

Лекция №3. Тұрақты электр тогы

- 3.1 Электр тогы. Өткізгіштің кедергісі. Тізбек бөлігі үшін Ом заңы және оның дифференциалдық түрде жазылуы.
- 3.2 Тұрақты ток тізбегінің жұмысы мен қуаты. Джоуль-Ленц заңы және оның дифференциалдық түрде жазылуы.
- 3.3 Ток көзі. Электр қозғаушы күш. Электр қозғаушы күші бар және тұйық тізбек үшін Ом заңы.
- 3.4 Тармақталған тізбек. Кирхгоф ережелері.

3.1 *Электр тогы.* Өткізгіштің екі қарама-қарсы жағында потенциалдар айырымын, яғни оның ішінде электр өрісін тудырса, өріс әсерінен өткізгіш ішінде зарядтар реттелген (бағытталған) қозғалысқа түседі: оң таңбалы зарядтар өріс кернеулігі векторының бағытымен, ал теріс таңбалы зарядтар қарама-қарсы бағытта қозғалады. *Зарядталған бөлшектердің реттелген қозғалысы электр тогы деп аталады.*

Электр тогын тасымалдаушылар оң таңбалы да, теріс таңбалы да зарядтар болуы мүмкін. Теріс таңбалы зарядтардың қозғалыс бағыты шама жағынан тең оң таңбалы зарядтардың қозғалыс бағытына қарама-қарсы болады. Кей жағдайда ток тасымалдаушы бөлшектер тек теріс таңбалы зарядтар ғана болуы мүмкін.

Токтың бағыты ретінде оң таңбалы зарядтардың қозғалыс бағытын қабылдау келісілген. Өткізгіштің екі қарама-қарсы жағында потенциалдар айырымы нөлге теңескенде электр тогы тоқтайды, яғни электр тогы жүруінің міндетті шарттарының бірі - оның екі қарама-қарсы жағында потенциалдар айырымының болуы. Өткізгіш бойымен тұрақты ток жүруі үшін оның ұштарындағы (екі қарама-қарсы жағындағы) потенциалдар айырымы тұрақты болуы керек.

Электр тогын сипаттау үшін ток күші деген шама енгізіледі.

Ток күші деп өткізгіштің көлденең қимасы арқылы бірлік уақыт ішінде тасымалданатын заряд шамасын айтады.

$$I = \frac{dq}{dt} \quad \left[\frac{Кл}{с} \right] = [A] \quad (3.1)$$

Ток күшінің ХБЖ-дегі өлшем бірлігі $\left[\frac{1 Кл}{1 с} \right] = 1 [A]$ -Ампер. (3.1)-өрнек ток күшінің лездік мәнін анықтауға мүмкіндік береді, егер ток күшінің шамасы мен бағыты уақытқа тәуелді болмаса, яғни күшінің шамасы мен бағыты уақыт өтуімен өзгермейтін болса, ондай ток тұрақты ток деп аталады.

$$\text{Тұрақты токтың ток күші: } I = \frac{q}{t} \quad (3.2)$$

Зарядталған бөлшектердің реттелген қозғалысы кезінде зарядтар қозғалыс бағытында таңдап алынған бет бойынша біркелкі таралмауы мүмкін. Мұндай жағдайда электр тогын сан мәні жағынан сипаттау үшін ток тығыздығы деген шама енгізіледі.

Электр тогының тығыздығы деп өткізгіштің ток бағытына перпендикуляр көлденең қимасының бірлік ауданынан өтетін ток күшінің сандық мәнін сипаттайтын векторлық шаманы айтады.

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \cdot \vec{n} \quad (3.3)$$

Ток тығыздығының бағыты реттелген қозғалысқа түскен оң таңбалы зарядтардың қозғалыс бағытымен сәйкес келеді. Ток тығыздығының ХБЖ-дегі өлшем бірлігі $\left[\frac{A}{m^2} \right]$.

Ток ауданы S кез келген тұйық контур арқылы өткенде, ток күші векторлық ағын ретінде келесі интегралды шешу арқылы анықталады:

$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} \quad (3.4)$$

Егер өткізгіш ішінде v жылдамдықпен қозғалатын, заряды e - ге тең ток тасымалдаушы бөлшектердің бірлік көлемдегі саны n болса, онда dt бірлік уақыт ішінде өткізгіштің S көлденең қимасы арқылы өтетін заряд шамасы келесі өрнекпен анықталады: $dq = e \cdot n \cdot v \cdot S \cdot dt$ Олай болса ток күші:

$$I = \frac{dq}{dt} = e \cdot n \cdot v \cdot S \quad \Rightarrow \quad I = e \cdot n \cdot v \cdot S \quad (3.5)$$

$$\text{Ток тығыздығының шамасы: } j = e \cdot n \cdot v \quad (3.6)$$

Өткізгіштің кедергісі. Тізбек бөлігі үшін Ом заңы және оның дифференциалдық түрде жазылуы. Неміс ғалымы Ом тәжірибелер негізінде температура тұрақты ($T = \text{const}$) болған жағдайда өткізгіш ұштарына түсірілген кернеудің оның бойымен өтетін ток күші шамасына қатынасы бір материал үшін әрқашан тұрақты шамаға болатындығын дәлелдеді $\frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} = \dots = \frac{U_n}{I_n} = \rho \cdot \text{const}$.

Бұл тұрақтыны өткізгіштің электр кедергісі деп атайды.

Тұрақты температурада тек өткізгіштің геометриялық өлшемдеріне (ұзындығы мен көлденең қимасының ауданына) және материалының табиғатына ғана тәуелді болатын негізгі электрлік шаманы электр кедергісі деп атайды.

$$\text{Электр кедергісін } R \text{ әрпімен белгілейді. } R = \frac{U}{I} \quad (3.7)$$

$$\text{Электр кедергісінің ХБЖ-дегі өлшем бірлігі } \left[\frac{1B}{1A} \right] = 1 [Om]$$

$$(3.7)\text{-өрнектен } I = \frac{U}{R} \quad (3.8)$$

(3.8)-өрнек тізбек бөлігі үшін Ом заңы деп аталады. Ом заңы былайша тұжырымдалады: тізбек бөлігіндегі ток күшінің шамасы оған түсірілген кернеуге тура пропорционал, ал өткізгіш кедергісіне кері пропорционал.

Әдетте өткізгіштің кедергісімен қатар өткізгіштің өткізгіштігі деген шама қолданылады. Электр өткізгіштігі деп өткізгіштің кедергісіне кері шаманы айтады. Электр өткізгіштігінің өлшем бірлігі Симменс.

$$\mu = \frac{1}{R} \quad [Cm] \quad (3.9)$$

(3.7)-өрнектегі U электр кернеуі немесе потенциалдар айырымы деп аталатын электрлік шама.

Электр кернеуі деп өткізгіштің бір ұшынан екінші ұшына q бірлік зарядты тасымалдағанда электрлік күштердің атқаратын жұмысына тең шаманы айтады, яғни электр зарядын өткізгіштің бір ұшынан екінші ұшына тасымалдағанда табиғаты электрлік болатын күштің атқаратын жұмысының сол заряд шамасына қатынасын айтады.

$$U = \frac{A}{q} \left[\frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}} \right] = [B] \text{ Вольт} \quad (3.10)$$

Табиғаты мен геометриялық өлшемдері әр түрлі көптеген өткізгіштерді арқылы жүргізілген тәжірибелер (Ом) біртекті цилиндр тәрізді өткізгіштердің кедергісі оның ұзындығына тура пропорционал да, көлденең қимасына кері пропорционал болатындығын көрсетеді. $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$ (3.11)

мұндағы: ρ - өткізгіштің меншікті кедергісі деп аталатын пропорционалдық коэффициент, оның өлшем бірлігі $[Ом \cdot м]$. l - өткізгіш сымның ұзындығы, ал S - өткізгіштің көлденең қимасының ауданы.

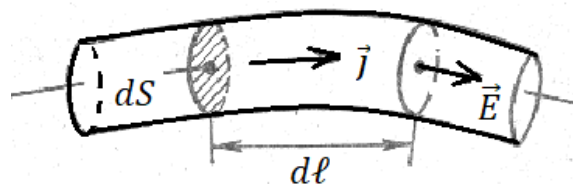
Меншікті кедергіге кері шаманы меншікті өткізгіштік деп атайды. Оны γ әрпімен белгілейді. $\gamma = \frac{1}{\rho} \left[\frac{См}{м} \right]$ (3.12)

Ом заңының дифференциалдық түрде жазылуын қорытып алайық. Цилиндр пішінді өткізгіштің бойымен ток тығыздығы \vec{j} болатын электр тогы жүрсін. Оның ішінен таңдап алынған екі dS көлденең қиманың арақашықтығы dl болсын (3.1-сурет). Өткізгіштің қарастырып отырған бөлігінің ұштарындағы кернеу түсуінің айырымы $dU = E \cdot dl$ болса, тізбек бөлігі үшін Ом заңы:

$$dI = \frac{dU}{\rho \cdot \frac{dl}{dS}} = \frac{E \cdot dl \cdot dS}{\rho \cdot dl} = \frac{E \cdot dS}{\rho} \quad \text{екі жағын да } \frac{1}{dS} \text{ қа көбейткенде, } j = \frac{dI}{dS} \text{ және}$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \text{ екенін ескерсек: } \vec{j} = \gamma \vec{E} \quad (3.13)$$

(3.13)-өрнек Ом заңының дифференциалдық түрде жазылуы болып табылады.



3.1-сурет

Көптеген тәжірибелер көрсеткендей металл өткізгіштердің кедергілері температураға тәуелді болады, температура жоғарылаған сайын кедергі шамасы да артады. Ол тәуелділік келесі өрнекпен анықталады:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha \cdot t) \quad (3.14)$$

мұндағы: R_0 - 0°C температура кезіндегі өткізгіштің кедергісі; R_t - берілген $t^\circ\text{C}$ температураға сәйкес өткізгіш кедергісі, ал α - кедергінің температуралық коэффициенті деп аталатын шама.

Кедергінің температуралық коэффициенті келесі өрнекпен анықталады:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho_0}{dt} \quad (3.15)$$

Кедергінің температуралық коэффициентінің сан мінң көптеген металдар үшін $\alpha \approx \frac{1}{273^0 C} \approx 0.004$. Өткізгіштің меншікті кедергісі (3.15)-өрнектен табылады:

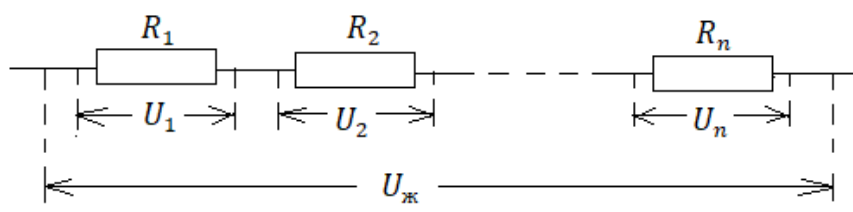
$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha \cdot t) \quad (3.16)$$

Өте төменгі температурада (шамамен $1 \div 8$ К) кейбір металдардың кедергісі кенеттен темендеп, нөлге жуықтайды, бұл құбылысты *асқын өткізгіштік* деп атайды. Асқын өткізгіштік құбылысын ең алғаш голланд физигі Камерлинг-Оннес 1911 жылы сынап (Hg) үшін анықтаған болатын. Уақыт өте келе мырыш, қорғасын, қалайы және тағы басқа металдар мен бірқатар қорытпаларда асқын өткізгіштік қасиеттер байқалды. Асқын өткізгіштік күйдің теориясын Н.Н.Боголюбов жасады.

Электр тізбегін құрастырғанда кейде жүктемелерді өзара тізбектей және параллель жалғауға тура келеді.

Өткізгіштерді (жүктемелерді) өзара тізбектей жалғағанда (3.2-сурет) тізбектің барлық бөліктерінде ток күштері бірдей болады:

$$I_{жс} = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (3.17)$$



3.2-сурет

Бұл жүктемелерге түсетін кернеулердің алгебралық қосындысы жалпы кернеуге тең болады:

$$U_{жс} = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (3.18)$$

Тізбек бөлігі үшін Ом заңынан: $U_{жс} = I_{жс} \cdot R_{жс}$; $U_1 = I_1 \cdot R_1$; $U_2 = I_2 \cdot R_2$... $U_n = I_n \cdot R_n$. Бұл өрнектерді (3.18)-өрнекке қойып, (3.17)-өрнекті ескерсек:

$$R_{жс} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (3.19)$$

(3.19)-өрнектен келесідей қорытынды жасауға болады: *өткізгіштерді өзара тізбектей жалғағанда тізбектің жалпы сыртқы кедергісі жеке өткізгіштердің кедергілерінің алгебралық қосындысына тең болады, яғни тізбектей жалғағанда жалпы кедергі артады.*

Өткізгіштерді (жүктемелерді) өзара параллель жалғағанда (3.3-сурет) тізбектің барлық бөліктерінде кернеу түсулері бірдей болады:

$$U_{жс} = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (3.20)$$

Тізбектің тармақталған бөлігіне дейінгі ток күшінің жалпы мәні тармақталған бөлігіндегі әрбір өткізгіш (жүктеме) арқылы өтетін ток күштерінің алгебралық қосындысына тең болады:

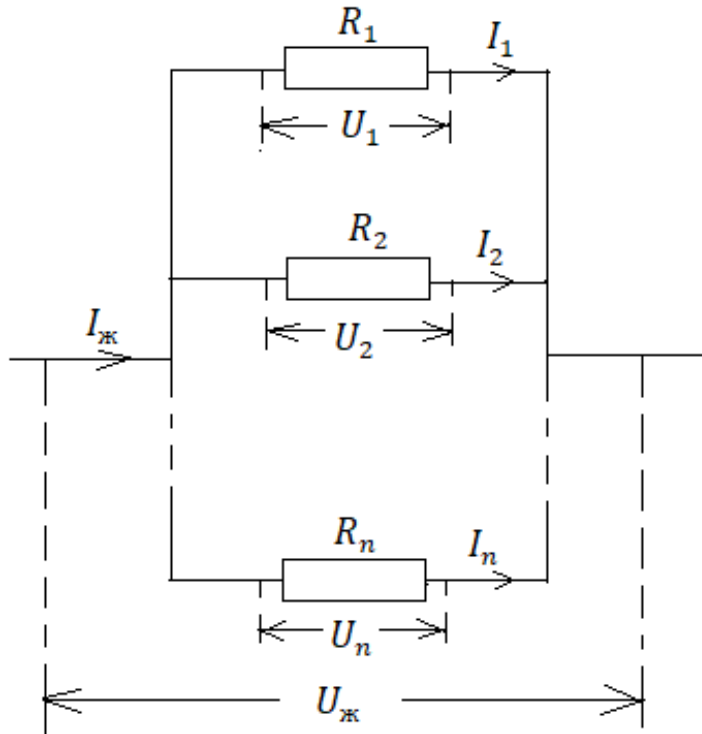
$$I_{жс} = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (3.21)$$

Тізбек бөлігі үшін Ом заңынан: $I_{жс} = \frac{U_{жс}}{R_{жс}}$; $I_1 = \frac{U_1}{R_1}$; $I_2 = \frac{U_2}{R_2}$... $I_3 = \frac{U_3}{R_3}$.

Бұл өрнектерді (3.21)-өрнекке қойып, (3.20)-өрнекті ескерсек:

$$\frac{1}{R_{\text{ж}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (3.22)$$

(3.22)-өрнектен келесідей қорытынды жасауға болады: өткізгіштерді өзара параллель жалғазғанда жалпы сыртқы кедергінің кері шамасы жеке өткізгіштердің кері шамаларының алгебралық қосындысына тең болады, яғни өткізгіштерді өзара параллель жалғазғанда жалпы кедергі кемиді.



3.3-сурет

3.2 Тұрақты ток тізбегінің жұмысы мен қуаты. Джоуль-Ленц заңы және оның дифференциалдық түрде жазылуы. Электр тогы өткізгіш бойымен жүргенде негізгі үш түрлі әсер байқалады: жылулық, химиялық және магниттік (механикалық). Электр тогының жылулық әсері деп өткізгіш бойымен ток жүргенде оның қызып, жылу бөлуін айтады.

Кернеу түсуі U болатын қозғалмайтын өткізгіштің бөлігі арқылы ток күші I электр тогы жүргенде, өткізгіш қызады, бұл зарядтарды тасымалдаушы электр күштерін жұмысымен байланысты болады, яғни $\delta A = dq \cdot U$, мұндағы dq – өткізгіштің көлденең қимасы арқылы dt уақыт ішінде өтетін заряд $dq = I \cdot dt$, олай болса: $\delta A = I \cdot U \cdot dt$. Бұл өрнекті 0-ден t уақыт аралығында интегралдасақ: $A = I \cdot U \cdot t$ (3.23)

(3.23)-өрнек өткізгіш бойымен ток күші I тұрақты электр тогы жүргенде электрлік күштердің атқаратын жұмысын анықтайды.

Қуат деп бірлік уақыт ішінде атқарылған жұмысты айтады, олай болса тұрақты токтың қуаты: $N = \frac{\delta A}{dt} = I \cdot U$ (3.24)

Қозғалмайтын металл өткізгіш бөлігі арқылы t уақыт ішінде ток күші I электр тогы жүргенде электр күштердің атқаратын жұмысы энергияның

сақталу заңына сәйкес өткізгіштен бөлінетін жылу мөлшеріне тең болуы керек: $\delta A = \delta Q \Rightarrow A = Q \Rightarrow Q = I \cdot U \cdot t$. Тізбек бөлігі үшін Ом заңынан: $U = I \cdot R \Rightarrow Q = I^2 \cdot R \cdot t$ (3.25)

(3.25)-өрнек Джоуль-Ленц заңы деп аталады, ол өткізгіштің бойымен өтіп жатқан тұрақты токтың жұмысы сан жағынан өткізгіштен бөлініп шығатын жылу мөлшеріне тең болатынын көрсетеді, өткізгіштен бөлінетін жылу мөлшерін анықтауға мүмкіндік береді.

Джоуль-Ленц заңы былайша тұжырымдалады: *өткізгіштен бөлініп шығатын жылу мөлшері ток күшінің квадратына, өткізгіштің кедергісіне және ток жүрген уақытқа пропорционал болады.*

Джоуль-Ленц заңының дифференциалдық түрде жазылуына қарапайым математикалық түрлендірулер арқылы көшуге болады.

Өткізгіштің dl бөлігі арқылы (3.1-сурет) dt уақыт бірлігі ішінде I ток өтсін, сол токтың қуаты сан мәні бойынша бірлік уақыт ішінде өткізгіштің бірлік dV көлемінен ($V = S \cdot l$ бөлінген жылу мөлшеріне тең болады. Сонда:

$$Q = \frac{N}{V} = \frac{I \cdot U}{S \cdot l} \quad \text{мұндағы: } \frac{I}{S} = j \text{ ал } \frac{U}{l} = E \text{ екенін ескерсек: } Q = j \cdot E.$$


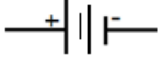
Ом заңының дифференциалдық түрде жазылуы $j = \gamma \cdot E$, олай болса:

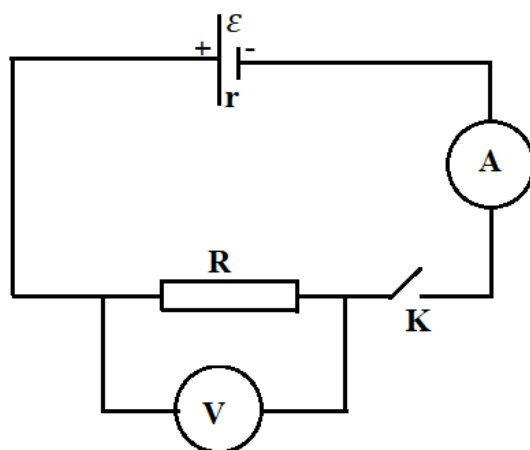
$$Q = \gamma \cdot E^2 \quad (3.26)$$

(3.26)-өрнек Джоуль-Ленц заңының дифференциалдық түрде жазылуы деп аталады. Бұл өрнек тұрақты ток үшін де, айнымалы ток үшін де орынды.

3.3 *Электр қозғаушы күш.* Электр тогы пайда болуы үшін келесі шарттар орындалуы тиіс: 1. Ток тасымалдайтын еркін зарядтардың болуы; 2. Еркін зарядтарды реттелген қозғалысқа түсіретін электр өрісінің болуы.

Тізбекте тек электростатикалық өріс әсері ғана болса, онда ток тасымалдаушы зарядтардың орын ауыстыруы нәтижесінде аз уақыт ішінде өткізгіштің барлық нүктелерінде потенциалдар теңесіп, электр өрісі жойылып, тізбекте ток тоқтар еді. Тізбекте тұрақты ток үздіксіз жүріп тұруы үшін табиғаты электростатикалық емес бөгде күштің есебінен оның ұштарында потенциалдар айырымын тудырып, оны тұрақты етіп ұстап тұруға қабілетті қондырғы қажет. Тізбек ұштарындағы потенциалдар айырымын тұрақты етіп ұстап тұратын құрылғыны ток көзі деп атайды. Тұрақты ток көзі сұлбада

(схемада)  немесе  деп белгіленеді. Ток көзін электр тогын тұтынушы жүктемелермен кедергісіз сымдар арқылы жалғануын электр тізбегі деп аталады. Қарапайым электр тізбегінің сұлбасы 3.1-суретте келтірілген:



3.4-сурет

Тізбек бөлігіндегі ток күшінің шамасы тізбек бөлігіне тізбектей жалғанатын амперметр деген құралмен, ал R жүктемеге түскен электр кернеуінің шамасы вольтметрмен өлшенеді, ол параллель жалғанады (3.1-сурет).

Ток көзінің ішкі кедергісі болады, оны r әрпімен белгілейді. Тұрақты ток көзінің оң (потенциалы жоғары) және теріс (потенциалы төмен) полюстері болады, яғни екі полюстердің арасында потенциалдар айырымы болады, ток көзінің полюстерде электр кернеуі пайда болады. $U = \phi_1 - \phi_2$ (3.27)

Электр өрісінің кернеулік векторы потенциалдың кемуі бағытына қарай бағытталады, өткізгіште зарядтар оң полюстен теріс полюске қарай бағытталған қозғалысқа түседі, электр тогы пайда болады.

Табиғаты электростатикалық емес, ток көзі тарапынан зарядқа әсер ететін күшті бөгде күш деп атайды. Бөгде күштің табиғаты әртүрлі, мысалы механикалық, химиялық т.б. болуы мүмкін. Бөгде күштердің әсерінен ток көзі ішінде электр өрісінің бағытына қарсы бағытта электр зарядтары қозғалып, соның салдарынан тізбек ұштарында потенциалдар айырымын тұрақты болып сақталады, тізбекпен тұрақты ток жүреді.

Зарядтарды электр өрісінің бағытына қарама-қарсы бағытта қозғалтып, жұмыс жасайтын бөгде күштерді ток көзінің электр қозғаушы күші (ЭҚК) деп атайды. Оны E деп белгілейді.

Ток көзінің ЭҚК-і деп тізбектің бір ұшынан екінші ұшына q бірлік зарядты тасымалдағанда бөгде күштің атқаратын жұмысына тең шаманы айтады.

$$E = \frac{A_\delta}{q} \quad \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}} = 1 \text{ В} \quad (3.27)$$

Мұндағы A_δ – бөгде күштердің атқаратын жұмысы.

Тізбектің бір ұшынан екінші ұшына q зарядты тасымалдаушы бөгде күш $\vec{F}_\delta = q \cdot \vec{E}_\delta$. мұндағы \vec{E}_δ – бөгде күштің өрісінің кернеулігі болса, онда тұйық тізбек бойындағы q зарядқа әсер етуші бөгде күштің жұмысы:

$$A_\delta = \oint \vec{F}_\delta \cdot d\vec{l} = q \cdot \oint \vec{E}_\delta \cdot d\vec{l} \quad (3.28)$$

(3.28)-өрнекті (3.27)-өрнекке қойғанда: $E = \oint \vec{E}_\delta \cdot d\vec{l}$ (3.29)

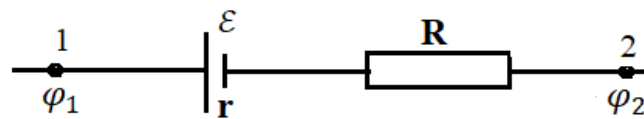
(3.29)-өрнектен тұрақты ток көзінің ЭҚК-і бөгде күштер өрісінің кернеулік векторының циркуляциясына тең екендігін көрінеді.

Тізбектің әрбір нүктесінде зарядқа екі күш: бөгде күш пен электростатикалық өріс тарапынан әсер ететін электрлік күш бірмезгілде әсер етеді, сонда қорытқы күш: $\vec{F} = \vec{F}_\delta + \vec{F}_s = q(\vec{E}_\delta + \vec{E}_s)$.

Олай болса, осы күштің тізбектің l бөлігінде атқаратын жұмысы:

$$A = q \int_0^l \vec{E}_\delta \cdot d\vec{l} + q \int_0^l \vec{E}_s \cdot d\vec{l} = q \cdot E + q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (3.30)$$

Электр қозғаушы күші бар және тұйық тізбек үшін Ом заңы. Бөгде күштер қатысатын, яғни тізбекте ток көзі болатын (3.5)-суретте келтірілген тізбек біртекті емес тізбек деп аталады. Біртекті емес тізбек бөлігін қарастырайық.



1.5-сурет

q заряд біртекті емес тізбектің 1-нүктесінен 2-нүктесіне орын ауыстырғанда атқарылатын жұмыс (3.30)-өрнекпен анықталады, яғни:

$A_{12} = q \cdot E + q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$, ал тізбектің осы бөлігінен t уақыт ішінде бөлінетін жылу мөлшері Джоуль-Ленц заңына бойынша: $Q_{12} = I^2 \cdot R \cdot t$ немесе түрлендірсек: $Q_{12} = I \cdot R \cdot (I \cdot t) = I \cdot R \cdot q$. Энергияның сақталу заңына сәйкес:

$$A_{12} = Q_{12}, \text{ Сонда: } I \cdot R = E + (\varphi_1 - \varphi_2) \Rightarrow I = \frac{E + (\varphi_1 - \varphi_2)}{R} \quad (3.31)$$

(3.31)-өрнек біртекті емес тізбек үшін Ом заңы деп аталады.

Біртекті емес тізбек үшін Ом заңынан (3.31)-өрнектен) келесідей дербес жағдайларды бөліп қарастыруға болады:

1. Егер берілген тізбек бөлігінде ток көзі болмаса, ондай тізбек *біртекті тізбек* деп аталады. $E = 0$ болған жағдайда: $I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{R} \Rightarrow I = \frac{U}{R}$, яғни біртекті тізбек бөлігі үшін Ом заңы шығады.

2. Егер тізбек тұйықталған болса, яғни $\varphi_1 = \varphi_2$ болса, онда $I = \frac{E}{R}$, мұндағы $R = R_c + r$ - толық кедергі, r - ток көзінің ішкі кедергісі, R_c - сыртқы тізбектің кедергісі. Сонда: $I = \frac{E}{R_c + r} \quad (3.32)$

(3.31)-өрнек тұйық тізбек үшін Ом заңы деп аталады.

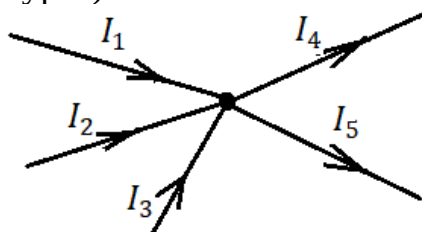
3. Сыртқы тізбек кедергісі нөлге тең ($R_c = 0$) болса, тізбектегі ток күші күрт артып кетеді. Бұл құбылыс қысқа тұйықталу деп аталады. $I_k = \frac{E}{r} \quad (3.33)$

(3.33)-өрнек қысқы тұйықталу тогының өрнегі.

Тармақталған тізбектер. Кирхгоф ережелері. Ом заңдары қарапайым тізбектерге арналған, ал тізбек тармақталған жағдайда әр тізбек бөлігіндегі ток күштерін анықтау үшін ол заңдарға қосымша ережелер енгізуге тура келеді. Ондай қосымша екі ережені заряд пен энергияның сақталу заңдарына сүйене отырып неміс физигі Кирхгоф енгізді.

Кирхгофтың 1-ережесі тізбектегі түйіндерге қатысты ереже. Түйін деп кем дегенде үш немесе одан да көп өткізгіш сымдар тоғысатын тізбектегі кез келген нүктені айтады.

Кирхгофтың 1-ережесі былайша айтылады: *Тармақталған тізбекте түйінге енген және түйіннен шыққан ток күштерінің алгебралық қосындысы нөлге тең болады* (1.6-сурет).



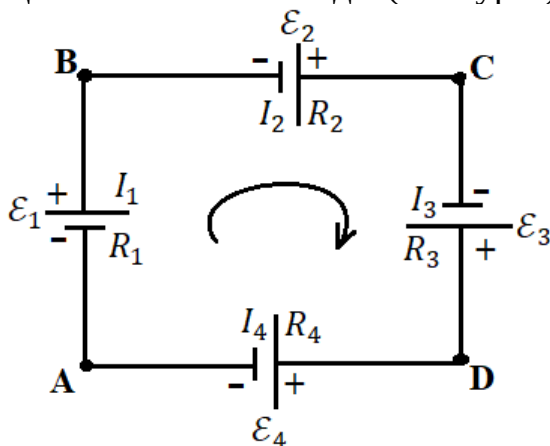
1.6-сурет

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0 \quad (3.34.a)$$

Зарядтың сақталу заңына сәйкес тұрақты токты қарастырғанда түйінге енген заряд шамасы түйіннен шыққан заряд шамасына тең болуы тиіс. Сондықтан Кирхгофтың 1-ережесін басқаша былай да айтуға болады: *Тармақталған тізбекте түйінге енген ток күштерінің алгебралық қосындысы түйіннен шыққан ток күштерінің алгебралық қосындысына тең болады.*

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5 \quad (3.34.б)$$

Кирхгофтың 2-ережесі берілген тізбекте бөліп қарастыруға болатын кез келген тұйықталған контурларға арналған және тармақталған тізбек үшін жалпыланған Ом заңы көмегімен алынады (1.7-сурет).



1.7-сурет

1.7-суретте төрт бөліктен тұратын контур келтірілген. Контурдағы айналу бағытын таңдап алу өз еркімізде болғандықтан сағат тілінің айналу бағытын оң деп қарастырсақ, осы бағытқа сәйкес токтар оң, ал қарсы бағытқа сәйкес токтар теріс деп есептеледі. Әр бөліктерге (AB, BC, CD, DA) сәйкес жалпыланған Ом заңын жазайық:

$$\begin{aligned}
I_1 \cdot R_1 &= (\varphi_A - \varphi_B) + E_1 \\
I_2 \cdot R_2 &= (\varphi_B - \varphi_C) + E_2 \\
I_3 \cdot R_3 &= (\varphi_C - \varphi_D) + E_3 \\
-I_4 \cdot R_4 &= (\varphi_D - \varphi_A) - E_4
\end{aligned}$$

Бұл теңдеулердің барлығын мүшелеп қосу арқылы:

$$I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3 - I_4 \cdot R_4 = E_1 + E_2 + E_3 - E_4$$

Соңғы өрнекке сүйене отырып Кирхгофтың 2-ережесін былайша тұжырымдауға болады: *Тармақталған тізбектің кез келген тұйық контурындағы ток күштерінің кедергілерге көбейтіндісінің алгебралық қосындысы сол тұйық контурдағы ЭҚК-нің алгебралық қосындысына тең болады.*

$$\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i = \sum_{i=1}^n I_i \cdot R_i \quad (3.35)$$

Бақылау сұрақтары

1. Электр тогының болуы үшін қажетті шарттарға талдау жасаңыз.
2. Электр кедергісінің табиғаты мен маңызы туралы ой түйіндеңіз.
3. Ом заңдарына талдау жасаңыз, Ом заңының дифференциалды түрде жазылу өрнегінің ерекшеліктеріне тоқталыңыз.
4. Джоуль-Ленц заңының физикалық мағынасын ашыңыз.
5. Бөгде күштердің табиғатына тоқталыңыз. Ток көзінің қызметі туралы баяндаңыз.
6. ЭҚК-і бар біртекті емес тізбек үшін Ом заңының өрнегін қорытыңыз.
7. Кирхгоф ережелерінің қажеттілігі туралы ойыңызды түсіндіріңіз.
8. Кирхгофтың 2-ережесін қорытып шығарыңыз.