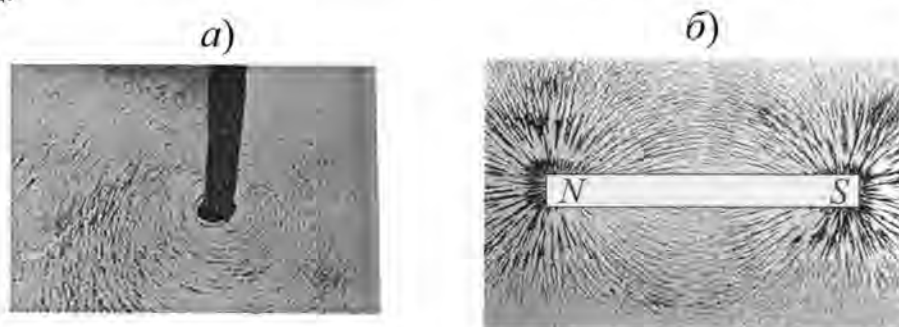
Ақрабаки магнитӣ (чун заряди озмоишӣ дар майдони электрӣ) барои ошкор соختани майдони магнитӣ хизмат мекунад. Рафтори ақрабаки магнитӣ дар майдон имкон медуҳад, ки мафҳуми *хатҳои магнитӣ* ё худ *хатҳои қуввагӣ* ворид карда шавад. Ин хатҳо ба хатҳои шадидияти майдони электрӣ шабеҳанд, вале аз онҳо фарқи кулلى доранд. Тавре ки зикр ёфта буд (ба §1.5 ниг.), хатҳои шадидияти майдони электростатикӣ аз зарядҳои мусбат ибтидо гирифта, дар

зарядҳои манфӣ тамом мешаванд ё ба беохирӣ мераванд. Бар хилофи ин, *хатҳои магнитӣ сарбастаанд*, яъне дар табиат зарядҳои магнитӣ вучуд надоранд; ягон далели таҷрибавие доир ба мавҷудияти зарядҳои магнитӣ ханӯз ёфт нашудааст.

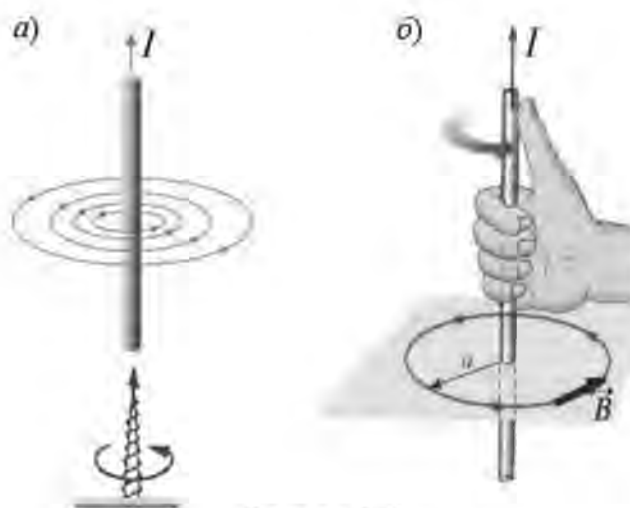
Бузургии асосии тавсифдиҳандаи майдонҳои магнитӣ *вектори индуксияи магнитӣ* ном гирифтааст. Ин вектор дар ҳар як нуқтаи хатҳои магнитӣ чун расанда самт мегирад ва ба қуввае мутаносиб мебошад, ки дар нуқтаи муайяни майдон ба қутби шимолии ақрабаки магнитии ниҳоят хурди дар он ҷойгирбуда таъсир менамояд ва шабеҳи вектори шадидияти майдони электрӣ мебошад. Ҳамин тариқ, вектори индуксия ба қонибе, ки қутби шимолии ақрабаки магнитии дар ҳар як нуқтаи хати магнитӣ ҷойгирбуда нигаронида мешавад, самт мегирад.

Ханӯз Эрстед ошкор сохта буд, ки хангоми ноқили чараёндро аз болои ақрабаки магнитӣ ҷойгир намудан қутби шимолии он ба як сӯй ва дар поёни ҳамин ноқил ба самти муқобил гардонда мешавад. Яъне, дар атрофи ноқили чараёндор ба ақрабаки магнитӣ қувваи гардишovar таъсир менамояд. Аз ин рӯ хатҳои магнитӣ сарбаста мебошанд ва самти муайян доранд. Ин хулосаро таҷрибаҳои дигар тасдиқ карданд. Олими фаронсавӣ Д.Ф. Араго (1786-1853) баъди ба чоп расидани натиҷаҳои таҷрибаҳои Эрстед (с. 1820) магнитнок шудани оҳансовҳои дар атрофи ноқили чараёндор ва магнитҳои дойимӣ пошдодаро ошкор сохт. Ҳамин буд, ки бо ёрии оҳансовҳо зоҳир гардондани хатҳои магнитӣ имконпазир шуд: ҳар як оҳансов чун ақрабаки магнитии миниётурӣ ба рафти хатҳои магнитӣ саф мекашад. Чунончӣ, дар расми 3.2 *а, б* ҷойгиршавии ин гуна оҳансовҳо дар атрофии милаи рости магнитӣ ва ноқили рости чараёндор оварда шудааст.

Бо ёрии хатҳои магнитӣ майдонҳои магнитии дар атрофи чараёнҳои электрии гуногуншакл ва магнитҳои дойимӣ мавҷудбуда ба тарзи аёнӣ омӯхта мешаванд. Масалан, дар расми 3.3 *а, б*, хатҳои қуввагии майдони магнитии ноқили рости чараёндор оварда шудаанд.



Расми 3.2



Расми 3.3

Барои муайян кардани самти хатҳои магнитӣ қойидаҳои махсус пешниҳод гардидаанд.

1) *Қойидаи пармача*: агар пармачаро ба самти ҷараён рост карда, дастаи онро тавре гардиш диҳем, ки ҳаракати пешравии пармача ба самти ҷараён мувофиқ ояд, самти гардиши нӯги дастаи ҳаёлан аз нуқтаи муайяни майдон гузаранда рафти хати магнитиро дар ин нуқта нишон медиҳад (расми 3.3 а).

2) *Қойидаи дасти рост*: агар кафи дасти рост ноқили ҷараёнро дарбар гирад ва ангушти калон (нарангушт)-и росткарда сӯйи ҷараён гардонда шавад, он гоҳ ангушти боқимондаи ин даст ба самти хатҳои магнитӣ мувофиқ меоянд (расми 3.3 б).

Ҳамин тариқ, яке аз фаслҳои физика-магнетизм аз асрҳои миёна сарчашма гирифта, минбаъд ташаккул ёфт ва маълум гардид, ки он бо ҳодисаҳои электрӣ зич алоқаманд мебошад ва ин фаслро *электродинамика* номидан раво аст.

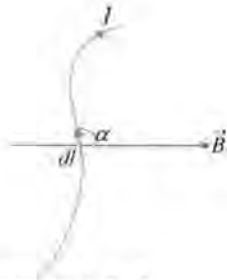
### § 3.2. Қувваи амперӣ

Аз таҷрибаҳои Эрстед бармеояд, ки ба акрабаки магнитӣ аз ҷониби майдони магнитии ҷараён қувва таъсир мекунад ва он боиси майли акрабак мешавад. Табиист, ки ҳодисаи баръакс-таъсироти майдони магнитӣ ба ноқили ҷараёндор бояд вучуд дошта бошад. Дарвоқеъ, баъди таҷрибаҳои Эрстед дере нагузашта Ампер ин гуна ҳамтасиротро ошкор кард. Ҳамин буд, ки қувваи аз ҷониби майдони магнитии магнити доимӣ ба ноқили ҷараёндор таъсирбахш *қувваи амперӣ* номида мешавад. Ампер тавассути таҷрибаҳо с. 1826 хулоса гирифт, ки бузургии қувваи зикрфта ба қувваи ҷараёни ноқил, дарозии фаъоли он-қитъаи дар майдон воқеъгардидаи ноқил ва нисбат ба хатҳои магнитӣ чӣ тарз ҷойгир будани ин ноқил вобаста аст. Ба ин муносибат қуввае, ки аз ҷониби майдони магнитӣ ба *элемент (ҷузъ)-и* ҷараён  $Idl$  таъсир менамояд, чунин пешниҳод мешавад:

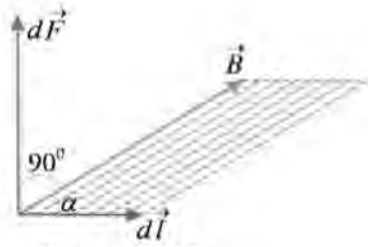
$$dF = BIdl \sin \alpha. \quad (3.1)$$

Ин таносуб чун *формулаи қувваи амперӣ* маъмул гаштааст ва онро баъзан *қонуни Ампер* низ меноманд. Дар ин формула  $B$

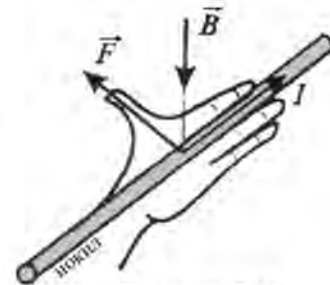
коэффитсиенти мутаносибӣ аст, ки индуксияи магнитӣ буданаширо пештар хотиррасон карда будем,  $dl$ -китъаи хурди нокили чараёндор,  $\alpha$ -кунчи байни самтҳои чараён ва вектори индуксияи магнитӣ,  $I$ -кувваи чараёни ноқил мебошанд (расми 3.4).



Расми 3.4



Расми 3.5



Расми 3.6

Дар майдонҳои якҷинса, ки дар ҳама нуктаҳои индуксияи магнитӣ ҳамон як қимат дорад ( $B = \text{const}$ ) ва хатҳои магнитии он ба ҳам параллелан равонаанд, формулаи (3.1) чунин пешниҳод мешавад:

$$F = BIl \sin \alpha. \quad (3.2)$$

Қонуни Ампер дар шакли векторӣ намуди зерин мегирад:

$$d\vec{F} = I[d\vec{l} \times \vec{B}]. \quad (3.3)$$

Яъне, самти қувваи амперӣ мувофиқи зарби вектории  $[d\vec{l} \times \vec{B}]$  муайян карда мешавад ва аз ин рӯ ба ҳамворие, ки векторҳои  $d\vec{l}$  ва  $\vec{B}$  ҷойгиранд, амудан равонааст (расми 3.5). Дар амалия барои муайян кардани самти қувваи амперӣ қойидаи махсус—қойидаи дасти чапро истифода мебаранд: дасти чапро тавре бояд ҷойгир кард, ки вектори индуксия  $\vec{B}$  ба қафи он амудан ворид гардад, чор ангушти ростии ин даст самти чараёни ноқилро нишон диҳанд, онгоҳ ангушти калон ба самти чараён таҳти кунчи рост равонбуда сӯйи қувваи амперӣ нигаронида мешавад (расми 3.6).

Дар мавриди  $\alpha = 90^\circ$  будан модули қувваи амперӣ қимати зиёдтарин мегирад:

$$F_{\max} = Bldl. \quad (3.4)$$

Аз ин ҷо модули индуксияи магнитӣ  $B$ -ро муайян кардан мумкин аст:

$$B = \frac{F_{\max}}{ldl}. \quad (3.5)$$

Бо ин аломаташ вектори индуксияи магнитӣ шабеҳи вектори шадидияти майдони электрӣ ( $|\vec{E}| = |\vec{F}|/q$ ) мебошад. Ҳамин аст, ки индуксияи магнитӣ бузургии асосии тавсифдиҳандаи қуввагии майдони магнитӣ ба ҳисоб меравад. Яъне, индуксияи магнитӣ бо қувваи зиёдтарине муайян карда мешавад, ки бо он майдони магнитӣ ба элементи воҳидии чараён ( $I = 1 \text{ A}, dl = 1 \text{ м}$ ) таъсир менамояд.

Воҳиди индуксияи магнитӣ мувофиқи формулаи (3.5) муқаррар карда мешавад ва дар СИ он 1 тесла (мухтасар 1 Тл) мебошад, ки ба шарафи олими серб Н. Тесла (1856-1943) номгузорӣ шудааст; ӯ дар соҳаҳои электро- ва радиотехника корҳои намоён кардаву дар Аврупо, Амрико фаъолият дошт. 1 Тл-индуксияи нуктаи майдонест,



ки дар он ба элементи воҳидии ҷараён аз ҷониби майдони магнитӣ қувваи зиёдтарини ба  $1 \text{ Н}$  баробар таъсир менамояд. Бояд хотирнишон сохт, ки  $1 \text{ Тл}$  индуксияи хеле бузург аст; майдонҳои индуксияшон  $8\text{--}10 \text{ Тл}$  рекордӣ ҳисоб меёбанд. Индуксияи майдони магнитии Замин ҳамагӣ  $50 \text{ мкТл}$  мебошад.

### §3.3. Таъсири майдони магнитӣ ба контури ҷараёндор

Рафтори контур (ё худ рамка)-еро муҳокима менамоем, ки шаклаш чоркунҷаи  $abcd$  (тарафҳояш  $da = bc = l_1$  ва  $ab = cd = l_2$ ) мебошад дар атрофи меҳвари  $OO_1$  (расми 3.8, а) гардиш хӯрда метавонад. Агар аз контур ҷараёни қуввааш  $I$ -ро сар дода, онро дар майдони магнитии якҷинсаи индуксияаш  $\vec{B}$  ҷойгир намоем, ки хатҳои магнитӣ ба ҳамвории контур параллелан равона бошанд, мувофиқи қонуни Ампер (3.2) тарафҳои  $ad$  ва  $bc$  дучори таъсири ҷуфти қувваҳои

$$F_1 = F_2 = F_{\max} = BIl_2 \sin 90^\circ = BIl_2 \quad (3.6)$$

мешаванд. Вале ба тарафҳои  $ab$  ва  $cd$ -и контур ҳеҷ гуна қувва таъсир намекунад, зеро самти ҷараён бо самти вектори  $\vec{B}$  мувофиқан кунҷҳои  $\alpha_1 = 0^\circ$  ва  $\alpha_2 = 180^\circ$  ташкил медиҳанду синуси ин кунҷҳо баробари сифр мебошад.

Тавре ки аз механика маълум аст, ҷуфти қувваҳои  $\vec{F}_1$  ва  $\vec{F}_2$  сабабгори ба вучуд омадани моменти гардишоваре мешавад, ки модули онро бо формулаи:

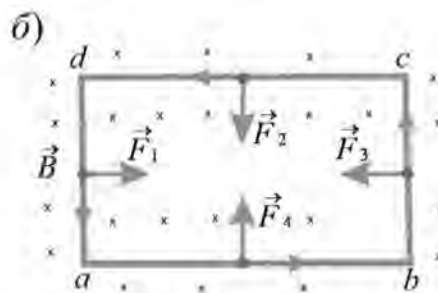
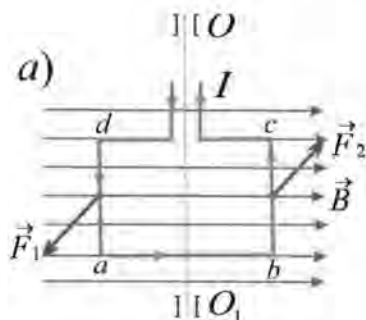
$$M = Fl_1 = BIl_1l_2 = BIS \quad (3.7)$$

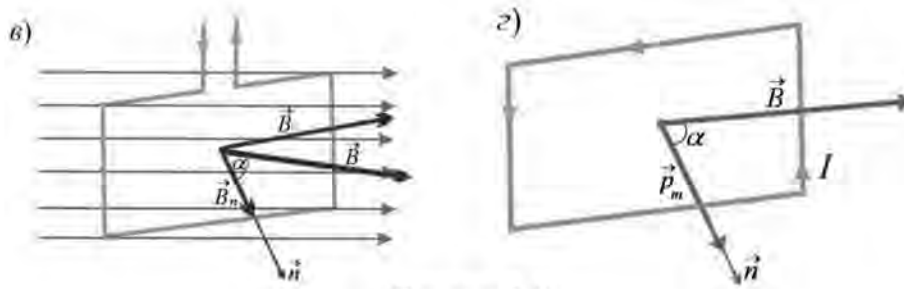
ҳисоб карда метавонем. Дар ин ҷо  $S = l_1l_2$  - масоҳати контур аст.

Бузургии:

$$p_m = IS \quad (3.8)$$

моменти магнитии ҷараён ном дорад ва воҳиди он дар СИ  $1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$  буданаш аз (3.8) бармеояд. Бояд хотирнишон сохт, ки моменти магнитии ҷараён бузургии векторӣ мебошад ва он чун нормал ба сатҳи контур  $S$ -равона асту бо ёрии қойидаи пармача муқаррар карда мешавад: агар дастаи пармачаро ба рафти ҷараён гардонем, ҳаракати пешравии пармача ба самти вектори  $\vec{p}_m$  рост меояд (расми 3.8, б).





Расми 3.8

Хамин тарик, ба контури ҷараёндор дар мавриди ҳамвори он ба хатҳои магнитӣ параллелан ҷойгир шудан моменти гардишовари зиёдтарини:

$$M_{\max} = p_m B \quad (3.9)$$

таъсир менамояд. Ин формуларо барои муайян кардани индуксияи магнитӣ  $\vec{B}$  низ истифода бурдан мумкин аст.

Дар ҳоли ҳамвори контури ҷараёндорро амудан бурида гузаштани хатҳои куввагии майдони магнитӣ ба контур куввахое таъсир менамоянд, ки онро дучори деформатсия мегардонанд: контурро вобаста ба самти ҷараёнаш мефишоранд (расми 3.8, б) ё аз ҷор атрофаш мекашанд.

Дар мавриди умумӣ, вақте ки вектори  $\vec{B}$  бо самти нормал ба сатҳи контур  $\vec{n}$  кунҷи  $\alpha$  ташкил медиҳад (расми 3.8, в), вектори  $\vec{B}$ -ро ба ду ташкилдиханда:  $B_{\parallel} = B \sin \alpha$  (он ба ҳамвори контур параллелан равона аст) ва  $B_{\perp} = B \cos \alpha$  (ин ташкилдиханда аз рӯи нормали  $\vec{n}$  самт дорад) ҷудо карда, муайян намудан душвор нест, ки ташкилдихандаи ба ҳамвори контур параллелан равонабуда (чун дар расми 3.8, а) моменти гардишовари зеринро сабабгор мешавад:

$$M = p_m B_{\parallel} = p_m B \sin \alpha. \quad (3.10)$$

Ин формуларо ба тарзи векторӣ пешниҳод кардан мумкин аст:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}] \quad (3.11)$$

Вектори  $\vec{M}$  контурро тавре гардониданӣ мешавад, ки моменти магнитӣ  $\vec{p}_m$  суйи вектори  $\vec{B}$  майл хӯрад.

Кореро, ки барои ба кунҷи  $d\alpha$  гардондани моменти магнитии контур иҷро мешавад, тавре ки аз механика маълум аст, бо формулаи:

$$\delta A = M d\alpha = p_m B \sin \alpha d\alpha = dW \quad (3.12)$$

муайян карда метавонем. Ин кор боиси тағйироти энергияи контури ҷараёндори дар майдони магнитӣ ҷойгирбуда мешавад. Бузургии энергияи контурро тавассути ҳисоби интегралӣ ёфтани мумкин аст:

$$W = \int_0^{\alpha} p_m B \sin \alpha d\alpha = -p_m B \cos \alpha = -\vec{p}_m \vec{B} \quad (3.12)$$

Яъне, контури ҷараёндори дар майдони магнитӣ воқеъгардида дорои энергия мебошад ва бузургии он бо ҳосили зарби скалярии векторҳои  $\vec{p}_m$  ва  $\vec{B}$  бо аломати минус муайян карда мешавад.

Хотирнишон кардан бамаврид мебошад, амали аксар мухаррик (мотор)-ҳои электрӣ, инчунин *асбобҳои* андозагирии электрии *системашон* ба ном *магнитоэлектрӣ* ба таъсироти гардишовари майдони магнитӣ ба контури чараёндог асос ёфтааст.

### § 3.4. Қонуни Био – Савар – Лаплас

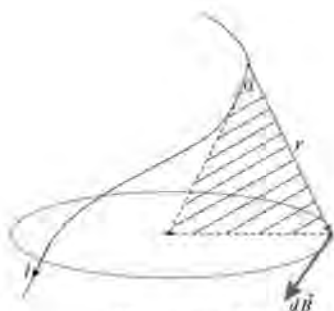
Баъди кашфиёти Эрстед майдони магнитии чараёнҳои гуногун босуръат мавриди тадқиқ қарор ёфт. Чунончӣ, олимони фаронсавӣ Ж.Б. Био (1774-1862) ва Ф. Савар (1791-1841) майдони магнитиро, ки чараёнҳои ростхатта, дойиравӣ, ғалтаки симини чараёндог ва ғайра дар ҳаво ба вучуд меоранд, тадқиқ намуданд. Дар асоси таҷрибаҳои сершумор онҳо хулоса гирифтанд, ки индуксияи майдони нокили чараёндог ба қувваи чараён, шакл ва андозаҳои нокил мавқеи нуқтае, ки дар он вектори индуксияи магнитӣ муайян карда мешавад, инчунин хосиятҳои магнитии муҳити атрофи нокил вобаста мебошад.

Натиҷаҳои таҷрибаҳои Био ва Саварро ситорашинос, математик ва физики машҳури фаронсавӣ П. Лаплас (1749 - 1827) ҷамъбаст намуд. Ҷислати векторӣ доштани индуксияи магнитиро ба эътибор гирифта, барои майдони магнитӣ низ раво будани принсипи суперпозитсияро пешниҳод кард: индуксияи натиҷавии майдони магнитии якчанд чараёнҳо ба ҳосили ҷамъи вектори индуксияи магнитии чараёнҳои алоҳида баробар аст. Чунончӣ, индуксияи натиҷавии майдони элементҳои чараён:

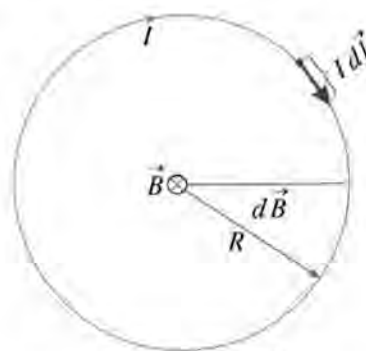
$$\vec{B} = \Delta\vec{B}_1 + \Delta\vec{B}_2 + \dots + \Delta\vec{B}_n = \sum_{i=1}^n \Delta\vec{B}_i \quad (3.14)$$

Мувофиқи қонуне, ки ҳамчун *қонуни Био-Савар-Лаплас* маъмул гаштааст, индуксияи магнитии элементҳои чараён  $I d\vec{l}$  дар масофаи  $r$  аз он (расми 3.8) бо формулаи зерин муайян карда мешавад:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2} \quad (3.15)$$



Расми 3.8



Расми 3.9

Дар он  $\alpha$  - кунҷи байни самти  $I d\vec{l}$  ва радиус-векторе, ки аз ин элемент то нуқтаи дар он вектори  $d\vec{B}$  муайяншаванда фурувардан мебояд,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н / А}^2$  (минбаъд нишон медиҳем, ки номи ин воҳид  $\text{ХН/м}$  мебошад)-дойимии магнитист,  $\mu$ -коэффитсиенти алоҳида аст, ки хосиятҳои магнитии муҳити атрофи нокили чараёндогро тавсиф

медихад (ниг. §4.12), масалан дар вакуум (амалан дар ҳаво)  $\mu = 1$  мебошад.

Формулаи (3.15) ба тарзи векторӣ намуди зерин мегирад:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l}\vec{r}]}{r^3}. \quad (3.16)$$

Аз ин формула (бо дар назардошти зарби вектории  $I d\vec{l}$  ва  $\vec{r}$ ) бармеояд, ки вектори  $d\vec{B}$  ба ҳамвории дар он векторҳои зарбшаванда ҷойгирбуда амудан равона аст.

Барои тавсифи майдони магнитӣ ба ғайр аз вектори индуксия  $\vec{B}$  бузургии ёридикандаи ба ном *шадидияти майдони магнитӣ*  $\vec{H}$  низ истифода мешавад, ки дар муҳитҳои якҷинса бо вектори  $\vec{B}$  ҳамсамт буда, бо он таносуби зерин дорад:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0} \quad (3.17)$$

ё худ

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H} \quad (3.18)$$

Фарқияти  $\vec{H}$  ва  $\vec{B}$  дар он аст, ки шадидият ба хосиятҳои магнитии муҳити атрофи ноқили ҷараёндор вобаста несту бо дигар хислатҳои шабеҳи вектори  $\vec{B}$  мебошад. Ҳамин аст, ки формулаҳои (3.15) ва (3.16) барои шадидият намудҳои соддатар мегиранд:

$$dH = \frac{I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}; \quad (3.19)$$

$$d\vec{H} = \frac{I[d\vec{l}\vec{r}]}{4\pi r^3}. \quad (3.20)$$

Аз (3.19) бармеояд, ки *воҳиди H* дар СИ 1 A/m мебошад.

Акнун якҷанд намунаҳои татбиқи амалии қонуни Био–Савар–Лапласро баррасӣ менамоем.

**1. Майдони магнитии ҷараёни дойиравӣ дар марказаш** (расми 3.9). Дар ин маврид радиус-векторе, ки аз элементи дилхоҳи  $I dl$  ба маркази ҷараёни дойиравӣ фуруварда мешавад, ба ин элемент амуд аст ( $\alpha = 90^\circ$ ). Ғайр аз он, тамоми векторҳои  $d\vec{B}$  ба ҳамвории дойираи ҷараён амудан (дар мисоли расми 3.9 мавриди ба рафти гашти акрабаки соат самт гирифтани ҷараён  $d\vec{B}$ -ҳо аз мо ба ҳамвории нақша) равонаанд. Аз ин рӯ, амали ҷамъи векторҳо бо ҷамъи модулҳои онҳо иваз карда ҳисоби интегралиро истифода бурдан раво аст ( $r = R$ ):

$$B = \int dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} \int_0^{2\pi R} dl = \mu\mu_0 \frac{I}{2R}.$$

Ҳамин тарик, индуксияи майдони магнитии ҷараёни дойиравии радиусааш  $R$  дар маркази он бо формулаи



$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2R} \quad (3.21)$$

муайян карда мешавад, аз ин рӯ шадидияти майдони магнитии ин гуна ҷараён дар марказаш:

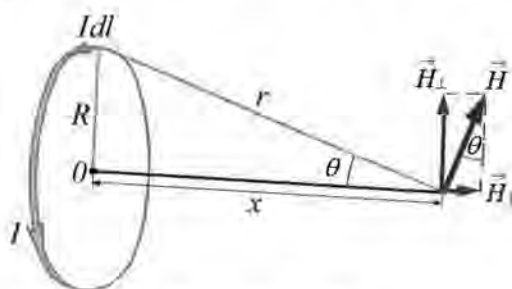
$$H = \frac{I}{2R} \quad (3.22)$$

ва дар мавриди аз  $N$ -то печак иборат будани ғалтаки ҷараёнҳои дойиравӣ:

$$H = \frac{NI}{2R} \quad (3.23)$$

мебошад. Аз (3.22) бар меояд, ки 1 А/м-шадидияти майдони ҷараёни дойиравии қуввааш 1 А ва радиусаш  $R = 0,5$  м дар маркази ин ҷараён аст.

**2. Майдони магнитии ҷараёни дойиравӣ дар меҳвараш.** Акун шадидияти майдони магнитии ҷараёни дойиравии радиусаш  $R$ -ро дар меҳвараш дар масофаи  $x$  аз он муайян менамоем (расми 3.10).



Расми 3.10

Шадидияти майдоне, ки элементи ҷараён  $Idl$  дар масофаи  $r$  аз он дар меҳвар ба вуҷуд меорад, мувофиқи (3.19):

$$dH = \frac{Idl \sin \alpha}{4\pi r^2} \quad (3.24)$$

аст. Агар ба эътибор гирем, ки дар ин маврид  $\alpha = 90^\circ$  ва радиус-вектор  $r$  дар масофаи  $x$  аз маркази ҷараён ҳамон як қимат дораду бо меҳвар кунчи  $\theta$ -ро ташкил медиҳад, яъне

$$x = r \cos \theta; \quad x = R / \sin \theta; \quad r = \sqrt{x^2 + R^2}. \quad (3.25)$$

Масофаҳои  $x$ ,  $r$  ва  $R$  бетағйиранд, аз ин рӯ вектори  $d\vec{H}$ -ро ба ду ташкилдиханда ҷудо карда метавонем:

$$d\vec{H} = d\vec{H}_{\perp} + d\vec{H}_{\parallel}$$

ва

$$dH_{\perp} = dH \sin \theta; \quad dH_{\parallel} = dH \cos \theta$$

мебошанду  $d\vec{H}_{\parallel}$  ба меҳвари ҷараён параллелан,  $d\vec{H}_{\perp}$  ба ин меҳвар амудан равонаанд. Ғайр аз он, ба ҳар як элементи  $Idl$ -и ҷараён элементи симметрии  $Idl'$  мавҷуд аст, ки дар натиҷа:

$$\sum d\vec{H}_{\perp} = 0; \quad \sum d\vec{H}_{\parallel} = \vec{H}$$

мешавад ва  $\vec{H}$  ба рафти меҳвар самт мегард. Бо дарназардошти (3.23) ва (3.24) барои шадидияти майдони магнитӣ чунин баробарӣ ҷой дорад:

$$H = \int dH = \int dH \cos\theta = \frac{I}{4\pi r^2} \cos\theta \int_0^{2\pi R} dl =$$

$$= \frac{I}{4\pi r^2} \frac{x}{R} 2\pi R = \frac{I}{2r^3} R = \frac{I}{2R \sqrt{\left(1 + \frac{x^2}{R^2}\right)^3}},$$

яъне,

$$H = \frac{I}{2R \sqrt{\left(1 + \frac{x^2}{R^2}\right)^3}} \quad (3.25)$$

ва

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2R \sqrt{\left(1 + \frac{x^2}{R^2}\right)^3}} \quad (3.26)$$

буданаш маълум мегардад. Дарвоқеъ, дар маркази ҷараён ( $x=0$ ) аз (3.25) ва (3.26) формулаҳои (3.21) ва (3.22) бармеоянд.

Дар мавриди  $x \gg R$  будан  $1 + \frac{x^2}{R^2} \approx \frac{x^2}{R^2}$  қабул кардан раво аст, он гоҳ формулаҳои зерин ҳосил мешаванд:

$$H = \frac{IR^2}{2x^3}; \quad (3.27)$$

$$B = \mu\mu_0 \frac{IR^2}{2x^3}. \quad (3.28)$$

Бо дарназардошти (3,8) формулаҳои (3.27) ва (3,28) – ро ба намуди зерин пешниҳод кардан мумкин аст:

$$H = \frac{P_m}{2\pi x^3}; \quad (3.30)$$

ва

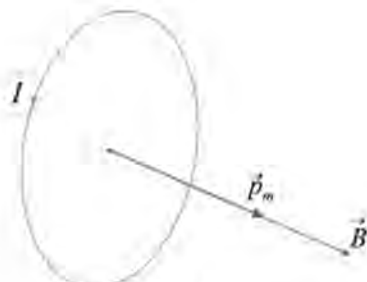
$$B = \mu\mu_0 \frac{P_m}{2\pi x^3}. \quad (3.31)$$

Моменти магнитии ҷараён  $\vec{p}_m$  чун векторе доништа мешавад, ки самти онро мутобиқи қойидаҳои дасти рост ё пармача муайян карда метавонем (расми 3.11) ва он бо вектори  $\vec{B}$  ҳамсамт буданаш маълум мегардад. Аз ин рӯ дар мавриди  $x \gg R$  формулаҳои (3.30) ва (3.31) - ро дар шакли векторӣ низ пешниҳод карда метавонем:

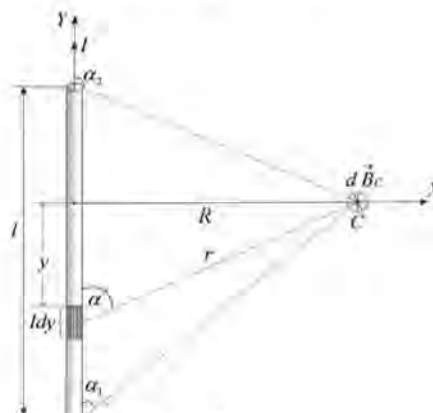
$$\vec{H} = \frac{\vec{p}_m}{2\pi x^3}; \quad (3.32)$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \frac{\vec{p}_m}{2\pi x^3}, \quad (3.33)$$

Ин формулаҳо шабеҳи шадидият ва индуксияи майдони электрии дипол буданашонро пайхас кардан мумкин аст (ниг §1.4).



Расми 3.11



Расми 3.12

**3. Майдони магнитии чараёни ростхатта.** Аввало майдони магнитии нокили ростхаттаи чараёндори дарозиаш  $l$ -ро дар нуктаи  $C$ , ки аз нокил дар масофаи  $R$  воқеъ гардидааст, муҳокима менамоем (расми 3.12).

Пеш аз ҳама бояд ба эътибор гирифт, ки вектори индуксия (шадидият)-и майдони магнитии тамоми элементҳои чараёни ростхатта ба вучуд оваранда ба ҳамвории нақша (дар мавриди аз поён ва боло ба рафти меҳвари  $Y$  нигарон будани чараён) амудан (аз мо) равона мебошад (дар расми 3.12  $\vec{B}_C$  дар нуктаи  $C$  бо дойирачаи салибдор нишон дода шудааст). Аз ин рӯ бузургии вектори  $d\vec{B}$  дар нуктаи  $C$ , ки элементи чараён  $Idy$  ба вучуд меорад, мувофиқи қонуни Био-Савар-Лаплас:

$$dB = \mu\mu_0 \frac{Idy \sin \alpha}{4\pi r^2}$$

мебошад.

Азбаски ҳама  $d\vec{B}$ -ҳои тамоми элементҳои чараёнҳои нокили дарозиаш  $l$  ба ҳамон як сӯ (аз мо амудан сӯи ҳамвории нақша) равонаанд, модули вектории натиҷавӣ  $\vec{B}$ -ро тавассути ҳисоби интегралӣ муайян кардан раво аст:

$$B = \int_0^B dB = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{dy \sin \alpha}{r^2}.$$

Акнун ба назар мегирем, ки  $y = \frac{R}{\operatorname{tg} \alpha} = R \operatorname{ctg} \alpha$ ;  $dy = -\frac{R}{\sin^2 \alpha} d\alpha$ ;  $r = \frac{R}{\sin \alpha}$ ; мебошанд, ифодаи таҳтинтегралӣ:

$$\frac{dy \sin \alpha}{r^2} = \frac{-\frac{R}{\sin^2 \alpha} d\alpha \sin \alpha}{R^2} = -\frac{\sin \alpha}{R} d\alpha$$

буданаш маълум мегардад, аз ин рӯ

$$B = -\frac{\mu\mu_0 I}{4\pi} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\sin \alpha}{R} d\alpha = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

аст.

Ҳамин тариқ, индуксияи магнитии қитъаи нокили дарозиаш  $l$ , кувваи ҷараёнаш  $I$  дар масофаи  $R$  аз ин нокил бо формулаи:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad (3.34)$$

муайян карда мешавад.

Дар мавриди ҷараёни рохаттаи беохир  $\alpha_1 \rightarrow 0^\circ$  ва  $\alpha_2 \rightarrow 180^\circ$  ( $\cos \alpha_1 = 1$ ;  $\cos \alpha_2 = -1$ ) ва аз ин рӯ:

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi R}; \quad (3.35)$$

$$H = \frac{I}{2\pi R} \quad (3.36)$$

мебошанд.

### §3.5. Ҳамтаъсиrotи ҷараёнҳои параллелӣ

Тавре ки зикр ёфт (§3.1), А. Ампер с. 1820 тавассути таҷрибаҳо ҳамтаъсиrotи ҷараёнҳои ростии параллелиро ошкор сохт: ду нокили ростии параллелии ҷараёндор хангоми ҳамсамт будани ҷараёнҳо (расми 3.13) ба якдигар ҷазб мешаванду дар мавриди ҷараёнхоро муқобилсамт равона кардан ҳамдигарро тела медиханд. У с. 1826 қонуни ҳамтаъсиrotи ҷараёнҳои параллелиро муқаррар намуд.

Бино ба ақидаи Ампер, индуксияи майдони магнитии ҷараёни  $I_1$  дар он ҷое, ки ҷараёни  $I_2$  воқеъ гардидааст (расми 3.13), мувофиқи (3.35):

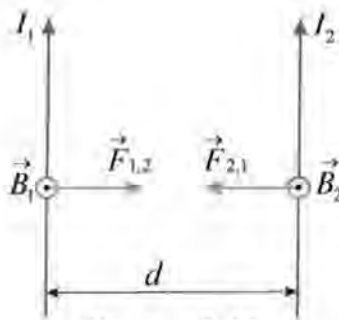
$$B_1 = \mu\mu_0 \frac{I_1}{2\pi d} \quad (3.37)$$

мебошад, ки дар он  $d$ -фосилаи байни ҷараёнхост (вектори  $\vec{B}_1$  дар асоси қоидаи дасти рост аз мо амудан ба ҳамвориин нақша самт мегирад). Ин майдон ба қитъаи нокили ҷараёндори дарозиаш  $l$ -и кувваи ҷараёнаш  $I_2$  мувофиқи (3.4) бо кувваи зиёдтарини:

$$F_{2,1} = B_1 I_2 l \quad (3.38)$$

таъсир мекунад, ки хангоми ҳамсамт будани ҷараёнҳо (расми 3.13) мутобиқи қоидаи дасти чап (§3.2) сӯйи ҷараёни  $I_1$  равона мебошад (яъне кувваи ҷозиба аст).





Расми 3.13

Айнан ҳамин тарз, ба китъаи дарозиаши  $l$ -и ҷараёни  $I_1$  аз ҷониби майдони магнитии ҷараёни  $I_2$  қувваи зиёдтарини:

$$F_{1,2} = B_2 I_1 l \quad (3.39)$$

таъсир менамояд, ки сӯйи ҷараёни  $I_2$  равона мебошад ва дар он  $B_2$ -индуксияи майдони магнитии ҷараёни  $I_2$  дар он ҷое, ки ҷараёни  $I_1$  воқеъ гардидааст:

$$B_2 = \mu \mu_0 \frac{I_2}{2\pi d} \quad (3.40)$$

мебошад.

Ифодаи (3.37)-ро ба (3.38) ва (3.39)-ро ба (3.40) гузошта, бузургии қувваҳои ҷозибаи ҷараёнҳои параллелиро муайян карда метавонем:

$$F = F_{2,1} = F_{1,2} = \mu \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi d} l. \quad (3.41)$$

Дар натиҷа маълум мешавад, ки дар мавриди ҳамтаъсироти магнитии ҷараёнҳои параллелӣ қонуни сеюми Нютон ҷой дорад.

Ба хонанда тавсия медиҳем, ки ҳангоми муқобилсамт будани ҷараёнҳои  $I_1$  ва  $I_2$  ҳамин қадар қувваҳои таладихӣ таъсир карданашонро муайян намояд ва шарҳ диҳад.

Ҳамин аст ифодаи математикии қонуни ҳамтаъсироти ҷараёнҳои параллелӣ (3.41), ки Ампер муқаррар карда буд.

Маҳз мувофиқи қонуни ҳамтаъсироти ҷараёнҳои параллелӣ (3.41) яке аз воҳидҳои асосии системаи Байналмилалӣ воҳидҳои (СИ)-1 ампер (муқтасар 1 А) муқаррар карда мешавад:

*1 А қувваи ҷараёни тағйирнаёбанда аст, ки аз ду ноқили беохири бурришгоҳи арзиашон дойиравии ниҳоят хурд, ки аз якдигар дар вакуум ( $\mu=1$ ) дар фосилаи 1 м ҷойгиранд, гузашта қувваи ҳамтаъсироти магнитии бузургияш  $2 \cdot 10^{-7}$  Н -и ба ҳар як метри дарозии ноқилҳо мувофиқ меомадаро ба вучуд меорад.*

Таърифи воҳиди қувваи ҷараён дар СИ имкон медиҳад, ки қимати дойимии магнитӣ  $\mu_0$  муайян карда шавад. Дарвоқеъ, агар ҳангоми  $I_1 = I_2 = 1$  А,  $d = 1$  м,  $\mu = 1$ ,  $F/l = 2 \cdot 10^{-7}$  Н/м буданаширо ба эътибор гирем, маълум кардан душвор нест, ки мувофиқи (3.41):

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н} / \text{А}^2 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ ХН} / \text{м}$$

мебошад ва дар ин ҷо хенри (ХН)-воҳиди бузургии ба ном индуктивият буданаширо минбаъд муайян хоҳем кард.

**Мисоли 3.1.** Дар нӯғҳои ду сими борик нокили росхаттаи дарозиаиш  $20\text{ см}$  ва массааш  $10\text{ г}$  овезон аст. Хатҳои майдони магнитии якҷинсаи индуксиаш  $0,25\text{ Тл}$  шокулан нокилро бурида мегузаранд (расми 3.14). Агар аз нокил чараёни қуввааш  $2\text{ А}$  сар дода шавад, он аз самти шоқулӣ ба кадом кунҷи  $\alpha$  майл меҳӯрад? Шитоби афтиши озод  $g = 10\text{ м/с}^2$  қабул карда шавад.

*Маълумот.*

$m = 10\text{ г} = 10^{-2}\text{ кг}$
$AB = l = 0,2\text{ м}$
$B = 0,25\text{ Тл}$
$I = 2\text{ А}$
$\alpha - ?$

*Ҳал*

Ба нокили чараёндоори  $AA_1$  қувваи вазнинии  $F_g = mg$  (аз рӯйи хатти шоқулӣ амудан ба поён), қувваи уфуқан равоншудаи амперии  $F_T = BIl$  ва қувваи тарангии симҳо  $F_T$  таъсир мекунанд. Дар натиҷа нокили  $AA_1$  аз самти шоқулӣ

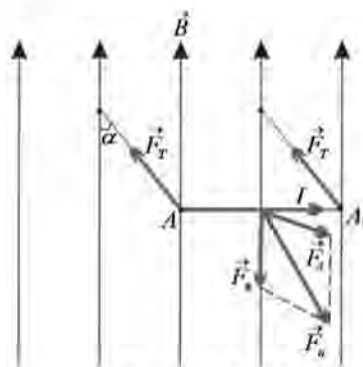
(вертикалӣ) қадре майл меҳӯрад, ки қувваи натиҷавии  $\vec{F}_n = \vec{F}_g + \vec{F}_A$  қувваҳои тарангиро ба мувозанат оварад. Дар ин вазъият қувваҳои натиҷавӣ  $\vec{F}_n$  ва  $\vec{F}_T$  дар як ҳамворӣ меҳобанд. Ҳамин аст, ки:

$$\operatorname{tg}\alpha = F_A / F_g$$

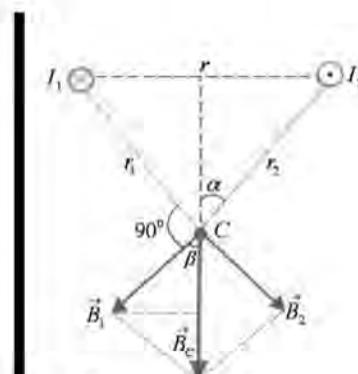
мешавад. Аз ин ҷо

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{F_A}{F_g}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{BIl}{mg}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{0,25\text{ Тл} \cdot 2\text{ А} \cdot 0,2\text{ м}}{10^{-2}\text{ кг} \cdot 10\text{ м/с}^2}\right) = \operatorname{arctg}1 = 45^\circ$$

Ҷавоб:  $\alpha = 45^\circ$ .



Расми 3.14



Расми 3.15

**Мисоли 3.2.** Аз ду нокили беинтиҳои параллелии фосилаи байнашон  $20\text{ см}$  чараёнҳои муқобилсамти қувваашон баробари  $50\text{ А}$  мегузаранд. Индуксияи майдони магнитии чараёнҳоро дар нуқтае муайян намоед, ки аз ҳар ду чараён дар масофаҳои баробари  $17\text{ см}$  ҷойгир аст.

Маълумот:

$$\begin{array}{l} r = 20 \text{ см} \\ r_1 = r_2 = 17 \text{ см} \\ I = I_1 = I_2 = 50 \text{ A} \\ \hline B - ? \end{array}$$

Ҳал

Дар мавриди чараёнҳо чун дар расми 3.15 тасвирёфта равона будан векторҳои индуксияи майдонҳои ин чараёнҳо ба  $\vec{r}_1$  ва  $\vec{r}_2$  амудан самт мегиранд ва модулан:

$$B_1 = B_2 = \mu_0 \frac{I}{2\pi r_1} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{50}{2\pi \cdot 0,17} \text{ Тл} = 5,88 \cdot 10^{-5} \text{ Тл} = 58,8 \text{ мкТл}$$

мебошанд. Аз расми 3.15 пайдост, ки

$$\sin \alpha = \frac{r/2}{r_2} = \frac{r}{2r_2} = \frac{20 \text{ см}}{2 \cdot 17 \text{ см}} = 0,5882$$

ва аз ин рӯ  $\alpha \approx 36^\circ$  мебошад. Гузашта аз ин, кунчи  $\beta = 180 - (90^\circ + 36^\circ) = 54^\circ$  аст. Азбаски  $\Delta B_1 C B_2$  баробарпахлӯ мебошад, таносуби зерин ҷой дорад:

$$\frac{B_2 / 2}{B_1} = \cos \beta,$$

Аз ин рӯ:

$$B_2 = 2B_1 \cos 54^\circ = 2 \cdot 58,8 \cdot 0,5882 \text{ мкТл} = 69,12 \text{ мкТл}.$$

Ҷавоб:  $B_2 = 69,12 \text{ мкТл}$ .

**Мисоли 3.3.** Ду нокили ростхаттаи ба ҳам амуд дар масофаи 20 см аз якдигар ҷойгиранд (расми 3.16): нокили якум (қувваи чараёнаш  $I_1 = 1,5 \text{ A}$ ) дар ҳамвории нақша хобидаасту ба поён самт дорад, нокили дуюм (қувваи чараёнаш  $I_2 = 4 \text{ A}$ ) ба ин ҳамворӣ аз мушоҳид амудан равона аст. Индуксияи натиҷавии майдони магнитии чараёнҳо дар миёнҷойи фосилаи байнашон муайян карда шавад.

Маълумот:

$$\begin{array}{l} b = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м} \\ I_1 = 1,5 \text{ A} \\ I_2 = 4 \text{ A} \\ \hline B - ? \end{array}$$

Ҳал

Аз нуктае, ки дар он индуксияи натиҷавиро муайян кардан лозим аст, хатҳои қуввагии майдони ҳар як чараёнро мегузаронем,

(ёдрас мешавем, ки хатҳои қуввагии майдони магнитии ростчараён давршакли марказшон дар нокили чараёндор воқеъ мебошад ва ҳамвориашон ба ин чараёнҳо амуданд). Мувофиқи қоидаи пармача ё дасти рост самти он хатҳо ва аз ин рӯ самти векторҳои индуксияи майдони ҳар як чараёнро муқаррар менамоем. Дар мавриди расми 3.16 вектори  $\vec{B}_1$  ба ҳамвории нақша амудан сӯйи мушоҳид ва  $\vec{B}_2$  ба

боло параллелан ба нокили якум равонаанд. Мувофиқи принципи суперпозитсия:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2.$$

Азбаски  $\vec{B}_1 \perp \vec{B}_2$  мебошад ва  $B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}$  шуданашро ба эътибор мегирем. Мувофиқи (3.35) бо дарназардошти  $\mu = 1$  (дар шарти масъала оид ба муҳити атрофи нокилҳо ишорате нест ва барои аксари муҳитҳои ғайриферромагнитӣ  $\mu \approx 1$  пиндоштан равост); инчунин  $R = b/2$ :

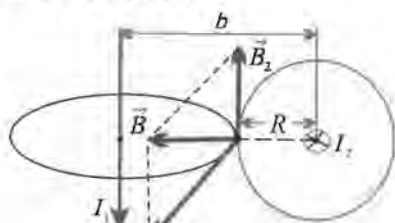
$$B_1 = \mu_0 \frac{I_1}{2\pi R} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{I_1}{2\pi(b/2)} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 1,5}{0,1} \cdot 10^{-7} Tл = 6 \text{ мкТл};$$

$$B_2 = \mu_0 \frac{I_2}{2\pi(b/2)} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{I_2 \cdot 2}{b \cdot 2\pi} = \frac{4 \cdot 2}{0,1} \cdot 10^{-7} Tл = 8 \text{ мкТл}.$$

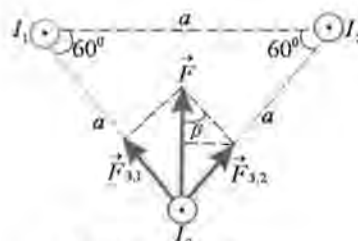
Аз ин рӯ

$$B = \sqrt{36 + 64} \text{ мкТл} = 10 \text{ мкТл}.$$

Ҷавоб.  $B = 10 \text{ мкТл}$ .



Расми 3.16



Расми 3.17

**Мисоли 3.4.** Се нокили параллелӣ, ки аз онҳо чараёнҳои куввашон баробари  $I = 10 \text{ A}$  аз қуллаҳои секунҷаи мунтазами тарафҳояш  $a = 5 \text{ см}$  мегузаранд. Дар мавриди ба як сӯ равон будани чараёнҳо ҳар як чараён аз ҷониби ду чараёни дигар дучори чӣ қадар қувваи ҳамтаъсиrotи магнитӣ мешавад?

Маълумот:

$$\begin{array}{|l} I_1 = I_2 = I_3 = I = 10 \text{ A} \\ a_1 = a_2 = a_3 = a = 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\ F - ? \end{array}$$

Ҳал

Дар мавриди ба як сӯ равона будани чараёнҳо, тавре ки дар § 3.5 зикр ёфт, дар байни чараёнҳо қувваҳои ҳамтаъсиrotи магнитии ҷозибача ба вучуд меоянд.

Масалан, ба чараёни  $I_3$  (расми 3.17) қувваҳои  $\vec{F}_{3,1}$  ва  $\vec{F}_{3,2}$  таъсир мекунанд, ки бо сабаби баробартараф будани секунҷа, бузургии онҳо ба ҳам баробаранд:

$$F_y = F_{3,1} = F_{3,2} = \mu_0 \frac{I_2 I_3}{2\pi a} = \mu_0 \frac{I^2}{2\pi a} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Хн} \frac{100 \text{ A}^2}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = \frac{2}{5} \cdot 10^{-3} \text{ Н} = 0,4 \text{ мН}.$$



Ин кувваҳо нисбат ба якдигар тахти кунчи  $60^\circ$  равонаанд ва кувваи натиҷавӣ диагонали параллелограмме мебошад, ки тарафҳои он ду кувваанд. Аз ин рӯ кувваи натиҷавиро бо формулаи:

$$\frac{F/2}{F_y} = \cos \beta$$

муайян карда метавонем. Аз расми 3.17 хувайдостки  $\beta = 30^\circ$  мебошад. Пас,

$$F = 2F_y \cos 30^\circ = 2 \cdot 0,4 \cdot 0,866 \text{ мН} \approx 0,7 \text{ мН}$$

аст.

Ҷавоб:  $F \approx 0,7 \text{ мН}$ .

**Мисоли 3.5.** Печакҳои квадратшакли тарафҳои  $a$  бо ноқили ростии беинтиҳо дар як ҳамворӣ тавре ҷойгир аст, ки ду тарафи печак ба ноқили рост параллеланду тарафи ба ноқил наздиктаринаш дар фосилаи ба дарозии тарафи  $a$  баробар воқеъ мебошад. Аз печак ва ноқил ҷараёнҳои куввашон баробари  $1 \text{ кА}$  мегузаранд (расми 3.18). Муайян бинмоед, ки ба ин печак аз ҷониби майдони магнитии ноқили беинтиҳо дароз чӣ қадар кувва таъсир мерасонад.

Маълумот:

$$\left. \begin{array}{l} I_1 = I_2 = I = 10^3 \text{ А} \\ x_1 = a \\ x_2 = 2a \\ F - ? \end{array} \right\}$$

Ҳал

Аз ҷониби майдони магнитии ноқили беинтиҳо, ки индуксияш:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi x}$$

мебошад, мувофиқи (3.1) ба

тарафи 1-2-и печак (расми 3.18) кувваи ҷозибавии амперии:

$$F_1 = IBa = I^2 \mu_0 \frac{a}{2\pi a} = \mu_0 \frac{I^2}{2\pi}$$

ба тарафи 3-4 кувваи теладиҳандаи:

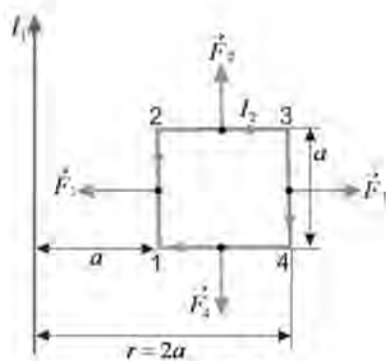
$$F_3 = IBa = I \mu_0 \frac{Ia}{2\pi \cdot 2a} = \mu_0 \frac{I^2}{4\pi}$$

таъсир менамоянд. Аз ин рӯ кувваи натиҷавӣ:

$$F = F_1 - F_3 = \mu_0 \frac{I^2}{2\pi} - \mu_0 \frac{I^2}{4\pi} = \mu_0 \frac{I^2}{4\pi} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{(10^3)^2}{4\pi} \text{ Н} = 0,1 \text{ Н}$$

мебошад.

Ба тарафҳои 2-3 ва 4-1 аз ҷониби майдони магнитии ноқили дароз кувваҳои баробар, вале муқобилсамти  $F_2 = -F_4$  ё худ  $F_2 + F_4 = 0$  таъсир мекунанд, ки якдигарро ба мувозинат меоваранд.



Расми 3.18

Ҷавоб:  $F = 0,1 \text{ Н}$

### §3.6. Қувваи лоренсӣ

Дар майдони магнитӣ ба нокили чараёндор қувваи амперӣ таъсир мекунад чараёнро дар ин ноқил ҳаракати бонизоми зарраҳои заряднок ташкил медиҳад, пас қувваеро дарёфттан мумкин аст, ки аз ҷониби майдони магнитӣ ба зарраи алоҳидаи зарядноки ҳаракатманди зарядаш  $q$  ва суръати ҳаракаташ  $\mathcal{V}$  таъсир мекунад. Дарвоқеъ, зарраи суръаташ  $\mathcal{V}$  дарозии  $dl$ -и нокили чараёндорро дар тӯли вақти  $dt = dl / \mathcal{V}$  мепаймояд ва дар ин муддат аз бурришгоҳи арзии ноқил  $N$ -то зарраи бузургии зарядаш  $q$  мегузарад. Аз ин рӯ элементи чараёнро чунин пешниҳод кардан мумкин мебошад:

$$I dl = \frac{Nq}{dt} \mathcal{V} dt = Nq \mathcal{V}.$$

Ҳамин аст, ки қувваи амперии (3.1)-ро ба намуди:

$$dF = Nq \mathcal{V} B \sin \alpha$$

оварда метавонем. Дар мавриди чараёни доимӣ тамоми зарраҳои заряднок ба ҳамон як сӯ ҳаракат мекунанд ва қувваи  $dF$ -ро чун қувваи натиҷавии ба зарраҳои хомилони чараён таъсирбахш пиндоштан раво аст. Пас, қувваи ба якто зарраи бо суръати  $\mathcal{V}$  ҳаракатманд таъсировав:

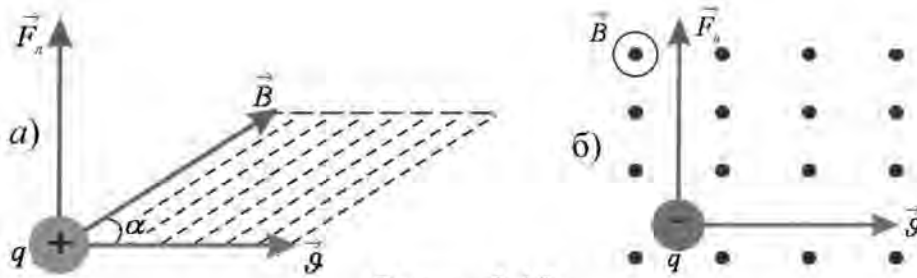
$$F_a = dF / N = q \mathcal{V} B \sin \alpha, \tag{3.42}$$

ки дар ин ҷо  $\alpha$ -кунҷи байни векторҳои  $\vec{\mathcal{V}}$  ва  $\vec{B}$  мебошад. Ин ифодаро дар шакли векторӣ чунин пешниҳод карда метавонем:

$$\vec{F}_a = q [\vec{\mathcal{V}} \vec{B}]. \tag{3.43}$$

Қувваи (3.42) ё (3.43)-ро олими голландӣ Ҳ.А. Лоренс (1853-1928)-яке аз асосгузори назарияи классикии электронӣ муқаррар карда буд ва ҳоло номи ӯро гирифтааст.

Самти қувваи лоренсӣ мувофиқи (3.43) муайян карда мешавад ва мутобиқи зарби вектории  $[\vec{\mathcal{V}} \vec{B}]$  он ба ҳамворие, ки векторҳои  $\vec{\mathcal{V}}$  ва  $\vec{B}$  ҷойгиранд, амудан раवонааст (расми 3.19, а).



Расми 3.19

Дар мавриди манфӣ заряднок будани зарраи ҳаракатманд бояд ба назар гирифт, ки чараён ба муқобили самти ҳаракати зарра равона мебошад (расми 3.19, б) ва мувофиқи қоидаи дасти чап (ниг. §3.2) дар ҳоли аз ҳамвории нақша амудан суйи мушоҳид самт доштани вектори  $\vec{B}$  қувваи лоренсӣ тавре самт дорад, ки дар расми 3.19, б тасвир ёфтааст.

Ҳамин тариқ, қувваи лоренсӣ ба самти суръати ҳаракати зарраи заряднок амуд мебошад ва аз ин рӯ он қор иҷро намекунад (яъне бузургии суръати зарраро тағйир намедихад). Қувваи лоренсӣ танҳо самти суръати ҳаракати зарраро дигар карда метавонад ва сабабгори дорои шитоби нормалӣ (ё худ марказрав) гардидани зарра мешавад.

Бояд хотирнишон сохт, ки майдони магнитӣ ба зарраи зарядноки ором таъсир намекунад ва ин яке аз хусусиятҳои фарқкунандаи майдони магнитӣ назар ба майдони электрӣ мебошад.

Агар ба зарраи зарядноки ҳаракатманд ҳамзамон ғайр аз майдони магнитии индуксияш  $\vec{B}$  майдони электрии шадидияташ  $\vec{E}$  низ таъсир намояд, қувваи натиҷавие, ки зарра таҳти таъсироти он мешавад, ба ҳосили ҷамъии вектории ду қувваи зерин баробар аст:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\left[\vec{g}\vec{B}\right]. \quad (3.44)$$

Ин ифода *формулаи Лоренс* ном дорад. Дар ин формула  $\vec{g}$ -суръати ҳаракати зарраи зарядноки  $q$  нисбат ба майдони магнитӣ мебошад.

### §3.7. Ҳаракати зарраҳои заряднок дар майдони якҷинсаи электрӣ

Ҳангоми ба фазое, ки дар он майдонҳои якҷинсаи электрии шадидияташ  $\vec{E}$  ва магнитии индуксияш  $\vec{B}$  мавҷуданд, ворид гаштани зарраи зарядаш  $q$  ва суръати ҳаракаташ  $\vec{g}$  ба ин зарра қувваи лоренсӣ (§3.6) таъсир менамояд. Аз ин рӯ мувофиқи қонуни дуоми Нютон муодилаи ҳаракати зарра намуди зерин мегирад:

$$m \frac{d\vec{g}}{dt} = q\vec{E} + q\left[\vec{g}\vec{B}\right]. \quad (3.45)$$

Агар ин муодила дар шакли проексия нисбат ба меҳварҳои координатӣ пешниҳод карда шавад, он ба се муодилаи скалярие тақсим мегардад, ки ҳар яке ҳаракати зарраро ба рафти меҳварҳои мувофиқи координатӣ ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) тасвир менамояд. Мо ҳоло мавриди соддатарро баррасӣ мекунем: бигзор зарраи заряднок дар ибтидо ба

рафти меҳвари  $X$  бо суръати  $\mathcal{G}_0$  ҳаракат намуда, ба майдони якҷинсаи конденсатори ҳамвори уфуқан ҷойгирбуда амудан ворид мешавад. Агар фосилаи байни рӯяҳои конденсатор назар ба дарозии рӯяҳо  $l$  хеле хурд бошад, майдони электроиро дар фазои байни рӯяҳо якҷинса ( $\vec{E} = \text{const}$ ) қабул кардан раво аст. Меҳвари  $Y$  - ро ба хатҳои шадидият  $\vec{E}$  параллелан равона месозем (расми 3.20). Дар ин маврид  $E_x = E_z = 0$ ;  $E_y = E$  мешавад. Ҳангоми мавҷуд набудани майдони магнитӣ ( $B_x = B_y = B_z = 0$ ) зарра чун қисми уфуқан партофташуда аз рӯйи парабола ҳаракат мекунад ва траекторияи ҳаракат дар ҳамвори  $XOY$  мебошад. Аз ин рӯ муодилаи ҳаракат дар намуди проексия:

$$\frac{d\mathcal{G}_x}{dt} = 0; \quad \frac{d\mathcal{G}_y}{dt} = \frac{q}{m} E$$

мешавад, зеро ҳаракати зарра танҳо таъсири қувваи доимии электрии  $F = qE$  сурат мегирад.

Акнун ба эътибор мегирем, ки  $\mathcal{G}_x = \frac{dx}{dt} = \text{const} = \mathcal{G}_0$  ва зарра дарозии рӯяи конденсаторро дар тӯли вақти  $t = l / \mathcal{G}_0$  мегузарад ва дар ибтидо  $\mathcal{G}_{0y} = 0$  аст. Аз ин рӯ

$$\mathcal{G}_y = \frac{q}{m} Et + \text{const}$$

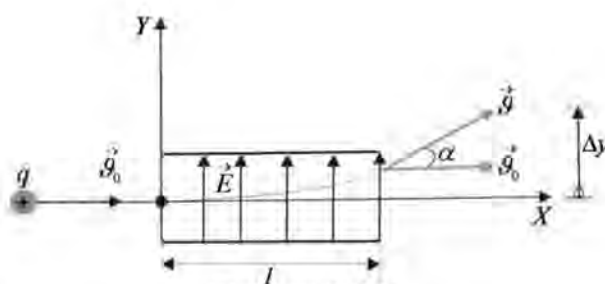
буданаширо бо истифодаи ҳисоби интегралӣ муайян карда метавонем ва бо дарназардошти  $\mathcal{G}_{0y} = 0$  доимии интегралӣ  $\text{const} = 0$  буданаши маълум мегардад. Пас,

$$\mathcal{G}_y = \frac{q}{m} \frac{El}{\mathcal{G}_0} \quad (3.46)$$

аст. Аз ин ирӯ бузургии майли зарра ба рафти меҳвари  $Y$ :

$$\Delta y = \frac{at^2}{2} = \frac{ql^2}{2m\mathcal{G}_0^2} E \quad (3.47)$$

мебошад.



Расми 3.20

**Мисоли 3.6.** Электрон бо суръати  $\mathcal{G}_0 = 10^7 \text{ м/с}$  ба фазои байни рӯяҳои конденсатори ҳамвори уфуқан ҷойгирбурда параллелан ба рӯяҳо ворид мегардад. Агар шадидияти майдони электрии конденсатор  $E = 10 \text{ кВ/м}$  ва дарозии рӯяҳо  $l = 6 \text{ см}$  бошад, модул ва



самти суръати электрон баъди конденсаторро гузаштан чӣ қадар мешавад?

Маълумот.

$$\left. \begin{aligned} g_0 &= 10^7 \text{ м/с} \\ |e| &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ m &= 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \\ E &= 10 \text{ кВ/м} = 10^4 \text{ В/м} \\ l &= 6 \text{ см} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\ g &=? \quad \alpha = ? \quad \Delta y = ? \end{aligned} \right|$$

Ҳал

Баъди ба фазои байни рӯяхои конденсатор ворид гаштани электрон ба он қувваи доимии электрии ба самти ҳаракаташ амудан равона будаи  $F = |e|E$  таъсир мекунад.

Дар натиҷа электрон ба самти муқобили вектори  $\vec{E}$  (дар расми 3.20 сӯйи меҳвари  $Y$  равонабуда) шитоб мегирад, ки модулашро мувофиқи қонуни дуҷуми Нютон дарёфта метавонем:

$$m \frac{dg}{dt} = |e|E$$

ё худ баъди татбиқи ҳисоби интегралӣ:

$$g_y = g_{0y} + \frac{|e|E}{m} t$$

буданаш маълум мегардад, ки дар ин ҷо  $t = l / g_0$  тӯли вақти ҳаракати электрон андаруни фазои конденсатор мебошад. Ба эътибор мегирем, ки то ба конденсатор ворид гаштан электрон уфуқан ҳаракат мекард ва  $g_{0y} = 0$ , аз ин рӯ

$$\vec{g} = \vec{g}_0 + \vec{g}_y$$

аст. Модули суръати натиҷавӣ (ба расми 3.20 ниг.)

$$g = \sqrt{g_0^2 + \left( \frac{|e|El}{mg_0} \right)^2} = \sqrt{\left( 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2 + \left( \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^4 \text{ В/м} \cdot 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 10^7 \text{ м/с}} \right)^2} = 1,45 \cdot 10^7 \text{ м/с}$$

Фақат электрон бо ин суръат на ба боло, балки ба поён майл мекунад.

Самти  $\vec{g}$ -ро бошад, аз секунҷаи тарафхояш  $\vec{g}$ ,  $\vec{g}_0$  ва  $\vec{g}_y$  дарёфта метавонем:

$$\cos \alpha = \frac{g_0}{g} = \frac{10^7 \text{ м/с}}{1,45 \cdot 10^7 \text{ м/с}} = 0,6897$$

ё худ

$$\alpha = \arccos 0,6897 = 46^\circ 24'.$$

Ҷавоб:  $g = 1,45 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ ;  $\alpha = 46^\circ 24'$ .

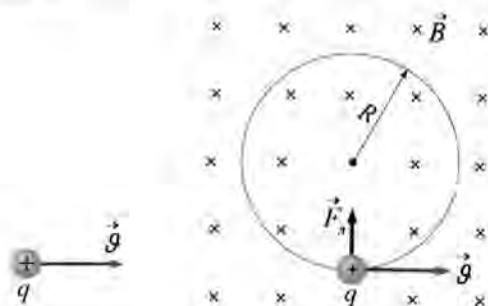
### §3.8. Ҳаракати зарраҳои заряднок дар майдони якҷинсаи магнитӣ

Майдони магнитӣ ба зарраи зарядноки ором ( $\mathcal{G} = 0$ ), тавре ки зикр ёфт, таъсир намекунад. Гузашта аз ин, дар мавриди ба рафти хатҳои магнитӣ ё муқобили онҳо ҳаракат кардани зарраи заряднок, яъне ҳангоми дар формулаи (3.42)  $\alpha = 0^\circ$  ва  $\alpha = 180^\circ$  будан низ майдон ба зарра таъсире намеоварад ва он дар ин гуна майдон мунтазаму ростхатта ҳаракат менамояд.

Агар суръати ибтидоии зарраи зарядаш  $q$  ба хатҳои магнитӣ амудан равона бошад ( $\alpha = 90^\circ$ ), он гоҳ зарра аз рӯи давраи радиусаш доимии  $R$  (расми 3.21 дар он хатҳои магнитӣ ба ҳамвории нақша амудан «аз мо» равона аст) ҳаракат мекунад, ки мувофиқи қонуни дуюми Нютон:

$$\frac{m\mathcal{G}^2}{R} = q\mathcal{G}B \quad (3.48)$$

сабт намуда метавонем.



Расми 3.21

Аз ин чо радиуси давра:

$$R = \frac{m\mathcal{G}}{qB} \quad (3.49)$$

буданаш маълум мегардад. Пас, суръати кунҷии гардиши зарра:

$$\omega = \frac{\mathcal{G}}{R} = \frac{qB}{m} \quad (3.59)$$

ва даври гардиши он:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (3.51)$$

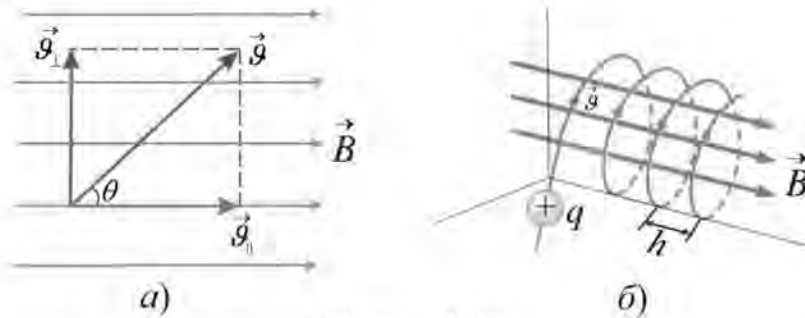
доимӣ буда, ба энергияи зарра вобаста нест. Танҳо радиуси даврае, ки зарра аз рӯи он гардиш мекунад, мувофиқи (3.49) ба суръати зарра вобаставу қувваи лоренсӣ ба маркази давра самт мегирад. Мавриди зарра мусбат буданаш самти гардиши он дар расми 3.21 нишон дода шудааст ва агар зарра манфӣ заряднок бошад, он ба самти муқобил гардиш мекунад.

Замоне ки зарра бо суръати  $\vec{\mathcal{G}}$  ба хатҳои майдони якҷинсаи магнитӣ таҳти кунҷи  $\theta$  ворид мешавад (расми 3.22, а), он суръатро ба ду ташкилдиханда: 1)  $\mathcal{G}_\parallel = \mathcal{G} \cos \theta$ , ки ба самти майдон равона аст ва 2)  $\mathcal{G}_\perp = \mathcal{G} \sin \theta$  ба ин самт амуд чудо мекунем. Дар ин маврид ҳаракати зарраро ҳосили ҷамъи ду ҳаракати новобаста ташкил менамоянд: яке

харкати мунтазам бо суръати  $\mathcal{G}_{\parallel}$  ба рафти хатҳои магнитӣ ва ҳаракати давронӣ бо суръати  $\mathcal{G}_{\perp}$  (суръати кунҷиаш  $\omega = qB/m$ ). Дар натиҷа зарра аз рӯи хати спиралии радиусаш  $R$  ва кадамаш  $h = \mathcal{G}_{\parallel} T$  дар атрофи хатҳои магнитӣ (расми 3.22, б):

$$h = \frac{2\pi m \mathcal{G} \cos\theta}{qB} \quad (3.52)$$

харакат мекунад.



Расми 3.22

**Мисоли 3.7.** Протон ба хатҳои майдони магнитии якҷинсаи индуксияаш  $B=20$  мТл амудан ворид гашта, аз рӯи давраи радиусаш  $R=1.5$  м гардиш мекунад. Суръати протон баъди ба майдон ворид гаштан ва энергияи он муайян карда шавад.

*Маълумот.*

$m = 1,627 \cdot 10^{-27}$ кг
$q =  e  = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
$B = 20$ мТл $= 2 \cdot 10^{-2}$ Тл
$R = 1,5$ м
$\mathcal{G} - ?$ $W - ?$

*Ҳал*

Суръати протонро дар асоси муодилаи (3.48) муайян карда метавонем:

$$\mathcal{G} = \frac{qBR}{m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ Тл} \cdot 1,5 \text{ м}}{1,627 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} = 2,95 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

Азбаски суръати протон  $\mathcal{G}$  назар ба суръати рӯшноӣ хеле хурд аст, барои муайян кардани энергияи он формулаи энергияи кинетикии муқаррариро истифода бурдан раво аст:

$$W_k = \frac{m\mathcal{G}^2}{2} = \frac{1,627 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot (2,95 \cdot 10^6 \text{ м/с})^2}{2} = 7,08 \cdot 10^{-15} \text{ Ҷ.}$$

Ин қадар энергияро одатан бо электрон-вольтҳо (эВ) ифода мекунанд:

$$W_k = \frac{m\mathcal{G}^2}{2} = \frac{7,08 \cdot 10^{-15}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} = 4,42 \cdot 10^4 \text{ эВ} = 44,2 \text{ кэВ.}$$

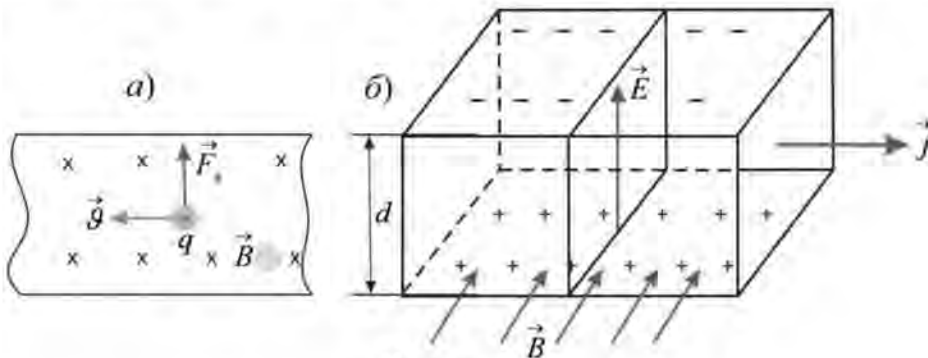
*Ҷавоб:*  $\mathcal{G} = 2,95 \cdot 10^6 \text{ м/с} = 2,95 \text{ Мм/с}$ ;  $W_k = 7,08 \cdot 10^{-15} \text{ Ҷ} = 44,2 \text{ кэВ}$

### §3.9. Эффеќти Холл

Соли 1879 олими амрикоӣ Э.Х. Холл (1855-1938) ошќор сохт, ки агар лавҳаи металли росткунҷашакли ҷараёндор дар майдони якҷинсаи магнитии хатҳояш ба самти ҷараён амудан раванбуда ҷойгир карда шавад, дар рӯяҳои ба самти хатҳои индуксияи магнитӣ ва вектори зичии ҷараён амудӣ фарқи потенциалҳо ба вуҷуд меояд ва он ба бузургии вектори индуксия  $\vec{B}$ , зичии ҷараён  $j$  ва ғафсии лавҳа  $d$  мутаносиби роста мебошад:

$$U = R_H j B d. \quad (3.53)$$

Дар ин ҷо  $R_H$ -коэффитсиенти мутаносибӣ асту *дойимии Холл* ном дорад. Ин ҳодиса бештар *эффеќти Холл* ёд мешавад ва он чун натиҷаи таъсироти қувваи лоренсӣ шарҳ меёбад (расми 3.23, а). Дар воқеъ, ҳангоми ба тарафи рост равона будани ҷараён ва аз мо сӯйи лавҳа самт доштани хатҳои майдони магнитӣ (расми 3.23, б) қувваи лоренсӣ ҳомилони ҷараён - электронҳоро аз поён ба боло майл медеҳад.



Расми 3.23

Ҳамин аст, ки сатҳи болоии лавҳа манфиву сатҳи поёнии он мусбат заряднок мешаванд ва дар байни онҳо фарқи потенциалҳо вусъат меёбад. Аз ин рӯ дар сатҳҳо тақсимои муайяни зарядҳо сурат мегирад. Ҳангоми бетағйир мондани тақсимои зарядҳо қувваи таъсироти майдони электрии ангеzonида ба ҳомилони ҷараён (вектори шадидияти он  $\vec{E}$  аз поён ба боло самт дошта) қувваи лоренсиро ба мувозанат меорад ( $F_{эл} = F_n$ ):

$$qE = qjB$$

ё худ

$$E = jB. \quad (3.54)$$

Агар ба эътибор гирем, ки  $E = U/d$  ва  $j = qn\mathcal{G}$  ( $q$ -заряди ҳомилони ҷараён,  $n$ -концентрацияи онҳо) мебошанд, баробарии зерин ҳосил мешавад:

$$U = Ed = jBd = \frac{1}{qn} jBd. \quad (3.55)$$

Аз муқоисаи (3.53) ва (3.55) дойимии Холл:

$$R_H = \frac{1}{qn} \quad (3.56)$$

буданаш маълум мегардад.



Пас, дониستاني дойимии Ҳолл (3.56) имкон медиҳад, ки концентратсияи ҳомилони ҷараён  $n$  муайян карда шавад. Гузашта аз ин, аломати  $R_H$  табиати ҷараёни электрӣ дар моддаи ноқилро муқаррар менамояд. Ҳамин аст, ки эффекти Ҳоллро хусусан барои муайян кардани наъви ноқилияти нимноқилҳо (яъне ба  $n$ -навъ ё  $p$ -навъ мансуб буданаш) истифода мебаранд.

Ҳоло дар асоси эффекти Ҳолл дастгоҳ (ба лафзи русӣ *датчик-бозгиранда*)-ҳо барои бо саҳеҳии калон чен кардани индуксияи магнитӣ (ингуна дастгоҳҳо андозаҳои хеле хурд доранд) сохта шудаанд.

**Мисоли 3.8.** Дойимии Ҳолл барои натрий муайян карда шавад. Ба эътибор гиред, ки концентратсияи ҳомилони ҷараён дар ин металл ба концентратсияи атомҳояш баробар асту зичии он  $D = 0,97 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  мебошад.

<p><i>Маълумот.</i></p> <table style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black; width: 100%;"> <tr> <td style="padding: 5px;"><math>M = 23 \cdot 10^{-3} \text{ кг/мол}</math></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><math>D = 970 \text{ кг/м}^3</math></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><math>R_H = ?</math></td> </tr> </table>	$M = 23 \cdot 10^{-3} \text{ кг/мол}$	$D = 970 \text{ кг/м}^3$	$R_H = ?$	<p>Ҳал</p> <p>Мувофиқи (3.56) <math>R_H = \frac{1}{qn}</math></p> <p>аст, ки дар ин ҷо</p> <p><math>q =  e  = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}</math> -заряди элементарӣ.</p>
$M = 23 \cdot 10^{-3} \text{ кг/мол}$				
$D = 970 \text{ кг/м}^3$				
$R_H = ?$				

Аз ин рӯ

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\nu N_A}{V} = \frac{m}{V} \cdot \frac{N_A}{M} = \frac{DN_A}{M}$$

мебошад.

Пас,

$$R_H = \frac{1}{|e|n} = \frac{M}{|e|DN_A} = \frac{23 \cdot 10^{-3} \text{ кг/мол}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 970 \text{ кг/м}^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ мол}^{-1}} = 2,47 \cdot 10^{-10} \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$$

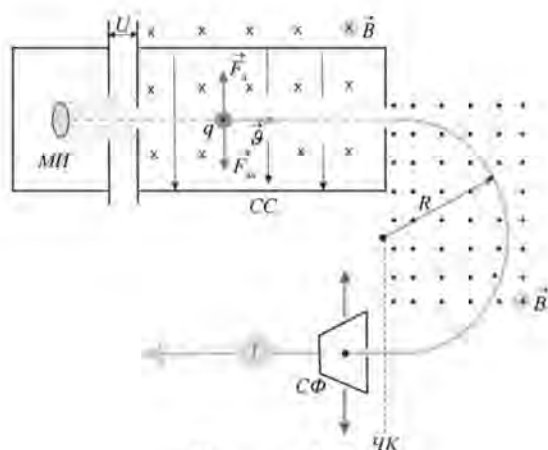
*Ҷавоб:*  $R_H = 2,47 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 / \text{Кл}$ .

### §3.10. Масс-спектрометр

Дар ибтидои садаи 20 барои бо саҳеҳии калон чен кардани массаи атому молекулаҳо асбобҳои сохта шуданд, ки *масс-спектрометрҳо* ном гирифтанд. Дар ин ҷода саҳми олимони англис Ч.Ч. Томсон (1865-1940), Ф.У. Астон (1877-1945) ва чандеи дигарон калон мебошад.

Амали масс-спектрометрҳо ба ҳаракати зарраҳои заряднок, хусусан ионҳо дар майдонҳои электрию магнитӣ асос ёфтааст. Ин гуна асбобҳоро як навъ тарозуи электромагнитӣ ҳисобидан раво аст.

Дар масс-спектрометрҳои муосир андаруни камерае, ки аз он ҳавояш то вакууми баланд (фишори газҳои боқимонда то  $10^{-9} \text{ Па}$  мерасад) кашида мешавад, манбایی ионҳо *МИ* (расми 3.24), дастгоҳи ба ном селектор (аз лот. Selector - ба наъво ҷудокунанда)-и суръатҳо *СС* ва ҷузъи қайдгираки ионҳо *ЧК* ҷойгиранд.



Расми 3.24

Дар манбайи ионҳо моддаи тадқиқшавандаро тавассути тафсонидан ба «бухор» мегардонанд. Зарраҳои алоҳидаи модда бо зарбаи электронҳои тезхаракат ба ионҳо табдил дода мешаванд. Сипас, ионҳо фарқи потенциалҳои  $U$ -ро гузашта дорои суръатҳои мегарданд, ки бузургии онҳоро дар асоси қонуни бақои энергия дарёфтани мумкин аст:

$$\frac{m v^2}{2} = qU \quad (3.57)$$

(дар ин ҷо  $m$ -массаи ион,  $q$ -заряди он мебошанд). Яъне, ионҳо вобаста ба массаашон бо суръатҳои гуногун ҳаракат мекунанд. Минбаъд ионҳо ба мобайни рӯяҳои конденсатори ҳамвор равона карда мешаванд. Ионҳо аз байни рӯяҳо гузашта дучори таъсири қувваи электрии  $F_{эл} = qE$  мегарданд. Ҳамзамон конденсаторро дар майдони магнитие ҷойгир мекунанд, ки вектори индуксияш  $\vec{B}$  ба самти вектори суръати ҳаракати ионҳо амуд бошад ва қувваи лоренсӣ ба қувваи электрӣ муқобилан равона шавад. Шадиқияти майдони электрӣ  $\vec{E}$  ва индуксияи магнитӣ  $\vec{B}$ -ро қадре интихоб менамоеанд, ки ин ду қувва ба мувозанат оянд ( $F_{эл} = F_{л}$ , яъне  $qE = qvB$  шавад). Дар ин маврид аз конденсатор танҳо ионҳои мегузаранд, ки суръаташон қимати муайяни  $\vec{v} = E/B$  дошта бошанд. Маҳз ба ин муносибат ин гуна дастгоҳ *селектори суръатҳо* ном гирифтааст.

Баъди селектори суръатҳо ионҳо дучори майдони магнитии дигари индуксияш  $B'$ -и ба самти суръати онҳо амудан равонабуда мегарданд ва мувофиқи (3.49) аз рӯйи давраҳои радиусашон ба массаи ионҳо муносибан гардиш меҳӯранду ба чузъи қайдгираки электрӣ (ба ном *силлиндри Фарадей-СФ*, ки бо гальванометри хеле ҳассоси  $\Gamma$  васл аст) ворид ва миқдори онҳо чун қувваи ҷараён чен карда мешавад.

Ҳамин тариқ, массаи атому молекулаҳо бо саҳеҳии зиёд (баъди адади бутун ҳиссаҳоаш то нӯҳ рақам маҳдуд) муайян мекунанд. Маҳз бо усули масс - спектрометрӣ муқаррар карда шуд, ки массаи атомҳои моддаи тозаи химиявӣ гуногунанд. Ин гуна атомҳои *изотоп* меноманд. Ҳарчанд ионҳо дорои массаҳои гуногунанд, дар ҷадвали даврии Д.И. Менделеев изотопҳо ҳамон як ҷойро ишғол менамоеанд (аз юнониҳои *isos* - баробар, *topos*-ҷой).

Чунончӣ, маълум гардид, ки элементи аввалини чадвали даврӣ-водороден дорои сето изотоп аст, ки номҳои махсус гирифтаанд:  ${}^1_1\text{H}$  - водородени муқаррарӣ-протий (аз юнонии protos-аввалин, махз ядроӣ ҳамин водороден *протон* ном дорад),  ${}^2_1\text{H}$  - дейтерий (аз юнонии deuterios-дуҷумин) ва  ${}^3_1\text{H}$  - тритий (аз юнонии tritos-сеҷумин), ки радиоактив мебошад. Элементи шашӯмини чадвали даврӣ-карбон бошад, ду изотоп:  ${}^{12}_6\text{C}$  - устувор ва  ${}^{14}_6\text{C}$  - радиоактив дорад (изотопҳои дигари карбон- ${}^{11}_6\text{C}$ ,  ${}^{13}_6\text{C}$ ,  ${}^{15}_6\text{C}$  ва  ${}^{16}_6\text{C}$  ба таври сунъӣ ҳосил карда шудаанд). Ба ҳамин минвол аксари элементҳо дорои изотопҳо буданашонро муқаррар намудаанд.

Бояд қайд кард, ки изотопҳои ҳамон як элемент аз ҷиҳати кимиёвӣ тамоман фарқ надоранд, ҳосиятҳои физикавӣ онҳо хеле наздиканд, ҳарчанд фарқ доранд. Масалан, оби вазнин- $D_2O$  (дар ин ҷо гуна об ҷойи яке аз водороденҳо дейтерий  ${}^2_1D$ -ишғол кардааст) ҳангоми фишори атмосферӣ нормалӣ дар  $3,8\text{ }^\circ\text{C}$  ях мебандаду дар  $101,4\text{ }^\circ\text{C}$  меҷӯшад; зичии он дар  $11,3\text{ }^\circ\text{C}$  қимати зиёдтарин мегирад (зичии оби муқаррарӣ- $H_2O$  дар  $4\text{ }^\circ\text{C}$  қимати зиёдтарин гирифтаниро хотиррасон менамоем).

### §3.11. Суръатфизоҳои зарраҳои заряднок

Дастгоҳҳои, ки бо ёрии онҳо зарраҳои заряднок дорои энергияи зиёди кинетикии то садҳо мегаэлектрон-вольт ( $MэВ$ ) гардонда мешаванд, *суръатфизоҳо* ном гирифтаанд. Зарраҳои дорои ин қадар энергия барои омӯختани ҳамтаъсири ядроӣ, сохти дохилии онҳо зарур мебошанд.

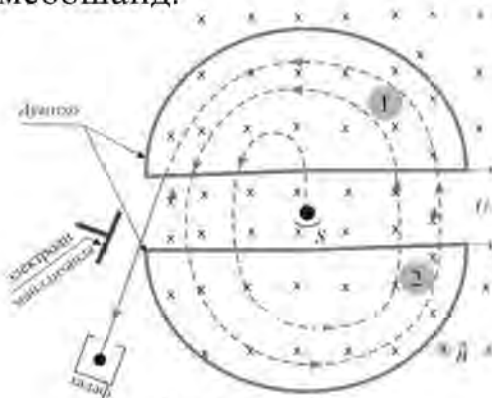
Амали суръатфизоҳо низ ба ҳаракати зарраҳои заряднок дар майдонҳои электрию магнитӣ асос ёфтааст. Мувофиқи (3.57) барои он, ки суръати зарра то қиматҳои зарурӣ зиёд карда шавад, зарра бояд фарқи потенциалҳои баланди бо душворихо фароҳамоваранда ё фарқи потенциалҳои начандон зиёд, вале бо осонӣ дастрасшавандаро тақрибан маротиба гузарад.

Дар *суръатфизоҳои хаттӣ* зарра як маротиба ба рафти хатти рост фарқи потенциалҳои баландро ки масалан бо ёрии генератори Ван-де-Грааф (ба §1.11 ниг.) ҳосил мекунанд, гузашта шитоб мегирад. Бо ин усул энергияи зарраро то  $\approx 10\text{ }MэВ$  расондан имконпазир асту бас, зеро қорбасти шиддатҳои нисбатан баландтар боиси раҳна шудани изоляторҳо ва талаф ёфтани энергия мегардад.

Дар *суръатфизоҳои сиклӣ* зарра аз рӯи спиралнамуди кушодашаванда гардиш хӯрда, энергияро афзун мекунад. Яке аз ин ҷо суръатфизоҳо *сиклотрон* мебошад, ки онро с. 1932 олимони амриқӣ Э.О. Лоуренс (1901-1958) сохта буд. (Ҷоизаи Нобелӣ с. 1939). Қисми асосии сиклотронро ду электроди дарунҳолии шакли сарҳарфи лотинии  $D$  дошта (ба ин муносибат *дуантҳо* ном гирифта) ташкил медиҳанд (расми 3.25). Дуантҳо аз ҳам дар фосилае дур буда, андаруни камераи ҳавояш то вакууми баланд кашида (фишори газҳои боқимонда  $\approx 10^{-6}\text{ Па}$ ) дар байни қутбҳои электромагнети пурзӯри



индуксияи магнитиаш якчанд тесла ҷойгиранд. Хатҳои магнитии ин майдон ба ҳамвории дуантҳо (дар расми 3.25 аз мо ба ҳамвории нақша) амудан равонаанд. Ба дуантҳо кутбҳои манбаии ҷараёни масалан мувофиқи қонуни  $U = U_0 \sin(2\pi/T_3)$  тағйирёбандаи баландбасомад васл мебошанд.



Расми 3.25

Ионҳои мусбат, протонҳо аз манбаии дар маркази фосолаи байни дуантҳо воқеъгардида баромада, сӯйи дуанти дар айни замон манфӣ заряднокбуда (дуанти 1) ба ҳаракат мебароянд ва ба таъсири қувваи лоренсӣ аз рӯйи нимдавра гардиш хӯрда, ба фосолаи байни дуантҳо бармегарданд; даври тағйироти майдони электрии шитобдиҳандаро қадре интиҳоб мекунанд, ки дар ин замон самти майдон иваз шавад, яъне дуанти 2 манфӣ заряднок гардида, ба минбаъд тезонидани зарра мусоидат намояд (тақон хӯрад). Баъд аз ин зарра андаруни дуанти 2 нимдавраи радиусаш мувофиқи (3.49) қалонтар, вале даври гардишаш ба суръати зарра новобастаро паймуда, бори дигар дар фосолаи байни дуантҳо тезонида мешавад ва хоказо.

Ба ин минвол зарра ҳар дафъа энергияашро афзун кардан мегирад. Пас, барои он, ки зарра дар сиклотрон тақроран гардиш хӯрда, суръаташро зиёд намеояд, даври гардишҳои он ( $T_m$ ) ба даври тағйироти майдони электрӣ ( $T_3$ ) мувофиқат кунад ( $T_3 = T_m$ ). Ин мувофиқат «принсипи синхронизатсия» (ҳамзамонгардонӣ) ном дорад. Лекин аз ин ҷо набояд хулоса гирифт, ки зарраро маротибҳои дилоҳ гардиш дода, энергияашро беохир зиёд кардан имконпазир бошад, зеро ҳангоми афзудани суръати зарра ( $\beta$ ) радиуси нимдавраҳо мувофиқи (3.49) - қалон мешаваду дар навбати худ афзудани андозаҳои дуантҳо ва мувофиқан андозаҳои электромагнитро тақозо менамояд (барои маълумот: диаметри дуантҳои сиклотрони аввалин 0,1143 м, диаметри электромагнито он 0,1016 м; диаметри электромагнито суръатфизое, ки дар ш. Серпухови вилояти Москва барои то 76 ГэВ тезондани протонҳо с. 1967 сохта шуда буд, 472 м ва барои он 20 000 тонна металл сарф гардид), яъне душворихоии иловагиро меоварад). Гузашта аз ин, дар ҳоли ба суръати рӯшноӣ ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с) наздик шудани суръати зарра ( $\beta$ ) дар асоси назарияи маҳсуси нисбияти А. Эйнштейн массаи зарра мутобиқи қонуни  $m = m_0 / \sqrt{1 - \beta^2/c^2}$  ( $m_0$  - массаи зарраи ором аст) меафзояд, ки мувофиқи (3.51) боиси зиёд шудани даври гардиши зарра дар майдони



магнитӣ ( $T_m$ ) ва вайроншавии принципи синхронизатсия ( $T_m > T_s$ ) мегардад. Дар натиҷа зарра тезонда нашуда, тормоз хӯрданаш мумкин мебошад. Аз ин рӯ дар сиклотрон энергияи протонҳоро то  $20 \text{ МэВ}$ , алфа-зарраҳоро то  $40 \text{ МэВ}$  расондан мумкин аст. Зиёда аз ин, дар сиклотрон электронҳоро тезонидан ғайриимкон мебошад, зеро ба зудӣ хамин, ки энергияи онҳо ба  $0,5 \text{ МэВ}$  мерасад, массаашон 2 маротиба меафзояд ( $m = 2m_0$ ).

Ҳамин буд, ки суръатфизоҳо минбаъд такмил дода шуданд. Масалан, дар суръатфизои ба ном *фазотрон* баробари афзудани массаи зарра мувофиқан даври тағйироти шиддати шитобдиханда ( $T_s$ )-ро дигар мекунанд, ки принципи синхронизатсия вайрон нашавад. Бо ин усул энергияи зарраҳоро то  $1000 \text{ МэВ}$  (ё ки  $1 \text{ ГэВ}$ ) расондан имконпазир гардид (дар ин маврид вобаста ба афзудани суръати зарраҳо зарурати зиёд кардани андозаҳои фазотронро ба миён овард).

Дар *синхротрон* ё *синхросиклотрон* асосан суръатфизои электронҳо даври тағйироти майдони электрӣ дойимӣ мемунаду ба кадри афзудани массаи зарра мутобиқи (3.51) индуксияи магнитиро зиёд мекунанд ва аз ин рӯ принципи синхронизатсия вайрон намешавад. Ин усул имконият дод, ки энергияи электронҳо то  $5-10 \text{ ГэВ}$  афзоиш ёбанд.

*Синхрофазотронҳо* муштаракан хосиятҳои фазотрон ва синхротронҳоро дарбар гирифтаанд. Дар онҳо радиуси мадори ҳаракати зарраҳо ба туфайли дойимӣ мондани  $\vartheta = E/V$  бетағйир аст. Бо ин роҳ энергияи зарраро то  $500 \text{ ГэВ}$  расониданд. Соли 1983 бошад суръатфизои калонтарин барои тезондани протонҳо то  $1000 \text{ ГэВ}$  дар ИМА сохта шуд.

**Мисоли 3.9.** Дар сиклотрони радиусаш  $R = 0,5 \text{ м}$  ва индуксияи магнетиаш  $B = 1,7 \text{ Тл}$  энергияи кинетикии протонҳо чӣ қадар мешавад ва басомади майдони шитобдихандаи электрӣ бояд чанд бошад?

*Маълумот.*

$$R = 0,5 \text{ м}$$

$$B = 1,7 \text{ Тл}$$

$$m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

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

$$W_k = ? \quad v_0 = ?$$

*Ҳал*

Мувофиқи формулаи (3.48) ёфтани суръати протон ва ҳисоб кардани энергияи кинетикии он чандон душвор нест:

$$\begin{aligned} W_k &= \frac{1}{2} \frac{q^2 B^2 R^2}{m} = \\ &= \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2 \cdot (1,7 \text{ Тл})^2 \cdot (0,5 \text{ м})^2}{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} = \\ &= 0,554 \cdot 10^{-11} \text{ Ҷ} = 34,6 \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

Даври гардиш ва аз ин рӯ басомади мувофиқи майдони электриро бо формулаи (3.51) ба шарти иҷро шудани «принципи синхронизатсия» муайян карда метавонем:

$$v_s = \frac{1}{T_{\text{м}}} = \frac{qB}{2\pi m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1,7 \text{ Тл}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} = 26 \cdot 10^6 \text{ Хс} = 26 \text{ МХс}.$$

Ҷавоб:  $W_k = 34,6 \text{ МэВ}$ ;  $v_s = 26 \text{ МХс}$ .

### §3.12. Теоремаи оид ба сиркулятсияи вектори индуксияи магнитӣ

Дар қисми электростатика (ба §1.7 ниг.) мафҳуми сиркулятсияи вектори шадидият  $\vec{E}$  - ро тавассути интегралӣ:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \oint_L E_t dl$$

ба рафти контури сарбасти шаклаш ихтиёрии  $L$  ворид намуда, нишон додем, ки он дар майдони электростатикӣ ҳар гоҳ баробари сифр аст ва ин натиҷа чун аломати потенциалӣ будани майдон дониста мешавад.

Акнун ҳамин гуна мафҳумро барои вектори индуксияи магнитӣ  $\vec{B}$  дар вакуум баррасӣ менамоем:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_t dl = \oint_L B dl \cos \alpha. \quad (3.58)$$

Хотирнишон мекунем, ки дар ин ҷо  $d\vec{l}$  -элементи контури сарбасти  $L$ ,  $B_t = B \cos \alpha$  -ташқилдиҳандаи вектори  $\vec{B}$  дар самти расандаи контур,  $\alpha$  -кунҷи байни векторҳои  $\vec{B}$  ва  $d\vec{l}$  мебошанд.

Сиркулятсияи вектори индуксияи майдони магнитӣ дар вакуум мувофиқи (3.58) ба ҳосили зарби дойимии магнитӣ  $\mu_0$  ва суммаи алгебравии қувваи ҷараёнҳои контури  $L$  дарбаргиранда баробар аст:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_t dl = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k. \quad (3.59)$$

Ин ҳулоса ифодаи математикии теоремаи оид ба сиркулятсияи вектори индуксияи магнитӣ дар вакуум мебошад ва он чун қонуни ҷараёни пурра низ маъмул гаштаасту далели ғайрипотенциалӣ будани майдони магнитӣ дониста мешавад. Ҳамин аст, ки майдони магнитиро *гирдбодӣ* (ё худ *тӯфонӣ*) меноманд. Ҳислати гирдбодӣ доштани майдони магнитӣ яке аз фарқиятҳои ин майдон назар ба майдони электрӣ мебошад.

Мо теоремаи (3.59)-ро дар мавриди соддатарин - индуксияи майдони магнитии ҷараёни ростхаттаи беохир исбот мекунем. Барои ин ба сифати контури сарбасти  $L$  яке аз хатҳои магнитии майдони ин ҷараёнро интихоб менамоем (расми 3.26): ҷараён ба ҳамворию нақша амудан сӯйи мо равонаву самти гашти контур ба самти ҳаракати акрабаки соат муқобил аст, аз ин рӯ  $\alpha = 0^\circ$  ва

$$B_t = B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

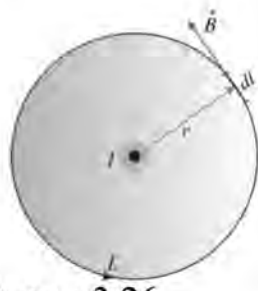
буданаширо ба эътибор мегирем. Пас,

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \oint_L dl = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \cdot 2\pi r = \mu_0 I. \quad (3.60)$$

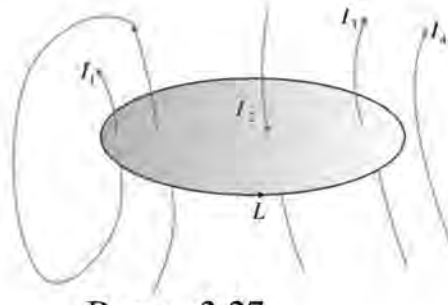
Агар контури  $L$  якчанд нокили чараёндорро дарбар гирад, дар асоси принципи суперпозитсияи майдонҳо ( $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$ ) бо дарназардошти (3.60) натиҷаи (3.59) ҳосил мешавад. Ҳангоми татбиқи амалии (3.59) бояд ба эътибор гирифт, ки дар мавриди ба ҳам мувофиқ омадани самти гашти контури  $L$  бо самти вектори индуксияи майдони магнитӣ қувваи чараёнро мусбату дар акси ҳол манфӣ қабул менамоем. Дар мавриди чараёнро дарбар нагирифтани контур циркулятсияи вектори индуксияи он баробари сифр ба ҳисоб меравад. Чунончӣ, дар мисоли расми 3.27:

$$\oint B_l dl = \mu_0 (2I_1 - I_2 + I_3 + 0 \cdot I_4)$$

мебошад.

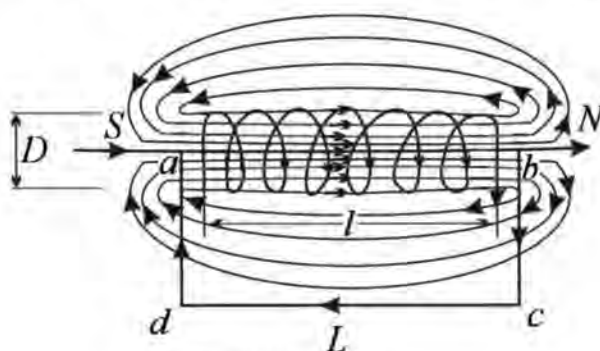


Расми 3.26

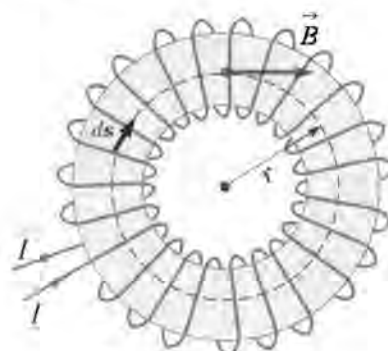


Расми 3.27

Чун намунаи татбиқи амалии қонуни чараёни пурра индуксияи майдони магнитии ғалтаки нокилии дарозро, ки *СОЛЕНОИД* ном дорад (аз юнонии *solēn*–найча ва *eidos*–намуд), муайян менамоем. Дар расми 3.28 чанд хатҳои магнитии майдони соленоид тасвир ёфтаанд. Аз расм хувайдост, ки хатҳои магнитӣ ғайр аз нӯғҳо ( $N$  ва  $S$ ) андаруни соленоид параллелан равонаанд ва он далели якҷинсагии майдон аст. Ғайр аз ин, майдони соленоид майдони магнители доимии ростро хотиррасон менамояд (ниг. расми 3.2, б). Дар беруни соленоид майдон ғайриҷинса, вале назар андарунаш суғт мебошад (зичии хатҳо ба ин шаҳодат медиҳад) ва онро сарфи назар кардан равоғт.



Расми 3.28



Расми 3.29

Барои дарёфтани индуксияи магнитии майдони соленоид ба сифати контури сарбаст чоркунҷаи росткунҷаи  $abcd$ -ро интихоб менамоем. Он гоҳ циркулятсияи  $\vec{B}$  - ро чунин пешниҳод карда метавонем:

$$\oint B_l dl = \int_L^b B_l dl + \int_a^c B_l dl + \int_c^d B_l dl + \int_d^a B_l dl = \mu_0 NI, \quad (3.61)$$

ки дар ин ҷо  $N$ -шумораи печаҳои контури сарбаст дарбаргирифта мебошад. Дар интегралӣ яқум  $B_l = B$  (майдони андаруни соленоид якҷинса асту самти  $\vec{B}$  бо самти гашти контур мувофиқ меояд); дар интегралӣ дуюм ва чорум  $B_l = 0$  (самтҳои  $\vec{B}$  ва гашти контур ба ҳам амуданд) дар интегралӣ сеюм  $B_l \rightarrow 0$  (дар беруни соленоид майдон хеле суст аст). Ҳамин тариқ,

$$Bl = \mu_0 NI \quad (3.62)$$

буданаш маълум мегардад, ки дар ин ҷо  $l$ -дарозии соленоид (он назар ба диаметри соленоид хеле калон ( $l \gg D$ )) ҳисоб карда мешавад.

Пас, индуксияи майдони магнитии соленоидро андарунаш бо формулаи:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l} I = \mu_0 nI \quad (3.63)$$

дарёфта метавонем, ки дар ин ҷо  $n = N/l$ -шумораи печаҳо дар воҳиди дарозӣ мебошад. Аз ин рӯ шадидияти майдони магнитии соленоидро андарунаш бо формулаи:

$$H = \frac{NI}{l} = nI \quad (3.64)$$

муайян кардан мумкин аст (ҳосили зарби  $NI$ -ро баъзан адади *ампер-печаҳо* меноманд.

Бояд қайд кард, ки натиҷаи ҳосилшуда (3.63), (3.64) ба дар қадом масофа аз меҳвари соленоид ҷойгир шудани порчаи  $ab$  вобаста нест; агар он дар берун воқеъ гардида бошад, печаҳои соленоидро дарбар намегирад, аз ин рӯ

$$\oint_L B_l dl = Bl = 0$$

ва  $B = 0$ . Пас, дар беруни соленоид индуксияи магнитӣ баробари сифр аст, андарунаш дар ҳамачо ҳамон як қимате дорад, ки бо (3.63) муайян карда мешавад. Ба ҳамин муносибат дар магнетизм соленоиди беохири дароз ҳамон нақшае мебозад, ки дар қисми электр конденсатори ҳамвор сахм дошт.

Индуксияи майдони магнитии *тороид*-ноқили зич дар чанбар печонида (расми 3.29) андарунаш айнан чун дар соленоид муайян карда мешавад:

$$B = \mu_0 nI, \quad (3.65)$$

ки дар ин ҷо  $n$ -шумораи печаҳои тороид дар воҳиди дарозииаш мебошад. Майдони магнитии тороид танҳо андарунаш вуҷуд дорад дар беруни он  $B = 0$  аст.

### § 3.13. Сели магнитӣ. Теоремаи Гаусс барои вектори индуксия

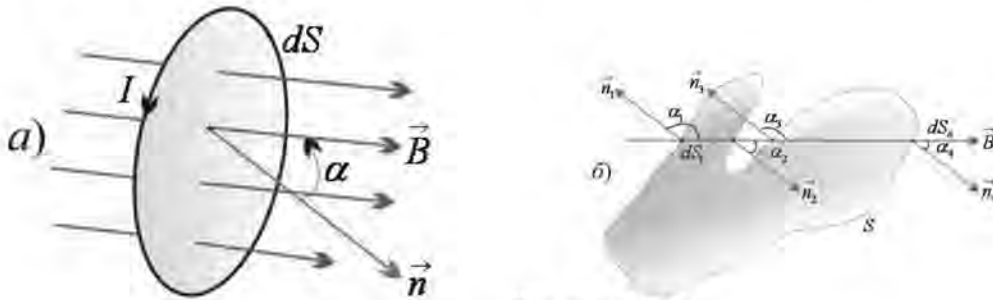
Мафҳуми сели магнитӣ ё худ сели вектори индуксияро ба монанди сели вектори шадидияти майдони электрӣ (§ 1.5. ниг) ворид мекунем.

*Сели магнитӣ* аз сатҳи  $dS$  гуфта бузургии скаляриро мефаҳманд, ки мувофиқи формулаи:

$$d\Phi_B = B dS \cos\alpha = B_n dS \quad (3.66)$$



муайян карда мешавад; дар ин ҷо  $\alpha$  - кунчи байни нормали берунаи  $\vec{n}$  -и сатҳ ва вектори индуксияи магнитӣ  $\vec{B}$ ,  $B_n = B \cos \alpha$  -проекцияи вектори  $\vec{B}$  дар нормали  $\vec{n}$  мебошанд. Амалан  $dS$ -масоҳати канорхоҷаш бо ноқили ҷараёндор маҳдуд мебошад, ки хангоми пармачаро ба муқобили рафти акрабаки соат аз рӯи ноқил гардиш додан ҳаракати пешрабии пармача сӯи нормали берунаи сатҳ сурат мегирад (расми 3.30, а).



Расми 3.30

Агар кунчи  $\alpha$  тез бошад ( $\alpha_2, \alpha_4 < 90^\circ$ , расми 3.30, б) сели магнитӣ мусбату дар мавриди кунд ( $\alpha_1, \alpha_3 > 90^\circ$ ) будани он сели магнитӣ манфӣ ба ҳисоб меравад. Дар ҳоли ба ҳам мувофиқ омадани самтҳои  $\vec{n}$  ва  $\vec{B}$  кунчи  $\alpha = 0^\circ$  мешаваду сели магнитӣ қимати зиёдтарин мегирад:

$$d\Phi_{B \max} = BS. \quad (3.67)$$

Воҳиди сели магнитӣ маҳз тавассути (3.67) муқаррар карда мешавад ва дар СИ он 1 *вебер\** (мухтасар 1 *Вб*) ном дорад:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2.$$

Яъне, 1 *Вб* - сели майдони якҷинсаи индуксияаш 1 *Тл* мебошад, ки хатхоҷаш сатҳи 1  $\text{м}^2$  - и ба самти ин хатҳо амудан ҷойгирбудароро бурида мегузаранд.

Азбаски хатҳои магнитӣ бар хилофи хатҳои шадидияти майдони электрӣ на сар доранду на нӯг (онҳо сарбаст буданашонро хотиррасон менамоем), сели магнитӣ аз ҳаргуна сатҳи сарбастии шаклаш ихтиёри баробари сифр аст:

$$\Phi_B = \oint_S B_n dS = 0. \quad (3.68)$$

Ин хулоса мазмуни *теоремаи Гаусс барои вектори индуксияи магнитиро* дарбар гирифтааст ва далели дар табиат вучуд надоштани зарядҳои магнитӣ мебошад (лозим ба ёдоварист, ки хатҳои шадидияти майдони электростатикӣ аз зарядҳои мусбат ибтидо мегиранду дар зарядҳои манфӣ тамом мешаванд ё ба беохирӣ

\*)ба шарафи олими олмонӣ В.Э. Вебер (1804 - 1891), ки дар соҳаи электромагнетизм тадқиқотҳои муҳим гузаронида буд, номгузорӣ шудааст. мераванд).

Чунончӣ, дар расми 3.30, б яке аз сатҳҳои сарбасти  $S$  ва якто хати майдони магнитӣ магнитии ин сатҳро буридагузаранда нишон дода шудааст: сели магнитии ин хат ду маротиба манфӣ, ду маротибаи дигар мусбату дар натиҷа сели баробари сифр ҳосил мешавад, ки тасдиқи теоремаи Гаусс ҳисобидан раво аст.

Барои намуна сели пурраи магнитие, ки тамоми сатҳҳои печҳои соленоидро бурида мегузаранд, ҳисоб мекунем. Барои ин ба эътибор мегирем, ки хангоми аз соленоид гузаштани чараёни қуввааш  $I$  андаруни он майдон якҷинса буда, индуксияаш (ба §3.12 ниг.) бо формулаи:

$$B = \mu\mu_0 nI \quad (3.69)$$

муайян карда мешавад (дар ин ҷо  $\mu$ -нуфузпазирии нисбии моддаи дилаки соленоид аст) ва аз ҳар як печи он (бигузур шумораи печҳои  $N$ -то бошад) сели магнитӣ:

$$\Phi_1 = BS$$

аст. Аз ин рӯ сели пурраи магнитии сатҳҳои тамоми печҳои соленоидро буридагузаранда :

$$\Phi_B = N\Phi_1 = NBS = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} SI = \mu\mu_0 n^2 VI \quad (3.70)$$

шуданаш маълум мегардад, ки дар он  $n = N/l$ -шумораи печҳо дар воҳиди дарозии соленоид,  $V = Sl$ -ҳаҷми дилак мебошанд.

**Масъалаи 3.10.** Сели пурраи магнитӣ аз печҳои ғалтаки дарозиаши  $l = 15$  см, диаметри дилакаш  $D = 1,0$  см, ки ба он сими мисини ( $\mu = 1$ ) ғафсиаш  $d = 1$  мм - ро ҷафс карда печондаанд, ёфта шавад. Аз ғалтак чараёни қуввааш  $I = 5$  А мегузарад.

*Маълумот.*

$$\left. \begin{aligned} l &= 15 \text{ см} = 0,15 \text{ м} \\ D &= 1,0 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м} \\ d &= 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м} \\ I &= 5 \text{ А} \\ \mu_0 &= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \\ \Phi_B &= ? \end{aligned} \right|$$

*Ҳал*

Хангоми печҳоро ҷафс карда печонидан  $l = Nd$ , аз ин рӯ

$$n = \frac{N}{l} = \frac{N}{Nd} = \frac{1}{d}$$

ва агар ба эътибор гирем, ки ҳаҷми ғалтак:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} l$$

мебошанд, сели пурра:

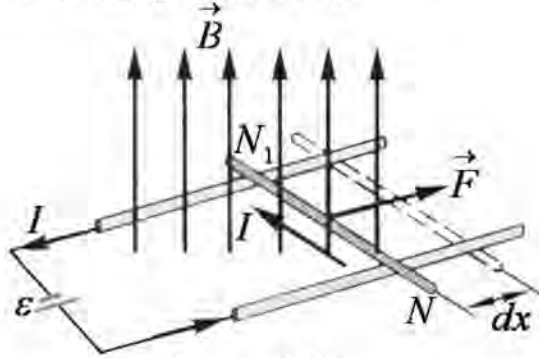
$$\begin{aligned} \Phi_B &= \mu\mu_0 \frac{1}{d^2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} I I = \pi^2 \left(\frac{D}{d}\right)^2 \cdot 10^{-7} I I = (3,14)^2 \cdot \left(\frac{10^{-2} \text{ м}}{10^{-3} \text{ м}}\right)^2 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \cdot 0,15 \text{ м} \cdot 5 \text{ А} = \\ &= 7,4 \cdot 10^{-5} \text{ Вб} = 74 \text{ мкВб} \end{aligned}$$

буданаш маълум мегардад.

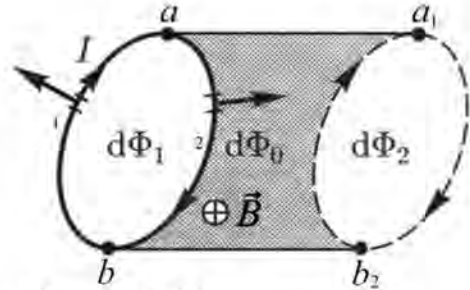
*Ҷавоб.*  $\Phi_B = 74 \text{ мкВб}$ .

### §3.14. Кори кӯчондани ноқил ва контури ҷараёндор дар майдони магнитӣ

Фарз мекунем, ки ноқили  $NN_1$ -и дарозияш  $l$ , қувваи ҷараёнаш  $I$  дар майдони магнитии якҷинсаи индуксияш  $\vec{B}$  озодона кӯчида метавонад (расми 3.31).



Расми 3.31



Расми 3.32

Ба ин ноқил аз ҷониби майдони магнитӣ қувваи амперии зиёдтарини  $F_{\max} = IBl$  таъсир менамояд ва ноқил ба самти ин қувва ба ҳаракат мебарояд. Кори кӯчондани ноқил дар роҳи  $dx$ :

$$dA = Fdx = IBldx = IBdS$$

мебошад. Ҳосили зарби  $ldx = dS$  масоҳатест, ки дар он ноқили ҷараёндор хатҳои магнитиро бурида мегузарад. Аз ин рӯ сели магнитӣ  $d\Phi = BdS$  мешавад. Пас, кори кӯчондани ноқили ҷараёндорро бо формулаи:

$$dA = Id\Phi \quad (3.71)$$

муайян карда метавонем.

Нишон додан мумкин аст, ки дар мавриди ғайриҷинса, инчунин хангоми ба сатҳи  $dS$  таҳти кунҷе равона будани вектори  $\vec{B}$  кори кӯчондани ноқили ҷараёндор боз бо ҳамон формулаи (3.71) ҳисоб карда мешавад (дар ин ҳол боиси ба ноқили ҷараёндор таъсир намудани майдони магнитӣ ташкилдихандаи нормалии вектори индуксия  $B_n = B\cos\alpha$ , буданаширо қайд менамоем, ки дар ин ҷо  $\alpha$ -

кунҷи байни нормали сатҳи  $dS$  ва вектори  $\vec{B}$  аст).

Лозим ба ёдоварист, ки кори кӯчондани ноқили ҷараёндорро на майдони магнитӣ, балки манбаи ҷараён  $\mathcal{E}$  иҷро менамояд. Агар майдони магнитӣ ин гуна корро иҷро мекард, масалан мавҷудияти магнитҳои доимӣ ғайри имкон мебуд.

Мавриди дар майдони магнитӣ кӯчидани контури сарбастии ҷараёндор, чунончӣ контури  $ab$  (расми 3.32, ки дар он хатҳои магнитӣ аз мо сӯйи ҳамвории нақша равонаанд) аз чап ба рост ҳаракат намудан, корро чун ҳосили ҷамъии қорҳои кӯчонидани гуё ду ноқил (қитъаҳои чапи контур  $alb$  ва ростии он  $b_2a_1$ ) пешниҳод кардан раво аст:

$$dA = dA_1 + dA_2 = -I(d\Phi_1 + d\Phi_0) + I(d\Phi_0 + d\Phi_2) = I(d\Phi_2 - d\Phi_1) = Id\Phi \quad (3.72)$$

Аломати минус дар ин формула бо сабаби ба самти муқобили қувваи амперӣ кӯчидани контур омадааст.

Ҳамин тарик, ҳангоми дар майдони магнитӣ кӯчонидани контури сарбастии чараёндог низ кор ба ҳосили зарби қувваи чараёни контур ва тағйироти сели магнитии бо ин контур алоқаманд баробар мебошад.

**Масъалаи 3.11.** Аз ҳалқаи нарми нокилии радиусаш  $R = 4$  см чараёни қуввааш  $I = 5$  А ҳорист. Хатҳои индуксияи майдони берунаи индуксияаш  $B = 0,4$  Тл ба ҳамвориҳои ҳалқа тавре равонаанд, ки бо вектори индуксияи чараён кунҷи  $\alpha_1 = 60^\circ$  ташкил менамоянд. Барои ин кунҷро ба  $\alpha_2 = 0^\circ$  табдил додан чӣ қадар кор иҷро кардан зарур аст?

*Маълумот:*

$R = 4 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$
$I = 5 \text{ А}$
$B = 0,4 \text{ Тл}$
$\alpha_1 = 60^\circ$
$\alpha_2 = 0^\circ$
$A = ?$

*Ҳал*

Ҳангоми тағйир додани кунҷи сели магнитӣ дигар мешавад. Кори иҷрошуда дар ин маврид:

$$\begin{aligned}
 A &= I(\Phi_2 - \Phi_1) = IBS(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1) = \\
 &= IBS(\cos 60^\circ - \cos 0^\circ) = IB\pi R^2(0,5 - 1) = \\
 &= -0,5 \cdot 5 \text{ А} \cdot 0,4 \text{ Тл} \cdot 3,14 \cdot (4 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2 = \\
 &= -50,24 \cdot 10^{-4} \text{ Ҷ} \approx -5 \text{ мҶ}.
 \end{aligned}$$

*Ҷавоб:*  $A = -5 \text{ мҶ}$

Кори манфӣ гувоҳи он аст, ки корро манбаии чараён муқобили қувваҳои майдон иҷро мекунад. Ин корро ба тарзи дигар тавассути тағйироти энергияи потенциалии контури дар майдони магнитӣ ҷойгирбуда ҳисоб кардан мумкин аст. Тавре ки дар §3.3 нишон додем, тағйироти энергияи потенциалии контур бо аломати минус ба кори иҷрошуда баробар мебошад:

$$A = -\Delta W_p = -P_m B = -\pi R^2 B I.$$

### Машқи 3

3.1. Аз қуллаҳои секунҷаи мунтазами тарафаш  $a = 2$  см се чараёни ҳамсамти рости беохори қувваҳои  $I_1 = I_2 = I_3 = 10$  А мегузаранд. Қувваи аз ҷониби ду чараён ба чараёни сеюм таъсиронаро, ки ба ҳар як метрии дарозии нокилҳо рост меояд, ёфта шавад.

$$(1,73 \text{ мН/м})$$

3.2. Ба рамкаи даврашакли радиусаш  $R = 10$  см, ки аз он чараёни қуввааш  $I = 20$  А мегузараду ба хатҳои майдони якҷинсаи магнитии индуксияаш  $B = 0,5$  Тл параллелан ҷойгир аст, чӣ қадар моменти гардишонаро таъсир мекунад?

$$(0,3 \text{ Нм})$$



3.3. Аз ду нокили беохири параллелии амудан чойгирбудаи фосилаи байнашон  $d = 10$  см чараёнҳои ҳамсамти қуввашон  $I_1 = 20$  А ва  $I_2 = 30$  А мегузаранд. Индуксияи магнитии майдонҳои чараёнҳо дар нуқтаҳои хати уфуқии: 1) аз нокили яқум ба қадри  $r_1 = 2$  см чаптар; 2) дар миёнҷойи фосилаи байни чараёнҳо; 3) ба қадри  $r_3 = 3$  см росттар аз нокили дуюм воқеъгардида ёфта шавад.

(0,25 мТл; 0,04 мТл; 0,23 мТл).

3.4. Нокили рости беохирро ба кунҷи рост катъ карда аз он чараёни қуввааш  $I = 50$  А сар дода шудааст. Шадидияти майдони магнитии чараён дар биссектрисаи кунҷ дар нуқтае ёфта шавад, ки аз қуллаи ин кунҷ дар масофаи 10 см чойгир мебошад.

(193,4 А/м)

3.5. Индуксияи майдони магнитиро дар маркази нокили квадратшакл муайян намоед, ки тарафаш  $a = 10$  см бошад ва аз он чараёни қуввааш  $I = 10$  А гузарад.

(226,3 мкТл)

3.6. Аз ду нокили рости беохири параллелии фосилаи байншон 10 см чараёнҳои қуввашон баробари  $I = 50$  А-ӣ мегузаранд. Индуксияи майдони магнитии чараёнҳоро дар нуқтае муайян намоед, ки аз ҳар ду нокил дар масофаҳои баробари 17 см чойгир аст. Мавридҳои ҳамсамт ва муқобилсамт будани чараёнҳоро муҳокима намоед.

(34,4 мкТл; 112,4 мкТл)

3.7. Шадидияти майдони магнитии чараёни доиравии моменти магнитиааш  $p_m = 0,785$  А·м<sup>2</sup> ва радиусаш  $R = 5$  см дар марказаш ёфта шавад.

(1 кА/м)

3.8. Аз нокили рости дароз чараёни қуввааш  $I_1 = 45$  А мегузарад. Аз поён дар масофаи  $d = 1$  см нокили ҳамон қадар дарози алюминии бурришгоҳи арзиаш  $S = 1$  мм<sup>2</sup> параллелан чойгир аст. Зичии алюминий  $D = 2,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> буданаширо дониста, маълум намоед, ки барои муаллақ мондани нокили алюминий аз он бояд чӣ қадар чараён гузарад?

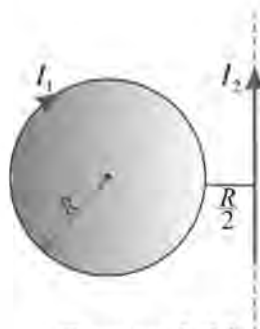
(30 А)

3.9. Шадидияти майдони магнитии нокили доиравии радиусаш 5 см, ки аз он чараёни қуввааш  $I = 50$  А мегузарад, дар меҳвари ин чараён дар масофаи 3 см аз марказаш чӣ қадар мебошад?

(24,7 А/м)

3.10. Нокили доиравии радиусаш  $R$ , қувваи чараёнаш  $I_1 = 2$  А ва нокили рости беохир дар як ҳамворӣ чойгиранд (расми 3.33). Аз нокили рост, ки дар фосилаи  $0,5R$  аз сатҳи нокили доиравӣ воқеъ гардидааст, чӣ қадар бояд чараён гузарад, ки шадидияти натиҷавии майдони ҳар ду чараён дар маркази чараёни доиравӣ  $H = 0$  шавад?

(9,42 А)



Расми 3.33

3.11. Шадиияти чараёни дойравии радиусаш  $R=10\text{ см}$  дар марказаш  $B=50\text{ мкТл}$  мебошад. Шадиияти ин гуна чараён дар нуктаи аз ҳамвори чараён дар фосилаи  $a=10\text{ см}$  дур дар меҳвараш ёфта шавад.

(35,3 А/м)

3.12. Шадиияти порчаи нокили ростро дар нуктаи хати амудии аз миёнҷойи порча фурувардашуда, ки дар фосилаи  $10\text{ см}$  аз порча воқеъ аст, муайян намоед. Порча аз он нукта тахти кунҷи  $60^\circ$  намоён аст. Аз нокил чараёни қуввааш  $30\text{ А}$  мегузарад.

(23,9 А/м)

3.13. Электрон дар майдони магнитии якҷинсаи индуксияаш  $\hat{A}=50\text{ мкТл}$  аз рӯйи давра гардиш мекунад. Суръати кунҷии гардиши электрон чӣ қадар аст?

( $8,8 \cdot 10^6\text{ рад/с}$ )

3.14. Протон аз рӯйи давраи радиусаш  $R=4\text{ см}$  дар майдони якҷинсаи индуксияаш  $\hat{A}=0,3\text{ Тл}$  чарх мезанад. Энергияи кинетикии протон муайян карда шавад.

(17,2 МэВ)

3.15. Протони бо шиддати  $U=50\text{ кВ}$  тезонидашуда ба нокили рости беохири қувваи чараёнаш  $I=5\text{ А}$  дар масофаи  $r=1\text{ см}$  аз он параллелан ҳаракат мекунад. Ба протон чӣ қадар қувва таъсир мекунад?

( $4,95 \cdot 10^{-16}\text{ Н}$ )

3.16. Протон фарқи потенциалҳои  $U=0,5\text{ кВ}$ -ро гузашта, ба майдони магнитии якҷинсаи индуксияаш  $B=0,3\text{ Тл}$  ворид мегардад ва аз рӯйи давра гардиш мекунад. Радиуси давра ёфта шавад.

( $\approx 1,6\text{ м}$ )

3.17. Дар сиклотрони радиуси дуантхояш  $R=35\text{ см}$  протонҳо то энергияи  $W=20\text{ МэВ}$  тезонида мешаванд. Индуксияи магнитии майдоне, ки дар он дуантҳо ҷойгиранд, чӣ қадар мебошад?

(1,85 Тл)

3.18. Аз бурришгоҳи арзии лавҳаи мисини ғафсиаш  $d=0,5\text{ мм}$  чараёни қуввааш  $I=5\text{ А}$  мегузарад. Лавҳа дар майдони магнитии якҷинсаи индуксияаш,  $B=1\text{ Тл}$ , ки хатҳояш ба паҳлӯи лавҳа амудан равонаанд, ҷойгир карда шудааст. Дар лавҳа чӣ қадар фарқи потенциалҳои ҳолӣ ба вучуд меояд?

Ба эътибор гиред, ки дар мис ба ҳар як атомаш якто электрони озод рост меояд ва зичии мисс  $D = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  аст.

(0,74 мкВ)

3.19. Дар майдони якҷинсаи магнитии шадидияташ  $\dot{I} = 60 \text{ кА/м}$  рамкаи квадратшакли тарафаш  $a = 10 \text{ см}$  тавре ҷойгир карда шудааст, ки ҳамвори он бо хатҳои магнитӣ кунҷи  $\alpha = 30^\circ$  ташкил медиҳад. Сели магнитӣ аз сатҳи рамка ёфта шавад.

(0,377 мВб)

3.20. Дар як ҳамворӣ бо ноқили ростии беохир, ки аз он ҷараёни қуввааш  $I = 50 \text{ А}$  мегузарад, рамкаи квадратшакли тарафаш  $10 \text{ см}$  ҷойгир аст. Агар ду тарафи рамка ба ноқил параллелан ва тарафи наздиктаринаш дар масофаи ба  $a$  баробар аз ноқил воқеъ гардида бошад, сели магнитии майдони ҷараён аз сатҳи ин рамка чӣ қадар аст?

( $\approx 0,7 \text{ мкВб}$ )

3.21. Ғалтаки дарози индуктивӣ аз сими диаметраш  $d = 0,8 \text{ мм}$ -и печаҳош ҷафс тайёр карда шудааст. Шадидияти майдонро андаруни ғалтак хангоми аз печаҳо сар додани ҷараёни қуввааш  $I = 5 \text{ А}$  муайян намоед.

(6,25 кА/м)

3.22. Аз сими диаметраш  $d = 0,5 \text{ мм}$  соленоиде бояд тартиб дод, ки андарунаш шадидияти майдон  $I = 24 \text{ кА}$  бошад. Аз сим ҷараёни қуввааш зиёдтарини  $H = 8 \text{ А/м}$  сар додан имконпазир аст. Агар печаҳо ба ҳам ҷафс карда гузаронида шаванд, соленоид бояд чанд қабатро дарбар гирад?

(3)

3.23. Индуктивияти ғалтаки дарозиаш  $l = 25 \text{ см}$ , радиусааш  $r = 2,5 \text{ см}$ , ки аз сими диаметраш  $d = 0,5 \text{ мм}$  ҷафс карда печонидаанд, чӣ қадар мебошад?

(25 мкҲн)

3.24. Дар майдони магнитии якҷинсаи индуксияаш  $B = 0,5 \text{ Тл}$  контури квадратшакли тарафаш  $l = 10 \text{ см}$  ва қувваи ҷараёнаш  $I = 20 \text{ А}$  ҷойгир аст. Ҳамвори квадрат бо самти вектори индуксия кунҷи  $\beta = 30^\circ$  ташкил медиҳад. Барои аз майдон баровардани контур чӣ қадар қор иҷро кардан лозим аст?

(0,05 Ҷ)

3.25. Печасе, ки аз он ҷараёни қуввааш  $I = 20 \text{ А}$  ҷорист, дар майдони якҷинсаи магнитии индуксияаш  $B = 0,02 \text{ Тл}$  ҷойгир аст. Радиуси печа  $R = 10 \text{ см}$ . Барои печаро ба кунҷи  $\alpha = \pi/2$  нисбат ба меҳвари бо диаметри печа мувофиқбуда гардондан чӣ қадар қор иҷро кардан мебошад?

( $\approx 12,6 \text{ мҶ}$ )

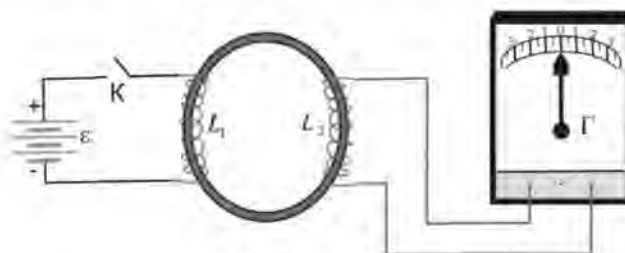
## ҲОДИСАҲОИ ЭЛЕКТРОМАГНИТӢ ВА ҚОНУНҲОИ ҚАРАӢНИ ТАҒЙИРӢБАНДА

### §4.1. Таҷрибаҳои Фарадей. Индуксияи электромагнитӣ

Баъди кашфиёти Х. Эрстед (с. 1820) ва таҷкикотҳои А. Ампер (с. 1820- 1821) маълум гардид, ки дар атрофи ҳар гуна қараёни электрӣ майдони магнитӣ ба вуҷуд меояд. Олими борҳо номбурдаи машҳури англис М. Фарадей симметрӣ будани қонунҳои табиатро дар назар дошта, ҳамон солҳо оид ба мавҷудияти ҳодисаи баръакс-тавассути майдони магнитӣ ҳосил шудани қараёни электрӣ масъала гузошт ва баъди кофтуковҳои тӯлонӣ таҷрибаҳои сершумор с.1831 ҳалли онро дарёфт. Ӯ ҳодисаеро ошкор сохт, ки минбаъд *индуксияи электромагнитӣ* ном гирифт. Хотиррасон кардан бамаврид аст, ки олими амрикоӣ Ч. Генрӣ, дурусттараш Ҳенрӣ (1797-1878) як сол пеш аз М. Фарадей ҳодисаи индуксияи электромагнитиро кашф кард, вале М. Фарадей натиҷаҳои ӯро зудтар ба ҷоп расонда буд.

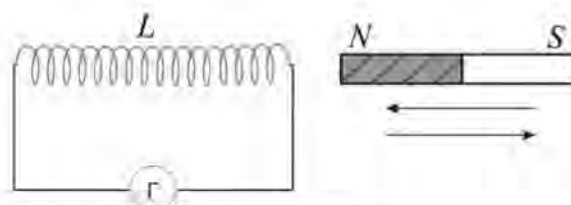
Барои ба ғояҳои ҳодисаи индуксияи электромагнитӣ сарфаҳм рафтан аз таҷрибаҳои Фарадей дутояшро баррасӣ менамоем. Дар таҷрибаи аввал ба дилаки оҳанин аз нокили изолятсияпӯш ду ғалтак печонида шуда буд, ки ба нӯгҳои яке ( $L_1$ , расми 4.1) тавассути калиди  $K$  манбаии қараёни дойимӣ  $\mathcal{E}$ , ба нӯгҳои дигаре ( $L_2$ ) галванометри ҳассоси таксимоти сифриаш дар миёнҷойи шкалааш воқеъгардидаи  $G$  пайвастанд. Ҳангоми васлу ҷудо кардани калид галванометр дар занҷири  $L_2$  ҳосил шудани қараёнро нишон медиҳад. Аҷоибот дар он буд, ки мавриди васли калид ақрабаки галванометр ба як сӯй, вақти ҷудо кардани он бошад, сӯйи муқобил майл меҳӯрад. Дар ҳоли аз ғалтаки  $L_1$  гузаштани қараёни дойимӣ ақрабак ором мемонад.

Дар таҷрибаи дуюм ба ғалтаки дар нӯгҳоиаш галванометр васлбудаи  $L$  (расми 4.2) дуру наздик кардани магнители дойимии  $NS$  галванометр тавлид ёфтани қараёнро қайд мекунад. Дар ин маврид ҳам вақти ба ғалтак дуру наздик овардани магнит ақрабак ба самтҳои гуногун майл меҳӯрад. Агар баръакс, ғалтакро ба магнители ором дуру наздик оварем ҳам ҳодиса такрор мешавад. Дар ҳоли андаруни ғалтак ором ҷойгир будани ҳатто магнители пурқувват галванометр ҳосил шудани қараёнро нишон намедиҳад. Гузашта аз ин, магнит ё ғалтакро ҳар қадар бо суръати қалонтарин дуру наздик оварем, галванометр ҳамон қадар қараёни зиёдтарро қайд менамояд.



Расми 4.1





Расми 4.2

Аз таҷрибаҳои Фарадей хулоса гирифт, ки танҳо дар мавриди аз печаҳои ғалтаки галванометрдор тағйир додани майдони магнитӣ ҷараён тавлид меёбад.

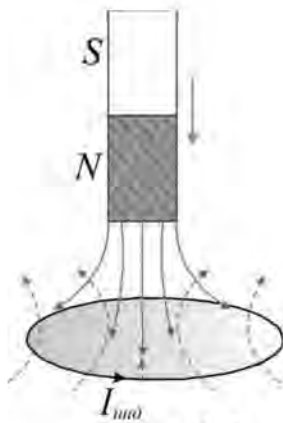
Лозим ба ёдоварист, ки то дар занҷир қувваи электроҳаракатдиҳанда (ҚЭХ) набошад, ҷараён ҳосил намешавад, вале дар занҷирҳои ғалтаки галванометрдор ҳеч гуна манбаи ҷараён вучуд надорад, ҳарчанд дар онҳо ҷараён ва аз ин рӯ ҚЭХ барангехта мешаванд. Маҳз ҳамин ҳодиса индуксияи электромагнитӣ, ҷараён ва ҚЭХ-и тавлидёфта мувофиқан ҷараён ва ҚЭХ-и индуксионӣ ном гирифтаанд.

Гузашта аз ин, Фарадей тавассути таҷрибаҳои муқаррар кард, ки дар мавриди умумӣ ҳангоми аз сатҳи ҳар гуна контур тағйир ёфтани сели магнитӣ бузургии ҚЭХ-и индуксионӣ ба суръати тағйироти он сел мутаносиби роста аст. Ин мутаносибиро чунин пешниҳод мекунанд:

$$\varepsilon_{\text{индук}} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.1)$$

Аломати минус дар ифодаи (4,1), ки чун қонуни асосии индуксияи электромагнитӣ маъмул гаштааст, ба ном қоидаи Ленс-ро ба эътибор мегирад. Ин қоида ро олими рус Э.Х. Ленс (1804-1865) тавассути таҷрибаҳо с. 1833 муқаррар намуд ва он оид ба самти ҷараёни индуксионӣ баҳс мекунанд:

*ҷараёни индуксионӣ чунон самт мегирад, ки майдони магнитии хусусии он ба майдони магнитии ин ҷараёнро барангезанда муқобил таъсир менамояд.* Чунончӣ, агар ба контур магнити дойимиро бо қутби шимолиаш наздик орем (расми 4.3), сатҳи контурро ҳарчӣ зиёдтар ҳатҳои майдони магнитӣ мебуранд (дар расми 4.3 онҳо бо ҳатҳои яқлухт тасвир ёфтаанд ва амудан ба поён равунаанд). Дар натиҷа сели магнитӣ аз сатҳи контур меафзояд. Дар ин маврид ҷараёни индуксионии контур ба рафти акрабаки соат муқобилан самт мегираду ҳатҳои майдони хусусии он (дар расми 4.3 онҳо бо ҳатҳои рах-рах тасвир ёфтаанд ва амудан ба боло равунаанд) ба афзоиши сели магнитии сабабгор мамониат мерасонанд; контур гӯё манбаи қутби шимолии майдони магнитии ҷараёни индуксионӣ мешавад. Агар ҳамон магнити дойимиро аз контур дур андозем, сели магнитӣ аз сатҳи контур кам мегардад. Дар ин ҳол самти ҷараёни индуксионӣ ба самти аввала муқобилу ҳатҳои магнитиаши акнун амудан ба поён равон шуда, ба қоҳиши сели магнити дойимӣ мамониат мерасонанд ва контур гӯё ба манбаи қутби ҷанубии майдони ҷараёни индуксионӣ табдил меёбад.



Расми 4.3



Расми 4.4

Қойидаи Ленсро бо дастгоҳи соддаи зерин намоиш додан мумкин аст (расми 4.4). Ду ҳалқаи алюминӣ (алюминий моддаи ғайрмагнитист)-яке яклухту дигаре қадре бурида чун ду паллаи тарозу дар мувозанат буда, дар атрофи меҳвари амудӣ гардиш хӯрда метавонанд. Ҳангоми ба ҳалқаи яклухт наздик овардани магнити дойимӣ ҳалқа мувофиқи қойидаи Ленс (ба расми 4.3 ниг.) тела меҳӯрад. Мавриди аз ҳалқа дур бурдани магнит ҳалқа ба магнит ҷазб мешаваду аз паси он ба ҳаракат мебарояд. Агар ба ҳалқаи бурришдор ҳарчанд магнити дойимиро дуру наздик намоем, ҳеҷ гуна ҳамтаъсирот мушоҳида намешавад. Зеро бо сабаби сарбаст набудани ҳалқа акнун дар он ҷараёни индуксионӣ тавлид намеёбад ва аз ин рӯ майдони магнити индуксионӣ ба вуҷуд намеояд.

Қойидаи Ленс ба қонуни бақои энергия асос ёфтааст. Дарвоқеъ, ба мавриди дар расми 4.3 тасвирёфта бармегардем. Агар ҳангоми ба контур наздик овардани қутби шимолии магнити дойимӣ ҷараёни индуксионӣ ба рафти ақрабаки соат самт мегирифт, сели магнитӣ аз сатҳи контур боз ҳам зиёдтар шуда, ҷараёни индуксионии қалонтарро тавлид мекард. Дар натиҷа дар контур иқтидори иловагӣ вусъат меёфт ва контур ба мошине мубаддал мешуд, ки абадӣ бояд амал намояд, вале ин ҳулоса муҳолифи қонуни бақои энергия мебошад. Ҳамин аст, ки олими олмонӣ Г.Л. Гелмголтс, дурусттараш Ҳелмхолтс (1821-1894) маҳз дар асоси қонуни бақои энергия ифодаи (4.1)-ро ба тарзи назариявӣ исбот кард. Барои ба он боварӣ ҳосил кардан ба таҷрибаи дар расми 3.31 тасвирёфта (ба §3.14 ниг.) бармегардем. Агар дар ин таҷриба ғайр аз гармии ҷоулу ленсиёе, ки дар занҷир хориҷ мешавад, кори кӯчондани ноқили ҷараёндорро ба эътибор гирем (тавре ки зикр ёфта буд, он корро манбайи ҷараён иҷро менамояд), кори пурраи манбаъро чунин пешниҳод кардан раво аст:

$$I \varepsilon dt = I^2 R t + I d\Phi \quad (4.2)$$

Дар ин ҷо  $R$ -муқовимати пурраи занҷир аст. Баъди ихтисори қувваи ҷараёни занҷир  $I$  аз (4.2) баробарии зеринро ҳосил мекунем:

$$I = \frac{\varepsilon - d\Phi / dt}{R} = \frac{\varepsilon + \varepsilon_{\text{инд}}}{R} \quad (4.3)$$

Ин таносуб ифодаи қонуни Ом барои занҷири сарбаст мебошад, ки он қонуни (4.1)-ро бевосита дарбар гирифтааст.

Минбаъд маълум шуд, ки ҳар қадар шумораи печаҳои контур зиёд бошад, ҳамон қадар бузургии ҚЭХ-и индуксионӣ меафзояд.

Ҳамин буд, ки Фарадей дар таҷрибаҳои ғалтакхоро истифода кард. Агар контур аз  $N$ -то печак иборат бошад, қонуни асосии индуксияи электромагнитӣ чунин намуд мегирад:

$$\varepsilon_{\text{индук}} = -N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (4.4)$$

ки дар он  $d\Phi/dt$ -суръати тағйироти сели магнитӣ аз ҳар як печа мебошад.

**Мисоли 4.1.** Дар майдони магнитии якҷинсаи индуксияаш  $B = 0,17 \text{ Тл}$  рамкаи квадратшакли тарафаш  $a = 5 \text{ см}$ , ки аз сими мисини масоҳати буришгоҳи арзиаш  $S = 1 \text{ мм}^2$  сохта шудааст, тавре ҷойгир мебошад, ки хатҳои магнитиро амудан бурида мегузарад. Агар майдони магнитӣ бархам хӯрад, аз рамка чӣ қадар заряд мегузарад?

*Маълумот:*

$$\left. \begin{aligned} B &= 0,17 \text{ Тл} \\ a &= 5 \text{ см} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\ \rho &= 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \\ S &= 1 \text{ мм}^2 = 10^{-6} \text{ м}^2 \\ q &= ? \end{aligned} \right|$$

*Ҳал*

Дар тӯли вақти бархам хӯрдани майдони магнитӣ дар рамка ҚЭҲ - и индуксионии:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

ангезонида мешавад. Дар тӯли ин вақт аз рамка ҷараёни қуввааш:

$$I = \frac{\varepsilon_i}{R} = -\frac{d\Phi}{Rdt}$$

мегузарад, ки онро чун:

$$I = -\frac{dq}{dt}$$

пешниҳод карда метавонем. Аз ин рӯ

$$dq = -\frac{1}{R} d\Phi,$$

ки дар ин ҷо  $R$ -муқовимати рамка мебошад. Пас, миқдори заряде, ки аз буришгоҳи арзии нокили рамка дар тӯли вақти бархам хӯрдани майдони магнитӣ мегузарад,

$$q = -\frac{1}{R} \int_{\Phi_0}^0 d\Phi = \frac{\Phi_0}{R}$$

аст. Акнун ба эътибор мегирем, ки

$$\Phi_0 = Ba^2 \cos 0^\circ = Ba^2; \quad R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{4a}{S}$$

(дар ин ҷо  $S = a^2$ -масоҳати рамка) мебошад.

Ҳамин тарик,

$$q = \frac{Ba^2}{\rho \frac{4a}{S}} = \frac{BaS}{4\rho} = \frac{0,17 \text{ Тл} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{4 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}} = \frac{0,5}{4} \text{ Кл} = 0,125 \text{ Кл}$$

мебошад:

Ҷавоб:  $q = 0,125 \text{ Кл}$ .

## §4.2. Ҳодисаи худиндуксия. Индуктивият

Тавре ки аз таҷрибаҳои Фарадей бармеояд, ҳар гуна тағйироти майдони магнитӣ сабабгори рӯй додани ҳодисаи индуксияи электромагнитӣ мегардад. Чунончӣ, агар аз контури сарбаст чараён гузарад, дар атрофи он майдони магнитие ба вучуд меояд, ки индуксияаш мувофиқи қонуни Био-Савар-Лаплас ба қувваи чараён вобаста аст ва дар мавриди тағйир ёфтани ин чараён сели магнитиаши аз сатҳи контур ба қувваи чараён мутаносибан дигар мешавад:

$$\Phi = LI. \quad (4.5)$$

Дар ин ҷо  $L$ -коэффитсиенти мутаносибӣ буда, *индуктивияти контур* ном дорад. Индуктивият ба андозаҳои контур, теъдод ё шумораи печакҳои он (агар контур аз чандин печакҳо иборат бошад), инчунин ҳосиятҳои магнитии муҳити атрофи контур вобаста аст. Воҳиди индуктивият дар СИ  $1 \text{ Ҳенри}$  (мухтасар  $1 \text{ Ҳн}$ , ба лафзи русӣ  $1 \text{ генри}$ , мухтасар  $1 \text{ Гн}$ ) буда, мувофиқи (4.5) муқаррар карда мешавад:  $1 \text{ Ҳн}$ -индуктивияти контурест, ки ҳангоми аз он гузаштани чараёни қуввааш  $1 \text{ А}$  аз сатҳи контур сели магнитии  $1 \text{ Вб}$  ба вучуд меояд.

Индуктивияти ғалтаки симин, ки *ғалтаки индуктивӣ* ном гирифтааст ва яке аз ҷузъҳои асосиест барои ҳосил кардани майдонҳои электромагнитии тағйирёбанда аҳамияти калони амалӣ дорад. Индуктивияти чунин ғалтаки дароз-соленоидро аз муқоисаи (4.5) ва (3.70) муайян карда метавонем:

$$L = \mu\mu_0 n^2 V, \quad (4.6)$$

ки дар ин ҷо  $n = N/l$ -шумораи печакҳои соленоид дар воҳиди дарозӣ аст.

Агар дар занҷири ғалтаки индуктивиро дарбаргирифта қувваи чараён тағйир ёбад, дар он як навъ ҳодисаи индуксияи электромагнитии ба истилоҳ *худиндуксия* рӯй медиҳад, ки ҚЭХ- ашро мувофиқи (4.1) муқаррар карда метавонем:

$$\varepsilon_s = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt} - I \frac{dL}{dt}. \quad (4.7)$$

Мавриди ба мурури замон дойимӣ мондани индуктивияти занҷир ( $L = \text{const}$ ) *ҚЭХ-и худиндуксия*:

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt} \quad (4.8)$$

танҳо ба суръати тағйироти қувваи чараён дар занҷир мутаносиб мебошад; яъне ҳар қадар индуктивияти занҷир зиёд бошад ва қувваи чараён дар он бо суръати калонтар (зуд) тағйир ёбад, ҚЭХ-и бузургтари худиндуксия барангехта мешавад. Аз (4.8) бармеояд, ки агар қувваи чараёни занҷир дар тӯли  $1 \text{ с}$  ба қадри  $1 \text{ А}$  тағйир ёбаду



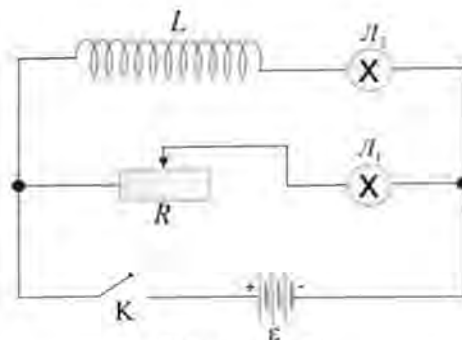
дар занҷир ҚЭХ-и худиндуксионии  $1$   $V$  барангехта шавад, индуктивияти ин занҷир:

$$1 \chi_H = 1 \frac{B \cdot c}{A}. \quad (4.9)$$

Ёдрас кардан бамаврид аст, ки ҳодисаи худиндуксияро с 1822 олими номбурдаи амрикоӣ Ч. Хенрӣ (воҳиди индуктивият маҳз ба шарафи ин олим  $1 \chi_H$  номгузорӣ шудааст) кашф намуда буд, вале  $\bar{y}$  натиҷаҳои дар вақташ ба чоп нарасонд.

М. Фарадей с. 1835 ҳодисаи худиндуксияро дар асл дубора кашфу натиҷаҳои чоп намуд.

Ҳодисаи худиндуксия дар таҷрибаи зерин бараъло зоҳир мегардад (расми 4.5). Занҷири электрии аз ду қитъаи параллелан пайваस्तбудаи яке аз ғалтаки индуктивии  $L$  ва лампаи  $L_2$ , дигаре аз реостати  $R$  ва лампаи  $L_1$  таркиб ёфта, тавассути калиди  $K$  ба манбаи ҷараёни доимии  $\mathcal{E}$  васл мебошад. Қитъаҳо аз ҷиҳати электрӣ баробарвазанд, яъне муқовиматҳои якандоза доранду лампаҳо айнан якхелаанд. Ҳангоми пайвасти калид қувваи ҷараён дар ғалтак аз сифр то ягон қимати  $I_0 = \mathcal{E} / R_2$  мефзояд ва мувофиқи қоидаи Ленс дар ин қитъа ҷараёни худиндуксионие ба вуҷуд меояд, ки муқобили ҷараёни асосӣ самт гирифта, ба ин афзоиш мамониат мерасонад ва дар натиҷа лампаи  $L_2$  назар ба лампаи  $L_1$  қадре дертар фурузон мешавад.



Расми 4.5

Мавриди ҷудо кардани калид қувваи ҷараён дар ҳамон қитъа аз  $I_0$  то сифр кам мешавад. Акнун ҷараёни индуксионӣ ба ҷараёни камшавандаи асосӣ ҳамсамт гашта, ба коҳиши ин ҷараён мамониат мерасонад. Ҳамин аст, ки дар ин ҳол лампаи  $L_2$  назар ба  $L_1$  қадре дертар хомӯш мегардад. Дарвоқеъ, баробари васли калид занҷир ҳам ҚЭХ - и асосӣ  $\mathcal{E}$  ва ҳам ҚЭХ-и худиндуксия  $\mathcal{E}_S$ -ро дарбар мегирад, аз ин рӯ қонуни Ом барои занҷири сарбаст чун:

$$IR = \mathcal{E} + \mathcal{E}_S$$

сабт карда мешавад, ки онро ба намуди

$$IR - \mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt}$$

овардан мумкин аст. Акнун бузургии тағйирёбандаи ёрирасони  $U = IR - \mathcal{E}$ -ро ворид сохта ин муодиларо чунин пешниҳод карда метавонем:

$$\frac{dU}{U} = -\frac{R}{L} dt. \quad (*)$$

Баъди интегрронӣ дар ҳудуди вақти аз 0 то  $t$ , ки дар ин муддат қувваи ҷараён аз 0 то қимати  $I_0 = \varepsilon/R_2$  тағйир меёбад, муодилаи (\*) намуди зерин мегирад:

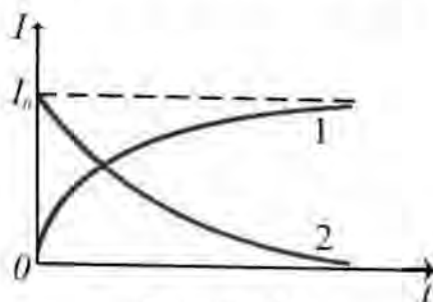
$$\ln\left(\frac{IR - \varepsilon}{-\varepsilon}\right) = -\frac{R}{L} t$$

ё худ баъди потенсиронидан:

$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L} t}\right) \quad (4.10)$$

буданаш маълум мегардад, ки дар ин ҷо  $I_0$ -қимати қувваи ҷараёни барқароршуда (ҳангоми  $t \rightarrow \infty$ ), нисбати  $\tau = L/R$  (мувофиқи воҳидаш) ба ном *тӯли вақти релаксатсия* мебошанд ( $\tau$ -тӯли вақтест, ки баъди гузаштани он система ба ҳолати ибтидоиаш бармегардад). Аз ин рӯ барқароршавӣ дар ҳоли ҳар қадар индуктивияти занҷир хурд ва муқовимати он калон будан ҳамон қадар тезтар рӯй медиҳад.

Ҳамин тариқ, мавриди васли калид қувваи ҷараён на якбора, балки тадричан мувофиқи хати қачи 1 (расми 4.6) меафзояд.



Расми 4.6

Акнун раванди тағйироти ҷараёнро ҳангоми ҷудо кардани калид муҳокима менамоем. Дар занҷире, ки индуктивияташ  $L$ , муқовиматаш  $R$  ва дар он манбаи ҚЭҲ-аш  $\varepsilon$  амал мекунад, ҷараёни қуввааш  $I_0 = \varepsilon/R$  ҷорист. Дар лаҳзаи  $t=0$  занҷирро тавассути калид аз манбаъ ҷудо мекунем, онгоҳ аз ғалтак, тавре ки зикр ёфт, қувваи ҷараён коҳиш меёбад, ки боиси ба вучуд омадани ҚЭҲ-и худиндуксияи  $\varepsilon_s = -L di/dt$  мешавад. Аз ин рӯ мувофиқи қонуни Ом баробарии зеринро сабт карда метавонем:

$$IR = -L \frac{di}{dt}.$$

Ин муодиларо ба намуди:

$$\frac{di}{i} = -\frac{R}{L} dt$$

оварда, баъди интегрронӣ дар ҳудуди вақти аз 0 то  $t$ , ки дар ин муддат қувваи ҷараён аз  $I_0$  то  $I$  кам мешавад, қонуни зерини тағйироти қувваи ҷараёнро муқаррар менамоем:

$$I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} \quad (4.11)$$

Яъне, баъди чудо кардани калид кувваи чараёни занчир на якбора, балки тадричан мутобики хати качи 2 (расми 4.6) кам мешавад.

Чараёне, ки мувофики қонуни (4.10) меафзояд, *экстрачараёни васлшавӣ* ва мувофики қонуни (4.11) кохиш меёбад, *экстрачараёни қатъшавӣ* ном гирифтаанд (пешованди *экстра* дар номҳои ин ду чараён ба маънои аҷоибу ғароиб, ғайричашмдошт омадааст).

Хотиррасон кардан бамаврид мебошад, ки хангоми қимати калон доштани индуктивияти занчир ва кувваи чараёни он бузург будан хангоми чудо кардани калид кувваи чараён хеле бо зудӣ тағйир ёфта, дар занчир ҚЭҲ - и худиндуксияи назар ба ҚЭҲ-и асосӣ зиёдтар барангехта шуданаш имконпазир аст. Дар натиҷа ҳаво раҳна гардида шарора парида метавонад. Ин гуна ҳодиса ба оқибатҳои нохуш оварданаш аз эҳтимол дур нест. Чунончӣ, дар хонае, ки бо ин ё он сабаб гази табиӣ ё буғҳои бензину карасин чамъ шуда бошанд, баробари чудо кардан, инчунин васли калиди шабакаи шахрӣ таркиш ё сӯхтор ба амал омада метавонанд, инчунин занчири шабакавии хона аз қор баромаданаш мумкин аст.

**Масъалаи 4.2.** Индуктивияти контур  $L = 0,144 \text{ Гн}$ , муқовимати он  $R = 10 \text{ Ом}$  мебошад. Баъди чанд вақти васли чараён кувваи он нисфи кувваи чараёни барқароршавандаро ташкил медиҳад?

*Маълумот:*

$$L = 0,144 \text{ Гн}$$

$$R = 10 \text{ Ом}$$

$$I = 0,5I_0$$

$$t = ?$$

*Ҳал*  
Баъди васли чараён кувваи он мутобики қонуни (4.10) то қимати  $I_0$  барқарор мешавад.

Мувофиқи шарти масъала  $I = 0,5I_0$  буданашро ба эътибор гирем:

$$0,5I_0 = I_0(1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$

ё ки

$$e^{-\frac{R}{L}t} = 0,5$$

аз ин рӯ

$$-\frac{R}{L}t = \ln 0,5 = -0,693$$

мешавад. Пас, тӯли вақти матлуб:

$$t = \frac{0,693L}{R} = \frac{0,693 \cdot 0,144 \text{ Гн}}{10 \text{ Ом}} = 10 \text{ мс}$$

буданаш маълум мегардад.

*Ҷавоб:*  $t = 10 \text{ мс}$

### §4.3. Энергияи майдони магнитӣ

Ноқиле, ки аз он чараён мегузарад, ҳар вақт бо майдони магнитӣ ихота ёфтааст. Майдони магнитӣ пайваста баробари ба вучуд омадани чараёну пайдо ва катъ ёфтани он нест мешавад. Майдони магнитӣ чун майдони электрӣ хомил (баранда)-и энергия мебошад. Энергияи майдони магнитӣ бо коре муайян карда мешавад, ки чараён барои ба вучуд овардани ин майдон иҷро менамояд.

Агар аз контури индуктивияташ  $L$  чараёни қуввааш  $I$  гузарад, бо ин контур сели магнитии  $\Phi = LI$  алоқаманд аст. Ба қадри  $dI$  тағйир ёфтани қувваи чараён боиси тағйироти сели магнитии  $d\Phi = LdI$  мегардад. Барои ин қадар тағйирот кори  $dA = Id\Phi = LI dI$  иҷро мешавад. Аз ин рӯ барои ба вучуд овардани сели магнитии  $\Phi$  кори зеринро иҷро кардан мебояд:

$$A = \int_0^I LI dI = \frac{LI^2}{2}. \quad (4.12)$$

Лозим ба ёдоварист, ки ифодаи (4.12)-ро чун кори зидди ҚЭХ - и худиндуксия ҳангоми аз 0 то қимати  $I$  афзудани қувваи чараён, ки барои ба вучуд овардани майдони магнитӣ иҷро кардан лозим меояд, маънидод намудан равоқ. Пас, контури чараёндор дорои энергияи:

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad (4.13)$$

мебошад.

Дар мисоли майдони магнитии якҷинсаи андаруни соленоиди дароз мавҷудбуда энергияи майдони магнитиро бо бузургҳои тавсифдиҳандаи ин майдон дар фазои ихотакарда ифода менамоем. Ба эътибор мегирем, ки индуктивияти соленоид мувофиқи (4.6):

$$L = \mu\mu_0 n^2 V,$$

индуксияи майдони магнитии он:

$$B = \mu\mu_0 nI = \mu\mu_0 \frac{NI}{l}$$

мебошанд, аз ин рӯ:

$$I = \frac{Bl}{\mu\mu_0 N}$$

ва бо дарназардошти он, ки  $B = \mu\mu_0 H$  аст, барои энергияи майдони магнитӣ ифодаи зеринро ҳосил карда метавонем:

$$W = \frac{1}{2} \mu\mu_0 H^2 V = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0} V = \frac{1}{2} BHV, \quad (4.14)$$

ки дар ин ҷо  $V = lS$ -ҳаҷми соленоид мебошад.

Майдони магнитии соленоиди дароз якҷинса буда, андаруни он энергия бо *зичии ҳаҷмӣ*.

$$w_m = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \mu\mu_0 H^2 = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0} = \frac{1}{2} BH, \quad (4.15)$$

тақсим шудааст. Ин ифодаҳо ҳислати умумӣ дошта, барои майдонҳои ғайриҷинса низ татбиқшавандаанд.



Зичии ҳаҷми энергияи майдони магнитӣ ба зичии ҳаҷмии энергияи майдони электрӣ (1.94):

$$w_E = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} ED \quad (4.16)$$

мувофиқат мекунад дар он бузургҳои электрӣ бо бузургҳои тавсифдиҳандаи майдони магнитӣ ( $\vec{B}$  ва  $\vec{H}$ ) иваз шудаанд.

**Масъалаи 4.3.** Майдонҳои пуркувати электромагнитӣ, ки дар шароити лабораторӣ дастрас мешаванд, ба шадидияти  $E = 1,0 \cdot 10^4 \text{ В/м}$  ва индуксияи  $B = 2,0 \text{ Тл}$  мувофиқанд. Зичии ҳаҷмии энергияи ин майдонҳоро муқоиса бинмод. Муайян созед, ки ҳангоми кадом шадидият зичии энергияи майдони электрӣ ба зичии энергияи майдони магнитии индуксияаш  $B = 2,0 \text{ Тл}$  мувофиқ меояд.

*Маълумот:*

$$E = 1,0 \cdot 10^4 \text{ В/м}$$

$$B = 2,0 \text{ Тл}$$

$$w_E = ? \quad w_M = ? \quad E_2 = ?$$

*Ҳал*

Зичии ҳаҷмии энергияи майдонҳои электрӣ ва магнитӣ бо формулаҳои:

$$w_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2; \quad w_M = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$$

муайян када мешаванд, ки дар ин ҷо  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  ва  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  мувофиқан доимӣҳои электрӣ ва магнитӣанд. Аз ин рӯ:

$$w_E = \frac{1}{2} 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ В/м} \cdot (10^4 \text{ В/м})^2 = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ Ҷ/м}^3;$$

$$w_M = \frac{1}{2} \cdot \frac{(2 \text{ Тл})^2}{12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}} = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Ҷ/м}^3$$

мебошанд. Пас, бояд баробарии зерин ҷой дошта бошад:

$$\frac{1}{2} \epsilon E_1^2 = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Ҷ/м}^3,$$

аз ин ҷо

$$E_1 = \sqrt{\frac{3,2 \cdot 10^6}{8,85 \cdot 10^{-12}} \frac{\text{В}}{\text{м}}} = 6 \cdot 10^8 \text{ В/м}$$

буданаш маълум мегардад.

Хотиррасон кардан бамаврид аст, ки шадидияти ба  $E_1$  баробар танҳо андаруни атомҳо вучуд дошта метавонад.

*Ҷавоб.*  $w_E = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ Ҷ/м}^3$ ;  $w_M = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Ҷ/м}^3$ ;  $E_1 = 6 \cdot 10^8 \text{ В/м}$ .

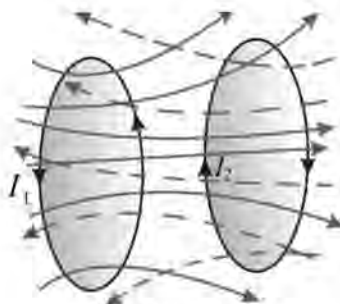
#### §4.4. Индуксияи тарафайн

Фарз мекунем, ки контурҳои 1 ва 2 нисбат ба якдигар начандон дур ҷойгиранд (расми 4.7). Агар аз контури 1 ҷараёни қуввааш  $I_1$

чорӣ бошад, он аз сатҳи контури 2 сели пурраи магнитии ба  $I_1$  мутаносибро ба вучуд меорад:

$$\Phi_1 = L_{12}I_1 \quad (4.17)$$

(дар расми 4.7 хатҳои магнители чараёни  $I_1$  бо хатҳои яклухт тасвир ёфтаанд).



Расми 4.7

Ҳангоми тағйироти чараёни  $I_1$  дар контури 2 ҚЭХ - и индуксионии:

$$\varepsilon_2 = -L_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (4.18)$$

ангезонида мешавад. Айнан ҳамин тарз дар ҳоли аз контури дуҷум гузаштани чараёни қуввааш  $I_2$  сели пурраи бо контури 1 алоқаманди:

$$\Phi_2 = L_{12}I_2 \quad (4.19)$$

ба вучуд меояд (хатҳои магнитии майдони чараёни  $I_2$  дар расми 4.7 бо хатҳои штрихӣ тасвир ёфтаанд). Ҳангоми тағйироти чараёни  $I_2$  дар контури 1 ҚЭХ-и индуксионии:

$$\varepsilon_1 = -L_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad (4.20)$$

тавлид меёбад.

Контурҳои 1 ва 2 ба ҳам алоқаманд мебошанд ва ҳодисаи ба вучуд омадани ҚЭХ дар яке аз контурҳо ҳангоми дар контури дигар тағйир ёфтани қувваи чараён *индуксияи тарафайн* ё худ *ба ҳам индуксия* ном гирифтааст.

Коэффитсиентҳои мутаносибӣ  $L_{12}$  ва  $L_{21}$  *индуктивияти тарафайн* номида мешаванд. Ҳисобу китоби ҷиддӣ нишон медиҳад, ки ин ду коэффитсиент ҳам вақт ба ҳам баробаранд:

$$L_{12} = L_{21}. \quad (4.21)$$

Индуктивияти тарафайн ба шакл, андозаҳо ва мавқеи нисбат ба якдигар ҷойгиршавии контурҳо, инчунин хосиятҳои магнитии муҳити атрофи онҳо вобаста буда, бо ҳенрӣ ( $ХН$ )-ҳо ифода меёбад. Масалан, индуктивияти тарафайни ду ғалтаки бо дилаки умумии тороидӣ печонидашударо муайян менамоем (расми 4.8). Индуксияи магнитие, ки ғалтаки шумораи печаҳош  $N_1$  ва қувваи чараёнаш мувофиқи (§3.12):

$$B_1 = \mu\mu_0 \frac{N_1}{l}, \quad (4.22)$$

ки дар он  $\mu$ -нуфузпазирии нисбии дилак,  $l$ -дарозии ин дилак мебошанд.



Расми 4.8

Акнун ба эътибор мегирем, ки сели магнитӣ аз якто печаи ғалтаки дуюм:

$$B_1 S = \mu \mu_0 \frac{N_1 I_1}{l} S$$

ва аз тамоми печаҳои ин ғалтак:

$$\Phi = N_2 B S = \mu \mu_0 \frac{N_1 N_2 I_1}{l} S$$

буда, онро чараёни  $I$  ба вучуд меорад. Аз ин рӯ:

$$L_{21} = \frac{\Phi}{I_1} = \mu \mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S \quad (4.23)$$

аст. Агар сели магнитии чараёни  $I_2$  аз сатҳи печаҳои ғалтаки якум ба вучуд оварандаро ҳисоб намоем, айнан ифодаи (4.22) ҳосил мешавад. Пас, индуктивияти тарафайни ду ғалтаки ба дилаки умумии тороидӣ печонидашуда:

$$L_{12} = L_{21} = \mu \mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S \quad (4.24)$$

буданаш маълум мегардад.

**Масъалаи 4.4.** Ду ғалтаки индуктивӣ ба дилаки умумӣ печонида шудаанд. Агар дар яке аз ғалтакҳо қувваи чараён бо суръати  $dI_1/dt = 5 \text{ A/c}$  тағйир ёбаду дар ғалтаки дуюм ҚЭХ-и индуксионии  $\varepsilon_2 = 0,5 \text{ В}$  ангезонида шавад, индуктивияти тарафайни ғалтакҳо чӣ қадар будааст?

*Маълумот.*

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dI_1}{dt} = 5 \text{ A/c} \\ |\varepsilon_2| = 0,5 \text{ В} \\ L_{12} = ? \end{array} \right\}$$

Ба назар мегирем, ки  $L_{12} = L_{21}$  ва

$$|\varepsilon_2| = L_{21} \frac{dI_1}{dt},$$

аз ин рӯ:

$$L_{21} = \frac{|\varepsilon_2|}{dI_1/dt} = \frac{0,5 \text{ В}}{5 \text{ A/c}} = 0,1 \text{ Хн.}$$

мебошад.

*Ҳал*

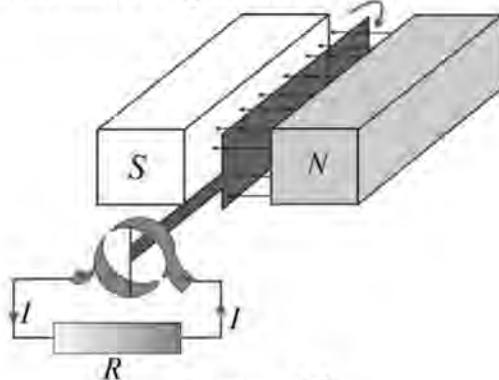
*Ҷавоб.*  $L_{21} = 0,1 \text{ Хн.}$

## §4.5. Чараёни тағйирёбанда

Чараёнхое, ки тавассути элементҳои галванӣ, аккумуляторҳо, батареяҳои офтобӣ ҳосил карда мешаванд, рост ё доимӣ мебошанд, зеро самт ва қувваи онҳо бо мурури замон бетағйир мемонанд. Қутбҳои мусбату манфии манбаҳои чараёнҳои доимии дар боло зикрфта дигар намешаванд.

Самт ва қувваи чараёнхое, ки генераторҳои\*) дар нерӯгоҳҳои барқии обӣ, стансияҳои ҳароратӣ шинондашуда ба вуҷуд меоранду барои равшанӣ, ба қор даровардани муҳаррик (мотор)-ҳои электрӣ, амали гармидиҳанда ва дастгоҳҳои дигари гуногуни электрӣ истифода мебаранд, бефосила, маротибҳои зиёд дар тӯли 1 с тағйир меёбанд.

Дар техникаи муосир аксар генераторҳои индуксионӣ, яъне мошинхое, ки энергияи механикӣ ё ҳароратиро дар натиҷаи ҳодисаи индуксияи электромагнитӣ ба энергияи электрӣ табдил медиҳанд, қорбаст мешаванд. Бо принсипи амали ин генераторҳо дар мисоли рамкаи ноқилии ҳамвори 1, ки дар байни қутбҳои магнети доимӣ давр мезанад, шинос мешавем (расми 4.9).



Расми 4.9

Қисми ҳаракатманди генератор (дар мисоли мо рамка) *ротор* (аз лотинии rotare-гардиш додан) ва ҷузъи беҳаракати он *статор* (магнети доимӣ аз лотинии stator-оромистода) ном гирифтаанд.

Дар ду нӯги рамка ҳалқаҳои мисини бо ҳамроҳии рамка гардишхӯранда васл мебошанд. Аз рӯйи ҳалқаҳо лавҳаҳои ангиштӣ бо ёрии пружинаҳои пахшбуда мелағжанд. Истеъмолгарони энергияи электрӣ, мухтасар *борбаст* (онро ба русӣ нагрузка мегӯянд) ба лавҳаҳо васланд. Сели магнитӣ аз сатҳи рамка:

$$\Phi = BS \cos \alpha = \Phi_m \cos \alpha \quad (4.25)$$

буданаширо хотиррасон менамоем, ки дар ин ҷо  $B$ -индуксияи магнитӣ,  $S$ -масоҳати рамка,  $\alpha$ -кунҷи байни нормали сатҳ ва вектори индуксия мебошад. Бузургии:

$$\Phi_m = BS \quad (4.26)$$

қимати зиёдтарин (амплитудавӣ)-и сели магнитӣ аст.

\*) Аз лотинии generator – истехсолкунанда, тавлидкунанда омадааст.



Агар сели магнитӣ тағйир ёбад, мувофиқи қонуни асосии индуксияи электромагнитӣ (§4.1) дар рамка ҚЭХ-и индуксионӣ ангезонида мешавад. Усули аз ҷиҳати техникӣ мусоидтарини тағйир додани сели магнитӣ ба ҳаракати чархзанӣ даровардани рамка мебошад. Ҳамин аст, ки хангоми бо суръати кунҷии  $\omega$  мунтазам гардиш хӯрдани рамка кунҷи  $\alpha$  мувофиқи формулаи  $\alpha = \omega t$  ва аз ин рӯ сели магнитии (4.25) мутобиқи қонуни:

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t \quad (4.27)$$

тағйир меёбад. Аз ин рӯ дар рамка ҚЭХ-и индуксионии:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega \Phi_m \sin \omega t = \varepsilon_m \sin \omega t \quad (4.28)$$

ангезонида мешавад, ки дар он

$$\varepsilon_m = \omega BS = \omega \Phi_m \quad (4.29)$$

қимати амплитудавии ҚЭХ аст.

Ҳамин тариқ, хангоми гардиши мунтазами рамка дар он ҚЭХ-и мувофиқи қонуни синус, яъне ба тарзи гармоникӣ тағйирёбанда ба вучуд меояд.

Аз формулаи (4.29) бармеояд, ки қимати амплитудавии ҚЭХ (аз ин рӯ худ ҚЭХ низ) ба бузургҳои  $\omega$ ,  $B$ , ва  $S$  мутаносиби роста мебошад. Дар мамлакатҳои аврупоӣ, инчунин собиқ Иттиҳоди шӯравӣ басомади стандартӣ  $\nu = \omega / 2\pi = 50$  Ҳс (дар ИМА ва Канада  $\nu = 60$  Ҳс) қабул шудааст. Барои ҳосил кардани ин қадар басомад ротор бояд дар як дақиқа ба қадри 3 000 гардиш намояд, ки аз ҷиҳати техникӣ басо мушқил мебошад. Аз ин рӯ дар НБО-ҳои пуриктидори муосир генераторҳои иктидорашон то 800 МВт (масалан, иктидори ҳар яке аз 9 агрегати НБО-и Норақ 300 МВт) мерасад ва дар онҳо чараёнҳои қувваашон даҳҳо ҳазор ампер ба вучуд меоянд, конструксияи дигари генераторҳо мавриди истифода қарор меёбад: ба ҷойи рамка ҳамчун ротор якчанд чуфт электромагнитҳои бештар бо чараёни доимӣ гизогиранда қорбаст мешаванд. Ба сифати статор дар ин генераторҳо ғалтакҳои печаҳояшон зиёди аз симҳои ғафс таркибёфта (дар генераторҳои ба ном чараёнҳои сефаза сето ғалтаки нисбат ба якдигар таҳти кунҷи  $120^\circ$  ҷойгирбуда) хизмат мекунанд. Дар ин маврид, агар ротор, масалан аз 16 чуфт электромагнит иборат бошад, барои ҳосил кардани басомади  $\nu = 50$  Ҳс он дар як дақиқа ба қадри 187,5 маротиба гардиш хӯрданиш кофист.

Барои афзудани индуксияи магнитӣ дар электромагнитҳои ротор нуфузпазирии магниташон калони  $\mu$  ҷойгир мекунанд ва аз онҳо чараёнҳои қувваашон калон сар медиханд.

Агар ба клеммаҳои генератор борбасти муқовиматаш  $R$  васл карда шавад, аз он чараёни қуввааш мувофиқи қонуни:

$$I = \frac{\varepsilon_m}{R+r} \sin \omega t = I_m \sin \omega t \quad (4.30)$$

тағйирёбанда мегузарад, ки дар ин ҷо

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{R+r} = \frac{\omega BS}{R+r} \quad (4.31)$$

қимати амплитудавии қувваи чараён,  $r$ -муқовимати дохилии генератор мебошанд.

Бузургии:

$$\varphi = \omega t = 2\pi\nu t = \frac{2\pi}{T} t \quad (4.32)$$

*фазаи чараёни тағйирёбанда*,  $\nu$  - басомад,  $T$  - даври он аст.

Бояд қайд кард, ки хангоми қимати зиёдтарин гирифтани сели магнитӣ (дар ин маврид хатҳои магнитӣ сатҳи рамкаро амудан бурида мегузаранд) қимати қувваи чараёни тағйирёбанда қимати баробари сифр ( $I = 0$ ) мешавад. Тавре ки мегӯянд, фазаҳои тағйироти сели магнитӣ, ҚЭХ, инчунин қувваи чараён ба кадри  $90^\circ$  фарк мекунанд.

Ёдрас шудан бамаврид аст, ки сохти генераторҳои чараёни дойимӣ назар ба генераторҳои чараёнҳои тағйирёбанда фарқияти кулӣ надорад. Фақат дар генераторҳои чараёни дойимӣ ба ҷойи ду ҳалқаи яклухт ду нимҳалқаҳои аз ҳам ҷудо қорбаст мешаванду бас ва дар холи ҳамчун ротор хизмат кардани электромагнитҳо ба ҳар як ҷуфти онҳо ду нимҳалқа васланд.

#### §4.6. Чараёнҳои Фуко

Чараёни индуксионӣ на танҳо дар ноқилҳои хатӣ, балки дар ноқилҳои ғафси яклухт, ки хатҳои сарбасти майдони магнитии тағйирёбандаро дарбар мегиранд, ба вучуд меоянд. Ин гуна чараёнҳо, ки дар ғафсии ноқилҳо ангеzoneида мешаванд, сарбастанд ва чараёнҳои *гирдбодӣ* ё *чараёнҳои Фуко* ном гирифтаанд, зеро онҳоро олими фаронсавӣ Ж.Б. Фуко (1819-1868) ошкор сохта (с. 1855), усулҳои кам карданашонро пешниҳод намуда буд.

Чараёнҳои Фуко мувофиқи қоидаи Ленс самт мегиранд. Ҳамин аст, ки ноқилҳои ғафс дар майдони магнитӣ тормоз хӯрда, ба туфайли муқовимати калон доштанашон ба дараҷа баланд гарм мешаванд ва аксар чараёнҳои Фуко дар ин маврид зарароваранд. Барои кам кардани таъсири манфии чараёнҳои Фуко ҷузъҳои металлӣ, ки дар майдонҳои магнитии тағйирёбанда ҷойгиранд, масалан дилакҳои трансформаторҳоро аз варақаҳои алоҳидаи тунуки изолятсияпӯш тайёр мекунанд, дар натиҷа муқовиматашон кам мешавад.

Чараёнҳои Фуко барои обутоб додани ҷузъҳои аз металлӣ яклухт сохташаванда низ истифода мебаранд. Барои ин онҳоро дар майдонҳои магнитии бо басомади калон тағйирёбанда ҷойгир карда, то ҳадди зарурӣ метафсонанд. Гармии ҷоулу ленси, ки тавассути чараёнҳои Фуко хориҷ мешавад, дар кӯраҳои металлургӣ татбиқ ёфтааст.

Дар ҳуди ноқилҳое, ки аз онҳо чараёни тағйирёбанда ҷорист, чараёнҳои Фуко ба вучуд омада, ба тақсимои номунтазами чараён дар бурришгоҳи арзии ноқилҳо сабабгор мегарданд. Дар натиҷа чараёнҳои баландбасомад танг карда, ба қабатҳои сатҳии ноқил бароварда мешаванд. Ин ҳодиса *скин-эффекти электрӣ* ном гирифтааст (аз англисии skin-пӯст, қабат). Скин-эффект барои обутоб додани сатҳи пӯлодҳо, пурзӯр кардани майдони магнитӣ дар қабатҳои сатҳӣ низ истифода мешавад.

Хамтаъсироти чараёнҳои Фуко бо майдони магнитии баландбасомад боиси тақсимоли номунтазами майдони магнитӣ дар дилакҳои магнитӣ мегарданд ва майдони магнитӣ аз ҳаҷми дилакҳо ба сатҳҳои онҳо танг карда бароварда мешавад, ки ин ҳодиса *скин-эффекти магнитӣ* номида мешавад. Ҳамин аст, ки чараёнҳои баландбасомад аз қабатҳои сатҳии ноқилҳо қорӣ мешаванд, аз ин рӯ барои ингуна чараёнҳо ноқилхоро дарунҳоли тайёр мекунад.

#### §4.7. Занҷирҳои чараёни тағйирёбанда

Бо зудӣ дигар шудани самт ва қувваи чараёни тағйирёбанда боиси дар занҷир ба вучуд омадани хусусиятҳои муҳимтарини назар ба таъсироти чараёни дойимӣ фарқдошта мегардад. Аз ин рӯ баррасӣ кардани ҳодисаҳои дар резистор, конденсатор ва ғалтаки индуктивӣ рӯйдиханда хангоми ба манбаи шиддаташ тағйирёбанда пайваस्त буданашон аҳамияти муҳими амалӣ дорад.

Пеш аз ҳама бояд қайд кард, ки барои чараёнҳои басомадашон начандон зиёд (мувофиқи тадқиқоти ҷиддӣ то  $10^6$  Ҳс), хусусан чараёни басомадаш стандартии  $\nu = 50$  Ҳс (ин гуна чараёнхоро *квазистатсионарӣ*, яъне гӯё чараёни дойимӣ ё ба дойимӣ наздик меноманд ва мо бештар ба онҳо саруқордор мешавем) қонунҳои Ом ва қоидаҳои Кирхгофро татбиқ кардан раво аст.

**1. Резистор дар занҷири чараёни тағйирёбанда.** Фарз мекунем, ки дар баромадгоҳи манбаи шиддат (ҚЭХ)-аш мувофиқи қонуни гармоникӣ:

$$U = U_m \sin \omega t \quad (4.33)$$

тағйирёбанда бевосита резистори муқовиматаш  $R$  ( $C \rightarrow 0$ ,  $L \rightarrow 0$ ) пайваस्त мебошад (расми 4.10, а). Дар ин ҷо  $U_m$ -қимати амплитудавии шиддат,  $\omega$ -басомади тағйироти он аст. Тавре ки зикр ёфт, мувофиқи қонуни Ом барои қиматҳои лаҳзавии қувваи чараён ифодаи зеринро сабт карда метавонем:

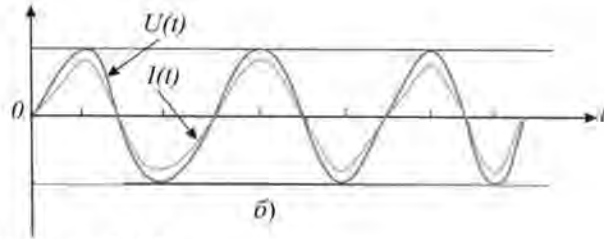
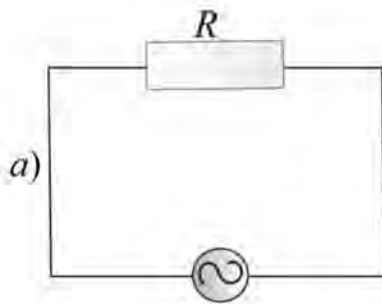
$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t. \quad (4.34)$$

Дар ин ҷо:

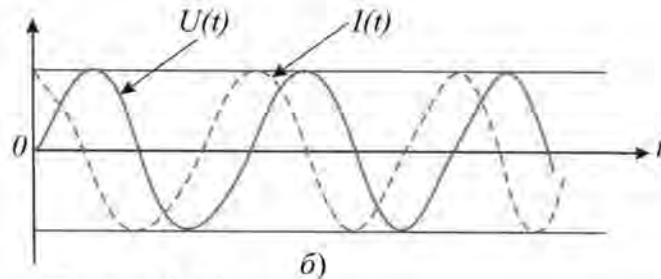
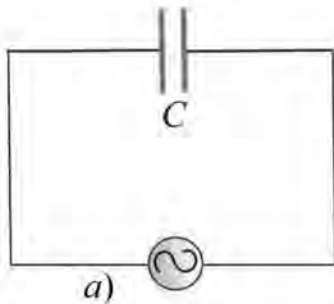
$$I_m = \frac{U_m}{R} \quad (4.35)$$

қимати амплитудавии қувваи чараён аст. Аз (4.28) бармеояд, ки дар резистор тағйироти қувваи чараён ва шиддат бо фазаҳои баробар (хамзамон ё худ синхронӣ) рӯй медиҳанд (расми 4.10, б) ва ҳосили зарби  $UI$  қиматҳои манфӣ намегирад (харчанд шиддат ва қувваи чараён алоҳида- алоҳида, вале ҳамзамон дорои қиматҳои манфӣ мешаванд). Энергияи чараён дар ин маврид асосан дар резистор ба гармии Ҷоулу Ленс табдил меёбад ва дар резистор захира намегардад. Ҳамин аст, ки резистор дар занҷири чараёни тағйирёбанда чун муқовимати фаъол рафтор мекунад.





Расми 4.10



Расми 4.11

**2. Конденсатор дар занҷири ҷараёни тағйирёбанда.** Ҳангоми конденсаторро бевосита ба манбаи ҷараёни доимӣ (батарея) пайваст намудан бо сабаби дар байни рӯяҳо мавҷуд будани диэлектрик ё вакуум аз занҷир ҷараён намегузарад (ҳарчанд вобаста ба ғунҷоиши конденсатор ва шиддати манбаъ рӯяҳо микдоран баробар, вале гуногунчунин то ба шиддати манбаъ баробар гардидани фарқи потенциалҳои байни рӯяҳо аз занҷир ҷараёни хеле кӯтоҳмуддат мегузарад. Ҳамин аст, ки галванометри ба ин гуна конденсатор пай дар пай васлбуда, баъди такони хурди гузаштани ҷараёнро қайд намекунад). Агар ҳамин конденсаторро ба манбаи ҷараёни тағйирёбанда бевосита пайваст намоем (расми 4.11, а) чун дар мавриди ба ҷараёни доимӣ васл буданаш аз диэлектрик ё вакууми байни рӯяҳо ҷараён намегузарад, аммо ҷараёни тафсиши бо конденсатор пай дар пай васлбуда фурузон мешавад, яъне аз конденсатор гӯё ҷараёни тағйирёбанда интиқол меёбад. Сабаб дар он аст, ки сараввал як рӯяи конденсатор мусбату рӯяи дигар манфӣ зарядноку конденсатор пурра аз бори электрӣ халос, яъне безаряд нагардида, қутбҳои манбаъ иваз мешаванд. Дар натиҷа зарядҳои рӯяҳо ба самтҳои муқобил ҳаракат мекунанд ва ин раванд даврӣ тағйир меёбад. Ҳангоми басомади тағйироти ҷараёни саноатӣ ( $\nu = 50$  Ҳс) чашми инсон пасту баландшавии тафсиши занҷирак (спирал)-и ҷараёнакро пайҳас намекунад. Дар натиҷа ҷараёнак гӯё бефосила фурузон аст.

Дар мавриди мувофиқи қонуни (4.33) тағйир ёфтани шиддат дар рӯяҳои конденсатор бузургии заряд низ мувофиқи қонуни гармоникӣ тағйирот мепазирад:

$$q = CU = CU_m \sin \omega t = q_m \sin \omega t, \quad (4.36)$$

ки дар ин ҷо:

$$q_m = CU_m \quad (4.37)$$



қимати амплитудавии заряди рӯяхо мебошад. Аз ин рӯ қувваи чараён мувофиқи таъриф чун:

$$I = \frac{dq}{dt} = U_m C \omega \cos \omega t = I_m \cos \omega t = I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (4.38)$$

тағйир меёбад, ки дар он

$$I_m = I_m C \omega \quad (4.39)$$

қимати амплитудавии қувваи чараён мебошад ва дар ҳоли бузургии зеринро ба сифати муқовимат пиндоштан (онро бо  $R_c$ , баъзан  $X_c$  ишорат мекунам):

$$R_c = \frac{1}{\omega C} \quad (4.40)$$

таносуби (4.39)-ро чун қонуни Ом барои қиматҳои амплитудавии шиддати қувваи чараён доништан раво аст:

$$I_m = \frac{U_m}{R_c} \quad (4.41)$$

Барои ин воҳиди  $R_c$ -ро дар СИ месанҷем:

$$[R_c] = \frac{1}{\frac{1}{c} \cdot \Phi} = \frac{1}{\frac{1}{c} \cdot \frac{Kl}{B}} = \frac{B}{Kl} = \frac{B}{A} = \text{Ом}.$$

Яъне, воҳиди  $R_c$  дар СИ 1 Ом буданаш маълум мегардад. Ҳамин аст, ки онро муқовимати ғунҷоишӣ меноманд. Бояд хотиррасон кард, ки ин муқовимат бар хилофи муқовимати фаъоли  $R$  ғайрифавол мебошад, зеро дар он энергия хорич намешавад. Дарвоқеъ, қимати миёнаи ҳосили зарби  $IU$  дар тӯли як даври тағйироти онҳо дар ҳоле, ки занҷири чараёни тағйирёбанда танҳо конденсаторро дарбар мегирад, баробари сифр аст:

$$\langle IU \rangle = \langle I_m U_m \sin \omega t + \cos \omega t \rangle = \langle I_m U_m \frac{1}{2} \sin 2\omega t \rangle = 0.$$

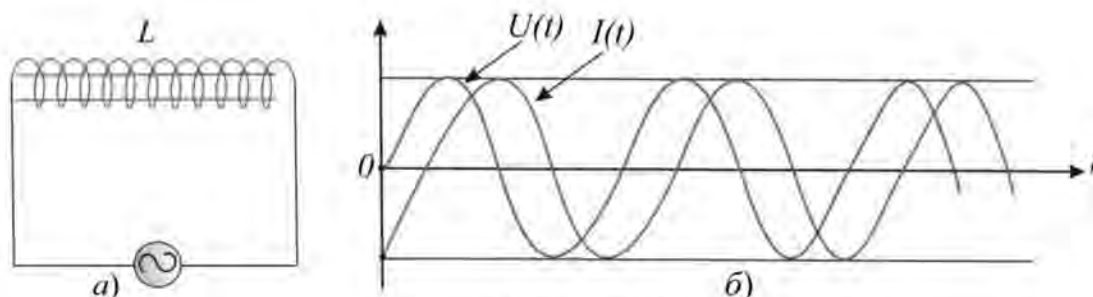
Зеро замоне ки шиддат аз қимати сифрӣ то қимати зиёдтаринаш  $U_m$  меафзояд, қувваи чараён аз қимати зиёдтаринаш  $I_m$  то 0 кам мешавад ва баръакс. Ин хулоса бо он тасдиқ мегардад, ки тағйироти фазаҳои ин ду бузургӣ ба қадри  $\pi/2$  фарқ доранд (ниг. ба расми 4.11, б): дар чоряки аввали давр энергияи манбаъ дар майдони электрии байни рӯяхои конденсатор захира гардида, сипас майдон суёт мешаваду энергия ба манбаъ бармегардад ва талафоти энергия (дар ҳоли  $R=0$  будан) дар ин раванд ба вучуд намеояд. Ҳол он ки дар резистор, тавре ки зикр ёфт, энергия бе бозгашт ба гармӣ табдил меёбад.

Қайд кардан бамаврид аст, ки барои  $\omega=0$  (чараёни дойимӣ) муқовими ғунҷоишӣ  $R_c$  [ниг. ба (4.40)] беҳад зиёд мешавад ( $R_c \rightarrow \infty$ ), яъне аз конденсатор чараёни дойимӣ нагузаштанаш тасдиқ мегардад.

**3. Индуктивият дар занҷири чараёни тағйирёбанда.** Дар ҳоли ба баромадгоҳи манбаи шиддаташ мувофиқи қонуни (4.33) тағйирёбанда бевосита ( $C \rightarrow 0$ ,  $R \rightarrow 0$ ) пайваст кардани ғалтаки индуктивияташ  $L$  (расми 4.12, а) дар он ҚЭҲ-и худиндуксияи  $\varepsilon_s = -Ldl/dt$  ангезонида мешавад, ки ба тағйироти шиддати ин ҚЭҲ-

ро ангезонанда мувофиқи қойидаи Ленс таъсироташ баръакс аст. Аз ин рӯ дар асоси қойидаи дуёми Кирхгоф ифодаи зеринро сабт карда метавонем:

$$U + \varepsilon_s = IR.$$



Расми 4.12

Мавриди ба эътибор нагирифтани муқовимати фаъоли ноқилҳои васлсозӣ ва печаҳои ғалтак ( $R = 0$ ) ин муодила намуди зерин мегирад:

$$U = L \frac{dI}{dt},$$

ки онро ба назардошти (4.33) чун:

$$dI = \frac{U}{L} dt = \frac{U_m}{L} \sin \omega t dt$$

пешниҳод кардан мумкин аст. Баъди интегрронии ин ифода қонуни тағйироти қувваи ҷараёнро ҳосил мекунем:

$$I = -\frac{U_m}{L\omega} \cos \omega t = -\frac{U_m}{R_L} \cos \omega t = \frac{U_m}{R_L} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = I_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (4.42)$$

ки дар ин ҷо

$$I_m = \frac{U_m}{L\omega} = \frac{U_m}{R_L} \quad (4.43)$$

қимати амплитудавии қувваи ҷараён асту онро чун ифодаи қонуни Ом барои қиматҳои амплитудавии қувваи ҷараёну шиддат доништан раво аст.

Бузургии:

$$R_L = \omega L \quad (4.44)$$

муқовимати индуктивӣ ном гирифтааст (санҷиши воҳиди онро ба хонандаи арҷманд вомегазорем).

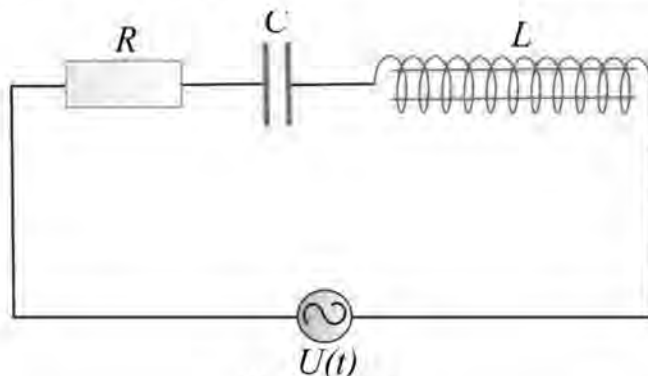
Ҳамин тариқ, дар занҷири ҷараёни тағйирёбандаи дорои ғалтаки индуктивӣ тағйироти қувваи ҷараён назар ба шиддат бо фаза ба қадри  $\pi/2$  қафо мемонад (расми 4.12, б). Шарҳи ин ҳодиса аз диди физикавӣ душвор нест. Сабабгори асосӣ ҚЭҲ-и худиндуксия аст, ки мувофиқи қойидаи Ленс таъсироти муқобил меоварад. Дарвоқеъ, аз ифодаи муқовимати индуктивӣ (4.44) бармеояд, ки ҳар қадар  $\omega$  ва  $L$  зиёд бошанд, ҳамон қадар ҚЭҲ-и худиндуксияи аксумали худиндуксионии калонтар ангезонида мешавад.

Хотирнишон кардан бамаврид аст, ки муқовимати индуктивӣ низ ғайрифайёл аст. Зеро дар ин маврид ҳам қимати миёнаи ҳосили зарби  $IU$  дар тӯли як даври тағйироти қувваи ҷараёну шиддат

баробари сифр аст. Зеро дар ғалтаки индуктивӣ баробари аз он гузаштани чараён майдони магнитӣ ба вуҷуд меояд, ки дар он энергияи манбаъ захира меёбаду сипас ба қадри суғшудани майдон ин энергия ба манбаъ бармегардад.

### §4.8. Қонуни Ом барои чараёни тағйирёбанда

Занҷири аз резистори муқовиматаш  $R$ , конденсатори ғунҷоишаш  $C$  ва ғалтаки индуктивияташ  $L$ -и пай дар пай васлбудаду ба баромадгоҳи манбаи шиддаташ мувофиқи қонуни гармоникӣ (4.33) тағйирёбанда пайвастро баррасӣ менамоем (расми 4.13).

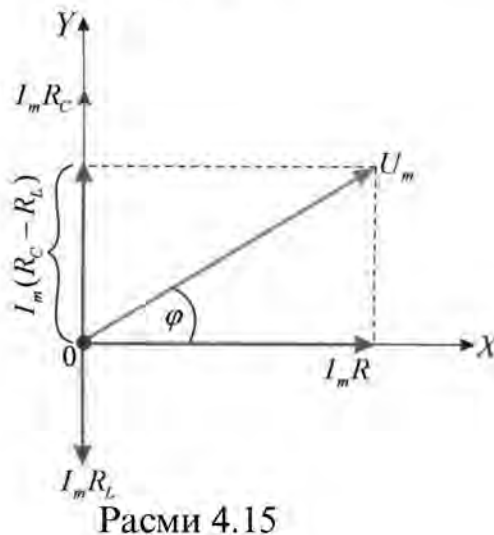
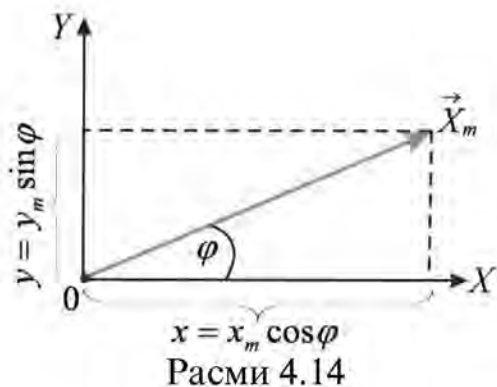


Расми 4.13

Дар ин маврид қимати лаҳзавии қувваи чараён дар ҳамаи ин ҷузъҳо якандоза буда, ҳосили ҷамъи афтишҳои шиддат дар онҳо ба шиддати манбаъ баробар аст:

$$U = U_R + U_C + U_L. \quad (4.45)$$

Тавре ки дар алоҳидагӣ муҳокима кардем (§4.7), ҳар яке аз ин шиддатҳо мувофиқи қонуни гармоникӣ бо фазаашон фарқдошта тағйир меёбанд. Барои дарёфтани ҳосили ҷамъи (4.45) истифодаи диаграммаи векторӣ мусоид аст, зеро дар ин гуна диаграмма ҳар як функсияи гармоникӣ бо проексияи вектор дар самте тасвир карда мешавад, ки нисбат ба он вектор бо суръати кунҷии бо басомади тағйироти функсия баробар гардиш меҳӯраду модулаш ба қимати амплитудавии функсия баробар мебошад (расми 4.14).



Аз ин рӯ шиддаҳои зикрфтаро мувофиқан чун:

$$U_R = I_m R \sin \omega t;$$

$$U_C = \frac{I_m}{C\omega} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = I_m R_C \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right);$$

$$U_L = I_m \omega L \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = I_m R_L \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

пешниҳод карда, диаграммаи вектории дар расми 4.15 тасвирфтаро тартиб дода метавонем. Мувофиқи ин диаграмма бо истифодаи теоремаи Пифагор:

$$U_m^2 = (I_m R)^2 + I_m^2 (R_C - R_L)^2,$$

аз ин чо:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (R_C - R_L)^2}} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}} \quad (4.46)$$

буданаш маълум мегардад. Ин формула қонуни Ом барои қиматҳои амплитудавии қувваи ҷараёну шиддатро дар занҷири ҷараёни тағйирёбанда ифода менамояд. Азбаски қиматҳои амплитудавӣ назар ба қиматҳои самарабахш (эффektivӣ)  $\sqrt{2}$  маротиба зиёд аст, формулаи (4.46)-ро барои қиматҳои самарабахш низ истифода бурдан раво аст:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}}, \quad (4.47)$$

ки дар он бузургии

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2} \quad (4.48)$$

муқовимати пурраи занҷири ҷараёни тағйирёбанда мебошад. Онро баъзан импеданс (аз англисии impedance, олмонии Impedanz, латиниасоси impedire-муқобилият нишон додан) меноманд.

Аз расми 4.15 фарқи фазаҳои тағйироти қувваи ҷараён ва шиддат  $\varphi$ -ро муайян карда метавонем:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_C - R_L}{R} = \frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}. \quad (4.49)$$

Ҳамин тариқ, агар шиддат (ҚЭХ) дар занҷир мувофиқи (4.33) тағйир ёбад, қимати лаҳзавии қувваи ҷараён мувофиқи қонуни:

$$I = I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (4.50)$$

дигар мешавад.

Дар ҳоли  $R_C = R_L$  ё  $L\omega = \frac{1}{\omega C}$  ё худ:

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{LC} \quad (4.51)$$



будан қувваи ҷараён қимати зиёдтарини имконпазир мегирад. Дар ин маврид афтиши шиддат дар резистор ба шиддати берунии дар занҷир гузошташуда баробар аст ( $U_R = U$ ), афтиши шиддат дар конденсатор ( $U_C$ ) ба афтиши шиддат дар ғалтак ( $U_L$ ) баробар, вале муқобилфаза мебошад. Ин ҳодиса *резонанси шиддатҳо* (резонанси пай дар пай) ном гирифтааст. Басомади бо ифодаи (4.51) муайяншавандаро *басомади резонансӣ* меноманд.

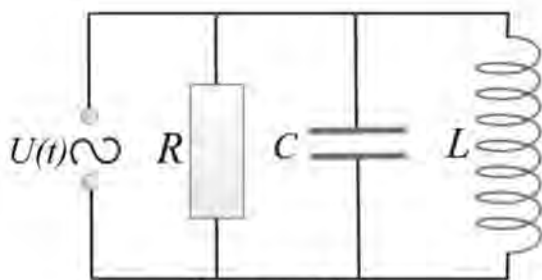
Ҳангоми резонанс дар байни қувваи ҷараён ва шиддат фарқи фаза вучуд надорад ва муқовимати пурраи занҷир қимати камтарини ба муқовимати фаъол баробарро мегирад.

Ҳодисаи резонанси зикрфта дар қабули сигналҳои радио, телевизион ва телефонҳои мобилӣ васеъ истифода мешавад.

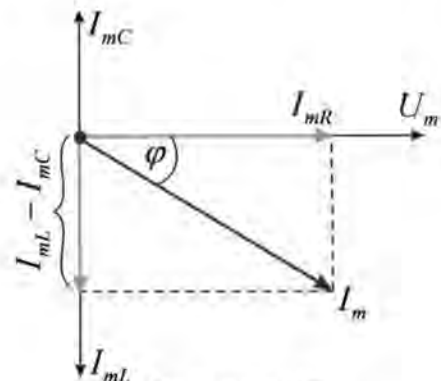
Қиматҳои лаҳзавии шиддатро дар ҷузъҳои алоҳидаи занҷир бо истифодаи диаграммаи вектории дар расми 4.15 тасвирфта муқаррар кардан душвор нест:

$$\left. \begin{aligned} U_R &= I_m R \sin(\omega t - \varphi); \\ U_C &= \frac{I_m}{\omega C} \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right); \\ U_L &= I_m \omega L \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned} \right\} \quad (4.52)$$

Акнун занҷири ҷараёни тағйирёбандаро, ки муқовимати фаъол  $R$ , конденсатори  $C$  ва ғалтаки индуктивии  $L$ -и параллелан васлбударо дарбар мегирад, баррасӣ менамоем (расми 4.16).



Расми 4.16



Расми 4.17

Дар ин маврид ҳам чун дар мавриди пайвасти пай дар пайи ҷузъҳо аз диаграмаҳои векторӣ истифода бурдан мусоид аст. Шиддат дар ҳама ҷузъҳои параллелӣ васлбуда ҳамон як қимати ба шиддати  $U(t)$  баробар гирифтаниро хотиррасон менамоем. Қувваи ҷараён дар ҳар қитъаи тақсимнашудаи занҷир ба ҳосили ҷамъи алгебравии қувваҳои ҷараён дар ҷузъҳои параллелӣ васлбуда баробар аст (қойидаи якуми Кирхгоф барои қиматҳои лаҳзавии қувваи ҷараён):

$$I = I_R + I_C + I_L. \quad (4.53)$$

Азбаски ҷараён дар  $R$  бо шиддати  $U(t)$  ҳамфаза, ҷараёни аз конденсатор гузаранда назар ба шиддат бо фаза бо қадри  $\pi/2$  пештар

мебошад, вале дар ғалтаки индуктивӣ хамин қадар кафо мемонад, диаграммаи вектории ба ин занҷир мувофиқ намуди дар расми 4.17 тасвирёфтаре мегирад. Ба эътибор мегирем, ки:

$$U_m = I_{mR}R = \frac{I_{mC}}{\omega C} = I_{mL}\omega L \quad (4.54)$$

мебошанд, аз ин рӯ мувофиқи диаграммаи дар расми 4.17 тасвирёфта барои кимати амплитудавии қувваи ҷараён дар қисми тақсимнашудаи занҷир  $I_m$  ва фарқи фазаҳои ин ҷараёнҳо ва шиддати  $U_m$  ифодаҳои зеринро дарёфта метавонем:

$$I_m = U_m \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2}; \quad (4.55)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = R \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right). \quad (4.56)$$

Ҳамин тариқ, қувваи ҷараён дар қисми тақсимнашудаи занҷир:

$$I(t) = I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (4.57)$$

мебошад, ки да ин ҷо  $I_m$  ва  $\varphi$  бо формулаҳои (4.55) ва (4.56) муайян карда мешаванд.

Диаграммаи векторӣ имкон медиҳад, ки киматҳои лаҳзавии қувваҳои ҷараён дар ҷузъҳои алоҳидаи занҷирро муқаррар намоем:

$$I_R = \frac{U_m}{R} \sin \omega t;$$

$$I_C = U_m \omega C \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{U_m}{R_C} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right); \quad (4.58)$$

$$I_L = \frac{U_m}{\omega L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{U_m}{R_L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Ҳангоми баробарии муқовиматҳои индуктивию ғунҷоишӣ, яъне  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  фарқи фазаҳои байни қувваи ҷараён дар қисми тақсимнашудаи занҷир ва шиддат баробари сифр ( $\varphi = 0$ ) мешавад, Қувваҳои ҷараёнҳои  $I_C$  ва  $I_L$  модулан баробаранд ва бо сабаби муқобилфаза буданашон қувваи ҷараён дар қисми тақсимнашудаи занҷир ба қувваи ҷараён дар муқовимати фаъл баробар ҳисоб меёбад.

Қайд кардан бамаврид аст, ки қувваи ҷараёнҳои  $I_L$  ва  $I_C$  дар қисмҳои алоҳидаи занҷир назар ба қувваи ҷараён дар ноқилҳои васлсозӣ хеле зиёд буда метавонад. Ин гуна ҳодиса *резонанси ҷараёнҳо* (ё худ *резонанси параллелӣ*) ном гирифтааст. Дар ин маврид мубодилаи энергия дар байни майдонҳои электрию магнитии мувофиқан дар байни рӯяҳои конденсатор ва андаруни ғалтаки индуктивӣ вучуддошта рӯй медиҳаду манбаии ҷараён танҳо талафи энергияро, ки чун гармии Ҷоулу Ленс дар муқовимати фаъл хориҷ мешавад, пардохт менамояд. Агар муқовимати  $R$ -ро аз занҷир гирифта партоем ( $R \rightarrow \infty$ ), он гоҳ талафоти энергия дар ин гуна занҷирҳои идеалӣ бархам меҳӯрад. Дар ин маврид ҳангоми  $\omega_{рез} = 1/\sqrt{LC}$

муқовимати пурраи занҷир беҳад зиёд меафзояд. Ин ходиса дар техника татбиқи васеъ ёфтааст.

**Мисоли 4.5.** Дар занҷири ҷараёни тағйирёбандаи басомадаш  $\nu = 50$   $\text{Хс}$  дар мавриди  $L = 0,2$   $\text{Ҳн}$  будан вольтметр қимати сифриро ( $U_V = 0$ ) нишон медиҳад (расми 4.18). Ғунҷоиши конденсатор чӣ қадар будааст?

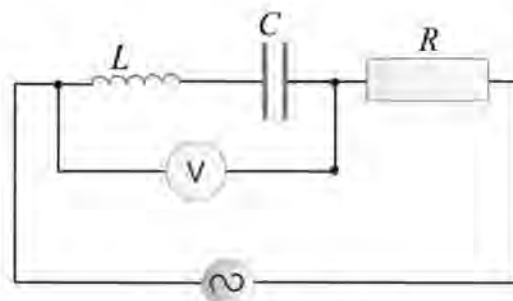
*Маълумот.*

$$\nu = 50 \text{ Ҳс}$$

$$L = 0,2 \text{ Ҳн}$$

$$U_V = 0$$

$$C = ?$$



Расми 4.18

*Ҳал*

Мувофиқи нишондоди вольтметр  $U_L - U_C = U_V = 0$  мебошад. Агар

$$U_L = IR_L; \quad U_C = IR_C; \quad R_L = \omega L; \quad R_C = \frac{1}{\omega C}; \quad \omega = 2\pi\nu \quad \text{буданашонро ба}$$

$$\text{этибор гирем, } R_L = R_C \text{ аст. Аз ин рӯ } \omega L = \frac{1}{\omega C},$$

пас:

$$C = \frac{1}{\omega^2 L} = \frac{1}{4\pi^2 \nu^2 L} = \frac{1}{4 \cdot 3,14^2 \cdot \left(50 \frac{1}{\text{с}}\right)^2 \cdot 0,2 \text{ Гн}} = 0,00005066 \text{ Ф} = 50 \text{ мкФ}$$

будаст.

*Ҷавоб.*  $C = 50 \text{ мкФ}$ .

**Мисоли 4.6.** Ба занҷире, ки аз ғалтаки индуктивияташ  $L = 0,5$   $\text{Ҳн}$ , муқовимати ғаёли  $R = 10 \text{ Ом}$  ва конденсатори ғунҷоишаш  $C = 22,5 \text{ мкФ}$ -и пай дар пай васлбуда таркиб ёфтааст, манбаи берунаи тағйирёбандаи қимати амплитудавии шиддаташ  $U_m = 180 \text{ В}$  ва басомадаш стандартӣ ( $\nu = 50 \text{ Ҳс}$ ) пайваст мебошад. Бузургҳои: 1) қимати амплитудавии қувваи ҷараён  $I_m$ ; 2) қимати амплитудавии аштиши шиддат дар ғалтак  $U_{mL}$ ; 3) қимати амплитудавии аштиши шиддат дар конденсатор  $U_{mC}$ ; 4) фарқи фазаҳои байни қувваи ҷараён ва шиддати беруна  $\varphi$  муайян карда шаванд.

Маълумот:

$$v = 50 \text{ Хс}$$

$$L = 0,5 \text{ Гн}$$

$$R = 10 \text{ Ом}$$

$$C = 22,5 \text{ мкФ} = 22,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$U_m = 180 \text{ В}$$

$$I_m - ?$$

$$U_{mL} - ?$$

$$U_{mC} - ?$$

$$\varphi - ?$$

Ҳал

Қимати амплитудавии кувваи ҷараёнро мувофиқи қонуни Ом бо формулаи:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}}$$

муайян карда метавонем, ки дар ин ҷо:

$$R_L = \omega L = 2\pi v L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \frac{1}{с} \cdot 0,5 \text{ Гн} = 157 \text{ Ом};$$

$$R_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi v C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \frac{1}{с} \cdot 22,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}} = 141,5 \text{ Ом}$$

мувофиқан муқовиматҳои индуктивӣ ва ғунҷоишӣ мебошанд. Пас,

$$I_m = \frac{180 \text{ В}}{\sqrt{(10 \text{ Ом})^2 + (157 \text{ Ом} - 141,5 \text{ Ом})^2}} = \frac{180}{18,45} \text{ А} = 9,76 \text{ А}.$$

Аз ин рӯ афтиши шиддатҳои матлуб:

$$U_{mL} = I_m R_L = 9,76 \text{ А} \cdot 157 \text{ Ом} = 1532 \text{ В};$$

$$U_{mC} = I_m R_C = 9,76 \text{ А} \cdot 141,5 \text{ Ом} = 1381 \text{ В}$$

мебошанд.

Акнун ёфтани фарқи фазаҳои тағйироти кувваи ҷараён ва шиддати беруна душвор нест:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_L - R_C}{R} = \frac{157 \text{ Ом} - 141,5 \text{ Ом}}{10 \text{ Ом}} = 1,55 \text{ ва } \varphi \approx 57^\circ.$$

Ҷавоб:  $I_m = 9,76 \text{ А}$ ;  $U_{mL} = 15,32 \text{ В}$ ;  $U_{mC} = 1381 \text{ В}$ ;  $\varphi \approx 57^\circ$ .

#### §4.9. Иқтидоре, ки дар занҷири ҷараёни тағйирёбанда вусъат дода мешавад

Қиматҳои лаҳзавии иқтидор (тавноӣ)-и ҷараёни тағйирёбандаро ба мисли иқтидори ҷараёни дойимӣ бо ҳосили зарби қиматҳои лаҳзавии шиддат ва кувваи ҷараён муайян мекунам:

$$P(t) = U(t)I(t). \quad (4.59)$$

Агар шиддат дар занҷир мувофиқи қонуни гармоникӣ:

$$U = U_m \sin \omega t \quad (4.60)$$

тағйир ёбад, тавре ки дар §4.8 нишон додем, фазаи тағйироти кувваи ҷараён дар занҷир назар ба тағйироти шиддат ба қадри  $\varphi$  фарқ карда метавонад:

$$I = I_m \sin(\omega t - \varphi). \quad (4.61)$$

Аз ин рӯ формулаи (4.59) намуди зерин мегирад:



$$P(t) = U_m I_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = U_m I_m \sin \omega t (\sin \omega t \cos \varphi - \cos \omega t \sin \varphi) = \\ = U_m I_m (\sin^2 \omega t \cos \varphi - \sin \omega t \cos \omega t \sin \varphi). \quad (4.62)$$

Дар амалия на қимати лаҳзавӣ, балки қимати миёнаи иқтидор дар тӯли як давр тағйироти шиддату ҷараён аҳамият дорад. Агар ба эътибор гирем, ки  $\langle \sin^2 \omega t \rangle = 1/2$ ,  $\langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle = \langle (1/2) \sin 2\omega t \rangle = 0$  мебошанд, барои қимати миёнаи иқтидор ифодаи зерин ҳосил мешавад:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi. \quad (4.63)$$

Мувофиқи диаграммаи вектории дар расми 4.15 тасвирёфта:

$$\cos \varphi = \frac{I_m R}{U_m}$$

мебошад, аз ин рӯ формулаи (4.63)-ро чун:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} I_m^2 R \quad (4.64)$$

пешниҳод карда метавонем. Ҳамин қадар иқтидорро ҷараёни доимии қуввааш:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

вусъат медиҳад.

Бузургихои:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \text{ ва } U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (4.65)$$

*қиматҳои самарабахш (ё эффективӣ)-и мувофиқан қувваи ҷараён ва шиддати тағйирёбанда* ном гирифтаанд. Тамоми асбобҳои андозагир: амперметр, вольтметр, ваттметр ва ғайра маҳз қиматҳои самарабахши бузургихоро нишон медиҳанд.

Ҳамин тариқ, қимати миёнаи иқтидоре, ки дар занҷири ҷараёни тағйирёбанда вусъат дода мешавад, чунин намуд мегирад:

$$\langle P \rangle = IU \cos \varphi. \quad (4.66)$$

Дар он зариби  $\cos \varphi$  *коэффициенти иқтидор* ном дорад.

Яъне иқтидоре, ки дар занҷири ҷараёни тағйирёбанда вусъат дода мешавад, на фақат ба қиматҳои қувваи ҷараён ва шиддат, балки ба фарқи фазаи тағйироти онҳо низ вобаста аст. Агар дар занҷир муқовиматҳои реактивӣ ( $R_C$  ва  $R_L$ ) набошанд,  $\cos \varphi = 1$  ва  $\langle P \rangle = IU$  мешавад. Дар ҳоли занҷир танҳо дорои муқовиматҳои реактивӣ буданаш ( $R = 0$ ) қимати миёнаи иқтидор баробари сифр аст ( $\langle P \rangle = 0$ ). Дар ин маврид шиддат ва қувваи ҷараён ҳар қадар бузург бошанд ҳам, дар занҷир иқтидор вусъат намеёбад. Дар ҳоли  $\cos \varphi \ll 1$  будан интиқоли иқтидор хангоми шиддати маълум қувваи ҷараёнро зиёд кардан лозим меояд, ки ба афзудани гармии Ҷоул-Лентсӣ меорад ва ин ҳол ҳар чӣ ғафстар гирифтани масоҳати буриши арзии ноқилҳои интиқолиро тақозо менамояд. Дар натиҷа нархи нақли энергияи электрӣ меафзояд. Аз ин рӯ дар амалия кӯшиш мекунанд, ки қимати  $\cos \varphi$  ҳарчӣ калонтар шавад. Қимати камтарини ҷоизавии он дар дастгоҳҳои саноатӣ тақрибан 0,85-ро ташкил медиҳад.

**Мисоли 4.7.** Ҳангоми 500 кВ будани шиддати самарабахш изоляторҳои хати нақли чараёнро бояд ба кадом шиддат мувофиқ намуд?

*Маълумот:*  
 $U = 500 \text{ кВ}$   
 $U_{\max} = ?$

*Ҳал*  
 Шиддати матлуб назар ба шиддати хатҳои интиқоли бояд ба кадри:

$\sqrt{2}$  маротиба зиёд бошад:

$$U_{\max} = \sqrt{2}U = 710 \text{ кВ.}$$

*Ҷавоб:*  $U_{\max} = 710 \text{ кВ.}$

**Мисоли 4.8.** Вобаста ба вақт қонуни тағйироти қувваи чараён бо муодилаи  $I = 5 \sin 200\pi t$  тасвир карда мешавад. Басомад ва даври тағйирот, қимати амплитудавии қувваи чараён, инчунин қимати лаҳзавии қувваи чараёнро ҳангоми фазаи  $\varphi = \frac{\pi}{3} \text{ рад}$  муайян намоед.

*Маълумот:*  
 $I = 5 \sin 200\pi t$   
 $\varphi = \frac{\pi}{3} \text{ рад} = 60^\circ$   
 $T = ? \quad \nu = ?$   
 $I_m = ? \quad I = ?$

*Ҳал*  
 Агар қонуни тағйироти дар масъала додашударо бо муодилаи тағйироти қувваи чараён дар намуди умумӣ:

$$I = I_m \sin \omega t = I_m \sin \varphi$$

муқоиса намоем, ёфтани бузургҳои матлуб душвор нест:  $I_m = 5 \text{ А}$ ;  
 $\omega t = 200\pi$ , аз ин ҷӯ  $2\pi\nu t = 200\pi$  ва  $\nu = 100 \text{ Ҳс}$ ,

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{100} \text{ с} = 0,01 \text{ с} = 10 \text{ мс};$$

$$I = 5 \sin 200\pi t = 5 \sin 60^\circ = 5 \cdot 0,866 \text{ А} \approx 4,3 \text{ А.}$$

*Ҷавоб:*  $T = 10 \text{ мс}$ ;  $\nu = 100 \text{ Ҳс}$ ;  $I_m = 5 \text{ А}$ ;  $I = 4,3 \text{ А}$ .

#### §4.10. Чараёни сефаза

Ҳоло дар тамоми ҷаҳон системаи *чараёни сефаза* номгирифта васеъ татбиқ ёфтааст. Ин система шароити мусоид ва ниҳоят муфиди тавассути симҳои интиқоли энергияи электроиро фароҳам меоварад ва хеле содда аст: он аз сето занҷире иборат мебошад, ки дар онҳо ҚЭХ-ҳои бо ҳамон як басомад тағйирёбандаи нисбати якдигар ба кадри  $1/3$  давр ( $\varphi = 2\pi/3$ ) фарқдошта амал мекунанд. Ҳар як занҷири алоҳидаи

системаро мухтасар *фаза* ва маҷмӯи чараёнҳои фазаашон фарқдоштаро *чараёни сефаза* меноманд.

Анқариб тамоми генераторҳои дар стансияҳои электрии муосир ҷойгирбуда генераторҳои сефаза мебошанд.

Схемаи сохти генератори чараёни сефаза да расми 4.19 тасвир ёфтааст.

Ҳамчун ангезонанда-индуктор шартан магнети дойимии *NS* нақш мебозад. Дар амал ба сифати индуктор ротори аз электромагнитҳо таркибёфта (ба §4.5 ниг.) истифода мешавад.

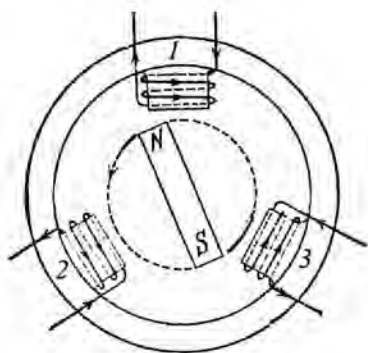
Ҳангоми чархзании ротор дар ҳар як ғалтак, ки минбаъд бо  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  ва  $\Pi_3$  ишорат мешаванд, ҚЭХ-ҳои  $\mathcal{E}_1$ ,  $\mathcal{E}_2$  ва  $\mathcal{E}_3$ -и дар байнашон фарқи фазаҳои  $120^\circ$  ва  $240^\circ$  ангезиш меёбанд. Агар ҚЭХ дар печайи  $\Pi_1$  мувофиқи қонуни:

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_m \sin \omega t$$

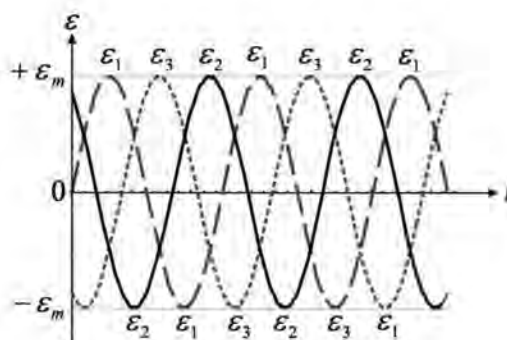
тағйир ёбад, дар ду печайи дигар ҚЭХ-ҳои:

$$\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_m \sin(\omega t - 120^\circ), \quad \mathcal{E}_3 = \mathcal{E}_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

ангезонида мешаванд, ки дар расми 4.20 ба тарзи графикӣ тасвир ёфтаанд.



Расми 4.19

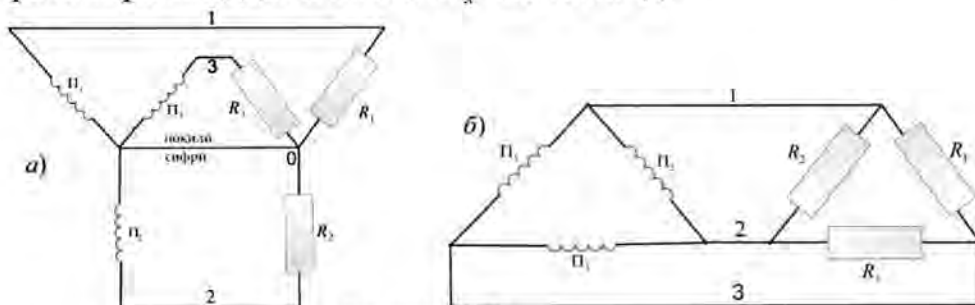


Расми 4.20

Ҳар яке аз печайҳо бо муковиматҳои борбастии  $R_1$ ,  $R_2$  ва  $R_3$  (муковиматҳои асбобҳои истеъмолгарони энергияи электрӣ) васл сохта, сето чараёни тағйирёбандаи дар байнашон фарқи фазаҳои катъӣ дойимӣ мавҷудбударо ҳосил кардан мумкин аст. Агар ҳар як ғалтаки генератор алоҳида бе алоқамандии якдигар истифода шаванд, назар ба генератори якфаза ягон бартарие надорад. Баръакс, барои ба истеъмолгарон расондани энергияи электрии ин гуна генераторҳо се ҷуфт ноқил (сим) лозим мешаванд. Вале печайҳои генераторҳоро бо як тарзи муайян васл сохта, барои интиқол ва истифодабарии энергияи электрии дар электростансияҳо истеҳсолшуда шароити басо мусоид фароҳам овардан мумкин аст.

Ду навъи ба ҳам васлсозии ғалтакҳо-яке *васли ситоравӣ*, дигаре *секунҷавӣ* ном гирифта корбаст менамоянд. Дар васли ситоравӣ ибтидои печайҳои ҳар се ғалтак дар як нуқта ба ҳам оварда мешаванд. Якто сими ба ин нуқта васлбударо *ноқили сифрӣ* ва се сими дигари ба нӯгҳои дуҷуми ғалтакҳо пайвастаро *ноқилҳои фазавӣ* меноманд. Дар расми 4.21, *a* васли ситоравӣ бо борбастҳояш  $R_1$ ,  $R_2$  ва  $R_3$ , ки низ ба тарзи ситоравӣ пайвастанд, тасвир ёфтааст. Дар он ноқилҳои 1, 2 ва 3 ноқилҳои фазавӣ мебошанд. Шиддати байни ноқили сифрӣ ва

ноқилҳои фазавӣ шиддати фазавӣ  $U_\phi$ , шиддати байни ноқилҳои фазавиро шиддати хаттӣ  $U_x$  меноманд.



Расми 4.21

Фарз мекунем, ки генератор ба борбастҳо васл нест ( $R_1 = R_2 = R_3 = \infty$ ). Таносуби байни шиддати фазавӣ, (ки дар ҳар як печакҳои  $\Pi_1, \Pi_2$  ва  $\Pi_3$  мавҷуд аст) ва шиддатҳои хаттӣ (дар байни ноқилҳои 1, 2, 3 вучуддошта)-ро муайян менамоем.

Шиддати хаттӣ дар байни ноқили сифрӣ ва ноқилҳои дигар ба шиддати фазавӣ баробар ва қимати амплитудавиаш  $\varepsilon_m$  буданаш маълум аст. Вале шиддати хаттии байни ҳар гуна чуфти ноқилҳои 1, 2 ва 3 дигар мебошад. Чунончӣ, барои чуфти ноқилҳои 1 ва 3 ба фарқи потенциалҳои нӯгҳои озоди печакҳои  $\Pi_1$  ва  $\Pi_2$  баробар аст:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t - \varepsilon_m \sin(\omega t - 120^\circ) = 2\varepsilon_m \sin 60^\circ \cos(\omega t - 60^\circ) = 2\varepsilon_m \sin 60^\circ \cos(\omega t - 60^\circ).$$

Вале

$$\sin 60^\circ = \sqrt{3}/2, \quad \cos(\omega t - 60^\circ) = \sin(\omega t + 30^\circ)$$

мебошанд. Аз ин рӯ:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sqrt{3} \sin(\omega t + 30^\circ)$$

аст. Пас, шиддати хаттӣ бо ҳамон басомади  $\omega$  тағйир меёбаду амплитудааш  $\sqrt{3}$  маротиба назар ба шиддати фазавӣ зиёдтар буданаш маълум мешавад. Ҳамин тариқ, хангоми васли ситоравии генератор шиддатҳои фазавии  $\varepsilon_m$  ва  $\sqrt{3}\varepsilon_m$ -ро ҳосил кардан мумкин мебошад.

Фарз мекунем, ки генератор ба борбастҳои баробари низ ба тарзи ситоравӣ пайваст (борбастии симметрӣ) васл мебошад (расми 4.21, а). Дар ин маврид дар ҳар яке аз ноқилҳои 1, 2 ва 3 амплитудайи қувваҳои ҷараёнҳо ба  $I_m$  баробар, буда, мувофиқи қонунҳои:

$$I_1 = I_m \sin \omega t; \quad I_2 = I_m \sin(\omega t - 120^\circ); \quad I_3 = I_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

тағйир меёбанд. Дар ноқили сифрӣ, ки дар генератор умумист, қувваи ҷараён ба ҳосили ҷамъии қувваҳои ҷараёнҳои ноқилҳои хаттӣ баробар аст:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = I_m \sin \omega t + I_m \sin(\omega t - 120^\circ) + I_m \sin(\omega t - 240^\circ).$$

Аммо

$\sin(\omega t - 120^\circ) + \sin(\omega t - 240^\circ) = 2 \sin(\omega t - 180^\circ) \cos 60^\circ = \sin(\omega t - 180^\circ) = -\sin \omega t$  мебошад, аз ин рӯ,

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

буданаш маълум мегардад. Пас, хангоми пайвасти симметрии борбастҳо қувваи ҷараён дар ноқили умумӣ баробари сифр мебошад ва номи *ноқили сифрӣ* аз ҳамин ҷост. Аз ин рӯ дар пайвасти симметрии борбастҳо (хатто дар мавриди анқариб симметрӣ будан)



нокили сифриро истисно кардан, яъне умуман партофтан мумкин аст, ки ба сарфаи маводи нокилҳо боис мегардад.

Бояд қайд кард, ки васли ситоравӣ як камбудии намоён дорад: агар яке аз симҳо, масалан сими 1 канда шавад ё сӯзад, борбасти  $R_1$  аз қор мебарояд, ҳарчанд ин ҳол ба амали борбастҳои дигар  $R_2$  ва  $R_3$  ҳалал намерасонад, дар онҳо чун пештара шиддаҳои фазавӣ амал мекунанд. Вале мавриди аз қор баромадан (масалан сӯхтан)-и нокили сифрӣ ҳар ҷуфти борбастҳои дигар, аз ҷумла  $R_1$  ва  $R_2$  пай дар пай гардида, ба шиддати  $\sqrt{3}$  маротиба назар ба шиддати фазавӣ баландтар воқеъ мешаванд. Ин шиддат чун дар ҳар гуна пайвасти пай дар пай номунтазам, ба  $R_1$  ва  $R_2$  мутаносибан тақсим мегардад. Чунончӣ, агар муқовимати  $R_1$ -ро якто ҷароғаки, масалан садваттӣ, муқовимати  $R_2$ -ро нӯхто параллелан пайвасти ҳамин гуна ҷароғақҳо ташкил намоянд, он гоҳ ба шоҳаи  $R_2$  даҳяки шиддати пурраву дар шоҳаи  $R_1$   $9/10$  ҳиссаи он шиддат рост меояд ва дар ҳоли шиддати фазавӣ  $220\text{ В}$  будан ҳарду шоҳа тахти шиддати  $\sqrt{3} 220 = 380\text{ В}$  воқеъ мегарданду аз он  $380 \cdot \frac{1}{10} = 38\text{ В}$  ба ҷароғақҳои  $R_2$  ва  $380 \cdot \frac{9}{10} = 342\text{ В}$  ба ҷароғаки  $R_1$  меафтад. Дар натиҷа ин ҷароғақ месӯзаду ҷараён дар ҳар ду шоҳа қатъ меёбад. Ҳамин аст, ки ба нокили сифрӣ муҳофизак (масалан муҳофизаки тезгудоз) васл намекунанд, зеро расиши кӯтоҳи тасодуфӣ ин нокилро аз қор бароварда метавонад. Занҷирро бо муҳофизакҳои дар ду сими дигар васлбуда ҳимоя мекунанд.

Васли секунҷавӣ дар расми 4.21, б бо ҳамин гуна пайвасти борбастҳояш тасвир ёфтааст. Дар ин маврид ҳам ҷараён ба истеъмолгарон тавассути се сим нақл мешавад.

#### §4.11. Трансформаторҳо

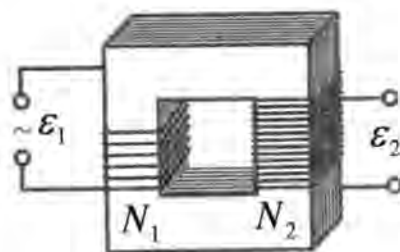
Электростансияҳои пуриктидорро, ки дар онҳо аз ҳисоби энергияҳои механикӣ, ҳароратӣ, атомӣ (дурусттараш ядрӣ), рӯшноӣ энергияи аз ҷиҳати экологӣ тозаву ба навъҳои дигар ба осонӣ табдилёбандаи электрӣ истехсол мешавад, на дар ҳама ҷо бунёд кардан имконпазир аст. Чунончӣ, гидроэлектростансияҳо дар мавзёҳои мусоиди дарёҳои қалон, электростансияҳои ҳароратӣ дар назди мавзёҳои аз сӯзишвории арзон бой сохта мешаванд. Ҳамин аст, ки эҳтиёҷи ба ҷойҳои дар масофаҳои аз электростансияҳо дур воқеъгардидаи истеъмолгарон интиқол додани энергияи электрӣ ба миён меояд.

Тавре ки зикр ёфт, иктидор дар ҳар як агрегати электростансияҳои муосир то ба садҳо мегаватт, шиддаташон бошад даҳҳо киловольт, аз ин рӯ қувваи ҷараёни истехсолшаванда то ҳазорҳо ампер мерасанд. Бо симҳо бевосита интиқол додани ин қадар ҷараён мувофиқи қонуни Ҷоулу Ленс (миқдори гармии дар симҳои интиқолӣ хориҷшаванда ба квадрати қувваи ҷараён мутаносиби рӯста мебошад) боиси талафоти зиёди энергия гардида метавонад. Ду усули назарногир кардани ин гуна талафоти энергия мавҷуд аст: 1) истифодаи нокилҳои ғафси металлӣ, ки миқдори зиёди металлҳои рангаро талаб менамоянд ва хеле серхарҷ мебошад; 2) ҳадалимкон

кам кардани қувваи чараён дар симҳои интиқолист, ки бо ёрии дастгоҳҳои ба ном *трансформаторҳо* (аз лотинии transformare-табдил додан) амалӣ гардонда мешавад.

Хотиррасон кардан бамаврид аст, ки назарияи амали трансформаторҳо басо мушкил мебошад, зеро дар он ҳодисаҳои худиндуксия ва индуксияи тарафайн омехта рӯй медиҳанд ва мо минбаъд бо муҳокимаи мавриди соддатарин маҳдуд мешавем.

Трансформаторҳо танҳо дар занҷирҳои чараёни тағйирёбанда мавриди татбиқ қарор меёбанд. Трансформатори соддатарин аз дилаки сарбасти бештар оҳанин (баъзан ферромагнитӣ) ва ду ғалтаки шумораи печаҳояшон гуногуни ба ин дилак шинондашуда иборат аст (расми 4.22). Ғалтаке, ки ба манбаи ҚЭҲ-и табдилшаванда васл аст, *печаҳои аввала* шумораашон  $N_1$ ) ва ғалтаки дигари табдилдиҳанда *печаҳои дуюмӣ* (шумораашон  $N_2$ ) ном гирифтаанд.



Расми 4.22

Агар ба печаҳои аввала ҚЭҲ-и тағйирёбандаи  $\mathcal{E}_1$  васл карда шавад, аз онҳо чараёни қуввааш  $I_1$  мегузарад, ки хатҳои майдони магниташ дар фазо паҳн нагардида, ба воситаи дилаки сарбаст ҳамчун расонаи магнитӣ (ба лафзи русӣ магнитопровод) печаҳои ҳарду ғалтакро мебуранд. Аз ин рӯ сели магнитиро дар ҳар як печай ҳарду ғалтак баробар ҳисобидан равоқ. Ҳамин аст, ки дар асоси қонуни асосии индуксияи электромагнитӣ (§4.1) ифодаҳои зеринро сабт карда метавонем:

$$\mathcal{E}_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad \mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.67)$$

Аз ин рӯ таносуби зерин ҷой дорад:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4.68)$$

Ин таносуб, ки барои қиматҳои лаҳзавии ҚЭҲ -ҳо оварда шудааст, барои қиматҳои амплитудавию самарабахш низ рост меояд. Яъне ҚЭҲ -ҳо дар ғалтакҳои трансформатор чун шумораи печаҳои ғалтакҳои он нисбат доранд.

Нисбати

$$\frac{N_1}{N_2} = k \quad (4.69)$$

*коэффитсиенти трансформатсия* ном гирифтааст. Агар  $N_2 > N_1$  ( $k < 1$ ) бошад,  $\mathcal{E}_2 > \mathcal{E}_1$  ва аз ин рӯ шиддат дар печаҳои дуюм баланд аст.

Дар ин маврид *трансформатор баландшиддат*, дар акси ҳол ( $N_2 < N_1$ ,  $k > 1$ ) трансформатори *пастшиддат* номида мешавад.

Дар ҳоли назарногир будани талафоти энергия (дар печаҳои трансформатор ва дилаки он, ки асосан барои ҳосил гардидани чараёнҳои Фуко сарф мешавад) ККФ-и трансформаторҳои муосир то 95-97% мерасад) мувофиқи қонуни бақои энэргия:

$$\varepsilon_1 I_1 t \approx \varepsilon_2 I_2 t$$

сабт кардан равоаст, аз ин рӯ баробарии зерин ҷой дорад:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1} = k \quad (4.70)$$

ки онро *муодилаи трансформатор* меноманд. Яъне, шумораи печаҳои дуҷумро зиёд гирифта, дар онҳо ба ҳосил шудани чараёнҳои қуввашон маротибҳо камбудаи  $I_2$  ва шиддатҳои баланди аз 200 кВ то 500-1000 киловольт ноил гаштан мумкин аст. Трансформаторҳои баланшиддат дар шафати электростансияҳо шинондашударо маҳз ба хамин мақсад истифода мебаранд.

Хотиррасон кардан бамаврид аст, ки хангоми ба борбаст васл набудани занҷири ғалтаки дуҷум қувваи чараён дар он  $I_2 = 0$  аст ва ҚЭХ-и худиндуксияи дар печаҳои якум ангезондаи ба  $\varepsilon_1$  баробар мувофиқи қоидаи Ленс ақсултаъсиррасонанда истеъмоли энергияро дар ин печаҳо хеле кам мекунад. Ин ҳодисаро *гашти бебунёди трансформатор* меноманд.

Дар ҷойҳои истеъмоли энергияи электрӣ (зерстансияҳои дар шафати корхонаҳо мавҷуда) баръакс, трансформаторҳои пастшиддат насб карда мешаванд, ки онҳо одатан шиддатҳои баланди интиқолиро бо якҷанд зина то 220 В/380 В паст мефуроранд.

Бояд қайд кард, ки трансформаторҳо дар соҳаҳои гуногуни техника, хусусан электро- ва радиотехника, инчунин асбобҳои рӯзгор васеъ истифода мешаванд. Масалан, дар кабинетҳои рентгении табобатхонаҳо то 40-50 кВ, вале дар транзисторҳои радио ва телевизион шиддатҳои якҷанд вольт лозиманд, ки истифодаи онҳо бидуни трансформаторҳо ғайриимкон мебошад.

**Мисоли 4.9.** Коэффитсиенти трансформатсияи пастшиддат  $k = 10$  буда, он ба шабакаи шиддаташ 220 В васл аст. Хангоми муқовимати печаҳои дуҷумӣ  $r_2 = 0,2 \text{ Ом}$  ва муқовимати борбасти фойидаовар  $R_2 = 2 \text{ Ом}$  будан, шиддат дар баромадгоҳи печаҳои дуҷумӣ ёфта шавад.

*Маълумот.*

$$\left. \begin{array}{l} k = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = 10 \\ r_2 = 0,2 \text{ Ом} \\ R_2 = 0,2 \text{ Ом} \\ U_1 = 220 \text{ В} \\ U_2 = ? \end{array} \right|$$

*Ҳал*

ҚЭХ дар печаҳои дуҷум мувофиқи коэффитсиенти додасҳудаи трансформатсия:

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1}{k} = \frac{220}{10} \text{ В} = 22 \text{ В}$$

Пас, шиддат дар баромадгоҳи печаҳои дуҷум бояд:

$$U_2 = \varepsilon_2 - I_2 r_2$$



бошад, ки дар ин ҷо  $I_2$  қувваи ҷараён дар печаҳои дуҷуми аст ва онро бо татбиқи қонуни Ом барои занҷири сарбаст ёфта метавонем:

$$I_2 = \frac{\varepsilon_2}{R_2 + r_1} = \frac{22 \text{ В}}{2 \text{ Ом} + 0,2 \text{ Ом}} = 10 \text{ А}.$$

Аз ин рӯ

$$U_2 = \varepsilon_2 - I_2 r_2 = 22 \text{ В} - 10 \text{ А} \cdot 0,2 \text{ Ом} = 20 \text{ В}.$$

Ҷавоб:  $U_2 = 20 \text{ В}$ .

## §4.12. Хосиятҳои магнитии моддаҳо

### 1. Диа-ва парамагнетикҳо

Тавре ки зикр ёфт, тадқиқоти аввалини майдони магнитии муҳити атрофи ноқилҳои ҷараёнҳо (ба §3.4. ниг.) ба хосиятҳои магнитии муҳити атрофи ноқили ҷараёндор вобаста будани индуксияи магнитиро ошкор карданд. Ин гуна вобастагӣ дар қонуни Био-Савар-Лаплас расман бо дохил кардани коэффитсиенти *нуфузпазирии нисбии магнитии муҳит*  $\mu$  ба эътибор гирифта мешавад. Акнун оид ба ин вобастагӣ муфассалтар таваққуф менамоем, зеро барои ҳосил кардани майдонҳои пурқуввати магнитӣ (хусусан дар электромагнитҳо, дилаки трансформаторҳо) аҳамияти калони амалӣ дорад.

Ҳаргуна моддаи дар майдони магнитӣ ҷойгиркарда ба қимати индуксияи магнитӣ саҳме мегузорад. Масалан, агар дилаки оҳанинро андаруни соленоиди ҷараёндор гузорем, индуксияи магнитӣ хеле меафзояду ҳуди дилак ба магнити дойимӣ табдил меёбад, тавре ки мегӯянд, магнитнок мешавад. Ин ҳодисаро маротиби нахуст А.М. Ампер ошкор сохта буд. Баъдтар маълум гардид, ки ҳама моддаҳо ба ин ё он дараҷа қобилияти магнитнокшавӣ зоҳир менамоянд ва барои тавсифи ин хосият маҳз бузургии:

$$\mu = B / B_0 \quad (4.71)$$

қабул шудааст; дар ин ифода  $B_0$ -индуксияи магнитӣ дар вакуум,  $B$ -ҳамин бузургӣ дар модда мебошад. Аз ин рӯ нуфузпазирии нисбии магнитӣ  $\mu$  нишон медиҳад, ки индуксияи магнитӣ дар муҳит назар дар вакуум чанд маротиба тағйир меёбад. Ҳамин аст, ки ҳар гуна моддаи дар майдони магнитӣ ҷойгиркардаро *магнетик* меноманд. Вобаста ба қимати  $\mu$  кулли магнетикҳоро ба се гурӯҳ: диамагнетикҳо, парамагнетикҳо ва ферромагнетикҳо ҷудо мекунанд.

**1) Диамагнетикҳо**, ки барои онҳо  $\mu \leq 1$  мебошад (аз юнонии диавал, яқум, дар ин ҷо пешовандест, ки ба пароканиши хатҳои магнитии майдон ишорат мекунад). Ба диамагнетикҳо *Cu, Bi, Sb, Ag, Au, Pb, I, C, Hg, Si, Zn, S, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>*, газҳои инертӣ ва аксари моддаҳои органикӣ мансубанд.

**2) Парамагнетикҳо**, ки барои онҳо,  $\mu \geq 1$  мебошад. Натрий, калий, магний, калсий, алюминий, марганетс, платина, оксиген (оксигени моеъ), маҳлули чанде аз намакҳо, масалан намаки хӯроқӣ



ва ғайра парамагнитанд. Ҷоиз аст хотиррасон намоем, ки диа-ва парамагнетикҳо *моддаҳои суствагнитӣ* ба ҳисоб мераванд.

**3) Ферромагнетикҳо.** (аз лотинии ferrum-оҳан намояндаи дар табиат хеле паҳнгардидаи ин гуна моддаҳо омадааст) моддаҳое, ки барояшон  $\mu \gg 1$  мебошад. Ба ин гуна моддаҳо ғайр аз оҳан кобалт, никел ва бисёр хӯлаҳои онҳо тааллуқ доранд. Онҳо *моддаҳои зӯрмагнитанд*.

Ҳосиятҳои магнитии кулли моддаҳо бо дарназардошти сохтори дохилии онҳо шарҳ меёбанд, зеро дар ҳар гуна ҷараёнҳои микроскопӣ (микрочараёнҳо) мавҷуданд, ки бо ҳаракати зарраҳои таркибии атому молекулаҳо-электронҳо алоқаманданд. Аҷиб аст, ки ҳанӯз А.М. Ампер с. 1820 бо фаразияи дар моддаҳо ҷой доштани ҷараёнҳои ниҳонии электрии молекулавӣ назарияи аввалини магнетизмро пешниҳод карда буд.

Ҳоло барои шарҳ додани бисёр ҳодисаҳои магнитӣ бо истифодаи модели анқариб классикии сохти атом-аз *ядро*и мусбат заряднок, ки асосан массаи атомро дарбар мегирад ва дар атрофаш электронҳои манфӣ зарядноки шумораашон ба рақами тартибии модда дар ҷадвали даврии элементҳо баробар гардишхӯранда иборатбуда маҳдуд мешавем. Маҳз электронҳои аз рӯи мадорҳои дойиравӣ ё эллипсӣ ҳаракатмандро чун микрочараёнҳо қабул кардан раво аст, ки сабабгори магнитнокшавии моддаҳо дониста мешуд.

Электрон сонияе  $v$  маротиба (мувофиқи назарияи Бор  $v = 10^{15} \text{ c}^{-1}$ ) аз рӯи мадори дойиравӣ гардишхӯрандаро ба сифати ҷараёни қуввааш:

$$I = \frac{e}{T} = ev$$

қабул кардан мумкин аст, ки моменти магнитии он бо формулаи:

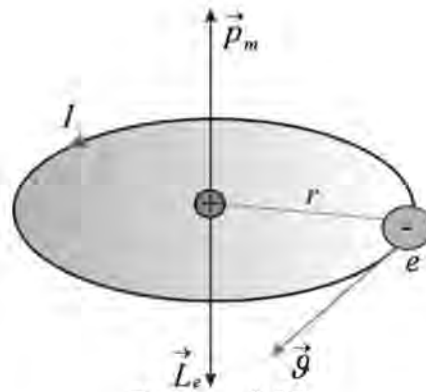
$$p_m = IS = evS \quad (4.72)$$

муайян карда мешавад (дар ин ҷо  $S$  - масоҳати мадор аст).

Агар электрон ба рафти акрабаки соат гардиш хӯрад, ҷараён ба муқобили ин самт ва вектори  $\vec{p}_m$  бошад ба ҳамвории мадор амудан (мувофиқи қоидаи дасти рост ё пармача) равона мебошад (расми 4.23). Азбаски электрон ғайр аз заряди  $e$  масса низ дорад, ба электрони гардишхӯранда моменти механикии:

$$L_e = m_e \mathcal{G}r = 2m_e v \pi r^2 = 2m_e v S \quad (4.73)$$

ҳос мебошад (дар ин ҷо  $\mathcal{G} = \omega r = 2\pi v r$  - суръати мадории электрон аст). Вектори  $\vec{L}_e$  ба самти вектори  $\vec{p}_m$  муқобилан равона буданаш мувофиқи қоидаи пармача бармеояд.



Расми 4.23

Мукоисаи (4.72) ва (4.73) нишон медихад, ки моментҳои механикию магнитӣ ба якдигар мутаносибанд:

$$\vec{p}_e = -\frac{e}{2m_e} \vec{L}_e. \quad (4.74)$$

Дар ин чо бузургии

$$g = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \quad (4.75)$$

нисбати гиромагнитӣ ном гирифтааст (аз юнонии gyros-давра).

Мавҷудияти ҳамбастагии моментҳои механикию магнитӣ боиси *ходисаҳои ба истилоҳ магнитомеханикӣ* мешавад. Чунончӣ, магнитнокшавии магнетик сабабгори ба ҳаракати чарзанӣ даромадани он мегардад. Ин ҳодиса дар таҷрибаҳои олими нидерландӣ де Хааз (1878-1960) ва А. Эйнштейн мушоҳида карда шуд (с. 1915). Ҳодисаи баръакс - ҳангоми чарзании магнетик магнитнок шудани моддаро олими амрикоӣ С.Ч. Барнетт (с. 1873-1956) дар таҷриба ошкор сохт (с. 1915).

Ақоибот дар он аст, ки дар таҷрибаҳои де Хааз ва А. Эйнштейн нисбати гиромагнитӣ ба  $-(e/m)$ , яъне назар ба дар (4.75) овардашуда ду маротиб зиёд буданаш муқаррар гардид. Баъдтар маълум шуд, ки электрон ғайр аз momenti мадории  $L_e$  дорои *моменти механики хусусии*  $L_s$ -и ба ном *спин* (аз англисии spin-чархак, чарзанӣ) ва мутаносибан ба он *моменти хусусии магнитӣ* (спинӣ)-и  $p_{ms}$  мебошад ва маҳз нисбати онҳо:

$$p_{ms} = -\frac{e}{m_e} L_s \quad (4.76)$$

буда, ба натиҷаҳои таҷрибаи де Хааз ва А. Эйнштейн мувофиқат мекунад. Дуруст будани нисбати (4.76) дар назарияи муосир-механикаи квантӣ пурра тасдиқ гардид. Аз ин рӯ ба хосиятҳои магнитии моддаҳо на momenti магнитии мадорӣ, балки асосан momenti магнитии хусусӣ (спинӣ)-и электрон саҳмгузор мебошад. Ҳамин аст, ки momenti умумии магнитии атом ба ҳосили ҷамъи вектории моментҳои магнитӣ (мадорӣ ва спинӣ)-и тамоми электронҳои атом баробар доништа мешавад:

$$\vec{p}_a = \sum \vec{p}_m + \sum \vec{p}_{ms}. \quad (4.77)$$

Лозим ба ёдоварист, ки momenti магнитии ядроҳо назар ба momenti магнитии электронҳо ҳазорҳо маротиб хурд аст (инро

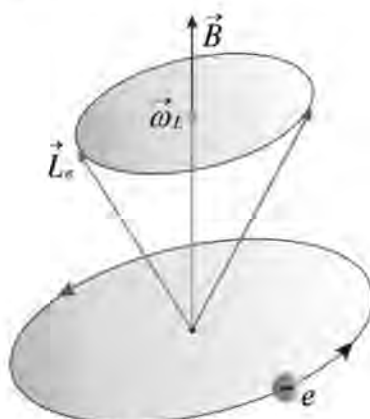
андозагириҳои муосир сахҳ тасдиқ карданд ва ин яке аз исботҳои дар ядро вучуд надоштани электронҳо дониста мешавад). Аз ин рӯ онро хангоми чамъи (4.77) сарфи назар кардан равост.

Маълум гардид, ки дар атомҳои моддаҳои диамагнитӣ  $\vec{p}_a = 0$  мебошад. Агар электрони гардишхӯранда дар майдони магнитии берунаи индуксияш  $\vec{B}$  воқеъ гардад, ба он чун чараёни дойравӣ моменти гардишovar таъсир мекунад. Тавре ки олими англис Ч. Лармор (1857-1942) кашф кард (с. 1895), электрон дар ин маврид ғайр аз гардиши мунтазам ҳаракати мураккабе иҷро менамояд, ки *прессесия* (аз латинии *pression* пеш аз ҳодисае рӯй додан маънидод мешавад): моменти механикии мадории электрон дар атрофи вектори индуксияи майдони магнитии берунаи  $\vec{B}$  аз рӯйи конусе бо суръати кунҷии:

$$\omega_L = \frac{1}{2} \left( \frac{e}{m_e} \right) \vec{B} \quad (4.78)$$

гардиш меҳӯрад (расми 4.24). Дар натиҷа чараёни индуксионие ангезонида мешавад, ки моменти магнитиаш мувофиқи қойидаи Ленс ба самти  $\vec{B}$  муқобилан равона аст. Ин ҳодиса *эффекти диамагнитӣ* номида мешавад. Азбаски  $\vec{p}_a$  дар атомҳои моддаҳои диамагнитӣ баробари сифр аст, дар ин гуна моддаҳо ин эффе́т сахми асосӣ дорад. Гузашта аз ин, дар дигар моддаҳо низ эффе́ти диамагнитӣ вучуд дорад, вале назар ба таъсири пурзӯртар (масалан дар моддаҳои ферромагнитӣ) назарногир буданаш мумкин мебошад.

Дар моддаҳои парамагнитӣ (*Al, W, Pa, Pt*)  $p_a \neq 0$  аст, вале бо сабаби ҳаракати бетартибонаи ҳароратии атомҳо дар ҳоли набудани майдони берунаи магнитӣ ингуна моддаҳо магнитнок нестанд. Хангоми ба майдони берунаи магнитӣ ворид кардани парамагнетикҳо атому молекулаҳоишон бештар сӯйи майдон нигаронида мешаванд (аммо ба ин тартибот ҳамон ҳаракатаи ҳароратӣ ҳалал мерасонад. Дар ин ҳол эффе́ти диамагнитӣ назарногир шуда мемонад.



Расми 4.24

Фарқияти диамагнетикҳо назар ба парамагнетикҳо дар он зоҳир мегардад, ки масалан милаи диамагнитии дар майдони магнитии якҷинсаи беруна дар нӯги ресмон овезонбуда ба хатҳои магнитӣ амудан нигаронида мешавад. Дар майдони ғайриякҷинса бошад, ба

намунаи диамагнитӣ қуввае таъсир менамояд, ки онро аз майдон дур меандозад. Намунаи парамагнитӣ дар майдони якҷинсаи магнитӣ ба рафти хатҳои магнитӣ чой мегирад. Дар майдони ғайриҷинса ба намунаи парамагнитӣ қуввае таъсир мерасонад, ки онро ба маҳалҳои пурзӯри майдон равона кардани мешавад.

Ба монанди он, ки барои микдоран арзёбӣ кардани поляризатсияи диэлектрикҳо мафҳуми вектори поляризатсия ё худ кутбнокшавӣ ворид карда будем, барои тавсифи микдории таъсироти майдони магнитии беруна ба магнетикҳо мафҳуми *вектори магнитнокшавӣ*  $\vec{J}$  (мухтасар магнитнокшавӣ) - ро қорбаст мекунанд, ки он ба моменти магнитии воҳиди ҳаҷми магнетик баробар аст:

$$\vec{j} = \frac{\vec{P}_m}{V} = \frac{\sum \vec{P}_a}{V}. \quad (4.79)$$

Дар майдонҳои начандон пурзӯр магнитнокшавӣ ба шадидияти майдони беруна  $H$  амалан хатӣ мутаносиб мебошад. Ҳамин аст, ки ба монанди пазируфти диэлектрик мафҳуми *пазируфти магнитӣ*  $\chi$  - ро ворид мекунанд:

$$\vec{J} = \chi \vec{H}. \quad (4.80)$$

Дар ин ҷо  $\chi$  бузургии бевоҳид, яъне адади ҳолис мебошад.

Индуксияи магнитӣ  $\vec{B}$  дар магнетикҳо аз ду майдон-майдони беруна  $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$ , ки аз ҷониби ҷараёни магнитнокгардонанда дар вакуум ва майдони дохилии муҳити магнитнокшаванда  $\vec{B}'$  таркиб меёбад. Нишон додан мумкин аст, ки  $\vec{B}' = \mu_0 \vec{j}$  ва аз ин рӯ:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' = \mu_0 (\vec{H} + \vec{j}) = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} \quad (4.81)$$

мебошад. Пас,

$$\mu = 1 + \chi \quad (4.82)$$

буданаш маълум мегардад.

Назарияи диа-ва парамегнетикҳоро олими фаронсавӣ П. Ланжевен (1872-1946) бунёд карда буд (с. 1905). Мувофиқи ин назария пазируфти диамагнетикҳо:

$$\chi = -\frac{\mu_0 N_A e^2}{6m_e} \langle r^2 \rangle, \quad (4.83)$$

ки дар он  $\mu_0$ -дойимии магнитӣ,  $N_A$ -адади Авогадро,  $e$ -заряди электрон,  $\langle r^2 \rangle$ -қимати миёнаи радиуси мадорҳои электрони атом мебошад. Агар ба эътибор гирем, ки  $\langle r^2 \rangle = 10^{-10} \text{ м}$  ва аз ин рӯ  $\chi$  барои диамагнетикҳо хеле хурд (ҳамагӣ  $10^{-6} \div 10^{-5}$ ) буданаш маълум мегардад.

Ба температура чаппа мутаносибии пазируфти парамагнетикҳоро, ки олими фаронсавӣ П. Кюри (1859-1906) ҳанӯз соли 1895 ба тарзи таҷрибавӣ муқаррар карда буд ва онро *қонуни Кюри* меноманд, П. Ланжевен назариявӣ шарҳ дод:

$$\chi = \frac{\mu_0 N_A p_m}{3kT}. \quad (4.84)$$

Дар ин ҷо  $p_m$ -моменти магнитии атом,  $k$ -дойимии Болсман,  $T$ -температураи термодинамикӣ мебошад.

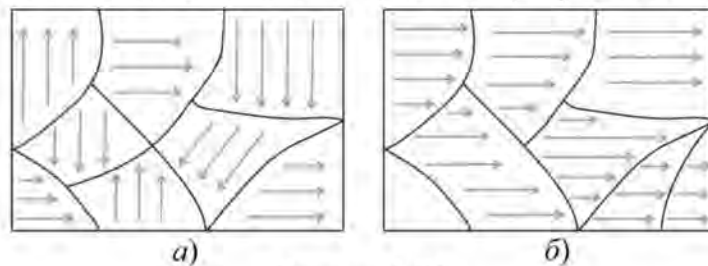


**2. Ферромагнетикҳо.** Нуфузпазири зиёди ферромагнетикҳо ( $\mu \gg 1$ ), чунончӣ барои оҳан вобаста ба дараҷаи тозагиашон аз 5 000 то 20 000, барои хӯлаи ба ном *супермаллой* (79% Ni, 5% Mo, 16% Fe) то  $10^6$ , ки *моддаҳои зӯрмагнитӣ* ба ҳисоб мераванд, бо дар сохторашон мавҷудияти соҳаҳои хеле хурд (0,01-0,1 мм)-и худ ба худ магнитнок шарҳ меёбад. Ин гуна соҳаҳо *доменҳо* (аз фаронсавии лотиниасоси *domaine*-қаламрав, мулк) ном гирифтаанд. Доменҳоро бо ёрии микроскопҳо мушоҳида кардан имконпазир аст. Барои ин сатҳи магнетики ҳамворро хуб суфта, ба рӯяш рағғани бо хокаи гардгаштаи оҳансов омехта паҳн мекунанд. Зарраҳои оҳансов магнитнок шуда, аз рӯйи доменҳо чун ақрабақҳои магнитии миниётурӣ саф мекашанд ва доменҳоро зохир менамоянд.

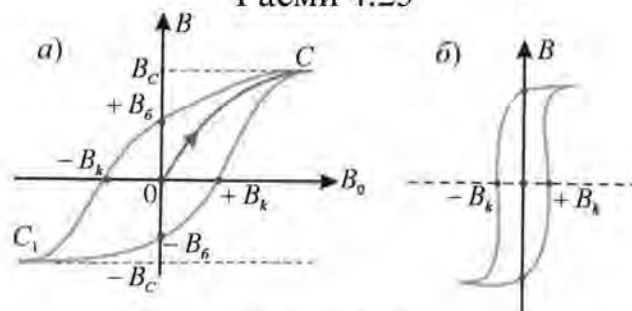
Азбаски нисбати гироманитии (4.75) мувофиқи натиҷаҳои таҷрибаҳои А. Эйнштейн ва де Хааз маҳз дар намунаҳои ферромагнетӣ ду маротиба зиёд аст, ба магнитнокшавии ферромагнетикҳо асосан моментҳои хусусӣ (спинӣ) - и электронҳо саҳмгузоранд. Бино ба назарияе, ки олими фаронсавӣ П.Э. Вейс (1865-1940) соли 1907, олимони шӯравӣ Я.И. Френкел (1894 - 1952) ва Н.С. Акулов (1900-1976), олими олмонӣ В.К. Хейзенберг (ба лафзи русӣ Гейзенберг) (1901-1976) оид ба сохти ферромагнетикҳо пешниҳод карданд (с. 1927-1928), моменти магнитии доменҳо дар натиҷаи ҳамтаъсири электронҳои қабатҳои гуногуни энергетикӣ ё зерсавияҳо (дар атомҳои ферромагнетикҳо баъзе зерсавияҳо то ҳади имконпазир бо электронҳо пур набуда, ҷойҳои холӣ доранд) электронҳои онҳо ба зерсавияҳои дигари аз ҷиҳати энергетикӣ мусоидтари баландтар мегузаранд) параллелан равонаанд. Агар намунаи ферромагнетӣ қаблан дар майдони магнитӣ воқеъ нагардида бошад, моменти магнитии доменҳо тавре бетартибона ҷойгир мешаванд, ки намуна магнитнок нест, моменти натиҷавӣ баробари сифр аст (расми 4.25, а). Вале ҳангоми намунаро дар майдони магнитии берунаи индуксияаш  $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$  гузошта, таъсироташро тадричан афзоиш додан ферромагнетик аҷоиб рафтор мекунад. Ҳатто дар майдонҳои начандон пурзӯр (масалан шадидияташ  $H \approx 100 \text{ A/m}$ ) моментҳои магнитии доменҳо бештар сӯйи ин майдон нигаронида шудан мегиранд. Ҳамин аст, ки индуксияи магнитии намуна  $B$  вобаста ба  $B_0$  чун дар расми 4.26, а тасвирёфта аввало ба рафти хати қачи  $O-C$  то ба қимати сершавии магнитӣ (нуқтаи  $C$ ) мерасад. Дар ин маврид моменти магнитии кулли доменҳо сӯйи майдони беруна  $B_0$  равона мешаванд (расми 4.25, б) Акнун, агар  $B_0$ -ро аз қимати ба сершавии магнити ( $BC$ ) мувофиқ кам намоем,  $B$  на ба рафти  $C-O$ , балки ба рафти  $C-B_0$  коҳиш меёбад. Қимати  $B_0$ , ки ба индуксияи  $B_0 = 0$  рост меояд, *магнитнокшавии боқимонда* ( $B_0$ ) ном дорад (магнитҳои дойимӣ маҳз то ба ҳамин дараҷа магнитнок карда мешаванд). Барои барҳам додани магнитнокшавии боқимондаи  $B_0$  самти индуксияи майдони беруна  $B_0$  - ро муқобил гардонда, то қимати  $-B_0$ , ки *қувваи коэрситивӣ* (аз лотинии *coercitio* - нигоҳ, маҳфуз доштан) ном гирифтааст, расондан лозим меояд. Дар натиҷа  $B = 0$  мешавад. Минбаъд зиёд кардани  $-B_0$  ба аз нав магнитнок

кардани намунаву ба қимати сершавии  $-B_C$  (нуктаи  $C_1$ ) расондан меорад. Акнун, агар  $B_0$  - ро кам кардан гирем, боиси дар намунаи ферромагнитӣ ба вачуд овардани индуксияи боқимондаи  $-B_0$  мешавем. Барои махв сохтани ин магнитнокшавии боқимонда ( $-B_0$ ) индуксияи майдони беруна  $B_0$  - ро то ба қимати  $+B_k$  афзудан мебояд. Сипас онро аз нав то ба қимати сершавӣ (нуктаи  $C$ ) расонда метавонем. Дар натиҷа хати сарбастии ба ном *халкаи хистерезисӣ* (ба лафзи русӣ гистерезисӣ, ки аз юнонии hysteresis - қафо мондан, таъхир кардан омадааст) ҳосил мешавад (расми 4.26, а)

Муқаррар карда шудааст, ки масоҳати халкаи хистерезисӣ ба кори аз нав магнитнок гардонидани намунаи ферромагнитӣ баробар аст. Аз ин рӯ шакли халқа яке аз тавсифоти асосии моддаи ферромагнитӣ мебошад. Масалан, дар ферромагнетики ҳамчун дилаки электромагнитҳои трансформаторҳо корбастаншаванда халкаи хистерезисӣ бояд ҷуноне бошад, ки дар расми 4.26, б тасвир ёфтааст. Яъне бо ёрии онҳо ҳарчӣ майдонҳои пурқувват дастрас мешаванду онҳоро ба зудӣ махв сохтаи имконпазир мегардад, зеро бузургии қувваи коэрситивии барои ин гуна магнетик  $B_k$  чандон зиёд нест. Ҷунонҷӣ, барои охани тоза  $B_k \approx 5$  мкТл, барои хӯлаи зикрфтаи супермаллоӣ  $B_k$  ҳамагӣ 0,5 мкТл мебошад. Ҳамин аст, ки ин навь ферромагнетикро *нармагнит* меноманд. Дар моддаҳои саҳтмагнит, ки халкаи хистерезисиашон дар расми 4.26, а тасвир ёфтаасту онҳо ҳамчун магнитҳои дойимӣ истифода мешаванд, қувваи коэрситивиашон бузург мебошад. Ҷунонҷӣ, барои пӯлоди карбондор (таркибаш 0,9%С, 1%Мп, боқимонда оҳан)  $B_k = 5$  мТл, хӯлаи ба ном платинокобалт (77%Рт, 23%Со)  $B_k = 0,26$  Тл аст.



Расми 4.25

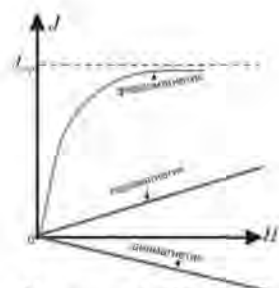


Расми 4.26

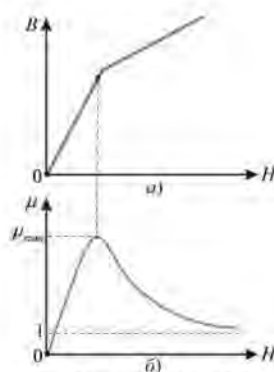
Умуман, бархилофи моддаҳои сустмагнитӣ, ки барои онҳо магнитнокшавӣ  $J$  вобаста ба шадидияти майдони магнитии беруна  $H$  хаттӣ тағйир меёбад, дар ферромагнетикҳо магнитнокшавӣ аввало бо

тезӣ афзуда, сипас ба қимати сершавӣ мерасад (расми 4.27). Гузашта аз ин, нуфузпазирӣ  $\mu$  ва индуксияи магнитии ферромагнетикҳо бар хилофи моддаҳои сустмагнитӣ, ки барояшон  $\mu$  амалан дойимист, ба  $H$  вобастагии мураккаб доранд (расми 4.28. а, б).

Бояд қайд кард, ки ферромагнетикҳо ҳангоми магнитнокшавӣ дучори деформатсия мегарданд. Ин ҳодиса *магнитостриксия* (аз латинии *strictio* - таранг шудан) ном гирифтааст ва он дар техника барои ангезонидани ултрасадои пурзӯр истифода мешавад. Дар солҳои охир нимноқилҳои ферромагнитии ба истилоҳ *ферритҳо* аҳамияти махсус пайдо кардаанд, зеро онҳо дорои хосиятҳои баланди ферромагнитӣ ва пайваста ба ин онҳо муқовимати хоси электрии калон буда, барои тайёр намудани магнитҳои дойимии пурқувват, антеннаҳои ферритӣ, чузъҳои ҳофизаи зудамал дар техникаи ҳисоббарории электронӣ ва ҳамчун рӯйпӯши наворҳои видео ва магнитофонҳо васеъ татбиқ ёфтаанд.



Расми 4.27



Расми 4.28

Хотиррасон кардан бамаврид аст, ки температураҳои назар ба *нуқтаи Кюри* баландтар ферромагнетик ба парамагнетики муқаррарӣ табдил меёбад. Масалан, нуқтаи Кюри барои кобалт  $1150^{\circ}\text{C}$ , оҳан  $770^{\circ}\text{C}$ , пермаллой ( $22\%\text{Fe}$ ,  $78\%\text{Ni}$ )  $360^{\circ}\text{C}$  буданаш муқаррар карда шудааст.

Дар хотима ёдовар мешавем, ки барои бемагнит гардондани ягон маснуот, масалан соати дастии магнитнокшуда онро андаруни соленоиди ҷараёнаш тағйирёбанда ҷойгир намуда, бо охиштагӣ аз соленоид баровардан лозим меояд.

**Мисоли 4.10.** Электрон дар атоми ҳидроген аз рӯи мадори радиусаш  $r = 0,528 \cdot 10^{-10} \text{ м}$  гардиш мекунад. Бо истифода аз ин маълумот: 1) моменти магнитии мадории электрон, 2) моменти механикии он, 3) нисбати гирпомагнитиро барои ин атом муайян намоед.

Маълумот.

$$\left. \begin{array}{l} r = 0,528 \cdot 10^{-10} \text{ м} \\ p_{me} - ? \\ L_e - ? \\ g - ? \end{array} \right\}$$

Ҳал  
Дар атоми ҳидроген қувваи кулонӣ ба электрон шитоби марказрав медиҳад, аз ин рӯ:

$$ma_n = F_{кул}; \quad \frac{m g^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

мебошад (дар инҷо  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  ва  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кӑ}$ ), аз ин ҷо

$$g = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 m_e r}}$$

Электрони гардишхӯрандаро чун ҷараёне пиндоштан мумкин равоост, ки қуввааш:

$$I = \frac{e}{T}$$

мебошад; ки дар ин ҷо  $T$ -даври гардиши электрон аст ва онро бо формулаи

$$T = \frac{2\pi r}{g}$$

муайян карда метавонем. Пас,

$$I = \frac{e g}{2\pi r}$$

аст. аз ин рӯ моменти магнитии ҷараён

$$p_m = IS,$$

ки дар ин ҷо  $S = \pi r^2$ -масоҳати мадори электрон мебошад. Пас, моменти магнитии матлуб:

$$\begin{aligned} p_m &= \frac{e g r}{2} = \frac{e^2}{4} \sqrt{\frac{r}{\pi\epsilon_0 m_e}} = \\ &= \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2}{4} \sqrt{\frac{0,528 \cdot 10^{-10} \text{ м}}{3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кӑ}}} = 9,25 \cdot 10^{-24} \text{ А/м}^2 \end{aligned}$$

буданаш маълум мегардад.

Моменти механикии мадории электронро бо формулаи зерин муайян мекунем:

$$L_e = m_e g r = \frac{e}{2} \sqrt{\frac{m_e r}{\pi\epsilon_0}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}{2} \sqrt{\frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кӑ} \cdot 0,528 \cdot 10^{-10} \text{ м}}{3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}}} = 1,05 \cdot 10^{-34} \frac{\text{кӑ} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}$$

аз ин рӯ нисбати гиромагнитӣ:

$$g = \frac{p_m}{L_e} = \frac{9,25 \cdot 10^{-24} \text{ А/м}^2}{1,05 \cdot 10^{-34} \frac{\text{кӑ} \cdot \text{м}^2}{\text{с}}} = 88,1 \cdot 10^9 \frac{\text{Кл}}{\text{кӑ}}$$

мебошад, ки бо қимати назариявии он:

$$g_{наз} = \frac{e}{2m_e} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кӑ}} = 87,9 \cdot 10^9 \frac{\text{Кл}}{\text{кӑ}}$$

мувофиқ меояд.

Ҷавоб: 1)  $p_m = 9,25 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ ; 2)  $L_e = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ кӑ} \cdot \text{м}^2 / \text{с}$ ; 3)

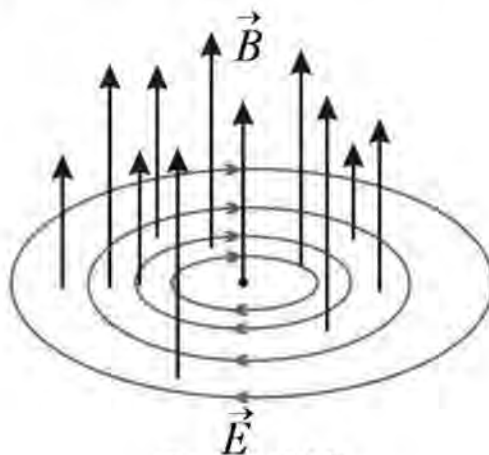
$g = 88,1 \cdot 10^9 \text{ Кл} / \text{кӑ}$ .

#### § 4.13. Муодилаҳои Максвелл



**1. Майдони гирдбодӣ (индуксионӣ)-и электрӣ. Муодилаи якуми Максвелл.** Олими машҳури англис Ч.К. Максвелл (1831-1879) ҳодисаи индуксияи электромагнитиро таҳлил намуда, хулосаҳои муҳимтарине гирифт, ки минбаъд асоси назарияи майдони электромагнитиро ташкил доданд (с. 1860-1865). Ин назария ҳоло номи ўро гирифтааст.

Бино ба андешарониҳои Максвелл чараёни индуксионие, ки ҳангоми аз сатҳи контури ноқилии беҳаракат тағйир ёфтани сели магнитӣ пайдо мешавад, натиҷаи равандҳои кимиёвӣ, ҳароратӣ, инчунин таъсири қувваҳои лоренсӣ нест. Зеро қувваҳои лоренсӣ қор иҷро намекунанд (ба §3.6 ниг.). Чараёни индуксионӣ бо таъсири қувваҳои майдони электростатикӣ ба вучуд омада наметавонад, чунки қори қувваҳои майдони электростатикӣ ба рафти контури сарбаст, яъне сиркулятсияи вектори шадидияти ин майдон ҳар гоҳ баробари сифр аст (ба §1.7 ниг.). Ҳамин буд, ки Максвелл ғояи тамоман навро пешниҳод кард. Мувофиқи ин ғоя пайдоиши чараёни индуксионӣ бо майдони тағйирёбандаи магнитӣ алоқаманд мебошад. Майдони магнитии тағйирёбанда майдони электрiero тавлид менамояд, ки хатҳои шадидияташ чун хатҳои магнитӣ (бар хилофи хатҳои шадидияти майдони электростатикӣ, ки аз зарядҳои мусбат ибтидо гирифта, дар зарядҳои манфӣ тамом мешаванд ё ба беохирӣ мераванд) сарбастанд. Ҳамин аст, ки майдони электрии дар натиҷаи тағйирёбии майдони магнитӣ ба вучуд омадаро *майдони гирдбодӣ* ё худ *индуксионӣ* меноманд. Маҳз бо таъсири ҳамин майдон зарраҳои озоди зарядноки контури сарбасти ноқилӣ ба ҳаракат мебароянду чараёни индуксиониро ташкил медиҳанд. Аз ҳама аҷоибот дар он аст, ки майдони индуксионӣ бе ҳеҷ гуна ноқил ҳам вучуд дошта метавонад (расми 4.29).



Расми 4.29

Ноқиле, ки дар ин гуна майдон ҷойгир карда мешавад ва чараёни дар он тавлидёбанда гӯё асбоб (ё худ як навъ индикатор)-и ошқорсозандаи мавҷудияти майдони индуксионӣ мебошад.

Бе ноқил ҳам вучуд доштани майдони индуксионии электрӣ амали суръатфизои электронҳо, ки *бетатрон* ном гирифтааст, шарҳ медиҳад: ин дастгоҳ аз камераи дарунҳолии ҳавояш то вакууми баланд кашидашуда дар байни қутбҳои электромагнители пурзӯри шаклаш маҳсус (конуси сарбурида) ҷойгирбуда иборат аст. Аз

печаҳои электромагнит чараёни тағйирёбандаи басомадаш анкариб 100 Хс сар медаханд. Майдони магнитии дар натиҷа ҳосилшуда ҳамзамон ду вазифаро иҷро мекунад. Аввало дар фазои беҳаво майдони гирдбодии электриро тавлид менамояд, ки маҳз бо таъсири он суръати электронҳои аз манбаи махсус ба ин фазо пошдошуда меафзояд. Сониян, майдони магнитӣ электронҳоро дар майдони дойиравии бо хатҳои шадидияти майдони гирдбодӣ мувофиқбуда нигоҳ медорад. Ҳамин аст, ки электронҳо аз рӯи мадори радиусаш дойимӣ дар тӯли афзоиши майдони магнитӣ ( $\approx 10^{-3}c$ ) миллионҳо маротиб гардиш хӯрда, дорои энергияи якчанд садҳо МэВ мегардад. Ҳангоми ин қадар энергия массаи электрон назар ба массаи оромишаш садҳо маротиб меафзояд ва суръаташ анкариб ба суръати рӯшноӣ дар вакуум баробар мешавад. Лекин ҳаракати электронҳо ба ҳеҷгуна синхронизатсия (ба §3.11 ниг.) эҳтиёҷ надорад. Гӯё дар бетатрон энергияи электронҳоро беҳад афзоиш додан мумкин аст. Вале электрони бошитоб дар ҳаракатбуда мавҷҳои электромагнитӣ меафканад, ки сабабгори талафоти энергияаш мешавад. Ҳамин аст, ки энергияашро ба садҳо МэВ мерасонанду бас.

Агар шадидияти майдони электрии индуксиониро бо  $\vec{E}_B^*$  ишорат намоем, сиркулятсияи он ба рафти контури сарбаст КЭХ-и индуксиониро муайян мекунад (ба §1.7 ниг):

$$\oint_L \vec{E}_B d\vec{l} = \varepsilon_i. \quad (4.85)$$

Акнун, агар ба назар гирем, ки мувофиқи қонуни асосии индуксияи электромагнитӣ (4.1):

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

ва

$$\Phi = \int_S B dS \cos \alpha = \int_S B_n dS$$

(дар ин ҷо  $S$ -масоҳати контур) мебошанд, барои контури беҳаракат формулаи (4.85)-ро ба намуди:

$$\oint_L \vec{E}_i d\vec{l} = -\int_S \left( \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right)_n dS \quad (4.86)$$

оварда метавонем, ки дар ин ҷо ҳосилаи хусусии  $\left( \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right)_n$ -чун тағйироти индуксияи майдони магнитӣ бо мурури замон дар самти нормали сатҳ  $n$  маънидод карда мешавад.

\*) Агар сиркулятсияи вектори шадидияти майдони электростатикӣ заряди  $q$  ба рафти контури сарбаст баробари сифр буданашро ба эътибор гирем, минбаъд аломати  $B$ -ро дар  $E_B$  партофта метавонем ва  $\vec{E} = \vec{E}_q + \vec{E}_B$  доништа мешавад.

Ҳамин тариқ, мувофиқи ғояи Максвелл майдони магнитии бо мурури замон тағйирёбанда майдони электриеро тавлид менамояд, ки шадидияташро бо формулаи (4.86) муайян карда метавонем. Ифодаи (4.86) муодилаи якуми асосии назарияи электромагнитии Максвелл мебошад.

**2. Ҷараёни кўчишӣ.** Симметрии будани қонунҳои табиатро ба эътибор гирифта, Максвелл фаразия пешниҳод кард, ки дар байни майдонҳои электрию магнитӣ таносуби баръакс низ вучуд дорад. Яъне, ба мисли он, ки майдони тағйирёбандаи магнитӣ боиси тавлид ёфтани майдони электрӣ мегардад, дар навбати худ майдони тағйирёбандаи электрӣ бояд майдони магнитиро ба вучуд оварад. Ин ғояи Максвелл минбаъд ба хусус самарабахш буданаш тасдиқ гардид.

Барои муқаррар кардани таносуби миқдории байни майдонҳои тағйирёбандаи электрию магнитӣ Максвелл мафҳуми *ҷараёни кўчиширо*-ворид намуд\*).  $\bar{U}$  баъди таҳлили ҷараёни безарядшавӣ (хамчунин ҷараёни заряднокгардонӣ)-и конденсатори дар занҷири ҷараёни доимӣ васлбуда ба ин хулоса омад.

Агар рӯяҳои конденсатори заряднокро ба воситаи ноқилҳои металлӣ ва ҷароғаки тафсишии  $L$  васл созем (расми 4.30), ҳарчанд дар фазои байни рӯяҳо диэлектрик ё вакуум мавҷуд аст, яъне занҷир сарбаст нест, ҷараёни безарядшавӣ мегузарад, ки онро афрӯзиши кўтоҳмуддати ҷароғак нишон медиҳад (ин ҷараён коҳишёбанда, яъне тағйирёбанда буданашро дар боби 5 нишон медиҳем). Ба ақидаи Максвелл занҷири ҷараёни дар ноқилҳои васлсозӣ суратгирандари, ки ҳаракати зарраҳои озоди заряднок-электронҳо ташкил медиҳад, дар фазои байни рӯяҳо маҳз ҷараёни кўчишӣ сарбаст менамояд. Ҷараёни кўчишӣ бо *тағйироти майдони электрии* байни рӯяҳо хоҳ дар он ҷо диэлектрик воқеъ гардидаву хоҳ вакуум бошад, алоқаманд аст. Гузашта аз ин, зичии ҷараёни кўчишӣ ба зичии ҷараёни ноқилият бояд баробар бошад. Дарвоқеъ, қувваи ин ҷараёнро чун:

$$I_H = \frac{dq}{dt} = \frac{d(\sigma S)}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} S$$

муайян карда метавонем, ки зичии он:

$$i_H = \frac{d\sigma}{dt} \quad (4.87)$$

мебошад (дар ин ҷо  $\sigma$ -зичии сатҳии зарядҳои рӯяҳои конденсатор аст ва он ба модули вектори индуксияи электрӣ  $\bar{D}$  баробар буданашро (ба §1.12 ниг.) хотиррасон мекунем ( $\sigma = D = \epsilon\epsilon_0 E = \epsilon_0 E_0$ )).

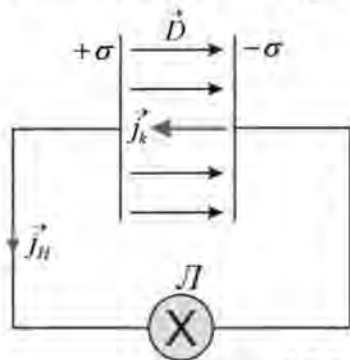
Ҳамин аст, ки зичии ҷараёни кўчиширо бо формулаи:

\*) Ин истилоҳи начандон мувофиқ бо он сабаб мавриди истифода қарор ёфт, ки дар замони Максвелл майдони электрӣ гӯё кўчиши зарраҳои муҳити ҳаёлии эфир номдошта сабабгор доништа мешуд. Ҳарчанд минбаъд вучудияти ин гуна муҳит инкор гардид, бо амри таърих истилоҳи ҷараёни кўчишӣ ва пайваста ба он эфир боқӣ монданд.

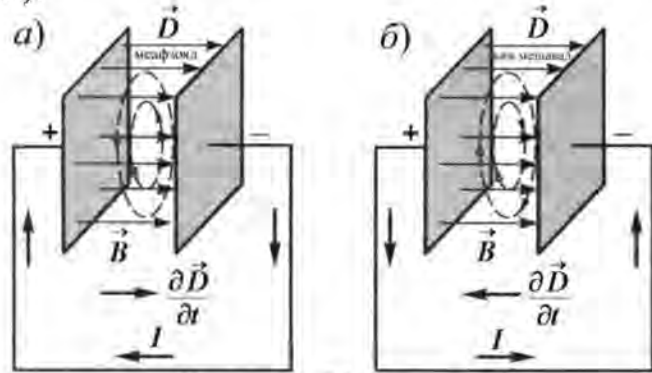
$$\vec{j}_k = \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (4.88)$$

муайян карда метавонем. Азбаски вектори  $\vec{D}$  ҳар гоҳ аз рӯи мусбат заряднок сӯи рӯи манфӣ заряднок самт мегирад, вектори зичии ҷараёни кӯчишӣ  $\vec{j}_k$  мавриди безарядшавии конденсатор (расми 4.31,

б) ба  $\vec{D}$  муқобилсамту дар ҳоли заряднокшавии конденсатор бо он ҳамсамт мебошад (расми 4.31, а).



Расми 4.30



Расми 4.31

Мавҷудияти ҷараёни кӯчишӣ сабабгори дар атрофи он ба вучуд омадани майдони магнитии гирдбодӣ мешавад, ки хатҳояш (бо истифодаи қоидаи дасти рост ё пармача) дар расми 4.31, а, б тасвир ёфтаанд. Дар амал воқеъ гардидани майдони магнитии ҷараёни кӯчиширо олими амрикоӣ Х. Роуланд (1848-1901) соли 1876 ва олими рус А.А. Эйхенвалд (1864-1944) соли 1903 дар таҷрибаҳо тасдиқ карданд.

Пас, ба муносибати ворид кардани ҷараёни кӯчишӣ, бино ба андешарониҳои Максвелл дар ҳаргуна занҷири электрӣ бояд *ҷараёни пурра* чун ҳосили ҷамъи ҷараёнҳои ноқилиятию кӯчишӣ ҷой дошта бошад, ки баробарии зеринро сабт кардан раво аст:

$$\vec{j}_n = \vec{j}_{nH} + \vec{j}_{nk} \quad (4.89)$$

Ёдрас шудан бамаврид аст, ки ҷараёни кӯчишӣ андаруни ноқилҳои металлӣ низ вучуд дорад, вале мувофиқи ҳисобу китоби ҷиддӣ он назарногир мебошад.

Акнун қонуни ҷараёни пурраро (ба §3.12 ниг.) бо дарназардошти он, ки қувваи ҷараён бо формулаи:

$$I_n = \int_S (\vec{j}_n)_n dS$$

муайян карда мешавад, ба намуди зерин оварда метавонем:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S (\vec{j}_H + \vec{j}_k) dS = \int_S \left( \vec{j}_H + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) dS \quad (4.90)$$

Дар ин ҷо  $\left( \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right)_n$  ҳосилаи хусусии вектори индуксияи электрӣ  $\vec{D}$  буда, тағйироти он бо мурури замон маънидод карда мешавад.

Мавриди дар фазо мавҷудияти танҳо майдони тағйирёбандаи электрӣ формулаи (4.90) чунин пешниҳод мешавад:



$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \oint_S \left( \frac{d\vec{D}}{dt} \right) dS. \quad (4.91)$$

Яъне, харгуна майдони тағйирёбандаи электрӣ дар атрофи худ майдони магнителиро тавлид менамояд, ки шадидияташ  $H$  мувофиқи формулаи (4.91) муайян карда мешавад. Ифодаи (4.91) муодилаи дуҷуми асосии назарияи электромагнитии *Максвелл* мебошад.

#### §4.14. Чамъбасти пурраи муодилаҳои Максвелл. Майдони электромагнитӣ

Барои чамъбасти пурраи муодилаҳои Максвелл ба ду муодилаи асосие, ки дар боло зикр ёфтаанд, чанд муодилаи дигарро илова кардан мебоянд. Чунончӣ, теоремаи Гаусс барои вектори индуксияи электрӣ  $\vec{D}$  (онро баъзан вектори кӯчиши электрӣ низ меноманд) *муодилаи сеюми Максвелл* доништа шудааст. Дар ҳоли андаруни сатҳи сарбаст бо зичии ҳаҷмии  $\tau = dq/dV$  бефосила тақсим шудани заряд ин муодила чунин намуд дорад:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \tau dV \quad (4.92)$$

Теоремаи Гаусс барои вектори индуксияи магнитӣ чун *муодилаи чоруми Максвелл* шуморида мешавад:

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0. \quad (4.93)$$

Ҳамин тарик, муодилаҳои зерин *чамъбасти пурраи муодилаҳои Максвеллро* дар шакли интегралӣ, ташкил медиҳанд:

$$\left. \begin{aligned} \oint_L \vec{E} d\vec{l} &= - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}; \\ \oint_S \vec{D} d\vec{S} &= \int_V \tau dV; \\ \oint_L \vec{H} d\vec{l} &= \int_S \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) dS; \\ \oint_S \vec{B} d\vec{S} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.94)$$

Одатан ба ин системаи муодилаҳои Максвелл таносуби бузургҳоеро, ки хосиятҳои муҳитҳои дар онҳо майдонҳои электрию магнитии ангехташавандаро тавсиф медиҳанд, низ илова мекунам. Он таносубҳо инҳоянд:

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}; \quad \vec{j} = \gamma \vec{E}, \quad (4.95)$$

ки дар ин ҷо  $\epsilon_0$  ва  $\mu_0$ -мувофиқан дойимҳои электрию магнитанд,  $\epsilon$  ва  $\mu$ -мувофиқан нуфузпазирии нисбии диэлектрию магнитӣ,  $\gamma$ -ноқилияти хоси модда буданаширо хотиррасон менамоем.

Аз системаи пурраи муодилаҳои Максвелл бармеояд, ки:

- зарядҳои электрӣ ё майдони бо мурури замон тағйирёбандаи магнитӣ манбайи майдони электрӣ мебошанд;

- майдони магнитиро зарраҳои зарядноки ҳаракатманд (ҷараёнҳои электрӣ) ё майдонҳои бо мурури замон тағйирёбандаи электрӣ ангехта метавонанд;
- майдони тағйирёбандаи магнитӣ ҳар гоҳ пайваста бо майдони электрии он ангезонида, майдони тағйирёбандаи электрӣ пайваста бо майдони магнитии тавлидкарда вучуд доранд, яъне майдонҳои электрию магнитӣ *чудонопазиранду майдони ягонаи электромагнитиро ташкил медиҳанд.*

Муодилаҳои Максвелл муодилаҳои умумитарин барои майдонҳои электрию магнитӣ мебошанд ва онҳо дар илми оид ба электромагнетизм ҳамон нақшаеро мебозанд, ки қонунҳои Нютон дар механика доранд. Муодилаҳои Максвелл ҳам чун қонунҳои Нютон умумияти далелҳои таҷрибавӣ буда, исбот надоранд. Ба дурустии онҳо таҷрибаҳои сершумор ва натиҷаҳои аз онҳо гирифтаю дар амал татбиқшаванда гувоҳӣ медиҳанд.

Назарияи электромагнитии Максвелл на танҳо далелҳои таҷрибавии то бунёди он маълумро шарҳ дод, балки мавҷудияти мавҷҳои электромагнитиро, ки дар фазо бо суръати охирик паҳн мешаванд, пешгӯӣ кард. Минбаъд муқаррар гардид, ки суръати паҳншавии майдони электромагнитии озоди ба заряд ва ҷараёнҳо пайваست набуда дар вакуум ба суръати рӯшноӣ ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ ) баробар аст. Ин ҳулоса ва тадқиқоти назариявии хосиятҳои мавҷҳои электромагнитӣ ба Максвелл имконият доданд, ки *назарияи электромагнитии табиати рӯшноиро* пешниҳод намояд. Мувофиқи ин назария рӯшноӣ мавҷи электромагнитӣ мебошад.

Мавҷҳои электромагнитиро олими олмонӣ Х.Р. Ҳертс (ба лафзи русӣ Генрих Гертс) (1857-1894) дар таҷриба с. 1887, яъне баъди даҳ соли ҷавти Максвелл ҳосил ва муқаррар кард, ки қонунҳои ангезиш ва паҳншавии онҳо пурра мутобиқи назарияи Максвелл мебошанд.

Ёдрас шудан бамаврид аст, ки майдони электромагнитӣ ба принципи нисбияти Эйнштейн пурра мувофиқат мекунад, зеро мавҷҳои электромагнитӣ дар вакуум нисбат ба ҳамагуна системаҳои сарҳисоб бо ҳамон як суръати ба суръати рӯшноӣ баробар паҳн мешаванд ва аз ин рӯ ба принципи нисбияти Галилей мутобиқ нестанд.

Аз принципи нисбият бармеояд, ки алохида-алохида баррасӣ намудани майдонҳои электрию магнитиро бояд нисбатан фаҳмид. Дарвоқеъ, майдони электриво маҷмӯии зарядҳои ором ба вучуд меоранд. Лекин, агар зарядҳо нисбат ба системаи сарҳисоби инерсиалие ором бошанд, онҳо нисбат ба системаи дигари инерсиалӣ дар ҳаракат ба ҳисоб мераванд, яъне онҳо на танҳо майдони электрӣ, балки майдони магнитиро ҳам тавлид менамоянд (зеро заряди ҳаракатманд ҷараёни электриво ташкил медиҳад). Дар атрофи ноқили ороми ҷараёнаш бетағйир майдони магнитии доимӣ мавҷуд мебошад. Вале нисбат ба системаи дигари сарҳисоби инерсиалӣ он ноқил дар ҳаракат буда метавонад. Дар ин марвид майдони магнитии он тағйирёбанда мешаваду майдони электрӣ тавлид менамояд.

Ҳамин тариқ, агар майдон нисбат ба системаи сарҳисобе «соф» электрӣ ё «соф» магнитӣ бошад, нисбат ба системаҳои дигари сарҳисоб маҷмӯии майдонҳои электрию магнитӣ аст.

#### Машқи 4.

4.1. Милаи дарозиаш  $l = 30$  см дар майдони якчинсаи магнитии индуксияш  $B = 0,1$  Тл ба хатҳои магнитӣ амудан дар атрофи меҳваре, ки ба хатҳои магнитӣ параллелу аз яке нӯғҳои мила мегузарад, бо басомади  $n = 3600$  гард/дақ чарх мезанад. Дар нӯғҳои мила чӣ қадар фарқи потенциалҳо ангезонида мешавад?

$$(U = |\varepsilon_1| = \pi n B l^2 = 1,7 \text{ В})$$

4.2. Контури масоҳаташ  $S = 30$  см<sup>2</sup>, ки  $N = 100$  печа дорад, мунтазам дар майдони магнитии якчинсаи индуксияш  $B = 10$  мТл дар атрофи меҳваре, ки бо хатҳои магнитӣ мувофиқ меояд, чарх мезанад. Агар даври гардиш  $T = 0,1$  с бошад, қимати амплитудавии ҚЭХ - и дар контур ангехта муайян карда шавад.

$$(\varepsilon_m = NBS2\pi/T = 2,5 \text{ В})$$

4.3. Дар майдони магнитии мувофиқи конуни  $B = 0,1 \cos 2\pi t$  тағйирёбанда рамкаи нокилии квадратшакли тарафаш  $l = 50$  см тавре гузошта шудааст, ки хатҳои магнитӣ сатҳи рамкаро амудан бурида мегузаранд. ҚЭХ-и индуксияро дар лаҳзаи  $t = (1/4)$ с муайян намоед.

$$(\varepsilon = 2\pi B_0 l^2 \sin 2\pi t = 157 \text{ мВ})$$

4.4. Ҳалкаи аз нокили алюминии диаметраш  $D = 50$  см сохташуда ба хатҳои магнитӣ амудан ҷойгир аст. Агар диаметри нокил  $d = 50$  мм бошад дар он ҷараёни индуксионии қуввааш  $I = 2$  А ангезонида шавад, суръати тағйироти индуксияи магнитиро ёбед. Муқовимати хоси алюминий  $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м буданастро ба эътибор гиред.

$$\left( \frac{dB}{dt} = \frac{16I\rho}{\pi D d^2} \approx 0,15 \text{ Тл/с} \right)$$

4.5. Дар майдони якчинсаи магнитии индуксияш  $B = 0,5$  мТл рамкаи чоркунҷаи як тарафаш ҳаракатманди дарозиаш  $l = 20$  см ба хатҳои магнитӣ амудан ҷойгир аст. Агар тарафи ҳаракатманд хатҳои магнитиро бо суръати  $\vartheta = 5$  м/с бурида гузарад, дар рамка чӣ қадар ҚЭХ ангезонида мешавад?

$$(|\varepsilon_i| = Bl\vartheta = 0,5 \text{ В})$$

4.6. Дар ғалтаки дарозиаш  $l = 50$  см, диаметраш  $D = 5$  см ва шумораи печаҳош  $N = 2400$  ҷараён бо суръати  $\Delta I / \Delta t = 0,5$  А/с мунтазам меафзояд. Бузургии ҚЭХ - и худиндуксия чӣ қадар аст?

$$\left( \varepsilon_s = \mu_0 \frac{N^2 \pi D^2}{4l} \left| \frac{dI}{dt} \right| \approx 14 \text{ мВ} \right)$$

4.7. Аз ғалтаки дарозиаш  $l = 20$  см, диаметраш  $D = 3$  см, шумораи печаҳош  $N = 400$  ҷараёни қуввааш  $I = 2$  А мегузарад.



Индуктивияти ғалтак  $L$  ва сели магнитӣ аз сатҳи ҳар як печа муайян карда шавад.

$$(L = 0,71 \text{ мХН}, \Phi_1 = 3,55 \text{ мкВб})$$

4.8. Аз соленоиди шумораи печаҳояш  $N = 2400$  чараёни қуввааш  $I = 5 \text{ А}$  мегузарад. Агар энергияи майдони магнитии соленоид  $W = 1 \text{ Ҷ}$ , бошад, сели магнитӣ дар соленоид чӣ қадар аст?

$$(\Phi_1 = 0,4 \text{ Вб})$$

4.9. Дар маркази печаи дойравии радиусаш  $r = 8 \text{ см}$  мавриди аз печа гузаштани чараёни қуввааш  $I = 30 \text{ А}$  зичии энергияи майдони магнитиро ёбед.

$$(0,022 \text{ Ҷ/м}^3)$$

4.10. Индуктивияти соленоиди дарозияш  $l = 60 \text{ см}$  ва масоҳати арзиаш  $S = 4 \text{ см}^2$  ба  $L = 0,4 \text{ мкХН}$  баробар аст. Ҳангоми чӣ қадар қувваи чараён зичии ҳаҷмии энергияи майдони магнитӣ  $W_m = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Ҷ/м}^3$  мешавад?

$$(1,55 \text{ А})$$

4.11. Электромагнити муқовиматаш  $R = 15 \text{ Ом}$  ва индуктивияташ  $L = 0,3 \text{ ХН}$  тахти шиддати дойимӣ мебошад. Тули чанд вақт дар печаҳои электромагнит микдори гармии хоричгардида ба энергияи майдони магнитӣ баробар мешавад?

$$(t = L/2R = 0,01 \text{ с})$$

4.12. Ротори генератори чараёни тағйирёбандаи басомадаш саноатӣ ( $\nu = 50 \text{ Хс}$ ) дар майдони магнитии якҷинсаи индуксияаш  $\hat{A} = 0,15 \text{ Тл}$  чарх мезанад. Агар масоҳати ҳар як печа  $S = 200 \text{ см}^2$  бошад, барои ҳосил кардани қимати амплитудавии ҚЭХ  $\varepsilon_m = 310 \text{ В}$  чанд печа бояд гирифт?

$$(329)$$

4.13. Ротори шумораи печаҳояш  $N = 150$ , масоҳати ҳар як печааш  $S = 500 \text{ см}^2$  дар майдони магнитии якҷинсаи индуксияаш  $\hat{A} = 0,5 \text{ Тл}$  бо кадом басомад бояд гардиш намояд, ки қимати самарабахши шиддат  $U = 220 \text{ В}$  шавад.

$$(790 \text{ гард/дак})$$

4.14. Қимати лаҳзавии ҚЭХ дар генератори индуксионӣ мувофиқи қонуни  $\varepsilon = 100 \sin 200\pi t$  тағйир меёбад. Қимати амплитудавии ҚЭХ, басомад ва даври тағйироти ҚЭХ муайян карда шавад.

$$(\varepsilon_m = 100 \text{ В}; \nu = 100 \text{ Хс}; T = 0,01 \text{ с})$$

4.15. Теъдоди симпечи якуми трансформатор  $N_1 = 2400$  мебошад. Барои дар шиддати  $U = 9 \text{ В}$  ба занҷири беруна нақл кардани иқтидори  $P = 54 \text{ Вт}$  теъдоди печаҳои дуҷуми трансформатор



чӣ қадар бояд бошад? Муқовимати симпечи дуюм  $R = 0,5 \text{ Ом}$ , шиддати шабака  $U_1 = 220 \text{ В}$ .

(131)

4.16. Трансформатори коэффитсиенти трансформатсияш  $k = 0,15$  шиддатро аз  $U_1 = \varepsilon_1 = 220 \text{ В}$  то  $U_2 = 6 \text{ В}$  паст мекунад. Агар қувваи ҷараён дар печаҳои дуюм  $I = 6 \text{ А}$  бошад, талафи энергияро дар печаҳои якум сарфи назар карда, муқовимати печаҳои дуюмро ёбед.

$$(R_2 = (\varepsilon_1 - U_2) / I_2 = 4,5 \text{ Ом})$$

4.17. Индуктивияти ғалтакеро ёбед, ки ба дилаки цилиндршакли ҷӯбини дарозиаш  $l = 12 \text{ см}$ , диаметраш  $D = 10 \text{ см}$  ба қадри  $N = 10$  қабат сими диаметраш  $d = 2 \text{ мм}$  ҷафс карда печонида шудааст.

$$(L = N\mu_0 \frac{\pi D^2}{4d^2} l = 3 \text{ мҲн})$$

4.18. Дар ғалтаки индуктивияташ  $L = 0,5 \text{ мҲн}$  тӯли вақти  $\Delta t = 0,5 \text{ с}$  қувваи ҷараёнаш аз  $I_1 = 30 \text{ А}$  то  $I_2 = 0 \text{ А}$  кам мешавад. ҚЭҲ-и худиндуксияи дар ғалтак ангеzonидаро ёбед.

(30 мВ)

4.19. Аз ғалтаки дарозиаш  $l = 15 \text{ см}$ , диаметраш  $D = 2 \text{ см}$ , ки ба он нокили диаметраш  $d = 2 \text{ мм}$  ҷафс карда печонида шудааст, ҷараёни қуввааш  $I = 10 \text{ А}$  сар доданд. Энергияи майдони магнитии дар ғалтак ба вучудомадаро муайян намоед.

(1,48 мҶ)

4.20. Конденсатори ғунҷоишаш  $C = 0,5 \text{ мкФ}$  ва реостати ба он пай дар пай васлбудаи муқовиматаш  $R = 3 \text{ кОм}$  ба шабакаи шахрии шиддаташ  $U = 220 \text{ В}$  (басомадаш  $\nu = 50 \text{ Ҳс}$ ) пайваст мебошад. Қувваи ҷараён дар ин китъаи занҷир ёфта шавад.

$$(I = U / \sqrt{R^2 + 1/(4\pi^2\nu^2c^2)} \approx 30 \text{ мА})$$

4.21. Ба манбайи ҷараёне, ки мувофиқи қонуни  $I = 2\sin 100\pi t$  тағйир меёбад, ғалтаки индуктивияташ  $L = 90 \text{ мҲн}$  ва реостати муқовиматаш  $R = 50 \text{ Ом}$  пай дар пай васл мебошанд. Қимати амплитудавии афтиши шиддат дар ин китъаи занҷир чӣ қадар аст?

$$(U_m = I_m \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} \approx 115 \text{ В})$$

4.22. Муқовимати пурраи китъаи занҷири ҷараёни тағйирёбандаи басомадаш  $\nu = 50 \text{ Ҳс}$ , ки аз резистори муқовиматаш  $R = 2 \text{ кОм}$  ва конденсатори ба он параллелан васлбудаи ғунҷоишаш  $C = 6 \text{ мкФ}$  таркиб ёфтааст, муайян намоед.

$$(Z = R / \sqrt{1 + 4\pi^2\nu^2R^2c^2} = 512,8 \text{ Ом})$$

4.23. Занҷири ҷараёни тағйирёбанда аз ғалтаки индуктивӣ, конденсатор ва резистори пай дар пай васлбуда таркиб ёфтааст. Қимати амплитудавии натиҷавии шиддат дар ғалтак ва конденсатор  $U_{mLC} = 180 \text{ В}$ , дар резистор  $U_{mR} = 100 \text{ В}$  мебошад. Фарқи фазаҳои кувваи ҷараён ва шиддатро муайян намоед.

$$(tg\varphi = (\omega L - 1/(\omega C)) / R = U_{mLC} / U_{mR} = 1,8; tg\varphi = 61^\circ)$$

4.24. Дар бетатрон суръати миёнаи тағйироти сели магнитӣ  $\langle \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| \rangle = 50 \text{ Вб/с}$  - ро ташкил медиҳад. Баъд аз чанд гардиш электрон дорои энергияи зиёдтарини  $W_{\max} = 80 \text{ МэВ}$  мешавад ва дар тӯли суръатгирӣ электрон дар бетатрон чӣ қадар роҳ мепаймояд? Ба эътибор гиред, ки электрон аз рӯи мадори дойравии радиусаш  $r = 20 \text{ см}$  гардиш мекунад.

$$(N = \frac{W_{\max}}{e\varepsilon_i} = W_{\max} / e \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = 1,6 \cdot 10^6; S = N2\pi r = 2 \cdot 10^6 \text{ м} = 2000 \text{ км})$$

4.25. Ба шабакаи ҷараёни тағйирёбандаи шиддати самарабахшаш  $U = 120 \text{ В}$  нокили муқовимати фаъолаш  $R = 25 \text{ Ом}$  ва ғалтаки индуктивияташ  $L = 0,183 \text{ Хн}$  пай дар пай васланд. Агар қимати амплитудавии кувваи ҷараён дар занҷир  $I_m = 5 \text{ А}$  бошад, басомади ҷараёнро муайян намоед.

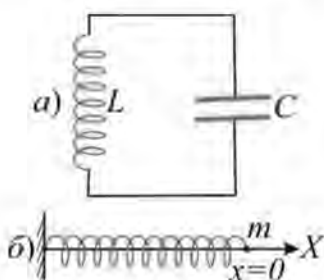
$$(v = \sqrt{(2U^2 / I_m) - R^2} / (2\pi L) = 20 \text{ Хс})$$

## ЛАППИШ ВА МАВҶҶОИ ЭЛЕКТРОМАГНИТӢ

## §5.1. Лаппишҳои озоди бардавоми электромагнитӣ

Тавре ки аз муодилаҳои Максвелл бармеояд, майдонҳои тағйирёбандаи электрию магнитӣ якдигарро тавлид менамоянд. Ин гуна майдонхоро бо ёрии схемаи электрие ба вучуд меоранд, ки *контური лаппиш* ном гирифтааст.

Контური лаппиш аз конденсатори  $C$  ва ғалтаки индуктиви  $L$ -и пай дар пай васлбуда таркиб ёфта (расми 5.1, *а*), дар он чун лаппишҳои механикӣ дар раққосаки пружинӣ (расми 5.1, *б*) лаппишҳои гармоникӣ ангезонида мешаванд.

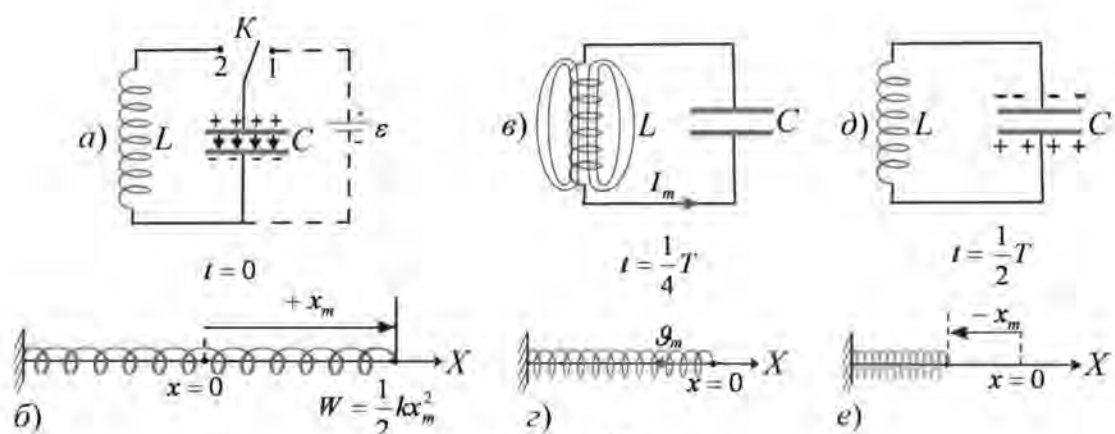


Расми 5.1.

Равандҳое, ки дар контური лаппиш ҳангоми конденсаторро заряднок карда, тавассути ғалтак безарядгардонӣ рӯй медиҳанд, баррасӣ менамоем. Барои ба ин равандҳо амиктар сарфаҳм рафтан лаппишҳое, ки дар раққосаки пружинӣ ба вучуд меоянд, тариқи муқоиса муҳокима кардан хеле мусоид аст.

Аввало конденсатори контурро аз манбаи берунаи ҷараёни доимии  $\varepsilon$  заряднок мекунем. Барои ин калиди  $K$ -ро ба мавқеи 1 (расми 5.2, *а*) гардондан мебояд (ба мисли он, ки раққосакро бо таъсири қувваи беруна, масалан даст ба масофаи  $x_m$  аз мавқеи мувозинатӣ майл додан лозим аст, расми 5.2, *б*). Дар ин ҳол конденсатори контур то шиддати  $U_m$ -и, ба ҚЭХ-и манбаи ҷараён  $\varepsilon$  баробар заряднок гардида, дар рӯяхояш микдори заряди ба ғунҷоишаш мувофиқ  $q_m$ -ро ғун мекунад ва дар натиҷа дар байни рӯяхо майдони электрӣ ба вучуд меояд, ки дар он энергияи

потенсиалии зиёдтарини  $W_p = \frac{q_m^2}{2C}$  захира мешавад (чун раққосаки ба қадри  $+x_m$  аз мавқеи мувозинатӣ майлхӯрда, ки дорон энергияи потенциалии  $W_p = \frac{1}{2} kx_m^2$  мебошад).



Расми 5.2

Баробари калиди  $K$ -ро ба мавқеи 2 гардондан (ба раҳо додани раққосак рост меояд) ҳисоби вақтро оғоз менамоем (лаҳзаи  $t = 0$ ). Электронҳои озоди дар рӯи поёнии конденсатор ғуншуда бо таъсири майдони электрӣ (дар раққосак қувваи чандирии  $F_r = -kx_m$  - и сӯи мавқеи мувозанатӣ равонобуд) аз печаҳои ғалтак мегузаранду ҷараёни безарядшавиро ташкил медиҳанд ва дар он майдони магнитиро анғезонида, ҷойҳои холии рӯи болоии конденсаторро пур кардан мегиранд. Дар ин маврид якбора ҳам майдони электрии суфт ва ҳам майдони магнитии тадриҷан пурзӯршаванда вучуд дорад (мувофиқи он, ки раққосаки ба қадри  $x < x_m$  аз мавқеи мувозанатӣ дурбуда ҳамзамон дорои энергияи кинетикии  $W_k = \frac{1}{2} m g^2$  ва энергияи потенциалии  $W_p = \frac{1}{2} kx^2$  мебошад).

Баъди аз ибтидо гузаштани тӯли вақти чоряк давр ( $t = \frac{1}{4} T$ ) конденсатор пурра безаряд мегардаду ҷараёни безарядшавӣ қимати зиёдтарини  $I_m$  мегирад. Дар ин лаҳза майдони электрӣ барҳам меҳӯрад (расми 5.2, в), вале энергияи майдони магнитӣ дорои қимати максималии  $W_m = \frac{1}{2} LI_m^2$  мешавад (раққосак аз мавқеи мувозанатӣ бо суръати  $g_m$  ба самти чап мегузараду дорои энергияи кинетикии зиёдтарини  $W_k = \frac{1}{2} m g_m^2$  мегардад (расми 5.2, г). Баробари сурат гирифтани ҷараёни безарядшавӣ ҳодисаи ҳудиндуксия сар мезанаду ҚЭХ-и он  $\varepsilon_s$  ба афзоиши ин ҷараён мувофиқи қойидаи Ленс мамониат мерасонад (мисли он, ки баъди аз мавқеи мувозанатӣ гузаштани раққосак пружина фишурда шудан мегараду қувваи чандирии сӯи мавқеи мувозанатӣ равонобуд) ба вучуд омада, ба ҳаракати минбаъдаи раққосак муқобилият нишон медиҳад). Баъди сипарӣ шудани боз як чоряки дигари давр, яъне дар лаҳзаи  $t = \frac{1}{2} T$  электронҳо бо инерсия кӯчишашонро идома дода, конденсаторро аз нав заряднок мекунанд, ҳарчанд акнун рӯи болоӣ дорои заряди манфӣю рӯи поёнӣ дорои заряди мусбат мешаванд (расми 5.2, д).



Дар ин раванд ҚЭХ-и худиндуксия нақши асосӣ мебозад (раккосак баъди мавқеи мувозанатино гузаштан ба кадри  $-x_m$  фишурда мешавад (расми 5.2, e). Яъне энергияи майдони магнитӣ ба энергияи майдони электрӣ табдил меёбад. Сипас, раванде, ки дар тӯли ним давр то ин дам сурат гирифт, ба самти муқобил такрор ёфта, баъди гузаштани ним даври дигар ба ҳолати ибтидоӣ бармегардад: конденсатор боз заряднок (рӯяи болоӣ мусбату рӯяи поёнӣ манфӣ) мешавад.

Ҳамин тариқ, майдонҳои электрию магнитӣ даврӣ ба ҳам табдил меёбанд. Агар талафи энергияи захиракардаи конденсатор ба гармии ҷоулу ленси дар муқовимати печаҳои ғалтак намебуд (дар рақкосак қувваҳои соиш вучуд намедоштанд) ин раванд беохир такрор меёфт. Ҳодисаи зикршуда *лаппишҳои озоди бардавом (хомӯшнашаванда)* ном гирифтааст. Бояд қайд кард, ки дар контур лаппишҳои даврии заряди рӯяҳои конденсатор ва шиддати байни ин рӯяҳо, қувваи ҷараёни безарядшавӣ, энергияи майдонҳои электрию магнитӣ рӯй медеҳанд. Ҳамин аст, ки лаппишҳои дар контур суратгиранда *лаппишҳои электромагнитӣ* ном гирифтаанд.

Барои муайян кардани басомад ва даври лаппишҳои озоди бардавом муқовимати фаъол (омӣ)-и печаҳои ғалтакро ба эътибор намегирем ( $R=0$ ). Дар ин маврид қоидаи дуҷуми Кирхгоф барои қиматҳои лаҳзавии афтиши шиддат дар конденсатор ва ҚЭХ-и худиндуксия чунин сабт карда мешавад:

$$U_C = \varepsilon_s \quad (5.1)$$

Акнун ба назар мегирем, ки

$$U_C = \frac{1}{C}q; \quad \varepsilon_s = -L\frac{dI}{dt}; \quad I = \frac{dq}{dt} = \dot{q}; \quad \frac{dI}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2} = \ddot{q}$$

(ҳосилаи дуҷуми заряд нисбат ба вақт) мебошанд, аз ин рӯ (5.1) намуди зерин мегирад:

$$L\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{C}q = 0.$$

Ин муодиларо чун:

$$\ddot{q} + \frac{1}{LC}q = 0 \quad (5.2)$$

пешниҳод ва бо муодилаи лаппишҳои озоди бардавоми рақкосак, ки дар механика баррасӣ шуда буд:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (5.3)$$

муқоиса карда, басомади сиклӣ (даврӣ)-и ин гуна лаппишҳо:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad \text{ё} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5.4)$$

ва даври онҳо

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC} \quad (5.5)$$

буданаширо муайян менамоем. Барои санҷидани дурустии формулаи (5.5), ки онро с. 1853 олими машҳури англис У. Томсон-лорд Келвин (1824-1907) муқаррар карда буд ва ҳоло *формулаи Томсон* ном гирифтааст, аз воҳидҳо истифода мекунем:

$$\begin{aligned} \text{СИ: } \omega_0 T &= (\omega_0 L \omega_0 C)^{1/2} = (1 \text{ ХН} \cdot 1 \text{ Ф})^{1/2} \\ &= \sqrt{1 \frac{B \cdot c}{A} \cdot 1 \frac{Kл}{B}} = \sqrt{1 \frac{B \cdot c}{A} \cdot 1 \frac{A \cdot c}{B}} = 1 \text{ с}. \end{aligned}$$

Хамин тарик, басомад ва даври лаппишҳои озод ё хусусии бардавоми электромагнитӣ дар контур ба бузургии индуктивияти ғалтак  $L$  ва ғунҷоиши конденсатор  $C$  вобаста буданаш маълум мегардад. Ифодаи (5.2) чун муодилаи лаппишҳои озод (хусусӣ)-и электромагнитӣ дониста мешавад.

Ҳалли муодилаи (5.2) функцияи гармоникӣ:

$$q = q_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (5.6)$$

буданашро хотиррасон менамоем. Барои санҷиш аз ин функция ҳосилаи тартиби дуюм нисбат ба вақт гирифтаем:

$$I = \frac{dq}{dt} = q_m \omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = I_m \sin\left(\omega_0 t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right) \quad (5.7)$$

ва

$$\frac{d^2 q}{dt^2} = \frac{dI}{dt} = -q_m \omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = q_m \omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \pi). \quad (5.8)$$

Аз муқоисаи (5.6) ва (5.7) бармеояд, ки фазаи лаппишҳои ҷараён назар ба лаппишҳои заряд дар рӯяҳои конденсатор ба қадри  $\pi/2$  пештар рӯй медиҳад. Ба ин муносибат лаппишҳои шиддати байни рӯяҳои конденсаторро низ меоварем:

$$U = \frac{1}{C} q = \frac{1}{C} q_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (5.9)$$

**Мисоли 5.1.** Даври лаппишҳои озоди электромагнитии ҳомӯшнашавандаро дар контуре муайян намоед, ки аз ғалтаки индуктивии  $L = 1 \text{ мХН}$  ва конденсатори ғунҷошаш  $C = 0,1 \text{ мкФ}$  таркиб ёфтааст:

Маълумот.

$$L = 1 \text{ мХН} = 10^{-3} \text{ ХН}$$

$$C = 0,1 \text{ мкФ} = 10^{-5} \text{ Ф}$$

$T = ?$

Ҳал

Мувофиқи формулаи Томсон (5.5) даври лаппишҳо дар контур:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \approx 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{10^{-3} \text{ ГН} \cdot 10^{-5} \text{ Ф}} = 6,28 \cdot 10^{-4} \text{ с} = 62,8 \text{ мс}$$

мебошад.

Ҷавоб:  $T \approx 62,8 \text{ мс}$ .

**Мисоли 5.2.** Рӯяҳои конденсатори ҳамвори ҳавоии контуреро, ки дар он лаппишҳои озоди бардавом (ҳомӯшнашаванда) сурат гирифта метавонанд, қадре заряднок карданд, ки дар он энергияи  $W = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ҷ}$  захира гардид. Сипас рӯяхоро оҳиста аз ҳам чунон дур андохтанд, ки басомади лаппишҳо  $n = 3$  маротиба афзуд. Дар ин ҳол бар зидди қувваҳои электрӣ чӣ қадар кор иҷро кардан лозим омад?

Маълумот.  
 $W = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ҷ}$   
 $n = 3$   


---

 $A = ?$

Ҳал  
 Кори матлубро чун меъери тағйироти энергияи конденсатор пешниҳод кардан мумкин аст:

$$A = W' - W = \frac{q_m^2}{2} \left( \frac{1}{C'} - \frac{1}{C} \right) = W \left( \frac{C}{C'} - 1 \right),$$

ки дар ин ҷо  $q_m$ -қимати амплитудавии заряди конденсатор,  $W = \frac{q_m^2}{2C}$ -энергияи дар конденсатор захирагардида мебошанд. Аз тарафи дигар,

$n = \frac{\omega_0}{\omega} = \sqrt{\frac{C}{C'}}$  ё ки  $\frac{C}{C'} = n^2$  буданаширо ба эътибор мегирем. Аз ин рӯ:

$$A = W(n^2 - 1) = 6 \cdot 10^{-6} (3^2 - 1) \text{ Ҷ} = 48 \cdot 10^{-6} \text{ Ҷ} = 48 \text{ мкҶ}.$$

Ҷавоб:  $A = 48 \text{ мкҶ}$ .

## §5.2. Лаппишҳои озоди хомӯшшаванда

Лаппишҳои дар контури муқовиматаш  $R = 0$  суратгиранда чун ҳар гуна ҳаракати бесоиши ғайривоқеӣ, яъне ҳаёлианд. Дар ҳар контур асосан аз ҳисоби печаҳои ғалтаки индуктивӣ муқовимати омӣ ( $R$ ) баробари сифр нест, ҳарчанд назарногир аст. Аз ин рӯ дар ҳар даври лаппиш хеле кам бошад ҳам, талафи энергияи дар контур захирагардида ба гармии ҷоулу ленси баъди заряднок кардани конденсатору ба ҳоли худ гузоштани контур ба хомӯш шудани лаппишҳои озод меоварад. Тадқиқоти таҳлилии инро тасдиқ мекунанд. Дарвоқеъ, ҳангоми  $R \neq 0$ , будан мувофиқи қоидаи дуҷуми Кирхгоф афтиши шиддатро дар ин муқовимат низ бояд ба эътибор гирифт (ба §5.1 ниг.):

$$U_R + U_C = \mathcal{E}_s$$

ё ки

$$IR + \frac{1}{C}q = -L \frac{dI}{dt}$$

Ин муодиларо бо дарназардошти он, ки

$$I = \frac{dq}{dt} = \dot{q}; \quad \frac{dI}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2} = \ddot{q}$$

мебошанд ба намуди зерин пешниҳод карда метавонем:

$$\ddot{q} + \frac{R}{L}\dot{q} + \frac{1}{LC}q = 0. \quad (5.10)$$

Чун дар мавриди лаппишҳои механикӣ коэффитсиенти хомӯшшавӣ:

$$\beta = \frac{R}{2L} \quad (5.11)$$

ворид мекунем ва

$$\frac{1}{LC} = \omega_0^2$$

буданаширо ба назар мегирем, он гоҳ (5.10)-ро чун:

$$\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = 0 \quad (5.12)$$

пешниход карда метавонем. Ин муодилаи дифференсиалии тартиби дуюми якчинсаи коэффитсиентхояш дойимӣ муодилаи лаппишҳои озоди хомӯшшаванда мебошад ва ҳалли он мувофиқи назарияи муодилаҳои дифференсиалӣ функсияи зерини гармоникӣ буданастро хотиррасон менамоем:

$$q = q_m e^{-\beta t} \cos(\omega t - \varphi_0). \quad (5.13)$$

Яъне, лаппишҳои заряд дар рӯяхи конденсатор (аз ин рӯ кувваи ҷараён дар контур, афтишҳои шиддат) мувофиқи қонуни лаппишҳои гармоникӣ сурат мегиранд, вале бар хилофи лаппишҳои гармоникӣ амплитудаашон дойимӣ амплитудайи лаппишҳои хомӯшшаванда мутобики қонуни:

$$q = q_m e^{-\beta t} \quad (5.14)$$

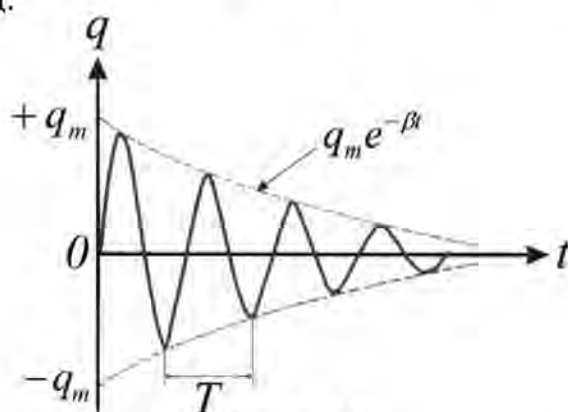
бо мурури замон кам шуда меравад (расми 5.3). Аз ифодаи коэффитсиенти хомӯшшавӣ (5.11) бармеояд, ки ҳар қадар муқовимати омӣ ( $R$ ) зиёд бошад, коҳиши амплитудайи лаппишҳо ҳамон қадар ба зудӣ сурат мегирад, ки онро бузургии ба ном *декременти хомӯшшавӣ*:

$$\delta = \frac{q(t)}{q(t+T)} = e^{\beta T} \quad (5.15)$$

инчунин *декременти логарифмӣ*:

$$\theta = \ln \delta = \ln \frac{q(t)}{q(t+T)} = \beta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N_e} \quad (5.16)$$

тавсиф менамоянд.



Расми 5.3

Декременти хомӯшшавӣ муайян мекунад, ки пас аз гузаштани як даври лаппиш ( $T$ ) амплитудайи лаппишҳо  $e$  ( $\approx 2,72$ ) маротиб коҳиш меёбад. Дар ифодаи (5.16)  $\tau = \frac{1}{\beta} = \frac{2L}{R}$  - тӯли вақти *релаксатсия*, ки баъди гузаштани он амплитудайи лаппишҳо  $e$  маротиб кам мешавад,  $N_e$  - шумораи ин лаппишҳо мебошад.

Нишон додан мумкин аст, ки *басомад ва даври лаппишҳои озоди хомӯшшавандаро* бо формулаҳои зерин муайян мекунанд:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}; \quad (5.17)$$



$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} \quad (5.18)$$

Дарвокеъ, хангоми  $R=0$  ифодаҳои (5.17) ба (5.4) ва (5.18) ба (5.5) табдил меёбанд.

Контури лаппишро аксар бо бузургии ба истилоҳ *судмандӣ*  $Q$  тавсиф медиҳанд, ки он ба баръакси декременти логарифмии хомӯшшавӣ мутаносиб буда, бо формулаи:

$$Q = \frac{\pi}{\theta} = \pi N_e \quad (5.19)$$

муайян карда мешавад. Яъне ҳар қадар  $N_e$  зиёд бошад, судмандии контур баландтар аст.

Мувофиқи (5.13) қонуни хомӯшшавии шиддати конденсаторро ёфта метавонем:

$$U = \frac{q_m}{C} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0) = U_m e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (5.20)$$

Қонуни коҳиши қувваи ҷараёнро низ муқаррар кардан мумкин аст: барои ин аз (5.13) нисбат ба вақт ҳосила гирифтаи мебоҷад. Ин амал баъди ворид кардани  $\sqrt{\omega^2 + \beta^2} = \sqrt{\omega_0^2} = \omega_0$  чунин натиҷа медиҳад:

$$I = \omega_0 q_m e^{-\beta t} \left[ -\frac{\beta}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}} \cos(\omega t + \varphi_0) - \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}} \sin(\omega t + \varphi_0) \right].$$

Ифодаи кунчи  $\psi$ -ро мувофиқи шарт:

$$\cos \psi = -\frac{\beta}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}} = -\frac{\beta}{\omega_0}; \quad \sin \psi = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}} = \frac{\omega}{\omega_0}; \quad (21)$$

ворид сохта, қонуни хомӯшшавии қувваи ҷараёнро дар намуди:

$$I = \omega_0 q_m e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0 + \psi) = I_m e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0 + \psi) \quad (5.22)$$

пешниҳод карда метавонем. Азбаски  $\cos \psi < 0$  вале  $\sin \psi > 0$  мебошад, ҳудуди кунчи  $\psi$  чунин буданаш муқаррар мешавад:

$$\frac{\pi}{2} < \psi < \pi.$$

Ҳамин тариқ, хангоми дар контур мавҷуд будани муқовимати ғаъол ( $R$ ) қувваи ҷараён назар ба шиддат дар конденсатор аз ҷиҳати фаза ба қадри аз  $\pi/2$  то  $\pi$  пеш меравад (дар ҳоли  $R=0$  ин пешравӣ ба  $\pi/2$  баробар буданашро хотиррасон менамоем).

**Мисоли 5.3.** Контури лаппиш аз ғалтаки индуктивияташ  $L = 2,5$  мҲн, конденсатори ғунҷоишаш  $C = 1$  мкФ ва резистори муқовиматаш  $R = 1$  Ом таркиб ёфтааст. Даври лаппишҳо дар контур ва декременти логарифмии хомӯшшавиро муайян намоед.

Маълумот:

$$L = 2,5 \text{ мХн} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Хн}$$

$$C = 1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$R = 1 \text{ Ом}$$

$$T = ? \quad \theta = ?$$

Ҳал

Аввало коэффициентҳои хомӯшшавиро меёбем:

$$\beta = \frac{R}{2L} = \frac{1 \text{ Ом}}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}} = 200 \text{ с}^{-1}.$$

Даври хомӯшшаванда: лапишҳои

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} = \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{\frac{1}{2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \cdot 10^{-6} \text{ Ф}} - \frac{1}{4 \cdot (2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн})^2}}}$$

$$= \frac{6,28}{\sqrt{4 \cdot 10^8 - 4 \cdot 10^4}} \text{ с} \approx \frac{6,28}{2 \cdot 10^4} \text{ с} = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

аст.  
Пас,

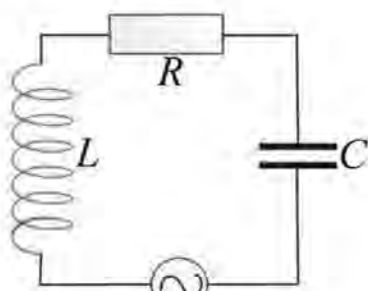
$$\theta = \beta T = 200 \text{ с}^{-1} \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} = 0,0628 \approx 0,063$$

буданаш маълум мегардад.

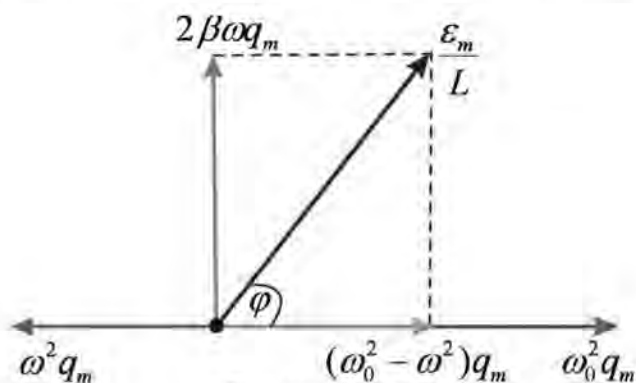
Ҷавоб:  $T = 0,314 \text{ мс}$ ;  $\theta = 0,063$ .

### §5.3. Лапишҳои маҷбурии электромагнитӣ. Резонанси электрӣ

Тавре ки маълум аст, ҳангоми лапишҳои бардавоми электромагнитӣ ба туфайли гармии ҷоулу ленсӣ талафоти энергия дар контур захирагардида сурат мегирад. Пас, ин талафотро пардохт намудан лозим меояд. Чунин амалро бо ёрии қувваҳои дойимӣ ба сомон расондан муяссар намешавад, зеро бо таъсири онҳо лапишҳо ба вучуд намеоянд. Дар қисми механика таъкид шуда буд, ки барои ин мақсад ягон навъ омили тағйирёбанда бояд бошад, Ҳамин аст, ки одатан барои ҳосил кардани лапишҳои хомӯшнашаванда ба контури лапиш манбаи шиддаташ мувофиқи қонуни гармоникӣ тағйирёбандаро васл месозанд (расми 5.4), зеро ингуна шиддатро бо ёрии генераторҳои ҷараёни тағйирёбанда ангезонидан имконнопазир аст.



Расми 5.4



Расми 5.5

Фарз мекунем, ки ба контури лаппиш манбайи ҚЭХ-аш мувофиқи қонуни гармоникӣ:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t, \quad (5.23)$$

ки дар ин ҷо  $\varepsilon_m$  -қимати амплитудавии ҚЭХ,  $\omega$  – басомади тағйироти он мебошад, васл аст. Дар ин маврид қоидаи дуҷуми Кирхгоф барои қиматҳои лаҳзавии ҚЭХ ва афтиши шиддатҳо чунин сабт меёбад:

$$U_R + U_C = \varepsilon_S + \varepsilon. \quad (5.24)$$

Бо дарназардошти ишоратҳои дар §5.2 воридсохта ин муодиларо ба намуди зерин пешниҳод карда метавонем:

$$\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{\varepsilon_m}{L} \sin \omega t. \quad (5.25)$$

Ифодаи (5.25) муодилаи лаппишҳои маҷбурӣ доништа мешавад, ки он муодилаи дифференсиалии тартиби дуҷум бо коэффитсиентҳои доимии ғайриҷамъи мебошад. Мувофиқи назарияи муодилаҳои дифференсиалӣ ҳалли ин муодила аз ҳосили ҷамъи ҳалли умумии муодилаи якҷамъи, яъне (5.13) ва ҳалли хусусии муодилаи ғайриҷамъи иборат аст.

Ҳалли муодилаи якҷамъи дар §5.2 муҳокима кардем ва нишон додем, ки он лаппишҳои ҳомӯшшавандаро ифода менамояд ва онҳо баъди муддати на чандон тӯлонӣ барҳам меҳӯранд. Сипас, лаппишҳо тавре сурат мегиранд, ки *лаппишҳои барқароршуда* ном гирифтаанд ва ба ҳалли хусусии муодилаи ғайриҷамъи (5.25) мувофиқанд. Ин ҳалро чун функсияи гармоникӣ:

$$q = q_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.26)$$

пешниҳод кардан табиист, ки дар он  $q_m$  (қимати амплитудавии заряди рӯяҳои конденсатор) ва  $\varphi$  ҳанӯз бузургҳои номаълуманд. Барои муайян кардани онҳо аз функсияи (5.26) нисбат ба вақт ҳосилаҳои тартиби якум ва дуҷумро дарёфта, ба муодилаи (5.25) баргузор намудан лозим аст:

$$\dot{q} = I = q_m \omega \cos(\omega t + \varphi) = q_m \omega \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) = I_m \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right); \quad (5.27)$$

$$\ddot{q} = \frac{dI}{dt} = -q_m \omega^2 \sin(\omega t + \varphi) = I_m \omega \sin(\omega t + \varphi + \pi), \quad (5.28)$$

ки дар онҳо бузургии:

$$I_m = q_m \omega \quad (5.29)$$

қимати амплитудавии қувваи ҷараён дар контур мебошад. Ҳамин аст, ки муодилаи (5.25) намуди зерин мегирад:

$$q_m \omega^2 \sin(\omega t + \varphi + \pi) + 2\beta\omega q_m \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) + \omega_0^2 q_m \sin(\omega t + \varphi) = \frac{\varepsilon_m}{L} \sin \omega t. \quad (5.30)$$

Тарафи чапи ин ифода аз ҷамъбасти се лаппиши гармоникӣ басомадашон баробару бо фазаашон фарқдошта таркиб ёфта, лаппиши гармоникӣ натиҷавии тарафи ростро ташкил медиҳанд.

Барои дарёфтани бузургҳои номаълуми  $q_m$  ва  $\varphi$  истифодаи мафҳуми вектор-амплитуда, яъне диаграммаи векторӣ (ба §4.8 ниг.),

ки амали чамъи лаппишхоро содда мегардонад, мусоид аст, (расми 5.5).

Аз расми 5.5 хувайдост, ки:

$$q_m^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2 q_m^2 = \frac{\varepsilon_m^2}{L^2}$$

мебошад, пас,

$$q_m = \frac{\varepsilon_m}{L \sqrt{4\beta^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2}} \quad (5.31)$$

ва

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (5.32)$$

буданаш маълум мегардад, ки онхоро бо дарназардошти:

$$I_m = q_m \omega; \quad \beta = \frac{R}{2L}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

дар намудҳои:

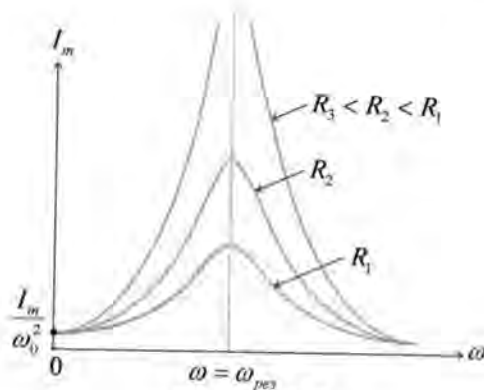
$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}}; \quad (5.33)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R}{\frac{1}{\omega C} - \omega L} \quad (5.34)$$

пешниҳод карда метавонем.

Ҳамин тариқ, ифодаи (5.33) конуни тағйироти қувваи ҷараёнро дар контури лаппиш бо тағйироти манбаи ҚЭХ-аш мувофиқи ифодаи (5.23) бо басомади  $\omega$  тағйирёбанда муайян менамояд (ёдрас мешавем, ки  $I_m = \sqrt{2}I$  ва  $\varepsilon_m = \sqrt{2}\varepsilon$  мебошанд, аз ин рӯ (5.33)-ро барои қиматҳои самарабахши қувваи ҷараён  $I$  ва ҚЭХ  $\varepsilon$  низ истифода бурдан равост).

Акнун вобастагии  $I_m$ -ро ба басомади манбаи беруна  $\omega$  таҳлил мекунем. Ин вобастагӣ ба тарзи графикӣ дар расми 5.6 тасвир ёфтааст.



Расми 5.6



Пеш аз ҳама диққатро ба он чалб намудан лозим аст, ки ҳангоми баробари сифр шудани ифодаи  $(1/(\omega C) - \omega L)$  дар (5.33) амплитудаи қувваи чараён  $I_m$  қимати зиёдтарин мегирад ва ин ҳодиса *резонансӣ электрӣ* ном дорад. Шарти муайян кардани басомади резонансӣ  $\omega = \omega_{рез}$  чандон душвор нест:

$$\frac{1}{\omega_{рез} C} - \omega_{рез} L = 0,$$

Аз ин ҷо

$$\omega_{рез}^2 = \frac{1}{LC}$$

ё ки

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0. \quad (5.35)$$

Яъне, ҳодисаи резонанси электрӣ мавриди ба басомади хусусии контури лаппиш  $\omega_0$  баробар шудани басомади манбайи беруна  $\omega$  рӯй медиҳад. Шарти *резонансӣ* имконият фароҳам меоварад, ки ҳатто лаппишҳои хеле суфт ошкор сохта шаванд. Ҳамин аст, ки ҳодисаи резонанси электрӣ барои қабули интихобии сигнали ин ё он стансияи радио, канали дилхости телевизион ва номерҳои мушаххаси телефонҳои мобилӣ васеъ истифода мебаранд.

Ҳар қадар муқовимати омӣ контур хурд бошад, максимуми хати қачи резонансӣ ҳамон қадар баландтар аст (расми 5.6). Ҳангоми  $R \rightarrow 0$  фарқи фазаҳои тағйироти қувваи чараёни контур ва ҚЭХ-и манбаъ мувофиқи (5.34), ки дар ин контур амал мекунад,  $\varphi \rightarrow 0$ .

Дар ҳоли  $\omega \rightarrow 0$  амплитудаи қувваи чараён ба қимати дойимии

$I_m = \frac{\varepsilon_m}{L\omega_0^2}$  баробар мешаваду ҳангоми  $\omega \rightarrow \infty$  бузургии  $I_m$  ба сифр

майл мекунад, зеро дар басомадҳои хеле баланд лаппишҳои контур фурсат намеёбанд, ки ба тағйироти ҚЭХ-и манбайи беруна мувофиқат намоянд.

**Мисоли 5.4.** Ба контуре, ки аз ғалтаки индуктивияташ  $L = 0,5$  мҲн, муқовиматаш  $R = 50$  Ом ва конденсатори ғунҷоишаш  $C = 0,2$  мкФ таркиб ёфтааст, манбайи ҚЭХ-аш мувофиқи қонуни  $\varepsilon = 100 \sin 3 \cdot 10^5 \pi t$  тағйирёбандаро васл карданд. Оё резонанси электрӣ рӯй медиҳад?

*Маълумот:*

$$L = 0,5 \text{ мҲн} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Ҳн}$$

$$R = 50 \text{ Ом}$$

$$C = 0,2 \text{ мкФ} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}$$

$$\varepsilon = 100 \sin 3 \cdot 10^5 \pi t$$

$$\omega_{рез} = ?$$

*Ҳал*

Аз қонуни тағйироти ҚЭХ маълум аст, ки басомади тағйироти он:

$$\omega = 3 \cdot 10^5 \pi = 9,42 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$$

мебошад. Басомади лаппишҳои озод (хусусӣ) дар контур:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{5 \cdot 10^{-4} \text{ Гн} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}}} = 10^5 \text{ с}^{-1}$$

буданаширо дониста, хулоса гирифтани душвор нест, ки шартҳои рӯй додани резонанси электрии ҷой надорад.

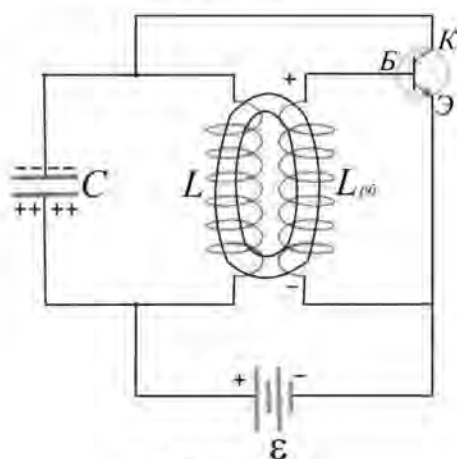
Ҷавоб:  $\omega_0 \neq \omega$ .

#### §5.4. Генератори лапшиҳои баландбасомади бардавом

Маълум аст, ки генераторҳои электростансияҳо ҷараёни басомадаш  $\nu = 50 \text{ Ҳс}$  истифода мекунанд, ки ба адади гардишҳои ротори генераторҳо дар гирди меҳвараш вобаста аст. Аммо барои алоқа тариқи радио, телевизион, телефонҳои мобилӣ басомадҳои садҳо мегагерсӣ қорбаст мешаванд, ки тавассути гардишҳои механикӣ дастрас намудан ғайри имкон мебошад. Ҳамин аст, ки лапшиҳои электромагнитии баландбасомад бо ёрии генераторҳои транзисторӣ амалӣ карда мешаванд. Дар ин ҷуна генераторҳо асосан *автолапшиҳо* сурат мегиранд.

Тавре ки дар механика зикр ёфта буд, автолапшиҳо-лапшиҳои хомӯшнашавандаанд, ки аз ҳисоби манбаи берунаи доимии энергия дастгирӣ меёбанд. Онҳо аз лапшиҳои маҷбурӣ, ки бо таъсири қувваҳои берунаи тағйирёбанда ангезонида мешаванд, ба қуллӣ фарқ доранд. Системае, ки дар он автолапшиҳо ба вуҷуд меоянд, худ таъсири берунаро танзим медиҳад (номи автолапшиҳо маҳз аз ҳамин ҷост). Ин ҷуна система энергияро чун дар соатҳои деворӣ аз манбаи берунаи доимӣ бо ҷузъҳои муайян барои пардохти талафоти энергия, ки боиси хомӯшшавии лапшиҳо мегардад, дар лаҳзаҳои мусоиди вақт ворид мекунад. Маҳз барои ин мақсад транзистор қорбаст мешавад. Транзистор чун қалиди зудамаъл хизмат мекунад, ки манбаи берунаро васлу ҷудо месозад.

Схемаи соддатарини генератори транзисторӣ лапшиҳои давомдор дар расми 5.7 тасвир ёфтааст.



Расми 5.7

Контурҳои лапшиш ба манбаи ҷараёни доимӣ  $\varepsilon$ , тавассути транзистор пай дар пай васл мебошад. Замоне ки рӯи поёнии конденсатори контур мусбат заряднок мегардад (дар расми 5.7 маҳз ҳамин лаҳза оварда шудааст) ба контур энергия интиқол меёбад.

Барои ин лаҳзаи мусоидро фароҳам овардан бояд ба базаи транзистор  $B$  (ба §2.10 ниг.) кутби мусбату ба эмиттер  $\mathcal{E}$  кутби манфӣ дода шавад. Ин гуна кутбнокшавии шиддат бо ёрии ғалтаки ба ном *робитаи баръакси индуктивӣ*  $L_{pb}$  амалӣ мегардад. Ҳангоми дар контур чараёни безарядшавӣ ба вучуд омадан хатҳои магнитии майдони ин чараён дар ғалтаки индуктивии контур  $L$  печаҳои ғалтаки  $L_{pb}$  - бурида дар он ҚЭХ-и даврӣ тағйирёбандаи индуксиониро меангезонанд. Ҳамин ки рӯяи поёнии конденсатори контур  $C$  манфӣ заряднок мешавад, чараён ба воситаи транзистор қатъ меёбад. Баъди ним даври лаппиш дар контур аз транзистор боз чараён мегузараду ба контур энергия ворид мешавад.

Ҳамин тарик, пас аз ҳар як ним давр дар контур аз ҳисоби манбайи беруна талафи энергия, ки асосан ба гармии ҷоулу ленси харҷ мешавад, пардохт мегардад. Дар натиҷа лаппишҳои бардавоми басомадашон ба формулаи Томсон (5.4) мувофиқро ангезонида мешаванд.

### §5.5. Паҳншавии майдони электромагнитӣ

Таҳлили қонуни Био-Савар-Лаплас дар асоси назарияи электромагнитии Максвелл ба хулосаҳои ҷолиб меорад. Дарвоқеъ, индуксияи майдони магнитие, ки ҷузъи чараён  $Idl$  дар нуктаи аз он ба қадри  $r$  дур ҷойгирбуда ба вучуд меорад, мувофиқи ин қонун:

$$dB = \mu\mu_0 \frac{Idl}{4\pi r^2} \sin \alpha \quad (5.36)$$

буданаширо хотиррасон менамоем ( $\alpha$ -кунҷи байни самти чараён ва радиус-вектори нукта  $\vec{r}$  аст). Агар ба эътибор гирем, ки чараёнро ҳаракати ботартибонаи  $N$  - то зарраи зарядноки  $q$ -и суръаташон  $\mathcal{V}$  ташкил медиҳад ва дарозии  $dl$ -и ҷузъро зарядҳо дар тӯли вақти  $dt$  мепаёмоянд,  $dl = \mathcal{V}dt$  мебошад. Дар тӯли ин вақт қувваи чараёнро чун  $I = \frac{dq}{dt} N = \frac{Nq}{dt}$  ҳисобидан равоқ. Ҳамин аст, ки (5.36) намуди зерин мегирад:

$$dB = \mu\mu_0 \frac{Nq\mathcal{V}}{4\pi r^2} \sin(\vec{\mathcal{V}}, \vec{r}).$$

Агар индуксияи майдони магнитии бо якто заряд алоқамандро бо  $B = dB/N$  муайян намоем, он дар нуктаи  $A$  (расми 5.8):

$$B_A = \mu\mu_0 \frac{q\mathcal{V}}{4\pi r^2} \sin(\vec{\mathcal{V}}, \vec{r}) \quad (5.37)$$

буданаш маълум мегардад. Акнун ба хотир меорем, ки шадидияти майдони электрии заряди  $q$  дар ҳамон нуктаи  $A$ :

$$E_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2}$$

аст, ифодаи (5.37)-ро ба намуди:

$$B_A = \epsilon_0\mu_0\epsilon\mu\mathcal{V}E \sin(\vec{\mathcal{V}}, \vec{E}) \quad (5.38)$$

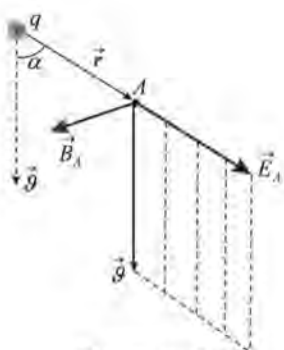
оварда метавонем.

Нишон додан душвор нест, ки ҳосили зарби дойимихои электрӣ  $\epsilon_0$  ва магнитӣ  $\mu_0$  ба бузургии баръақси квадрати суръати рӯшноӣ дар вакуум ( $c = 299792 \text{ м/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ ) баробар мебошад:

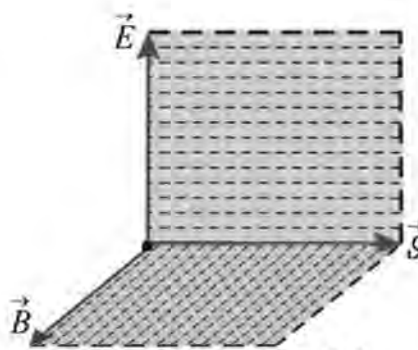
$$\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}. \quad (5.39)$$

Аз ин рӯ (5.38) намуди зерин мегирад:

$$B_A = \frac{\epsilon \mu}{c^2} \mathcal{G} E \sin(\vec{\mathcal{G}}, \vec{E}).$$



Расми 5.8



Расми 5.9

Яъне, майдони электрии шадидияташ  $E$ , ки бо суръати  $\mathcal{G}$  паҳн мешавад, майдони магнитии индуксияш  $B$ -ро тавлид менамояд ва онро бо формулаи:

$$B = \frac{\epsilon \mu}{c^2} \mathcal{G} E \sin(\vec{\mathcal{G}}, \vec{E}) \quad (5.40)$$

ё ба тарзи векторӣ:

$$\vec{B} = \frac{\epsilon \mu}{c^2} [\vec{\mathcal{G}}, \vec{E}] \quad (5.41)$$

муайян карда метавонем. Ачиб аст, ки вектори  $\vec{B}$  мувофиқи қоидаи зарби вектории  $[\vec{\mathcal{G}}, \vec{E}]$  ба ҳамвори ин ду вектор воқеъгардида амудан равона мебошад (ба расми 5.8 ниг.).

Ҳамин гуна таҳлили қувваи лоренсӣ дар асоси назарияи электромагнитии Максвелл низ ба ҳулосаи диққатангез меоварад. Дарвоқеъ, (ба §3.6 ниг.) ба заряди  $q$ -и дар майдони магнитии индуксияш  $B$ -и бо суръати  $\mathcal{G}$  дар ҳаракатбуда қувваи лоренсии:

$$F_L = q \mathcal{G} B \sin(\vec{\mathcal{G}}, \vec{B}) \quad (5.42)$$

таъсир мекунад. Агар тасавур намоем, ки ин қувва ба заряди ороми  $q$  аз ҷониби майдони магнитии нисбат ба ин заряд бо суръати  $\vec{\mathcal{G}}$  дар ҳаракатбуда таъсир расонад, бино ба ақидаи Максвелл, мисли таҳлили болоӣ ин майдони ҳаракатманд майдони электрии шадидияташ  $E$ -ро меангезад. Майдони электрӣ дар навбати худ ба заряди ороми  $q$  таъсир мекунад. Аз ин рӯ қувваи лоренсиро чун:

$$F_L = qE$$

донистан равоқ ва (5.42)-ро ба намуди:

$$E = \mathcal{G} B \sin(\vec{\mathcal{G}}, \vec{B})$$



ё ба тарзи векторӣ:

$$\vec{E} = -[\vec{\mathcal{G}}\vec{B}] \quad (5.44)$$

пешниҳод карда метавонем. Яъне, майдони магнитии индуксияаш  $B$ -и бо суръати  $\mathcal{G}$  дар ҳаракатбуда майдони электрииеро тавлид менамояд, ки шадидияташро мувофиқи (5.43) ё (5.44) муайян намудан мумкин аст.

Лозим ба ёдоварист, ки ифодаҳои (5.43) ва (5.44) ба (5.40) ва (5.41) шабеҳанд. Ачиб аст, ки (5.44) пурра ба муодилаи якуми Максвелл (4.86) мувофиқат мекунад ва онро чун ифодаи мавриди махсуси ин муодила доништан равост. Гузашта аз ин, самти вектори  $\vec{E}$  низ ба зарби вектори  $-\vec{\mathcal{G}}\vec{B}$  рост меояд (ба расми 5.9 ниг.).

*Хулосаи муҳимтарине, ки аз муқоисаи ифодаҳои (5.41) ва (5.44) бармеояд,  $\mathcal{G}$  дар онҳо на суръати нисбӣ, балки суръати умумии майдони ягонаи электромагнитӣ мебошад. Дикқатангез аст, ки векторҳои  $\vec{\mathcal{G}}$ ,  $\vec{E}$  ва  $\vec{B}$  мувофиқи зарбҳои вектори (5.41) ва (5.44) ба ҳам амуданд:  $\vec{E} \perp \vec{\mathcal{G}}$ ,  $\vec{B} \perp \vec{\mathcal{G}}$ , пас  $\vec{E} \perp \vec{B}$  мебошад (расми 5.9). Аз ин рӯ дар ифодаҳои (5.40) ва (5.43):*

$$\sin(\vec{\mathcal{G}}, \vec{B}) = \sin(\vec{\mathcal{G}}, \vec{E}) = 1$$

буданашро ба эътибор гирифта, формулаҳои зеринро сабт карда метавонем:

$$B = \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \mathcal{G}E; \quad (5.45)$$

$$E = \mathcal{G}B. \quad (5.46)$$

Ингуна тарзи пешниҳоди муодилаҳои Максвелл, ки таносуби байни бузургиҳои  $\vec{E}$  ва  $\vec{B}$  дар нуктаи муайяни майдони ягонаи электромагнитиро ифода мекунанд, ба хулосаи минбаъдаи умумӣ меоварад: *ҳар гуна тағйироти майдони электрӣ ё магнитӣ боиси пайдоиши майдони электромагнитӣ мегардад, ки бо суръати  $\vec{\mathcal{G}}$ -и самташ ба векторҳои  $\vec{E}$  ва  $\vec{B}$  амудан равонабуда паҳн мешавад ва онҳо ҳамчун майдони ягонаи электромагнитиро дар нуктаи муайяни ин майдон тавсиф медиҳанд. Чунончӣ, агар дар нуктае майдони электрии мувофиқи қонуни гармоникӣ бо басомади  $\omega$ , лаппишхӯранда ба вучуд ояд, фаврӣ майдони магнитии мувофиқи ҳамон қонун лаппишхӯрандаи бо он алоқамандро тавлид менамояд, ки ҳамвори ин лаппишҳо суратгиранда ба самти паҳншавии майдони электромагнитии бо векторҳои  $\vec{E}$  ва  $\vec{B}$  дар ҳар як нуктаи ин майдон тавсифёбанда амуд аст.*

Барои муайян кардани бузургии суръати паҳншавии майдони электромагнитӣ  $\mathcal{G}$  ифодаҳои (5.44) ва (5.45)-ро аъзо ба аъзо зарб задан кофист:

$$BE = \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \mathcal{G}^2 EB,$$

аз ин ҷо

$$\mathcal{G} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad (5.47)$$

буданаш маълум мегардад. Ачиб аст, ки дар вакуум, инчунин муҳитҳои шаффоф, масалан ҳаво амалан  $\varepsilon = \mu = 1$  буда, майдони

электромагнитӣ дар вакуум бо суръати ба суръати рӯшноӣ баробар паҳн мешавад. Ҳамин буд, ки Максвелл табиати электромагнитӣ доштани рӯшноиро кашф кард ва (5.47) чун қонуни Максвелл ном гирифт.

Бо сабаби бо суръати охиринок дар ҳар гуна муҳит паҳн шудани майдони электромагнитӣ лаппишҳои дар ягон нуқтаи муҳит ба вучуд омадаи масалан майдони электрӣ боиси паҳн шудани он аз як нуқтаи муҳит то нуқтаи дигар, яъне ҳосил шудани мавҷи электромагнитӣ мегардад, ки яқоя бо муодилаҳои мавҷҳои дар ҳамворихои ба ҳам амудан воқеъбуда тасвир карда мешавад (расми 5.10):

$$\left. \begin{aligned} E_z &= E_m \sin(\omega t - kx); \\ B_y &= B_m \sin(\omega t - kx), \end{aligned} \right\} \quad (5.48)$$

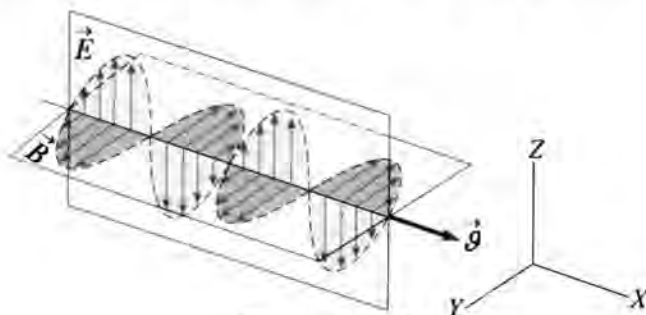
ки дар ин ҷо  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ -адади мавҷӣ ва  $\lambda$ -дарозии мавҷ

( $\lambda = gT = \frac{g}{\nu} = 2\pi \frac{g}{\omega} = 2\pi \sqrt{LC}$ ) буданаширо хотиррасон мекунем.

Агар ифодаҳои (5.45) ва (5.46)-ро аъзо ба аъзо тақсим бинмоему ба эътибор гирем, ки  $B = \mu\mu_0 H$  аст, бо дарназардошти (5.39) таносуби зерин ҳосил мешавад:

$$\sqrt{\mu\mu_0} H = \sqrt{\epsilon\epsilon_0} E. \quad (5.49)$$

Пас, ҳангоми паҳншавии мавҷи электромагнитии (5.48) фазаи лаппишҳои векторҳои  $\vec{E}$  ва  $\vec{H}$  ҳамон як қимат, яъне ин векторҳо ҳамзамон қиматҳои амплитудавӣ ва сифрӣ мегиранд.



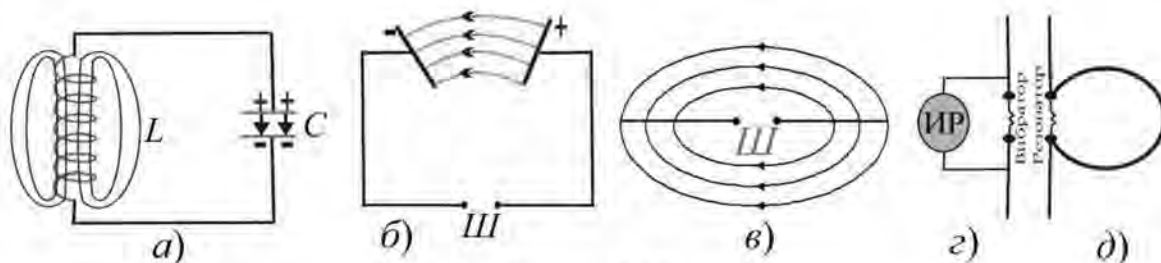
Расми 5.10

Хотирнишон кардан лозим аст, ки ҳалли муодилаҳои Максвелл (барои ин мувофиқи қойидаю қонунҳои математика аввало онҳоро ба шакли дифференциалӣ гардонда, сипас ҳалли муодилаҳои дифференсиалиро дарёфттан рост меояд), айнан ба ҳамин натиҷаҳо меоварад.

### §5.6. Ҳосил кардани мавҷҳои электромагнитӣ. Таҷрибаҳои Хертс

Ба вучуд омадану паҳн шудани майдони электромагнитӣ, яъне мавҷи электромагнитиро Максвелл ханӯз с. 1865-1867 ба тарзи назариявӣ дар асоси таҳлили муодилаҳои (§4.13-4.14) пешгӯӣ карда буд. Тавре ки закр ёфт, барои ҳосил кардани мавҷҳои электромагнитӣ ангезонидани майдони тағйирёбандаи электрӣ ё магнитӣ лозим меояд

ва ин раванд тавассути контурҳои лаппиш амалӣ гардонда мешавад. Вале контурҳои мукаррарие, ки оид ба онҳо дар §5.1 муҳокимаронӣ карда будем, барои ин амал чандон созгор нестанд. Дар онҳо майдонҳои электрию магнитӣ фазоҳои андозахояшон хеле хурди маҳдудро дарбар мегиранд: майдони электрӣ фақат дар фосилаи байни рӯяҳои конденсатор, майдони магнитӣ бошад, танҳо андаруни печаҳои ғалтаки индуктиви контур вучуд дошта метавонанду бас. Гузашта аз ин, басомадҳои тағйироти майдонҳо дар он контурҳо чандон баланд нестанд. Ҳол он ки барои ба масофаҳои нисбатан дур паҳн гардидани лаппишҳо, тавре ки тадқиқоти ҷиддии лаппиш ва мавҷҳои механикӣ нишон доданд, басомадҳои онҳоро ҳадалимкон баланд бардоштан лозим меояд. Ин мувофиқи формулаи Томсон (5.4)-(5.5) ғунҷоиши конденсатор ва ғалтаки индуктиви контури лаппишро ба қадри имкон кам карданро тақозо менамояд. Аз ин рӯ олими олмонӣ Х. Ҳертс (1857-1894) аввалин шуда мавҷҳои электромагнитиро ба тарзи таҷрибавӣ ҳосил кард (с. 1887). Ӯ контуреро сохт, ки ҳоло *вибратори Ҳертс* ном гирифтааст (аз лотинии *vibrare*-лаппиш, майл хӯрдан). Ҳертс пеш аз ҳама шумораи печаҳои ғалтаки индуктивӣ ва масоҳати рӯяҳои конденсатори контурро харҷӣ кам гирифта, барои афзудани фазоҳои майдонҳои электрию магнитӣ дарбаргиранда аз контури пӯшида (расми 5.11, *а*) ба контури кушоди лаппиш (расми 5.11 *б, в*) ва дар натиҷа басомадҳои 100-1000 МҲс ( $10^8$ - $10^9$  Ҳс)-ро ҳосил кард, ки ба дарозииҳои мавҷи якчанд метр рост меояд. Минбаъд ин схемаро дар шакли аз ду лавҳаи ноқилии ба курачаҳои металлӣ васлкардаи аз ҳам бо фосилаи ҳавоии хурди шароравӣ *Ш* ҷудоро гирифта, ба индикатори Румкорф *ИР* пайваस्त (расми 5.11, *г*). Маҳз дар ҳамин шакл контури лаппиш ба вибратори Ҳертс табдил ёфт.



Расми 5.11

Хотирнишон кардан бамаврид аст, ки индуктори Румкорфро чун трансформатори аввалин ҳисобидан равоқ ва онро ихтироъкор Х.Д. Румкорф (1803-1877) дар Париж с. 1851 сохта буд. Ин дастгоҳ аз дилаки ба намуди дастаи парчаҳои ноқилҳои оҳанини дар рӯяшон якчанд печаҳои аввали симини нисбатан ғафси изолятсияпӯш (диаметрашон 2 мм ва аз болои онҳо печаҳои дуҷуми шумораашон хеле зиёд, бештар аз 50 000 (аз сими борики диаметраш анқариб 0,1 мм) таркибёфта иборат мебошад. Печаҳои аввалин тавассути калиди катъуваслсозанда ба занҷири аккумулятор пайваस्त аст. Дар натиҷа дар нӯғҳои печаҳои дуҷум шиддати баланди тағйирёбанда ангезонида мешавад. Замоне ки бузургии шиддати байни курачаҳои металлӣ ба қимати раҳнасосандаи фосилаи ҳавоӣ баробар мегардад, дар ин фосила шарора мепараду чараёни безарядшавӣ сурат мегирад, яъне



барки миниётурӣ сар мезанад. Хамин ки дар натиҷа потенциалҳои кураҷаҳо баробар мешаванд, ҷараёни зикргардида катъ меёбад. Сипас, шиддати байни кураҷаҳо аз нав меафзояду паридани шарора такроран рӯй медиҳад ва ҳоказо. Маҳз дар атрофи хамин ҷараёни безарядшавии тез-тез такрорёбанда майдони магнитии тағйирёбандаи баландбасомад меангезад ва он акнун фазои атрофи милаҳоро дарбар гирифта, дар навбати худ майдони электрии индуксиониро тавлид менамояд. Барои ошкор соختани мавҷи ҳосилшуда Ҳертс дар масофае аз вибратораи контури ноқилии дойравӣ ё чоркунҷашакли дорои фосилаи ҳавоии шарорапар ҷойгир намуд ва он *резонатор* ном гирифт. Зеро, агар сатҳи контури он нисбат ба вибратор тавре воқеъ гардад, ки хатҳои майдони магнитии мавҷи электромагнитии вибратор афканда сатҳи контурро ҳарчӣ зиёдтар бурида гузаранд, дар резонатор ҚЭХ-и индуксионӣ ангезонида мешавад. Ба вучуд омадани ин ҚЭХ боиси дар фосилаи ҳавоии резонатор паридани шарора мегардид, ки ҳарчанд хеле хурд буд ва барои онро мушоҳида кардан таҷрибаро шабона гузаронидан лозим меомад. Ҳертс шакл ва андозаҳои контурро тағйир дода, ба пурзӯр шудани шарора ноил гашт, ки ба қимати амплитудавии ҚЭХ-и индуксионӣ рост меомад. Ин пурзӯршавии шарора аз резонанси лаппишҳои вибратор ва контури қабул рӯйдода дарак меод. Резонатор ном гирифтани ин контур аз хамин ҷост. Бо ин таҷрибаҳои Ҳертс тарзи ангезиш ва қабули мавҷҳои электромагнитиро кашф кард.

Дарозии мавҷе ки Ҳертс бо ёрии вибратор ҳосил кард,  $\lambda = 3 \text{ м}$  буд. Профессори донишгоҳи Москва П.Н. Лебедев (1866-1912) вибратори миниётурии милаҷаҳояш платинӣ сохта, мавҷи дарозиаи  $\lambda = 6 - 4 \text{ мм}$ -ро с. 1900 дастраст гардонд. Соли 1923 физики шӯравӣ Глаголева-Аркадьева (1884-1945) бо усули ҳосил кардани шарора дар байни оҳансҳои андаруни равшан муаллақбуда мавҷҳои электромагнитии дарозиашон аз 50 мм то 80 мкм-ро ангезонид. Сипас, солҳои бистуми садаи 20 мавҷҳои электромагнитӣ бо ёрии лампаҳои электронӣ, минбаъд аз солҳои панҷоҳӯм тавассути генераторҳои транзистории баландбасомади бардавом мавҷҳои пуриктидори синусоидавии дарозихои мавҷашон дилхоҳро ба вучуд меовардагӣ шуданд.

Ҳамин тариқ, аз оғози таҷрибаҳои Ҳертс ва минбаъд тадқиқоти олимони дигар мавҷҳои электромагнитии дарозихои мавҷашон ихтиёрӣ ангезонида, тамоми ҳулосаҳои аз муодилаҳои Максвелл гирифта дар амалия татбиқ карда шуданд. Ба хусус, маълум гардид, ки мавҷҳои электромагнитӣ пурра ба қонунҳои паҳншавии рӯшноӣ дар муҳитҳои гуногун, инъикос, шикаст ва ҳатто дисперсия рӯшноӣ то ба бунёд соختани назарияи электромагнитӣ муқарраргардида мувофиқанд. Ин ҳулосаҳоро чун гувоҳи пирӯзӣ ва ба тарзи таҷрибавӣ қомилан тасдиқ шудани назарияи электромагнитии Максвелл эълон кардан равост.

**Мисоли 5.5.** Контури лаппиш аз конденсатори ғунҷоӣшаш  $C = 0,5 \text{ мкФ}$  ва ғалтаки индуктивияташ  $L = 0,5 \text{ мкҲн}$  таркиб ёфтааст. Дарозии мавҷи электромагнитие, ки контур меафканад, ёфта шавад.



Маълумот:

$$L = 0,5 \text{ мкХН} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ ХН}$$

$$C = 0,5 \text{ мкФ} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}$$

$\lambda - ?$

Ҳал

Дарозии мавҷе, ки контур меафканад, бо формулаи:

$$\lambda = \mathcal{L}$$

муайян карда мешавад.

Дар ин ҷо  $\mathcal{L}$ -суръати паҳншавии мавҷи электромагнитӣ, ки дар вакуум (амалан ҳаво) ба суръати рӯшноӣ баробар аст:  $\mathcal{L} = c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ ,  $T$ -даври лаппишҳои электромагнитӣ буда, онро бо формулаи Томсон дарёфта метавонем:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Аз ин рӯ:

$$\lambda = 2\pi c\sqrt{LC} = 2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot \sqrt{5 \cdot 10^{-7} \text{ ГН} \cdot 5 \cdot 10^{-7} \text{ Ф}} = 942,5 \text{ м}$$

будааст.

Ҷавоб:  $\lambda = 942,5 \text{ м}$ .

**Мисоли 5.6.** Контури лаппиши дастгоҳи қабул (резонатор) аз конденсатори ҳамвори ҳавоии масоҳати ҳар яке аз рӯяхояш  $S = 100 \text{ см}^2$  ва ғалтаки индуктивияташ  $L = 1 \text{ мкХН}$  иборат мебошад. Барои он, ки ин контур ба мавҷи электромагнитии дарозиаш  $\lambda = 10 \text{ м}$  чӯр гардад (ба резонанс дарояд) фосилаи байни рӯяхои конденсатор чӣ қадар бояд бошад?

Маълумот:

$$L = 1 \text{ мкХН} = 10^{-6} \text{ ХН}$$

$$S = 100 \text{ см}^2 = 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$\lambda = 10 \text{ м}$$

$d - ?$

Ҳал

Мувофиқи формулаи дар масъалаи 5.4 оварда:

$$\lambda = cT = 2\pi c\sqrt{LC}$$

мебошад. Агар ба эътибор гирем, ки барои ҳаво нуфузпазирии нисбии диэлектрикӣ  $\varepsilon \approx 1$  буда,

ғунҷоиши конденсатори ҳамвор дар ин ҳол бо формулаи

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$$

муайян карда мешавад ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ )

$$\lambda = 2\pi c\sqrt{L \frac{\varepsilon_0 S}{d}}$$

буданаш маълум мегардад. Аз ин рӯ фосилаи матлуб  $d$  - ро ёфтан душвор нест:

$$d = \frac{4\pi^2 c^2 L \varepsilon_0 S}{\lambda^2} = \frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 \cdot 10^{-6} \text{ ГН} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 10^{-2} \text{ м}^2}{(10 \text{ м})^2}$$

$$= 3,14 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 3,14 \text{ мм}$$

Ҷавоб:  $d \approx 3,14 \text{ мм}$

## §5.7. Энергияи мавҷҳои электромагнитӣ. Вектори Умову Пойтинг

Мавҷҳои электромагнитӣ чун ҳар гуна мавҷ интиқолдиҳандаи энергияанд. Дорандаи ин энергия майдони ягонаи электромагнитӣ мебошад, ки дар фазо паҳн гардида, мавҷи электромагнитиро ташкил медиҳад.

Тавре ки маълум аст, зичии ҳаҷмии энергияи майдонҳои электрию магнитӣ мувофиқан бо формулаҳои:

$$w_E = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2; \quad w_M = \frac{1}{2} \mu \mu_0 H^2 \quad (5.50)$$

муайян карда мешаванд (дар ин ҷо  $E$  ва  $H$  шадидиятҳои ин майдонҳоянд). Аз ин рӯ зичии ҳаҷмии энергияи майдони ягонаи электромагнитиро чун:

$$w = w_E + w_M = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu \mu_0 H^2 \quad (5.51)$$

пешниҳод кардан раво аст, ки бо дарназардошти (5.39), (5.47) ва (5.49) ин ифода ро ба намуди:

$$w = \varepsilon \varepsilon_0 E^2 = \mu \mu_0 H^2 = \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0} E \cdot \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0} E = \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0} E \cdot \sqrt{\mu \mu_0} H = \frac{\sqrt{\varepsilon \mu}}{c} EH = \frac{1}{g} EH \quad (5.52)$$

оварда метавонем.

Энергияе, ки ҳар гуна мавҷ дар тӯли вақти  $1$  с аз сатҳи воҳидии ба самти паҳншавии мавҷ амудан ҷойгирбуда интиқол медиҳад, бо бузургии ба истилоҳ *зичии сели энергия* тавсиф ёфтанаширо хотиррасон менамоем. Зичии сели энергия чун векторе доништа мешавад, ки бо вектори суръати паҳншавии мавҷ ҳамсамт аст ва модули онро бо формулаи:

$$J = w g \quad (5.53)$$

муайян мекунанд, ки дар он  $g$ -суръати мавҷ мебошад. Қимати миёнаи зичии сели энергияро *интенсивияти мавҷ* меноманд.

Ёдрас мешавем, ки мафҳуми зичии сели энергияро барои мавҷҳои механикӣ с. 1874 олими рус Н.А. Умов (1846-1915) ворид карда буд. Соли 1884, яъне 10 сол дертар чунин векторро барои мавҷҳои электромагнитӣ олими англис Ч.Х. Пойтинг (1852-1914) пешниҳод кард ва чандон аз рӯи инсоф нест, ки дар адабиёти ғайрирусӣ онро *вектори Пойтинг* меноманд. Дуруст мебуд вектори зикрфтаро чун *вектори Умову Пойтинг* ёд бинмоем.

Пас, зичии сели энергияи мавҷи электромагнитӣ бо дарназардошти (5.52) ва (5.53) бо формулаи:

$$J = EH \quad (5.54)$$

муайян карда мешавад. Агар ба эътибор гирем, ки дар мавҷи электромагнитӣ шадидиятҳои майдонҳои электрию магнитӣ ба ҳам амуданд ва ҳосили зарби вектории  $[\vec{E}\vec{H}]$  бо вектори суръати паҳншавии мавҷ ҳамсамт аст, (5.54)-ро ба тарзи векторӣ чунин пешниҳод карда метавонем:

$$\vec{J} = [\vec{E}\vec{H}] \quad (5.55)$$

Усули ҳисоби энергияи мавҷи электромагнитиро тавассути вектори Умову Пойтинг дар мисоли оддӣ баррасӣ менамоем.

Энергияе, ки чараёни электрии куввааш  $I$  дар тӯли  $l$  с аз ноқили цилиндрашакли дарозиаш  $l$ , радиуси масоҳати арзиаш  $r$  ва муқовиматаш  $R$  интиқол медиҳад:

$$P = I^2 R$$

ва майдони электро дар тӯли ноқили дарозиаш  $l$  дар холи дар нӯгҳояш шиддати  $U$  будан:

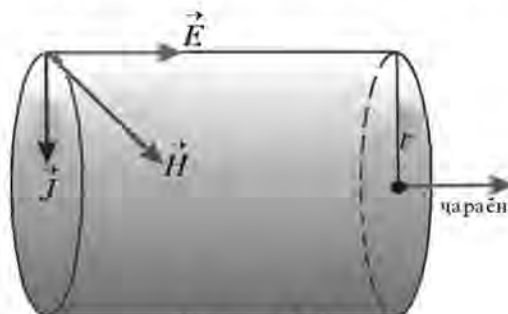
$$E = \frac{U}{l} = \frac{IR}{l}$$

сабт кардан равоаст.

Акнун ба эътибор мегирем, ки шадидияти майдони магнитии чараёни куввааш  $I$  дар сатҳи ноқил мувофиқи (3.36) бо формулаи:

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

муайян карда мешавад ва самти  $\vec{H}$  ба вектори  $\vec{E}$  (ба рафти чараён равона буданастро хотиррасон менамоем) амуд аст (расми 5.12).



Расми 5.12

Аз ин рӯ:

$$J = EH = \frac{IR}{l} \cdot \frac{I}{2\pi r} = \frac{I^2 R}{2\pi r l} = \frac{P}{S_n} \quad (5.56)$$

буданастро маълум мегардад. Азбаски  $S_n = 2\pi r l$  масоҳати сатҳи паҳлӯии ноқил мебошад, (5.56) энергияро муайян менамоед, ки дар тӯли  $l$  с ба ҳаҷми ноқил тавассути сатҳи паҳлӯии ин ноқил ворид мешавад. Ба ин ҳулоса самти вектори Умову Пойтинг гувоҳӣ медиҳад, ки дар расми 5.12 нишон дода шудааст.

Дикқатангез мебошад, ки назария аз майдони электромагнитии дар атрофи ноқили чараёндор мавҷудбуда ба ҳаҷми ноқил ворид шудани энергияро муқаррар менамоед. Симхо бошанд, интиқоли энергияи майдони электромагнитиро раҳнамун месозанд.

Ҳамин тариқ, иқтидоре, ки дар занҷири электрӣ вусъат дода мешавад, ба тарзи зайл интиқол меёбад: генератор майдони электромагнитиро ангишиш медиҳад, ноқилҳо самти паҳшӯбии ин майдонро муайян менамоенд ва энергияро аз майдони электромагнитӣ гӯё «фурӯ» мебаранд ва ба навъҳои дигари энергия – механикӣ, гармӣ, рӯшноӣ ва ғайра табдил медиҳанд. Дар дастгоҳҳои радио ва телевизион низ воқеа ҳамин тарз сурат мегирад: антеннаҳои генератори лаппишҳои баландбасомади бардавом майдони тағйирёбандаи электромагнитиро паҳш менамоед, антеннаҳои стансияҳои қабул бошанд, энергияи майдоне, ки то онҳо омада

мерасад, тавассути ходисаи индуксияи электромагнитӣ «фурӯ» мебаранд ва табдили минбаъда дар манзара, садо ва ғайра чараён мегирад.

**Мисоли 5.7.** Дар вакуум мавҷи электромагнитии қимати амплитудавии шадидияти майдони электрияш  $E_m = 50 \text{ мВ/м}$  паҳн мешавад. Интенсивияти мавҷро муайян намоед.

*Маълумот:*

$$E_m = 50 \text{ мВ/м} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ В/м}$$

$J - ?$

*Ҳал*

Мо мавриди соддатарин-мавҷи электромагнитии мувофиқи (5.48) тариқи муодилаҳои:

$$E_z = E_m \sin(\omega t - kx),$$

$$H_z = H_m \sin(\omega t - kx)$$

пешниҳод шуданашонро ба эътибор мегирем.

Аз ин рӯ мувофиқи таърифи интенсивияти мавҷ:

$$J = \langle EH \rangle = E_m H_m \sin^2(\omega t - kx)$$

мебошад. Азбаски дар майдони ягонаи электромагнитӣ дар асоси (5.49):

$$\sqrt{\epsilon \epsilon_0} E_m = \sqrt{\mu \mu_0} H_m \text{ ва } H_m = \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0}{\mu \mu_0}} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu \mu_0}} E_m,$$

аст,

$$J = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_m^2,$$

инчунин

$$\langle \sin^2(\omega t - kx) \rangle = \frac{1}{2}$$

буданашро ба эътибор гирифтаем. Пас,

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} E_m^2 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} = \frac{1}{2} (5 \cdot 10^{-2} \text{ В/м})^2 \sqrt{\frac{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}}} = \\ &= 33,18 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \approx 3,32 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 3,32 \frac{\text{мкВт}}{\text{м}^2}. \end{aligned}$$

*Ҷавоб.*  $J = 3,32 \frac{\text{мкВт}}{\text{м}^2}.$

### §5.8. Шкалаи мавҷҳои электромагнитӣ

Дарозии мавҷҳои электромагнитие, ки Х. Хертс ҳосил карда буд, якчанд метрро ташкил меод. Тавре ки зикр ёфт, профессори донишгоҳи Москва П.Н. Лебедев дарозии мавҷҳои бо тарзи таҷрибавӣ ҳосилшавандаро с. 1900 сӯйи мавҷҳои кӯтоҳ то  $\lambda = 6 \text{ мм}$  расонд. Минбаъд тадқиқотчиёни дигар мавҷҳои дарозашон то



$\lambda = 0,08$  мм-ро ҳосил карданд. Олими олмонӣ Х. Рубенс (1865-1922) мавҷҳои дарозашон  $\lambda = 60$  мкм-ро дастрас гардонд.

Ҳоло зарраҳои заряднокро ба ҳаракатҳои имконпазири лаппишнок дароварда, фосилаи дарозии мавҷҳои электромагнитии аз  $\lambda = 0$  то  $\lambda = 10^{-14}$  м-ро ба қайд гирифтаанд. Дарвоқеъ, ин гуна лаппишҳо дар хатҳои интиқоли электрӣ, антеннаҳои стансияҳои радио ва телевизион, телефонҳои мобилӣ, манкал (гармидиханда)-ҳои микромавҷӣ дастгоҳҳои радиолокатионӣ, лазерҳо, ҷароғҳои электрии тафсишӣ ва люменесцентӣ, аппаратҳои рентгенӣ, моддаҳои радиоактив ба вуҷуд меоянд. Мувофиқи дарозии мавҷ ё басомадҳои онҳо тамоми мавҷҳои электромагнитиро шартан ба диапазон (фосила)-ҳои алоҳида-мавҷҳои радио, шуоъҳои инфрасурх, рӯшноии намоён, шуоъҳои ултрабунафш, шуоъҳои рентгенӣ, гамма-шуоъҳо ҷудо мекунанд, вале худудҳои ин диапазонҳо қатъӣ нестанд.

Ҳарчанд ҳама ин мавҷҳо табиати ягона доранд-мавҷҳои электромагнитиву бо тарзи ангезиш, паҳншавӣ, инъикос, шикаст, соҳаҳои татбиқ, ҳамтаъсирот бо модда, усулҳои қайдашон фарқ доранд.

Дар поён ин диапазонҳоро мухтасар тавсиф дода, бо баъзе хусусиятҳо, манбаъҳои онҳо, инчунин бо ҷанде аз татбиқҳои онҳо ва хосиятҳои онҳо шинос менамоем.

Ба **мавҷҳои радио** басомадҳои  $20 \text{ кГц} - 1 \text{ ГГц}$  (дарозҳои мавҷи  $\lambda = 0,3 - 1,5 \cdot 10^4 \text{ м}$ ) мансуб доништа мешаванд. Манбаи онҳо ҷараёнҳои тағйирёбандаи дар контурҳои лаппиш суратгирандаанд. Онҳоро барои паҳши ахборот дар масофаҳои дур (радиошунавоӣ, телевизион, телефонҳои мобилӣ, радиолокатионӣ) истифода мекунанд. Аз ҷумла мавҷҳои фавкулбаландбасомад (ба лафзи русӣ СВЧ волни) –  $\nu = 10^9 \text{ Гц} - 10^{11} \text{ Гц}$  ( $\lambda = 1 \text{ мм} - 0,3 \text{ м}$ ) дар натиҷаи тағйироти суръати ҷарҳизии молекулаҳои модда ангезонида мешаванд ва барои алоқаи қайҳонӣ, гармидихандаҳои микромавҷӣ дар рӯзгор татбиқ мекунанд.

Афканишоти ба ҷашм нонамоёни ба ном **шуоъҳои инфрасурх** басомадҳои  $3 \cdot 10^{11} - 3,85 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$  ( $\lambda = 780 \text{ нм} - 1 \text{ мм}$ )-ро дарбар мегиранд. Манбаи онҳо лаппиш ва гардишҳои молекулаҳои модда мебошанд. Мавҷҳои ин соҳаро асосан ҷисмҳои тафсон меафкананд. Ҳамин аст, ки онҳоро бештар *афканишоти ҳароратӣ* меноманд. Анқариб 50% энергияи Офтоб тавассути мавҷҳои инфрасурх интиқол меёбад ва то ба сатҳи Замин омада мерасад. Интенсивияти зиёдтарини афканишоти бадани инсон ба дарозии мавҷи  $\lambda = 10 \text{ мкм}$  рост меояд. Мавҷҳои ин соҳаро, ки ба температураи ҷисм вобаста аст, барои ҷен кардани температураи онҳо, инчунин мавҷҳои инфрасурхро барои биниши шабона тавассути дурбинҳои махсус ба мақсадҳои ҳарбӣ, тиб истифода мекунанд. Бояд қайд кард, ки телевизор ва видеомагнитофонҳои замонавӣ дар масофаи маҳз тавассути шуоъҳои инфрасурх идора карда мешаванд.

Лозим ба ёдоварист, ки шуоъҳои инфрасурхро с. 1801 ситорашиноси англис У. Ҳершел (1738-1822) кашф кард. Ӯ барои ин термометри ҳассосро дар паси рангҳои сурхи спектри Офтоб ҷойгир

карда ошкор сохт, ки нишондоди термометр дар он соха якбора афзуда меравад.

**Рӯшноии намоён** диапазони ягонаи мавҷҳои электромагнитӣ аст, ки чашми инсон дарк менамояд. Мавҷҳои рӯшноии намоён соҳаи хеле хурд-дарозашон аз 380 нм то 780 нм ( $\nu = 3,85 \cdot 10^{14} - 1,89 \cdot 10^{14}$  Ҳс)-ро ишғол мекунанд бас. Манбаи рӯшноии намоён гузаришҳои электронҳои валентии атому молекулаҳо, инчунин ҳаракати шитобдори зарраҳои озоди заряднок мебошанд. Ҳассосияти зиёдтарини чашми инсон ба дарозии мавҷи  $\lambda = 560$  нм рост меояд. Бояд қайд кард, ки интенсивияти максималии афканишоти Офтоб ва шаффофияти атмосфераи Замин маҳз ба ҳамин дарозии мавҷҳои электромагнитӣ мувофиқ мебошанд. Инсон ахбороти асосӣ оид ба муҳити арофи худро маҳз тавассути рӯшноии намоён мегирад.

Маълум гардид, ки мавҷҳои соҳаи намоён ба шабакияти чашми инсон таъсири физиологӣ расонда, дарки рангро ба вучуд меоранд. Ранг хосияти мавҷҳои электромагнитӣ набуда, натиҷаи таъсири электрокимиявӣ рӯшноӣ ба системаи бинии инсон - чашм, асабҳо ва майна мебошад. Чашми инсон тақрибан ҳафт тобишҳои асосии рангҳо: *сурх* ( $\lambda = 780 - 620$  нм), *норинҷӣ* (620-590 нм), *зард* (590-560 нм), *сабз* (560-500 нм), *нилобӣ* (500-480 нм), *кабуд* (480-450 нм), *бунафш* (450-380 нм)-ро фарқ мекунад.

Рӯшноии намоён ба ҷараёни реаксияҳои кимиёвӣ дар растаниҳо таъсир мерасонад (ин ходиса, тавре ки маълум аст, *фотосинтез* ном дорад). Чунинчӣ, ранги нилобӣ боиси диссоциатсия (таксимот)-и молекулаҳо дар хун гардида, дар кӯдакҳои навзод ба инкишофи касалии зарпарвин мамониат мерасонад. Дар натиҷаи фотосинтез растаниҳо гази карбонатро фуру мебаранд, ки ба хоричшавии оксиген оварда мерасонад ва сабабгори мавҷудияти ҳаёти биологӣ дар рӯи Замин мегарданд. Мувофиқи тадқиқоти олимони соли 200 миллиард тонна карбони дар раванди фотосинтез хоричшаванда ба ташкилҳои молекулаҳои мураккаби органикӣ меоварад, ки табиати Заминро бой мекунад.

**Афканишоти ултрабунафш** басомадҳои  $\nu = 8 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$  Ҳс ( $\lambda = 10 - 380$  нм)-ро дарбар мегирад. Онҳо гузаришҳои электронҳои валентии атому молекулаҳо, инчунин зарядҳои озоди бошито ба ҳаракатманд ба вучуд меоранд. Афканишоти ин соҳа ро с. 1801 олимони И.В. Риттер (1776-1810) кашф карда буд. Ӯ ошкор сохт, ки нукра бо таъсири рӯшноии намоён сиёҳ мешавад. Вале дар соҳаи паси рангҳои бунафши спектри Офтоб нукра бештар сиёҳ мегардад. Ҳамин буд, мавҷудияти афканишоти ултрабунафши ба чашм ноаён муқаррар карда шуд.

Доза (воя)-и хурди афканишоти ултрабунафш ба бадани инсон таъсири шифобахш расонда, боиси синтези витамини *D* мегардад. Вале дозаи зиёди он зараровар аст, зеро пӯсти баданро сӯзонда, сабабгори ба вучуд омадани касалии саратони пӯст шуда метавонад. Афканишоти дарозии мавҷашон  $\lambda < 300$  нм протеин (сафеда)-хоро вайрон карда, ба равандҳои ҳаётӣ дар организм халал мерасонанд.

Ин гуна мавҷҳо, аз ҷониби дигар микроорганизмҳоро нобуд месозанд ва дорои таъсироти бактериякушӣ мебошанд.

Қабати озонии атмосфераи Замин афканишоти дарозии мавҷашон  $\lambda < 320$  нм-ро хуб фуру бурда, хайёти организмҳоро аз таъсироти зараровари афканишоти ултрабунавш эмин медорад.

Бояд қайд кард, ки шишаи тирезаҳо амалан афканишоти ултрабунавшро намегузаронанд, зеро онро асосан оксиди оҳани дар таркиби шиша мавҷудбуда фуру мебарад.

Чашми инсон афканишоти ултрабунавшро дарк намекунад, зеро онҳоро қабати шохмонанди ғӯзайи чашм намегузаронад. Вале баъзе ҳайвонот афканишоти ултрабунавшро мебинанд. Чунончӣ, кабутарҳо дар рӯзҳои офтобинабуда маҳз тавассути ин навъ афканишот самти парвозашонро муайян мекунанд.

**Афканишоти рентгенӣ** фосилаи мавҷҳои дарозиашон  $\lambda = 10^{-12} - 10^{-8}$  м ( $\nu = 3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$  Ҳс)-ро дарбар мегирад. Ин навъ афканишотро с. 1895 олими олмонӣ В.К. Рентген (1845-1923) кашф кард (барои ин кашфиёт ӯ аввалин шуда сазовори ҷойизаи Нобелӣ дар соҳаи физика гардид).

Афканишоти рентгенӣ дар натиҷаи якбора тормозхӯрии электронҳои дар майдони электрии шадидияташ калон то суръатҳои зиёд тезонида- шуда, инчунин гузаришҳои электронҳо дар қабатҳои дохилии атомҳои серэлектронӣ ҷойгирбуда ба вучуд меоянд.

Шуоъҳои рентгенӣ дорои қобилияти аз қабатҳои ғафси моддаҳо гузаштан мебошанд. Онҳо аз лавҳаҳои металли ғафсиашон сантиметрӣ бемалол мегузаранд. Ба мисли он, ки рӯшноии намоён дар паси ҷисмҳои ношаффоф соя ҳосил мекунад, шуоъҳои рентгенӣ дар қафои моддаҳои зичиашон калон соя меафкананд. Ҳамин аст, ки шуоъҳои рентгенӣ хусусан дар тиб татбиқи ба аксар одамон маълум (тадқиқи устухонҳои осебдида, ташҳиси касалиҳои гуногуни узвҳои дигари инсон, ба хусус шуш) ёфтаанд. Гузашта аз ин, шуоъҳои рентгенӣ барои таҳлили сохтори дохилии моддаҳо-панҷараҳои кристаллӣ, молекулаҳо, ошкор сохтани нуксонҳои намунаҳои ҷузъҳои яклухти металли мошинҳо, табоати касалиҳои саратон, соҳаҳои гуногуни криминалистика ва ғайра васеъ истифода мешаванд.

Дозаҳои зиёди афканишоти рентгенӣ ба тағйироти таркиби хун меоварад ва боиси касалиҳои вазнин шуда метавонанд.

Системаҳои мусоиди бақайдгирии шуоъҳои рентгенӣ ва ҷойгир кардани онҳо дар кашфиётҳои кайҳонӣ имконият доданд, ки афканишоти рентгении садҳо ситораҳо, қабатҳои ситораҳои навбунёд ва галактикаҳо омӯхта шаванд.

**Гамма-афканишот (худ гамма-шуоъҳо)** мавҷҳои хастанд, ки дарозии мавҷашон  $\lambda = 10^{-12}$  м ( $\nu > 3 \cdot 10^{20}$  Ҳс) мебошанд. Онҳоро с. 1900 дар таркиби шуоъҳои афкандаи моддаҳои радиоактив олими фаронсавӣ П.У. Виллер (1860-1934) кашф кард. Ҳ шуоъҳои радиоактивро аз майдони пурзӯри магнитӣ гузаронда ошкор сохт, ки қисми он шуоъҳо ба мисли рӯшноӣ майл намехӯрад. Ҳамин тарик, манбайи гамма-шуоъҳо моддаҳои радиоактив буданашон муқаррар гардид. Минбаъд маълум шуд, ки онҳо натиҷаи равандҳои дар ядроҳо



суратгирандаанд. Ҳангоми таркиши аслиҳаҳои ядрои низ гамма-шуоъҳо афканда мешаванд.

Гамма-шуоъҳо назар ба шуоъҳои рентгенӣ дорои қобилияти зиёдтари аз қабатҳои ғафси моддаҳо гузаранда мебошанд. Онҳо аз қабатҳои метрии бетон ва якчанд сантиметрии сурб мегузаранд. Анқариб тамоми гамма-шуоъҳои аз қайҳон омадаро атмосферари Замин фуру мебарад. Ҳамин аст, ки мавҷудияти ҳаёт дар Замин имконпазир мебошад.

Хотирнишон сохтан бамаврид аст, ки Офтоб ба мухити атроф дар тамоми соҳаҳои мавҷҳои электромагнитӣ энергияи анқариб  $10^{26}$  *Ҷ* кадршавандаро хориҷ мекунад. Ин қадар энергия сонияе ба талаф ёфтани зиёда аз як миллион тонн массаи Офтоб мувофиқ мебошад. Агар ба эътибор гирем, ки массаи Офтоб  $2 \cdot 10^{30}$  *к* аст, ингуна талафоти масса тақрибан  $6 \cdot 10^{23}$  сол тӯл қашида метавонад.

## Машқи 5

### Машқи 5

5.1. Контурҳои лапшиш аз конденсатори ғунҷоишаш  $C = 800$  *нФ* ва ғалтаки индуктивияташ  $L = 0,2$  *мҲн* таркиб ёфтааст. Даври лапшишҳои электромагнитӣ дар контур чӣ қадар аст?

$$(T = 2,5 \text{ мкс})$$

5.2. Ба контурҳои лапшиши ғунҷоишаш  $C = 2$  *мкФ* чӣ қадар ғалтаки индуктивият васл сохта, лапшишҳои электромагнитии басомадашон  $\nu = 1000$  *Ҳс* ҳосил карда метавонем?

$$(L = 12,7 \text{ мҲн})$$

5.3 Дар контур лапшишҳои озоди бардавоми ( $R = 0$ ) амплитудаашон  $U_m = 28,2$  *В* сурат мегиранд. ҚЭҲ-и худиндуксияро дар ғалтаки контур ҳангоми ба энергияи электрӣ баробар будани энергияи майдони магнитӣ муайян намоед.

$$0,09(|\mathcal{E}_s| = U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 20 \text{ В})$$

5.4. Фарқи потенциалҳо дар рӯяхҳои конденсатори контурҳои лапшиш мувофиқи қонуни  $U = 50 \cos 1000\pi t$  (*В*) тағйир меёбад. Даври лапшишҳо дар контур чӣ қадар аст?

$$(T = 2 \text{ мс})$$

5.5. Индуктивияти контурҳои дар масъалаи 5.3 овардашударо дар мавриди ғунҷоиши конденсатори контур  $C = 2$  *мкФ* будан дарёбед.

$$(L = 50 \text{ мҲн})$$



5.6. Контури лаппиш аз конденсатори ғунҷоишаш  $C = 5 \text{ мкФ}$  ва ғалтаки индуктивияташ  $L = 0,2 \text{ ХН}$  таркиб ёфтааст. Агар кимати зиёдтарини фарқи потенциалҳои рӯяхои конденсатор  $U_m = 50 \text{ В}$  бошад, дар мавриди ба эътибор нагирифтани муқовимати контур кимати зиёдтарини қувваи ҷараён дар ғалтак чӣ қадар аст?

$$(I_m = 0,25 \text{ А})$$

5.7. Контури лаппиш аз конденсатори ғунҷоишаш  $C = 1 \text{ нФ}$  ва ғалтаки индуктивияташ  $L = 1 \text{ мХН}$  иборат мебошад. Агар конденсатор ба қадри  $U_m = 250 \text{ В}$  заряднок карда шавад, қувваи ҷараён дар контур мувофиқи қадом қонун тағйир меёбад?

*Нишондод.* Ба эътибор гирифта шавад, ки миқдори заряд дар рӯяхои конденсатор мувофиқи қонуни  $q = q_m \sin \omega t$  тағйир меёбад.

$$(I = 0,25 \cos 10^6 t)$$

5.8. Қонуни тағйироти энергияи майдонҳои электрӣ, магнитӣ ва бузургии энергияи пурра барои контури масъалаи 5.7 муайян карда шавад.

$$(W_E = 31,25 \sin^2 10^6 t \text{ мҶ}; W_M = 31,25 \cos^2 10^6 t \text{ мҶ}; W = 31,25 \text{ мҶ})$$

5.9. Нисбати энергияи майдонҳои электрию магнитии контури лаппишро дар лаҳзаи  $t = \frac{1}{8} T$  муайян намоед. Ба эътибор гиред, ки миқдори заряд дар рӯяхои конденсатор мувофиқи қонуни  $q = q_m \sin \omega t$  тағйир меёбад.

$$(W_E / W_M = 1)$$

5.10. Контури лаппиш аз конденсатори ғунҷоишаш  $C = 800 \text{ нФ}$  ва ғалтаки индуктивияташ  $L = 0,2 \text{ мХН}$  таркиб ёфтааст. Даври лаппишҳои электромагнитӣ дар контур ёфта шавад.

$$(T = 2,5 \text{ мкс})$$

5.11. Контури лаппиш аз конденсатори ғунҷоишаш  $C = 50 \text{ мкФ}$ , индуктивияташ  $L = 25 \text{ мХН}$  ва муқовимати ғаёли  $R = 20 \text{ Ом}$  таркиб ёфтааст. Басомади лаппишҳои озоди хомӯшаванда чӣ қадар мебошад? Агар муқовимати ғаёлро ба эътибор нагирем, басомади лаппишҳо чӣ қадар тағйир меёбад?

$$(\nu_1 = 199 \text{ Хс}; \nu_2 = 144 \text{ Хс}; \Delta \nu = 57 \text{ Хс})$$

5.12. Дар тӯли чанд вақт дар контури аз ғалтаки индуктивияташ  $L = 40 \text{ мХН}$ , муқовиматаш  $R = 3 \text{ Ом}$  ва конденсатори заряднок таркибёфта шиддат 2 маротиба кам мешавад?

$$(t = 18,5 \text{ мс})$$

5.13. Мавриди конденсатори ғунчоишаш  $C = 1200 \text{ нФ}$  - ро то шиддати  $U = 500 \text{ В}$  заряднок кардан дар он чӣ қадар энергия захира меёбад ва мавриди конденсаторро ба ғалтаки индуктивияташ  $L = 7,5 \text{ мХн}$  васл сохтан дар контури лаппиши таркибёфта қимати амплитудавии қувваи чараён чӣ қадар мешавад?

$$(W_m = 1,5 \text{ мкҶ}; I_m = 5 \text{ мА})$$

5.14. Судмандии контури лаппишро муайян намоед, ки аз ғалтаки индуктивияташ  $L = 2 \text{ мХн}$ , конденсатори ғунчоишаш  $C = 0,2 \text{ мкФ}$  ва резистори муқовиматаш  $R = 1 \text{ Ом}$  таркиб ёфтааст.

$$(Q = \frac{2\pi L}{RT} = 100)$$

5.15. Декременти хомӯшшавии контуреро муайян намоед, ки дар он баъди  $N = 5$  лаппиши пурра энергия  $n = 8$  маротиб кам мешавад.

$$(\theta = \frac{\ln \sqrt{n}}{N} = 0,21)$$

5.16. Контури лаппиш аз конденсатори ғунчоишаш  $C = 400 \text{ нФ}$ , ғалтаки индуктивияташ  $L = 10 \text{ мХн}$  ва муқовимати  $R = 2 \text{ Ом}$  таркиб ёфтааст. Муайян намоед, ки баъди сипарӣ шудани ду даври лаппиш шиддати рӯяхои конденсатори заряднок чанд маротиб кам мегардад.

$$(n = \frac{U_0}{U} = e^{2\beta T} = 1,286)$$

5.17. Судмандии контур  $Q = 2$  мебошад. Басомади лаппишҳои хомӯшшаванда чанд фоизи басомади хусусии контурро ташкил медиҳад?

$$(x = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{2Q}{\sqrt{1 + 4Q^2}}\right) \cdot 100\% = 3\%)$$

5.18. Контури лаппиш аз конденсатори ғунчоишаш  $\tilde{N} = 0,2 \text{ мкФ}$ , ғалтаки индуктивияташ  $L = 0,5 \text{ мХн}$  ва муқовимати  $R = 10 \text{ Ом}$  таркиб ёфтааст. Дар тӯли чанд вақт шиддати байни рӯяхои коенденсатор  $n = 5$  маротиб кам мешавад?

$$(t = 1,61 \cdot 10^{-4} \text{ н})$$

5.19. Контури лаппиш аз конденсатори ғунчоишаш  $C = 7 \text{ мкФ}$  ғалтаки индуктивияташ  $L = 0,23 \text{ мХн}$  ва муқовимати  $R = 40 \text{ Ом}$  таркиб ёфтааст. Рӯяхои конденсаторро ба кадри  $q_m = 0,56 \text{ мкКл}$

заряднок кардаанд. Даври лаппишҳо ва қонуни тағйироти шиддати байни рӯяхоро муқаррар намоед.

$$(T = 2\pi\sqrt{LC} = 8\text{мс}; U = 80e^{-87t} \cos 250\pi t)$$

5.20. Дар тӯли чанд вақт амплитудай лаппишҳо дар контури аз ғалтаки индуктивияташ  $L = 40 \text{ мХн}$  ва конденсатори ғунҷоишаш  $C = 4,8 \text{ мкФ}$  ташкилёфта ба қадри 2 маротиб кам мешавад?

$$(T = 18,5 \text{ мн})$$

5.21. Басомади лаппишҳои хомӯшишаванда  $\omega = 65 \text{ рад/с}$  аст. Агар судмандии контур  $Q = 2$  бошад, басомади хусусии контурро ёбед.

$$(\omega_0 = \omega\sqrt{1 + \frac{1}{Q^2}} = 72,7 \text{ рад/с})$$

5.22. Тӯли вақтеро муайян намоед, ки амплитудай лаппишҳои хомӯшишавандаи басомадаш  $\nu = 1 \text{ кХс}$  дар контури судмандиаш  $Q = 3,14$ , қадри  $n = 4$  маротиб кам мешавад.

$$(t = \frac{2Q}{\omega} \ln n = 1,4 \text{ мс})$$

5.23. Ғалтаки индуктиви дарозиаш  $l = 25 \text{ см}$ , радиусааш  $r = 2 \text{ см}$  аз  $N = 1000$  печай сими мисин ( $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) - и масоҳати буришгоҳи арзиаш  $S = 1,0 \text{ мм}^2$  таркиб ёфтааст. Ғалтак ба занҷири чараёни тағйирёбандаи басомадаш саноатӣ васл мебошад. Муқовиматҳои фаъол  $R$  ва индуктивӣ  $R_L$  кадом ҳиссаи муқовимати пурра  $Z$  - ро ташкил медиҳанд?

$$\left(\frac{R}{Z} \cdot 100\% = 77,8\%; \frac{R_L}{Z} = 22,2\%\right)$$

5.24. Ду конденсатори ғунҷоишашон  $C_1 = 0,6 \text{ мкФ}$  ва  $C_2 = 0,2 \text{ мкФ}$  - и пай дар пай васлбуда ба занҷири чараёни тағйирёбандаи шиддаташ  $U = 220 \text{ В}$  ва басомадаш  $\nu = 50 \text{ Хс}$  пайвастанд. Қувваи чараёни занҷир  $I$  ва афтиши шиддат дар конденсаторҳо ёфта шавад.

$$\left(I = \frac{2\pi\nu U(C_1 + C_2)}{C_1 C_2} \approx 13,84 \text{ мА}; U_{C_1} = 73 \text{ В}; U_{C_2} = 147 \text{ В}\right)$$

5.25. Ба занҷири чараёни тағйирёбандаи шиддаташ  $U = 220 \text{ В}$  муқовимати фаъол, конденсатор ва ғалтаки индуктивӣ пай дар пай васланд. Агар афтиши шиддат дар конденсатор назар ба афтиши шиддат дар муқовимати фаъол 2 маротиб ( $U_C = 2U_R$ ) ва дар ғалтак 3

маротиб ( $U_L = 3U_R$ ) зиёд бошад, афтиши шиддат дар муқовимати фаъол ёфта шавад.

$$(U_R = \frac{U}{\sqrt{2}} = 156 \text{ В})$$

5.26. Контури қабул аз ғалтаки индуктивияташ  $L = 2 \text{ мХн}$  ва конденсатори ғунҷоишаш  $C = 1800 \text{ нФ}$  таркиб ёфтааст. Контур ба кадом дарозии мавҷ чӯр мебошад?

$$(\lambda = 2\pi c\sqrt{LC} = 113 \text{ м})$$

5.27. Контури лапшиш аз ғалтаки индуктивияташ  $L = 20 \text{ мкХн}$  ва конденсатори ҳамвори масоҳати рӯяхояш  $S = 0,04 \text{ м}^2$ , ки фосилаи байнашон  $d = 1,0 \text{ мм}$  мебошад, ташкил ёфтааст. Агар контур ба дарозии мавҷи  $\lambda = 385 \text{ м}$  чӯр бошад, нуфузпазирии диэлектрикии байни рӯяхои конденсатор  $\varepsilon$  муайян карда шавад.

$$(\varepsilon = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 C^2 \varepsilon_0 S L} = 5,89)$$



## ФОРМУЛАҲОИ АСОСИ

Қонуни бақои заряд:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_N = \sum_{i=1}^N q_i = \text{const}.$$

Қонуни Кулон:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}; \quad F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}.$$

Шаидияти майдони электрӣ:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}.$$

Шаидияти майдони электрии заряди нуқтавӣ:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{\epsilon r^2}.$$

Қувваи электрӣ:

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

Принсипи суперпозитсияи майдонҳо:

$$E = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_N = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i.$$

Шаидияти майдони диполи электрӣ дар меҳвараш:

$$\vec{E}_c = k \frac{2\vec{p}_e}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\vec{p}_e}{r^3}.$$

Сели шаидияти майдони электрӣ:

$$\Phi_e = E S \cos\alpha.$$

Теоремаи Гаусс:

$$\Phi_e = \oint_S E_n dS = \oint_S E dS \cos\alpha = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i.$$

Шаидияти майдони зарядҳои дар ҳамвори беохир мунтазам бо зичии сатҳии  $\sigma = q/S$  ( $\text{Кл/м}^2$ ) тақсимшуда:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}.$$

Шаидияти майдони ду ҳамвори беохири параллелии мунтазам, вале гуногунчунин заряднок:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}.$$

Шаидияти майдони ноқили шаклаш силиндри борику дароз (сим) - и мунтазам бо зичии хаттии  $\lambda = q/l$  ( $\text{Кл/м}$ ) заряднок ( $l$  - дарозии ноқил,  $q$  - заряди он):

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r}.$$

Шаидияти майдони сатҳи сферавии радиусаш  $R$ -и мунтазам заряднок:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}.$$

Шаидияти майдони кураи мунтазам бо зичии ҳаҷмии  $\tau = q/V$  ( $Kл/м^3$ ) заряднок:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^3} r; (r > R);$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^3} r (r \leq R).$$

Сиркулятсияи вектори шаидият:

$$\oint_L E_l dl.$$

Энергияи потенциалии ҳамтаъсирот (таъсироти мутақобила) - и ду заряди нуктавӣ:

$$W_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r}.$$

Потенциали нуктаи майдон:

$$\varphi = W_p / q_0.$$

Потенциали майдони заряди нуктавӣ:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r}.$$

Потенциали нуктаи маълуми майдони системаи зарядҳои нуктавӣ:

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{r_i}.$$

Фарқи потенциалҳои ду нуктаи майдон:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q_0}.$$

Таносуби байни шаидият ва потенциал:

$$\vec{E} = -grad\varphi.$$

Таносуби байни шаидияти байни ду нуктаи масофаи байнашон  $d$  дар майдони якҷинса:

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{d} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U}{d};$$

$$U = Ed.$$

Фарқи потенциалҳои ду нуктаи майдони ҳанвори беохири мунтазам заряднок:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{|\sigma|}{2\epsilon_0} (r_2 - r_1).$$

Фарқи потенциалҳои майдони ду ҳамвори беохири параллелии мунтазам, вале гуногунҷинс заряднок:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} (r_2 - r_1) = \frac{q}{\varepsilon_0 S} d.$$

Фарқи потенциалҳои ду нуқтаи майдони сатҳи сферавии мунтазам заряднок:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Фарқи потенциалҳои ду нуқтаи майдони силиндри борики беохир (сим) - и мунтазам заряднок:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Нуфузпазирии нисбии диэлектрикии модда:

$$\varepsilon = \frac{F_0}{F} = \frac{E_0}{E}.$$

Теоремаи Гаусс барои вектори индуксияи электрӣ:

$$\oint_S D_n dS = \sum_{i=1}^n q_{i\text{Озод}} = q_{\text{Озод}}.$$

Ҳуҷҷаҳои электрии ноқили танҳо:

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

Ҳуҷҷаҳои электрии ноқили сферашакл:

$$C = 4\pi\varepsilon_0 \varepsilon R.$$

Ҳуҷҷаҳои ҳаргуна конденсатор:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}.$$

Ҳуҷҷаҳои конденсатори ҳамвор:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}.$$

Ҳуҷҷаҳои конденсатори сферавӣ:

$$C = \frac{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1}.$$

Ҳуҷҷаҳои конденсатори силиндрий:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0 \varepsilon l}{\ln(R_2 / R_1)}.$$

Ҳуҷҷаҳои умумӣ ҳангоми пайвасти параллелии якчанд конденсаторҳо:

$$C_{\text{ум}} = C_1 + C_2 + \dots + C_N = \sum_{i=1}^n C_i;$$

$$C_{\text{ум}} = NC \quad (C_1 = C_2 = \dots = C_N = C).$$

Ҳуҷҷаҳои умумӣ ҳангоми пайвасти пай дар пайи якчанд конденсаторҳо:

$$\frac{1}{C_{\text{y.M}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N};$$

$$C_{\text{y.M}} = \frac{C}{N} \quad (C_1 = C_2 = \dots = C_N = C)$$

Энергияи системаи зарядҳои нуқтавӣ:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N q_i \varphi_i.$$

Энергияи ноқили заряднок:

$$W = \frac{1}{2} q \varphi = \frac{1}{2} C \varphi^2 = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}.$$

Энергияи майдони электростатикӣ:

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 V.$$

Зичии ҳаҷмии энергияи майдони электростатикӣ:

$$w_E = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2.$$

Қувваи ҷараён:

$$I = \frac{dq}{dt}.$$

Зичии ҷараён:

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}.$$

Ҳаракатмандии зарраи заряднок:

$$b = \frac{\langle \mathcal{G} \rangle}{E}.$$

Қувваи электроҳаракатдиханда (ҚЭХ)-и манбаъ:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{тв}}}{q}.$$

$$\varepsilon = \oint_L E_l^* dl = \oint_L E^* dl \cos \alpha$$

Қонуни Ом барои қитъаи якҷинсаи занҷир:

$$I = \frac{U}{R}; \quad U = IR; \quad R = \frac{U}{I}.$$

Муқовимати ноқили дарозиаш  $l$ , масоҳати бурришгоҳи арзиаш  $S$ :

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Вобастагии муқовимати ҳос ба температураи ноқил:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t).$$

Вобастагии муқовимати ноқил ба температура:

$$R = R_0 (1 + \alpha t).$$

Шиддат:



$$U = \varphi_1 - \varphi_2 \pm \varepsilon_{1,2}.$$

Қонуни Ом барои китъаи ғайриҷинсаи занҷир:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm \varepsilon_{1,2}}{R_{1,2}}.$$

Қонуни Ом барои занҷири пурра (сарбаст):

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

Қараёни расиши кӯтоҳ:

$$I_{\max} = \frac{\varepsilon}{r}.$$

Қоидаи якуми Кирхгоф:

$$\sum_{k=1}^N I_k = 0.$$

Қоидаи дуюми Кирхгоф:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i.$$

Пайвасти пай дар пайи резисторҳо:

$$R_{\text{ум}} = R_1 + R_2 + \dots + R_N = \sum_{k=1}^N R_k.$$

Пайвасти параллелии резисторҳо:

$$\frac{1}{R_{\text{ум}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}.$$

Вобастагии ноқилияти ҳоси нимноқилҳо ба температура:

$$\gamma = \gamma_0 e^{\frac{W_a}{kT}}.$$

Қувви амперӣ:

$$dF = B I dl \sin \alpha;$$

$$d\vec{F} = I [d\vec{l} \times \vec{B}].$$

Индуксияи магнитӣ:

$$B = \frac{F_{\max}}{I dl}.$$

Моменти магнити чараён:

$$p_m = IS.$$

Моменти гардишовари майдони магнитӣ:

$$M = p_m B \sin \alpha;$$

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}].$$

Энергияи контури чараёндор дар майдони магнитӣ:

$$W = -p_m B \cos \alpha = -\vec{p}_m \cdot \vec{B}.$$

Қонуни Био-Савар-Лаплас:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}; d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l}\vec{r}]}{r^3}.$$

Таносуби байни векторҳои  $\vec{H}$  ва  $\vec{B}$ :

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0}; \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}.$$

Қонуни Био-Савар-Лаплас барои шадидият:

$$dH = \frac{Idl \sin \alpha}{4\pi r^2}; d\vec{H} = \frac{I[d\vec{l}\vec{r}]}{4\pi r^3}.$$

Индуксияи майдони магнитии чараёни дойиравӣ дар марказаш:

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2R},$$

шадидияти ин майдон:

$$H = \frac{I}{2R}; H = \frac{NI}{2R}.$$

Индуксияи майдони магнитии чараёни дойиравӣ дар меҳвари чараён:

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2R\sqrt{\left(1 + \frac{x^2}{R^2}\right)^3}},$$

шадидияти ин майдон:

$$H = \frac{I}{2R\sqrt{\left(1 + \frac{x^2}{R^2}\right)^3}}.$$

Майдони магнитии чараёни ростхатта:

а) барои қитъаи нокили дарозиаш маҳдуд:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2); H = \frac{I}{4\pi R} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2),$$

б) барои чараёни ростхаттаи беохир:

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi R}; H = \frac{I}{2\pi R}.$$

Қувваи ҳамтаъсири чараёнҳои параллелӣ (қонуни Ампер):

$$F = \mu\mu_0 \frac{I_1 I_2 l}{2\pi d}.$$

Қувваи лоренсӣ:

$$F = q\mathcal{G}B \sin \alpha; \vec{F} = q[\vec{g}\vec{B}]$$

Формулаи Лоренс:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\left[\vec{g}\vec{B}\right].$$

Радиуси даврае, ки зарраи зарядноки суръаташ  $\mathcal{G}$  дар майдони магнитӣ аз рӯи он гардиш мекунад:

$$R = \frac{m g}{qB},$$

суръати кунҷии гардиши зарра:

$$\omega = \frac{qB}{m},$$

даври гардиши зарра:

$$T = \frac{2\pi m}{qB}.$$

Шиддат дар эффекти Холл:

$$U = R_n j B d.$$

Дойимии Холл:

$$R_n = \frac{1}{qn}.$$

Теоремаи оид ба циркулятсияи вектори индуксияи магнитӣ (қонуни ҷараёни пурра):

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k.$$

Майдони магнитии соленоид:

$$B = \mu_0 n l; H = n l.$$

Сели магнитӣ:

$$d\Phi_B = B dS \cos\alpha = B_n dS.$$

Теоремаи Гаусс барои вектори индуксияи магнитӣ:

$$\Phi_B = \oint_S B_n dS = 0.$$

Кори кӯчондани ноқил ва контури ҷараёндор дар майдони магнитӣ:

$$dA = I d\Phi.$$

Қонуни асосии индуксияи электромагнитӣ:

$$\varepsilon_{индук} = -\frac{d\Phi}{dt}; \varepsilon_{индук} = -N \frac{d\Phi}{dt}.$$

Таносуби байни сели майдони магнитии ҷараён ва қувваи ҷараён:

$$\Phi = LI.$$

Индуктивияти соленоид:

$$L = \mu\mu_0 n^2 V.$$

Қувваи электроҳаракатдиҳандаи худиндуксия:

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}.$$

Қонуни тағйироти электраҷараёни васлшавӣ:

$$I = I_0 \left( 1 - e^{-\frac{Rt}{L}} \right).$$

Қонуни тағйироти электраҷараёни қатъшавӣ:

$$I = I_0 e^{-\frac{Rt}{L}}.$$

Энергияи майдони магнитӣ:

$$W = \frac{1}{2} \mu \mu_0 H^2 V = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu \mu_0} V = \frac{1}{2} BHV.$$

Зичии ҳаҷмии энергияи майдони магнитӣ:

$$w_m = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \mu \mu_0 H^2 = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu \mu_0} = \frac{1}{2} BH.$$

Индуктивияти тарафайни ду ғалтаки дилакашон умумӣ:

$$L_{12} = L_{21} = \mu \mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S.$$

Қонуни тағйроти ҚЭХ-и индуксионӣ:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega \Phi_m \sin \omega t = \varepsilon_m \sin \omega t; \varepsilon_m = \omega BS = \omega \Phi_m.$$

Фазаи чараёни тағйирёбанда:

$$\varphi = \omega t = 2\pi \nu t = \frac{2\pi}{T}.$$

Қонуни Ом барои қиматҳои амплитудавии шиддату қувваи чараёни тағйирёбанда:

$$I_m = \frac{U_m}{R_c}.$$

Муқовимати ғунҷоишӣ (реактивӣ):

$$R_c = \frac{1}{\omega C}.$$

Муқовимати индуктивӣ (реактивӣ):

$$R_L = \omega L.$$

Қонунҳои тағйироти шиддат дар занҷири чараёни тағйирёбанда хангоми пайвасти пай дар пайи  $RLC$ :

$$U_R = I_m R \sin \omega t;$$

$$U_C = \frac{I_m}{C\omega} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = I_m R_C \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right);$$

$$U_L = I_m \omega L \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = I_m R_L \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Қонуни Ом барои чараёни тағйирёбанда:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (R_c - R_L)^2}} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}},$$

барои қиматҳои самарабахш (эффektivӣ):

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}}.$$



Муковимати пурраи занчири чараёни тағйирёбанда:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}.$$

Фарқи фазаҳои тағйироти қувваи чараён ва шиддат дар занчири чараёни тағйирёбанда:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_C - R_L}{R} = \frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}.$$

Шарти резонанси электрӣ:

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{LC}.$$

Қувваи чараён дар занчири чараёни тағйирёбанда хангоми пайвасти параллелии  $RLC$ :

$$I = I_R + I_C + I_L;$$

$$U_m = I_{mR} R = \frac{I_{mC}}{\omega C} = I_{mL} \omega L;$$

$$I_m = U_m \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = R \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right);$$

$$I_R = \frac{U_m}{R} \sin \omega t;$$

$$I_C = U_m \omega C \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{U_m}{R_C} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right);$$

$$I_L = \frac{U_m}{\omega L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{U_m}{R_L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right);$$

Декременти хомӯшшавӣ:

$$\delta = \frac{q(t)}{q(t+T)} = e^{\beta T}.$$

Декременти логарифмӣ:

$$\theta = \ln \delta = \ln \frac{q(t)}{q(t+T)} = \beta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N_e}$$

Басомад ва даври лаппишҳои озоди хомӯшшаванда:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}};$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}.$$

Судмандии контур:

$$Q = \frac{\pi}{\theta} = \pi N_e.$$

Қонуни қохиши кувваи чараён:

$$I = \omega_0 q_m e^{-\beta t} \left[ -\frac{\beta}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}} \cos(\omega t + \varphi_0) - \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}} \sin(\omega t + \varphi_0) \right].$$

$$\cos \psi = -\frac{\beta}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}} = -\frac{\beta}{\omega_0}; \quad \sin \psi = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}} = \frac{\omega}{\omega_0};$$

$$I = \omega_0 q_m e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0 + \psi) = I_m e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0 + \psi).$$

Муодилаи лапшишҳои маҷбурӣ:

$$\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{\varepsilon_m}{L} \sin \omega t,$$

ҳалли он:

$$q_m = \frac{\varepsilon_m}{L \sqrt{4\beta^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2}}.$$

Қонуни тағйироти кувваи чараён дар контур бо таъсири манбайи ҚЭХ-аш мувофиқи қонуни гармоникӣ тағйирёбанда:

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R}{\frac{1}{\omega C} - \omega L}.$$

Майдони электрии шадидияташ  $E$ , ки бо суръати  $\mathcal{G}$  паҳн мешаваду майдони магнитии индуксияаш  $B$ -ро тавлид менамояд:

$$B = \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \mathcal{G} E \sin(\vec{\mathcal{G}}, \vec{E});$$

$$\vec{B} = \frac{\varepsilon \mu}{c^2} [\vec{\mathcal{G}}, \vec{E}].$$

Майдони магнитии индуксияаш  $B$ , ки бо суръати  $\mathcal{G}$  паҳн мешаваду майдони электрии шадидияташ  $E$ -ро тавлид менамояд:

$$E = \mathcal{G} B \sin(\vec{\mathcal{G}}, \vec{B});$$

$$\vec{E} = -[\vec{\mathcal{G}} \vec{B}];$$

$$\sin(\vec{\mathcal{G}}, \vec{B}) = \sin(\vec{\mathcal{G}}, \vec{E}) = 1;$$

$$B = \frac{\varepsilon \mu}{c^2} \mathcal{G} E;$$

$$E = \mathcal{G} B.$$

Қонуни Максвелл:

$$\mathcal{G} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}.$$

Муодилаҳои мавҷи электромагнитӣ:

$$E_z = E_m \sin(\omega t - kx);$$

$$B_y = B_m \sin(\omega t - kx).$$

Энергияи мавҷҳои электромагнитӣ:

$$w = w_E + w_M = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu \mu_0 H^2;$$

$$w = \varepsilon \varepsilon_0 E^2 = \mu \mu_0 H^2 = \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0} E \cdot \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0} E = \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0} E \cdot \sqrt{\mu \mu_0} H = \frac{\sqrt{\varepsilon \mu}}{c} EH = \frac{1}{g} EH;$$

$$J = w g.$$

Вектори Умову Пойтинг:

$$J = EH;$$

$$\vec{J} = [\vec{E}\vec{H}].$$

## Феҳрасти мафҳумҳои муҳимтарин

- Автолапишҳо 12,33  
Адади ампер-печаҳо 163  
—— Фарадей 107  
Ампер (воҳиди кувваи ҷараён)  
69,144  
—— бар метр (воҳиди  
шадидияти майдони магнитӣ) 139  
—— метри квадратӣ  
(воҳиди зичии ҷараён) 69  
—— миллиметри  
квадратӣ (воҳиди  
гайрисистемавии зичии  
ҷараён) 69  
——  $\times m^2$  (воҳиди моменти  
магнитии ҷараён) 136  
Ангеза (индуксия)-и электрӣ 50  
Анод 106  
Асбобҳои андозагири электрии  
системашон магнитоэлектрӣ 138  
Афканишоти ионафзо 112  
—— рентгенӣ 246  
—— ултрабунафш 245  
—— хароратӣ 244  
Ақрабаки магнитӣ 131
- База 123  
Басомад ва даври лапишҳои  
хомӯшшаванда 227  
Басомади резонансӣ 192  
Ба ҳам индуксия 181  
Бетатрон 213  
Боди электрӣ 45  
Борбаст 76, 91
- Васли секунҷавӣ дар ҷараёни  
сефаза 198  
—— ситораӣ ————  
—— 198
- Вақти релаксатсия 177, 227  
Вебер (воҳиди сели магнитӣ) 164  
Вектори индуксияи магнитӣ 133  
—— магнитнокшавӣ 207  
—— поляризатсия 49  
—— Умову Пойтинг 241  
Вибратори Хертс 238  
Волт (воҳиди потенциал) 36  
—— бар метр (воҳиди  
шадидияти майдони электрӣ) 19
- Волтметр 36
- Галванопластика 110  
Галваностегия 110  
Гамма-афканишот (гамма-  
шуоҳо) 246  
Гашти бевунёд (холӣ)-и  
Трансформатор 202  
Генератори электростатикӣ 45  
Генрӣ (хенрӣ, воҳиди  
индуктивият) 175  
Гиреҳи занҷир 93  
Градиенти потенциал 39
- Даври ҷараёни  
тағйирёбанда 185  
Датчик (бозгиранда)-и  
Холл 156  
Декременти логарифмӣ 227  
—— хомӯшшавӣ 227  
Диаманетикҳо 204  
Диоди нимнокилӣ 121  
Диполи электрӣ 20  
Диссоциатсияи электролитӣ 105  
Диэлектрикҳо 68  
Дойимии Холл 155  
—— электрӣ 14  
Доменҳо 50, 208  
Дуантҳо 158
- Зарраҳои нейтралӣ 10  
Заряд 6  
Заряди нуқтавӣ 12  
—— элементарӣ (бунёди) 10  
Зарядҳои баста (алоқаманд) 46  
—— индуксионӣ 9  
Зичии иқтидор 101  
—— сели энергия 241  
—— ҳаҷмии энергия 64, 179  
—— ҷараён 69  
—— ҷараёни сершуда 114
- Изоляторҳо 68  
Изотоп 158  
Импеданс 191  
Индуктивият дар занҷири  
ҷараёни тағйирёбанда 188  
Индуктивияти контур 175



- тарафайн 181
- Индуксияи тарафайн 180
- Инжексия 123
- Интенсивияти ионизатор 113
- мавҷ 241
- Ионизатсия 112
- Иктидор (тавоноӣ)-и пурраи манбаъ 91
- Иктидори фойиданок 91
  
- Камони электрӣ** 116
- Катод 106
- Коллектор 123
- Конденсатор 54
- дар занчири чараёни тағйирёбанда 187
- Конденсатори силиндриӣ 56
- сферавӣ 55
- электролитӣ 55
- ҳамвор 55
- Концентратсияи зарядҳои озод 70
- Контури лаппиш 222
- Коеффитсиенти кори фойиданоки манбаъ 91
- температуравии муковимат 75
- трансформатсия 202
  
- Лаппишҳои барқароршуда** 230
- озоди бардавом (хомӯшнашаванда) 224
- хомӯшшаванда 227
- электромагнитӣ 224
  
- Мавҷҳои радио** 244
- Магнетик 204
- Магнит 131
- Магнитнокшавии боқимонда 209
- Магнитостриксия 210
- Майдони гирдбодӣ (тӯфонӣ) 212
- (индуксионӣ)-и Электрӣ 212
- магнитии чараёни дойиравӣ дар марказаш 139
- ростхатта 142
- ягонаи электромагнитӣ 217, 236
- якчинсаи электростатикӣ 27
- Майли магнитӣ 131
- Манбайи чараён 72
- Масс-спектрометр 156
- Мехвари дипол 21
- Микрофарад 54
- Микдори электр 6
- Моддаҳои зӯрмагнитӣ 204, 208
- сузмагнитӣ 204
- Моменти дипол 21
- магнитии чараён 136
- магнитӣ (хусусӣ)-и электрон 205
- Муайян кардани муковимат бо усули Уитстон 97
- Муодилаи дуоми Максвелл 216
- лаппишҳои маҷбуриӣ 230
- озоди хомӯшшаванда 227
- сеюми Максвелл 216
- трансформатор 202
- чоруми Максвелл 216
- якуми Максвелл 214
- қонуни Ом барои электролитҳо 109
- Муковимати индуктивӣ 189
- ҳос 74
- электрӣ 74
- ғунҷоишӣ 188
- Муҳофизакҳо 77
- Муҳофизати электростатикӣ 44
  
- Назарияи классикии Электронӣ** 43, 102
- электромагнитии табиати рӯшноӣ 217
- Намуди дифференсиалии қонуни Ом 100
- Ҷоулу Ленс 104
- интегралии қонуни Ом 100
  
- Нанофарад** 54

Нарммагнит 209  
 Нимноқилҳо  
 Нисбати гирромагнитӣ 205  
 Ноқилият 74  
 Ноқилияти ҳос 100  
 Ноқилҳо 68  
 Ноқилҳои сифрӣ 198, 200  
 ——— фазавӣ 198  
 Ноқилияти ионӣ 106  
 ——— махлутии нимноқилҳо 121  
 ——— *n* – тип 121  
 ——— *p* – тип 121  
 ——— хусусии нимноқилҳо 120  
 Ноқилҳои чинси I 43  
 ——— ——— II 43, 105  
 Нуфузпазирии нисбии магнитии мухит 203  
 ——— ——— электрии мухит 14  
 Нуқтаи Кюри 51  
 ——— ——— барои ферромагнетикҳо 210  
  
 Ом (воҳиди муковимат) 74  
 Ом·м (воҳиди муковимати ҳос) 74  
 Омехтаҳои акцепторӣ 121  
 ——— донорӣ 121  
  
 Пазируфти диэлектрикии модда 49  
 ——— магнитӣ 207  
 Пайвасти омехтаи конденсаторҳо 58  
 ——— пай дар пайи конденсаторҳо 57  
 ——— ——— манбаъҳои ҷараён 96  
 ——— ——— резисторҳо 95  
 ——— параллелии конденсаторҳо 57  
 ——— ——— манбаъҳои ҷараён 96  
 ——— ——— резисторҳо 95  
 Парамагнетикҳо 204  
*p* – *n* гузариш 121  
 Печаҳои аввала 201  
 ——— дуҷумӣ 201

Пикофарад 54  
 Плазмаи 118  
 Плазмаи баландҳарорат 118  
 ——— пастҳарорат 118  
 Поляризатория (қутбнокшавӣ) 48  
 Поляризаторияи боқимонда 51  
 ——— худ аз худ (спонтанӣ) 50  
 Потенсиали майдони заряди нуқтавӣ 36  
 ——— нуқтаи майдон 36  
 ——— ——— майдони системаи Зарядҳо 36  
 Принципи синхронизатория 159  
 ——— суперпозитория (замшуд)-имайдонҳо 20  
 Прессория 206  
 Протон 158  
  
 Рангҳои бунафш 245  
 ——— зард 245  
 ——— кабуд 245  
 ——— нилобӣ 245  
 ——— норинҷӣ 245  
 ——— сабз 245  
 ——— сурх 245  
 Расиши кӯтоҳ 77  
 Рафинатория 109  
 Реаксияи барқароршавӣ 106  
 ——— оксидшавӣ 106  
 Резистор 95  
 ——— дар занҷири ҷараёни тағйирёбанда 186  
 Резонанси параллелӣ 193  
 ——— шиддатҳо 192  
 ——— электрӣ 232  
 ——— ҷараёнҳо 193  
 Резонатор 239  
 Реохорд 97  
 Робитаи баръакси индуктивӣ 234  
 Ростгардон (выпрямитель) 122  
 Ротор 183  
 Рӯшноии намоён 245

Сарбастагии хатҳои магнитӣ 132  
 Сатҳҳои эквипотенсиалӣ 39  
 Сегнетоэлектрикҳо 50  
 Селектори суръатҳо 157  
 Сели магнитӣ 164  
 ——— шадидият 27  
 Сиклотрон 158  
 Силиндри Фарадей 157  
 Сименс (воҳиди нокилият) 74  
 Синхросиклотрон 160  
 Синхротрон 160  
 Синхрофазотрон 160  
 Сиркулятсияи вектори  
     индуксияи магнитӣ 161  
 ——— ——— шадидият 35  
 Скин-эффекти магнитӣ 186  
 ——— ——— электрӣ 185  
 Солват 108  
 Соленоид 162  
 Спин 205  
 Статор 183  
 Судмандӣ 228  
 Суръатфизоҳо 158  
 Суръатфизоҳои хаттӣ 158  
 ——— сиклӣ 158  
  
**Тавсифоти волтампери**  
     тахлия 158  
 Тахлия 112  
 Тахлияи лахчавӣ 117  
 ——— мустақил 114  
 ——— номустақил 114  
 ——— тоҷӣ 116  
 ——— шароравӣ 116  
 Таквиятдиханда (куватфизо) 123  
 Таҷрибаҳои Эрстед 131  
 Температураи гузариш 75  
 ——— ионӣ 118  
 ——— электронӣ 118  
 Теоремаи Гаусс оид ба  
     сиркулятсияи векторӣ  
     индуксияи магнитӣ 164  
 ——— Остроградский-Гаусс 28  
 Термометрҳои муковиматӣ 75  
 Тесла (воҳиди индуксияи  
     магнитӣ) 135

Торикии катодӣ 117  
 Тороид 163  
 Трансформаторҳо 201  
 Трансформаторҳои  
     баландшиддат 202  
 ——— пастшиддат 202  
  
**Фавқунокилият** 75  
 Фаза 198  
 Фазаи чараёни  
     тағйирёбанда 185  
 Фазотрон 160  
 Фарад (воҳиди ғунҷоиши  
     электрӣ) 53  
 Фарқи потенсиалҳои  
     ду нуқтаи майдон 37  
 ——— ——— майдони кураи  
     ҳаҷман мунтазам  
     заряднок 43  
 ——— ——— ——— сатҳи  
     сферавии мунтазам  
     заряднок 42  
 ——— ——— ———  
     силиндри беохир  
     (сим) – и мунтазам  
     заряднок 43  
 ——— ——— ———  
     ҳамвории беохир  
     мунтазам заряднок 41  
 Ферритҳо 210  
 Ферромагнетикҳо 204, 208  
 Ферроэлектрикҳо 50  
 Формулаи Лоренс 150  
 ——— Томсон 224  
 ——— кувваи амперӣ 134  
  
**Хатҳои магнитӣ** 132  
 ——— шадидият 26  
 ——— куввагӣ 26, 132  
 Худиндуксия 175  
  
**Чароғҳои квартсӣ** 117  
 ——— рӯз 118  
 Чип 123  
  
**Шадидияти майдони ду**

хамвории беохир  
параллели мунтазам,  
вале гуногунчинс  
заряднок 30  
——— зарядҳои дар  
хамвории беохир мунтазам  
тақсимшуда 30  
——— магнитӣ 139  
——— электрии ноқили  
шаклаш цилиндри  
борику дароз (сим)-и  
мунтазам заряднок 31  
——— кураи мунтазам  
заряднок 32  
——— электрӣ 19  
——— сатҳи сферавии  
мунтазам заряднок 31

Шарти резонансӣ 232

Шиддат 73

Шиддати раҳнави 56, 114

——— раҳнашавии  
конденсатор 56

——— ҳаттӣ 199

——— фазавӣ 199

Шуоъҳои инфрасурх 244

Эквиваленти кимёвии  
модда 107

Эквиваленти электрокимёвии  
модда 106

Экстраҷараёни васлшавӣ 178

——— катъшавӣ 178

Электретҳо 51

Электришавӣ 6

Электрнокшавӣ 6

Электродинамика 20

Электродҳо 106

Электролиз 106

Электролитҳо 43, 68, 105

Электромметр 9

Электрон 5, 8

Электрон-волт 37

Электронҳои валентӣ 10

Электроскоп 9

Электрӣ 5

Элемент (ҷузъ)-и ҷараён 134

Эмиссияи термоэлектронӣ 117

Эмиттер 123

Энергияи активатсияи атом 119

——— ионизатсия 113

——— конденсатори  
заряднок 62

——— майдони  
электростатикӣ 63

——— ноқили заряднок 62

——— системаи зарядҳои  
нуқтавӣ 61

——— ҳамтаъсироти ду заряди  
нуқтавӣ 36, 61

Эффекти диамагнитӣ 206

——— пьезоэлектрӣ 52

——— транзисторӣ 122

——— Холл 155

Ядро 10, 204

Ғалтаки индуктивӣ 175

Ғунҷоиши электрии ноқил 52

——— электрӣ  
(электроғунҷоиш) 52

Қабати бандкунанда  
(мамнӯъ) 122

Қимати амплитудавӣ  
(зиёдтарини)-и заряди  
рӯяхои конденсатор 188

——— сели магнитӣ 183

——— қувваи ҷараён 185

——— ҚЭҲ 184

Қиматҳои самарабахши  
(эффektivӣ)-и шиддату  
қувваи ҷараёни  
тағйирёбанда 196

Қойидаи дасти рост 134

——— чап 135

——— дуюми Кирхгоф 94

——— Ленс 172

——— якуми Кирхгоф 93

Қонуни Ампер 134

——— асосии индуксияи  
электромагнитӣ 172

——— бақои заряд 11



- Био-Савар-Лаплас 138
- Видеману Франс 104
- дуоми Фарадей оид ба  
Электролиз 107
- якуми Фарадей оид ба  
электролиз 106
- Кюри 208
- Максвелл 237
- Ом дар намуди  
дифференциалӣ 99
- Ом барои киматҳои  
амплитудавии шиддату  
қувваи ҷараёни  
тағйирёбанда 188, 189, 191
- — — — — занҷири пурра  
(сарбаст) 76
- — — — —  
электролитҳо 109
- — — — — китъаи  
якҷинсаи занҷир 76
- — — — — ҷараёни  
ғайриякҷинсаи занҷир 106
- — — — — ҷараёни  
пурра 161
- Ҷоулу Ленс 91
- Қувваи амперӣ 132
- коэффитивӣ 51, 209
- электрӣ 20
- Қувватфизо  
(таквиятдиҳанда) 123
- ҚЭҲ-и манбаъии ҷараён 73
- худиндуксия 175
- Қутбнамо-компас 131
- Қутбҳои магнитӣ 131
- шимолию ҷанубии  
магнитӣ 131
- Ҳалқаи гистерезис**  
(гистерезис) 51, 209
- Ҳаракатмандии зарраи  
Заряднок 69
- ион 109
- Ҳенри (генри, воҳиди  
индуктивият) 115
- Ҳодисаҳои  
магнитомеханикӣ 205
- Ҷамъбасти пурраи муодилаҳои**  
Максвелл 216
- Ҷараёни доимӣ 69
- кӯчишӣ 214
- пурра 161
- рост 122
- сефаза 197
- электрӣ 68
- Ҷараёнҳои гирдбодӣ 212
- квазистатсионарӣ 186
- Фуко 185

1. С.Э.Фриш ва А.В.Тиморева. Курси физикаи умумӣ. «Нашриёти давлатии тоҷик», Душанбе, с.1961, 606 сах.
2. Қ.Комилов, С.Н.Ниёзов, М.Қ.Қурбоналиев. Электростатика ва ҷараёни доимӣ. «УДТ», Душанбе, 1985, 105 сах.
3. Дастури методӣ барои омӯхтани курси электрорадиотехника ва элементҳои техникаи бехатарӣ дар корҳои лабораторӣ (Мураттибон Сабзали Мисров ва Ҷалил Рашидов), Душанбе, с.1986.
4. Ҳ.Саъдуллозода. Асосҳои электродинамика. «Донишгоҳи кишоварзии Тоҷикистон», Душанбе, с.1997, 227 сах.
5. М.Сайдуллоева. Электродинамика. «Маориф», с.2000, 225 с.
6. М.Ҷамолов, С.Н.Каримов, Ф.Қ.Рахимов. Курси физикаи умумӣ. Ҳодисаҳои электромагнитӣ. «ДДМТ», Душанбе, с.2003, 348 сах.
7. Ҳ.Мачидов. Асосҳои электродинамика. Оптика ва физикаи атомӣ. «Эр-граф», Душанбе, с.2007, 425 сах.
8. Корҳои лабораторӣ аз электр ва магнетизм (мураттибон Ҳ.Саъдуллозода, Д.Ақдодов). «ДМТ», Душанбе, с.2007, 157 сах.
9. Н.В.Кашин. Курс физики т. II. «Высшая школа», Москва, с. 1963, 643 сах.
10. Г.Е.Зильберман. Электричество и магнетизм «Наука», Москва, с.1970, 385 сах.
11. Р.В.Телеснин и В.Ф.Яковлев. Курс физики. Электричество. «Просвещение», Москва, с.1970, 487 сах.
12. Берклеевский курс физики. Электричество и магнетизм (Э.Парселл).»Наука», 1975, 440 сах.
13. С.Г.Калашников. Электричество. «Наука», Москва, с.1977, 591 сах.
14. Д.В.Сивухин. Курс общей физики. т. III. Электричество. «Наука», с. 1977, 687 сах.
15. Р.Г.Геворкян. Курс физики. «Высшая школа», Москва, 1979, 656 сах.
16. А.Г.Чертов, А.А.Воробьев. Задачник по физике. «Высшая школа», Москва, с.1981, 495 сах.
17. А.Н. Матвеев. Электричество и магнетизм. «Наука», Москва, с.1983, 463 сах.
18. В.С.Волькенштейн. Сборник задач по общему курсу физики. «Наука», Москва, с.1985, 352 сах.
19. Элементарный учебник физики т. II. Под ред. акад. Г.С.Ландсберга. «Наука», Москва, 1986, 480 сах.
20. А.А.Детлаф, Б.М. Яворский. Курс физики. «Высшая школа», Москва, С.1989, 608 сах.
21. Д.Джанколи. Физика. т. II. «Мир», Москва, с.1989, 668 сах.

22. А.П.Рымкевич. Маҷмӯаи масъалаҳо аз физика. «Маориф», Душанбе, с.1989, 175 сах.
23. R.A. Serway. Physics. Philadelphia Fort Worth Chicago San Francisco, 1996, 1442 p.
24. Т.И.Трофимова, З.Г.Павлова. Сборник задач по курсу физики с решениями. «Высшая школа». Москва, с.1999, 591 сах.
25. С.В.Громов. Физика, 10. «Просвещение», Москва, с. 2003, 383 сах.
26. В.А. Касьянов. Физика, 11. «Дрофа», Москва, с.2004, 414 сах.
27. И.В.Савельев. Курс физики. т.2. «Астрель» АСТ, Москва, с.2005.
28. Т.И.Трофимова. Курс физики. Издательский центр «Академия», Москва, с.2007, 558 сах.
29. Курс физики т.1. Под ред. проф В.Н.Лозовского. «Лань», Санкт-Петербург- Москва- Краснодар, с.2007, 572 сах.

## МУНДАРИЧА

Пешгуфтор.....	3
Муқаддима.....	5
<b>БОБИ I. Электростатика.....</b>	<b>9</b>
§1.1. Электришавӣ. Қонуни бақои заряд.....	9
§1.2. Қонуни Кулон.....	12
§1.3. Майдони электрӣ. Шадиияти майдони электрӣ.....	18
§1.4. Принсипи суперпозитсияи майдонҳо. Майдони диполи электрӣ.....	20
§1.5. Хатҳои шадиият. Сели вектори шадиияти майдони электрӣ.....	26
§1.6. Теоремаи Гаусс ва татбиқҳои амалии он.....	28
§ 1.7. Қори қўчондани заряд дар майдони электростатикӣ.....	33
§1.8. Потенциал. Фарқи потенциалҳо.....	35
§ 1.9. Таносуби байни потенциал ва шадиият.....	38
§1.10. Ҳисоб кардани фарқи потенциалҳо ба воситаи шадиият...41	41
§1.11. Ноқилҳо дар майдони электрӣ.....	43
§1.12. Диэлектрикҳо дар майдони электрӣ.....	46
§1.13. Сегнетоэлектрикҳо. Эффеќти пийезоэлектрӣ.....	50
§1.14. Ғунҷоиши электрӣ.....	52
§1.15. Конденсаторҳо.....	54
§1.16. Пайвасти конденсаторҳо.....	57
§1.17. Энергияи майдони электростатикӣ.....	60
Машқи 1 .....	65
 <b>БОБИ 2. Қонунҳои ҷараёни доимӣ.....</b>	 <b>68</b>
§2.1. Ҷараёни электрӣ. Қувваи ҷараён. Зичии ҷараён.....	68
§2.2. Манбаҳои ҷараён. Қувваи электроҳаракатдиҳандаи Манбаи ҷараён. Шиддат.....	72
§2.3. Қонунҳои Ом.....	73
§2.4. Қор ва иқтидори ҷараён. Қонуни Ҷоулу Ленс.....	91
§2.5. Қоидаҳои Кирхгоф.....	93
§2.6. Намуди дифференсиалии қонунҳои Ом ва Ҷоулу Ленс.....	99
§2.7. Назарияи классикии электронӣ.....	101
§2.8. Ҷараёни электрӣ дар моеъҳо.....	105
§2.9. Ҷараёни электрӣ дар газҳо.....	111
§2.10. Ҷараёни электрӣ дар нимноқилҳо.....	119
§2.11. Хатарҳои ҷараёни электрӣ.....	123
Машқи 2.....	125
 <b>БОБИ 3. Майдонҳои магнитӣ.....</b>	 <b>131</b>
§3.1. Ҳодисаҳои магнитӣ.....	131
§ 3.2 Қувваи амперӣ.....	134
§3.3 Таъсири майдони магнитӣ ба контури ҷараёндор.....	136



§ 3.4. Қонуни Био-Савар-Лаплас.....	138
§3.5 Ҳамтаъсиrotи чараёнҳои параллелӣ.....	143
§3.6. Қувваи лоренсӣ.....	149
§3.7. Ҳаракати зарраҳои заряднок дар майдони якҷинсаи электрӣ.....	150
§3.8.Ҳаракати зарраҳои заряднок дар майдони якҷинсаи магнитӣ.....	153
§3.9. Эффеќти Холл.....	155
§3.10. Масс-спектрометр.....	156
§3.11. Суръатфизоҳои зарраҳои заряднок.....	158
§3.12 Теоремаи оид ба сиркулятсияи вектори индуксияи магнитӣ.....	161
§ 3.13.Сели магнитӣ. Теоремаи Гаусс барои вектори индуксия..	163
§3.14. Кори кӯчондани ноќил ва контури чараёндор дар майдони магнитӣ.....	166
Машқи 3.....	167
БОБИ 4. Ҳодисаҳои электромагнитӣ ва қонунҳои чараёни тағйирёбанда.....	171
§4.1. Таҷрибаҳои Фарадей. Индуксияи электромагнитӣ.....	171
§4.2 Ҳодисаи худиндуксия. Индуктивият.....	175
§4.3. Энергияи майдони магнитӣ.....	179
§4.4. Индуксияи тарафайн.....	180
§4.5. Чараёни тағйирёбанда.....	183
§4.6. Чараёнҳои Фуко.....	185
§4.7. Занҷирҳои чараёни тағйирёбанда.....	186
§4.8. Қонуни Ом барои чараёни тағйирёбанда.....	190
§4.9. Иқтидоре, ки дар занҷири чараёни тағйирёбанда вусъат дода мешавад.....	195
§4.10. Чараёни сефаза.....	197
§4.11. Трансформаторҳо.....	200
§4.12. Хосиятҳои магнитии моддаҳо.....	203
§ 4.13.Муодилаҳои Максвелл.....	212
§4.14.Ҷамъбасти пурраи муодилаҳои Максвелл.Майдони электромагнитӣ.....	216
Машқи 4.....	218
БОБИ 5. Лаппиш ва мавҷҳои электромагнитӣ.....	222
§5.1. Лаппишҳои озоди бардавоми электромагнитӣ.....	222
§5.2. Лаппишҳои озоди хомӯшшаванда.....	226
§5.3. Лаппишҳои маҷбурии электромагнитӣ. Резонанси электрӣ.....	229
§5.4 Генератори лаппишҳои баландбасомади бардавом.....	233
§5.5. Паҳншавии майдони электромагнитӣ.....	234
§5.6. Ҳосил кардани мавҷҳои электромагнитӣ. Таҷрибаҳои Ҳертс.....	237

§5.7. Энергияи мавҷҳои электромагнитӣ.	
Вектори Умову Пойтинг.....	241
§5.8. Шкалаи мавҷҳои электромагнитӣ.....	243
Машқи 5.....	247
Формулаҳои асосӣ.....	252
Феҳрасти мафҳумҳои муҳимтарин.....	263
Адабиёт.....	269