

ТҰРАҚТЫ ТОКТЫҢ ЭЛЕКТР ТІЗБЕКТЕРІ

2.1. ЖАЛПЫ МАҒЛҰМАТТАР

Электр құбылыстарын және олардың тәжірибелік қолданыстарын жүйелі түрде зерттеу тарихи тұрғыдан уақыт өте өзгермейтін токтың қасиеттерін зерттеуден басталды. Бұған тұрақты токтың электр энергиясы көздерінің – алдымен гальвани элементтерінің (А. Вольта, 1745—1827), кейіннен аккумуляторлардың пайда болуы мен қол жетімділігі, сондай-ақ электрді жарықтандыруға (П.Н.Яблочков, 1847—1894), электролиз бен гальванопластикаға (Б.С.Якоби, 1801 — 1874) қолданудағы алғашқы сәтті тәжірибелері ықпал етті.

А.М. Ампер (1775—1836), Г.С. Ом (1787—1854), Ш.О. Кулон (1736—1806) және басқа да физиктер жүргізген тұрақты токтың қасиеттерін тәжірибелік зерттеу жұмыстары, бірқатар заңдылықтар мен түсініктерді анықтауға және негіздеуге мүмкіндік берді. М.Фарадей (1791 —1867), Э.Х. Ленц (1804—1865), Д. Генри (1797—1878), Э.В. Сименс (1816— 1892), Д. Джоуль (1818—1889), В. Вебер (1804—1891), Д.К. Максвелл (1831 —1879), Г.Р. Герц (1857—1894) және басқа ғалымдар орындаған ары қарайғы зерттеу жұмыстары, тұрақты ток тізбектерін талдау кезінде анықталған көптеген заңдылықтар электротехниканың іргелі заңдары болып табылатындығын көрсетті.

Электротехникалық құрылғылар — бұл электр энергиясын өндірудің, үлестірудің, бақылаудың, түрлендірудің және қолданудың кешенді мәселелерін шешу кезінде белгілі бір функцияны атқаруға арналған өндірістік бұйым.

Тұрақты токтың электротехникалық құрылғылары әртүрлі, мысалы аккумулятор, энергия жеткізу желісі, амперметр, реостат. Тұрақты ток алюминийді электрохимиялық әдіспен алу кезінде, қалалық және теміржол электр көліктерінде, электроникада, медицинада және ғылым мен техниканың өзге салаларында қолданылады.

2.2. ТҰРАҚТЫ ТОҚТАҒЫ ЭЛЕКТР ТІЗБЕГІНІҢ ЭЛЕМЕНТТЕРІ

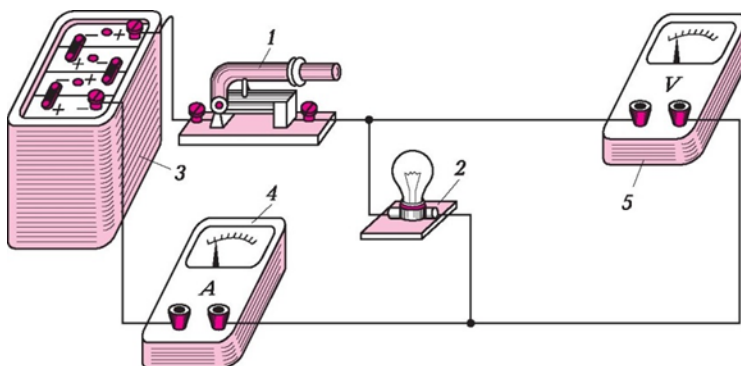
Электр тізбегі, немесе тұрақты ток тізбегі, жалпы жағдайда электр энергиясының көздерінен, электр энергиясын қабылдағыштардан, өлшеу аспаптарынан, автоматика мен басқару аппараттарынан, байланыс желілері мен сымдарынан тұрады.

Электр энергиясы көздерінде энергияның басқа түрлерінің электр энергиясына түрлендірілуі жүреді, мысалы гальваника элементтері мен аккумуляторлардағы химиялық процестер энергиясы, термопара негізіндегі термдік түрлендіргіштердегі жылу энергиясы.

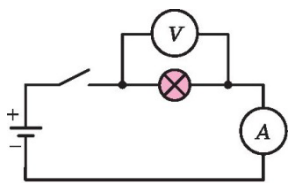
Электр энергиясын қабылдағыштарда электр энергиясы, мысалы механикалық (тұрақты ток қозғалтқыштары), жылу (электрлік пештер), химиялық (электролиздік ванналар) энергиясына түрленеді.

Электрлік автоматика мен басқару аппараттары, байланыстыру желілері мен өлшеуіш аспаптар энергия көздерінен электр энергиясын жіберу, оны қабылдағыштардың арасында тарату және барлық электротехника құрылғыларының жұмыс режимін бақылау үшін қызмет етеді.

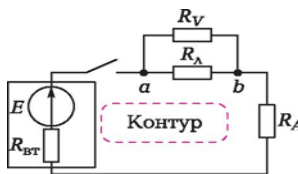
Электр тізбегінің графикалық бейнесі *схема* деп аталады. Тізбекті бейнелеудің бірнеше тәсілдерін ажыратады. 2.1-суретте мысал ретінде электротехникалық құрылғылар мен тұрақты токтың қарапайым тізбегінде, оларды жалғау әдістерінің үлгілік бейнесі



2.1-сурет



2.2-сурет



2.3-сурет

келтірілген. Ажыратқыш 1 тұйықталған кезде қызу шамына 2 – электр энергиясын қабылдағышқа – тұрақты токтың электр энергиясының көзі –аккумуляторлы батареясы 3 қосылады. Энергия қабылдағышының жұмыс режимін қадағалау үшін амперметр 4 мен вольтметр жалғанады. Электрлік техникалық құрылғылардың және олардың жалғануының шынайы суреті өте үлкен және көп еңбекті қажет ететін схемаларға әкеледі. Егер әрбір электротехникалық құрылғыны (MEMСТ бойынша) оның шартты белгісімен алмастыратын болсақ, тізбек суретін қарапайымдауға болады (2.2-сурет). Тізбектердің мұндай графикалық бейнеленуін *принциптік схемалар* деп атайды. Принциптік схема, электротехникалық құрылғылардың тағайындалымын және олардың әсерлесуін көрсетеді, бірақ тізбек жұмыс режимін есептеу кезінде қолайсыз болмақ. Есептеу жүргізу үшін әрбір электротехникалық құрылғыны оның алмастыру схемасымен көрсету қажет.

Электр тізбегінің *алмастыру схемасы* тізбектегі процесті берілген жуықтаумен сипаттауға болатындай таңдап алынған, түрлі идеалдандырылған элементтердің жиынтығынан тұрады.

Тізбектің алмастыру схемасының конфигурациясы тармақ, түйін, контур секілді геометриялық (топологиялық) түсініктермен анықталады.

Схема *тармағы*, әрқайсысы екі шықпаға (басы мен соңы) ие, бір немесе бірнеше тізбектеп жалғанған элементтерден тұрады, және де әрбір алдыңғы элементтің соңына келесі элементтің басы жалғанады.

Схема *түйінінде* үш немесе одан да көп тармақтар жалғанады.

Контур — бірде бір тармақ тап және түйін де бір реттен көп кездеспейтіндей етіп, бірнеше тармақтардан өтетін тұйықталған жол.

2.1-суретте көрсетілген тізбектің алмастыру схемасы (2.3-сурет) үш тармақтан тұрады, және де екеуінің әрқайсысы бір элементтен, ал үшіншісі үш элементтен тұрады. Суретте элементтердің параметрлері көрсетілген: $R_{ш}$ — шам тізбегінің кедергісі; R_V —

вольтметр тізбегінің кедергісі; R_A — амперметр тізбегінің кедергісі; E — аккумулятор ЭҚК мен $R_{\text{вк}}$ — оның ішкі кедергісі. Үш тармақ a және b екі түйінінде жалғанған.

Егер тізбектің алмастыру схемасының барлық элементтерінің параметрлерінің мәні белгілі болса, оның барлық элементтерінің жұмыс режимін есептеп шығуға, яғни бүкіл электротехникалық құрылғылардың электрлік күйін анықтауға болады.

Бұдан әрі *электр тізбегінің алмастыру схемасы* терминінің орнына – *тізбек схемасы* немесе *схема* қысқартуын қолданатын боламыз.

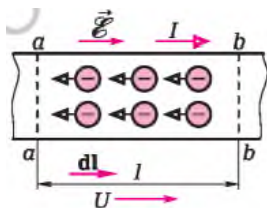
2.3.

ТОКТАР МЕН КЕРНЕУЛЕРДІҢ ОҢ БАҒЫТТАРЫ

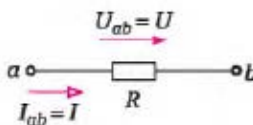
Электр өткізгіштігінің электрондық теориясына сәйкес, металдардағы валентті электрондар оң иондар болатын, атомдарынан оңай ажырайды. Иондар қатты денеде кеңістіктік периодтылыққа ие кристаллдық тор түзеді. Еркін электрондар атомдарға соқтығыса отырып, олардың арасында тор кеңістігінде бейберекет қозғалады.

l ұзындықты өткізгіште электр энергиясы тудыратын $\vec{\xi}$ кернеулікті көлденең электр өрісінің әсерінен, еркін электрондар қосымша жылдамдыққа ие болып, өткізгіш бойымен бір бағытта қосымша орын ауыстырады (2.4-сурет).

Өткізгіш ортадағы *тұрақты ток*, жалпы жағдайда электр өрісінің әсерінен оң және теріс зарядтардың реттелген қозғалысын білдіреді. Мысалы, электролиттерде және газдарда оң және теріс зарядты иондар бір-біріне қарай қозғалады. Оң және теріс зарядтардың бағыттары қарама-қарсы болғандықтан, қандай зарядтардың қозғалысын ток бағыты деп есептейтінімізді нақтылап алу қажет. Оң зарядтардың қозғалыс бағытын, яғни электр өрісінің



2.4-сурет



2.5-сурет

әсерінен өткізгіштегі электрондардың қозғалыс бағытына кері бағытты I тогының бағыты деп есептеу қабылданған. Бұл бағыт бағыттауыш сызығымен көрсетілген (2.4-суретті қараңыз).

Тұрақты токты

$$I = |q| / t$$

формуласы бойынша анықтайды, мұндағы t — қарастырылып отырған тізбек бөлігінің көлденең қимасы арқылы $|q|$ қосынды зарядының біркелкі орын ауыстыруының уақыты.

Токтың СИ-дегі негізгі өлшем бірлігі — *ампер* (А): 1 А = 1 Кл/с.

Тізбектегі ток мәні амперметр құралымен өлшенеді, оны тізбектей, яғни тізбек ажыратылуына қосады.

Тізбекті есептеу кезінде оның элементтеріндегі токтардың нақты бағыты жалпы жағдайда алдын ала белгісіз. Сондықтан да, шартты оңдарды, немесе, қысқаша айтқанда оңдарды - тізбектің барлық элементтеріндегі токтардың бағытын алдын ала таңдап алу қажет.

R кедергісіне ие элементтегі (2.5-сурет) немесе тармақтағы *токтың оң бағыты* дербес таңдап алынады және бағыттауыш сызығымен көрсетіледі. Егер токтың таңдап алынған оң бағыттарында, тізбектің жұмыс режимін есептеу нәтижесінде берілген элементтегі ток мәні оң болса, онда токтың нақты бағыты таңдап алынған оң бағытпен сәйкес келеді. Кері жағдайда, нақты бағыты таңдап алынған оң бағытқа қарама-қарсы.

Тізбек схемасының элементіндегі *кернеудің оң бағыты да* (2.5-сурет) дербес таңдап алынады және бағыттауыш сызығымен көрсетіледі, алайда энергия көздері жоқ тізбек бөліктері үшін, оны 2.5-суреттегідей токтың оң бағытымен сәйкестендіріп таңдауға кеңес беріледі.

Егер элемент шықпалары белгіленген болса, мысалы a мен b деп (2.5-суретті қараңыз) және бағыттауыш сызық a шықпасынан b шықпасына қарай бағытталған болса, онда оң бағыты

$$U = U_{ab} = V_a - V_b$$

кернеуінің анықталатындығын білдіреді.

Осындай белгілеуді ток үшін де қабылдауға болады. Мысалы, I_{ab} белгісі a шықпасынан b шықпасына қарай тізбек элементіндегі немесе схемасындағы токтың оң бағытын көрсетеді.

Өткізгіштердегі еркін электрондардың кристалдық торлар атомдарымен соқтығысуы олардың ілгерілемелі қозғалысын тежейді. Бұл еркін электрондардың бағытталған қозғалысына, яғни тұрақты токқа қарсы әсер, өткізгіштің *электрлік кедергісінің* физикалық түпнегізін құрайды. Электролиттердегі және газдардағы тұрақты токқа кедергі келтірудің механизмі ұқсас.

R кедергісіне ие тізбек бөлігіндегі (2.5-суретті қараңыз) токтың кернеуге тәуелділігі *Ом заңы* деп аталатын

$$U_{ab} = RI_{ab} \text{ немесе } U = RI \quad (2.1)$$

қатынасымен анықталады.

Кедергіге кері *жартылай өткізгіштік* деп аталады:

$$G = 1/R \quad (2.2)$$

Кедергінің СИ-дегі негізгі өлшем бірлігі — *ом* (Ом), өткізгіштікі — *сименс* (См).

Материалдың өткізгіштік қасиеті, қыры 1м текшенің қарама-қарсы жақтары арасындағы кедергіге тең ρ_V *көлемдік меншікті кедергісін* анықтайды.

Көлемдік меншікті кедергісіне кері шама көлемдік меншікті өткізгіштік деп аталады

$$\gamma_V = 1/\rho_V \quad (2.3)$$

Көлемдік меншікті кедергісінің өлшем бірлігі— 1 Ом • м, көлемдік меншікті өткізгіштікі — 1 См/м.

Өткізгіштің кедергісі оның ұзындығына, көлденең қимасының ауданына және өткізгіш жасалынған материалына тәуелді.

Бұл тәуелділік

$$R = \rho_V l / S, \quad (2.4)$$

формуласымен өрнектеледі, мұндағы R — өткізгіш кедергісі, Ом; ρ_V — меншікті кедергі, Ом • мм²/м; l — өткізгіш ұзындығы, м; S — өткізгіштің көлденең қимасының ауданы, мм².

Өткізгіштің тұрақты токқа кедергісі температураға тәуелді. Аз аралықта (шамамен 200 °С) температураның өзгерісі кезіндегі бұл тәуелділікті

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)] \quad (2.5)$$

формуласымен өрнектеуге болады, мұндағы R_1 мен R_2 — θ_1 , θ_2 температуралары кезіндегі кедергілер; α — температура 1°C -қа өзгерген кезде кедергінің салыстырмалы өзгерісіне тең температуралық кедергі коэффициенті.

2.1-кестеде кейбір өткізгіштердің, ал 1.1-кестеде электроқшаулаушы материалдардың көлемдік меншікті кедергісі мен кедергінің температуралық коэффициенті мәні келтірілген.

Резистор деп кедергісі бар және тоқты шектеуге қолданылатын электротехникалық құрылғыны атайды.

2.1-кесте. Кейбір өткізгіш материалдардың меншікті кедергісі мен кедергінің температуралық коэффициенті

Материал	20 °C температурасы кезіндегі көлемдік меншікті кедергісі, Ом*м	Кедергінің температуралық коэффициенті (1°C -қа)
Күміс	$1,6 \cdot 10^{-8}$	0,0035
Техникалық мыс	$(1,72—1,82) \cdot 10^{-8}$	0,0041
Алюминий	$2,95 \cdot 10^{-8}$	0,004
Болат	$(1,25—1,46) \cdot 10^{-7}$	0,0057
Темір	$(0,9—1,1) \cdot 10^{-7}$	0,006
Шойын	$1,5 \cdot 10^{-7}$	0,001
Қорғасын	$(2,18—2,22) \cdot 10^{-7}$	0,0039
Вольфрам	$0,503 \cdot 10^{-7}$	0,0048
Көмір	$(1—6) \cdot 10^{-7}$	0,005
Манганин (қорытпа: Cu— 85 % Mn— 12 % Ni — 3 %)	$(0,40—0,52) \cdot 10^{-7}$	0,00003
Константан (қорытпа: Cu — 57—60 %; Ni — 39—41 %; Mn — 1—2 %)	$4,4 \cdot 10^{-7}$	0,00005
Нихром (қорытпа : Cr — 20 %, Ni — 80 %)	$(1,02—1,120) \cdot 10^{-6}$	0,0001

2.2-кесте – Резисторлардың шартты графикалық белгісі

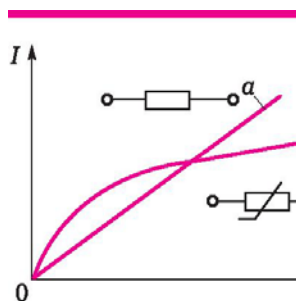
Атауы	Шартты белгісі
Тұрақты	
Бұрғыштары бар	
Айнымалы (реостат)	
Тізбек ажыратқышына ие	
Тізбек ажыратқышынсыз	
Сатылы реттелетін айнымалы (реостат)	
Сызықтық емес өздігінен реттелетін, мысалы сыртқы ортаның P параметріне қатысты	

Реттелетін резистор *реостат* деп аталады. Резисторлардың түрлі типтерінің шартты белгілері 2.2-кестеде берілген.

Резистивті элементтер деп, тұрақты токқа осы құбылыстың физикалық табиғатына қарамастан кедергі келтіретін, резисторлардың немесе басқа да кез-келген электротехникалық құрылғыларының немесе олардың бөліктерінің идеалдандырылған үлгісін атайды. Олар тізбектердің алмастыру схемаларын жасау және олардың тәртіптерін есептеу кезінде қолданылады. Идеалдандыру кезінде резисторлардың оқшаулаушы жабындылары, сымды реостаттардың қаңқасы және т.с.с. арқылы өтетін токтарды елемейді.

Сызықтық резистивті элемент, ток кернеуге пропорционалды болатын, электротехникалық құрылғысының кез-келген бөлігінің алмастыру схемасы болып табылады. Оның параметрі ретінде $R = \text{const}$ кедергісі алынады.

Егер токтың кернеуге тәуелділігі сызықтық емес болса, онда алмастыру схемасы *сызықтық емес резистивті элементтен* тұрады, ол $I(U)$ сызықтық емес *вольт-амперлік сипаттамамен* беріледі. 2.6-суретте сызықтық (a сызығы) және сызықтық емес (b сызығы) резистив-



2.6-сурет

ті элементтердің вольт-амперлік сипаттамасы (BAC), және де олардың алмастыру схемасындағы шартты белгісі берілген.

2.3. РЕЗИСТОРЛАРДЫ ЖАЛҒАУ ТӘСІЛДЕРІ

Резисторларды электр тізбегінде тізбектеп, параллельді және аралас жалғауға болады.

Тізбекті деп алдыңғы резистордың соңына келесінің басы жалғастырылатын жалғануды атайды. 2.7-суретте үш резистивті элементтің тізбекті жалғанғандағы тізбек схемасы көрсетілген. Бұл ретте әрбір резистивті элементтегі I ток бірдей. Тізбекке салынған кернеу резистивті элементтердегі кернеулер қосындысына тең және Ом заңын ескере отырып,

$$U = R_{\text{бал}} I = U_1 + U_2 + U_3 = R_1 I + R_2 I + R_3 I$$

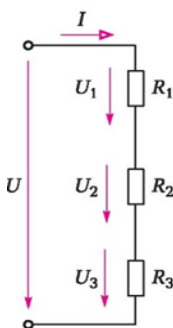
тең болады, мұндағы $R_{\text{бал}}$ — тізбектің балама кедергісі.

Теңдіктің екі бөлігін I -ге бөліп,

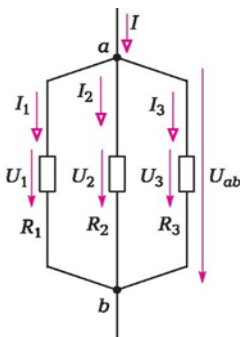
$$R_{\text{бал}} = R_1 + R_2 + R_3$$

қатынасын аламыз.

Параллель жалғау деп резисторлардың басын тізбектің бір түйініне, ал соңын басқа түйініне жалғайтын резисторлар тобының жалғануын айтады. 2.8-суретте a және b түйіндері арасында үш резистивті элементтердің параллель жалғанғандағы тізбек схемасы



2.7-сурет



2.8-сурет

көрсетілген. Бұл ретте барлық резистивті элементтердегі кедергі бірдей:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U_{ab} = U.$$

Тізбектің жалпы тогы резисторлардағы токтар қосындысына тең және Ом заңын ескерсек:

$$I = U/R_{\text{бaл}} = I_1 + I_2 + I_3 = U/R_1 + U/R_2 + U/R_3,$$

мұндағы $R_{\text{бaл}}$ — тізбектің балама кедергісі.

Теңдіктің екі бөлігін U -ге бөліп,

$$1/R_{\text{бaл}} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$$

қатынасын аламыз, немесе резистордың өткізгіштігі $G = 1/R$ тең екендігін ескере отырып,

$$G_{\text{бaл}} = G_1 + G_2 + G_3.$$

Параллель жалғанған екі резистор үшін:

$$1/R_{\text{бaл}} = 1/R_1 + 1/R_2, \text{ немесе } R_{\text{бaл}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2).$$

Егер n бірдей резисторлар $R_1 = R_2 = \dots = R_n$ параллель жалғанған болса, онда $R_{\text{бaл}} = R/n$.

2.8-суретте бейнеленген схема үшін:

$$I_1 R_1 = U; I_2 R_2 = U; I_3 R_3 = U.$$

Бұл теңдіктердің оң жақ бөлігі өзара тең болғандықтан

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3.$$

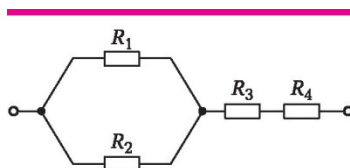
Осыдан келесі қатынасты аламыз:

$$I_1 / I_2 = R_1 / R_2; I_2 / I_3 = R_3 / R_2; I_3 / I_2 = R_1 / R_3$$

Бұл параллель қосылған резисторлардағы ток олардың кедергісіне кері пропорционалды үлестірілетінін білдіреді.

Аралас жалғау деп резисторлардың бір бөлігі параллель, ал басқа бөлігі тізбектеп жалғанатын тізбектегі резисторлар жалғануын атаймыз.

Мұндай тізбектерді есептеу кезінде алдымен параллель және тізбектей жалғанған резисторлар тобының баламалы кедергісі, содан соң – тізбектің жалпы кедергісі анықталады. Мысалы, 2.9-суреттегі тізбек схемасы үшін паралелді жалғанған R_1 және R_2 резистивті элементтерінің бөліктері мен тізбектеп жалғанған R_3 және R_4 резистивті элементтерінің баламалы кедергілері мынаған тең болады:



2.9-сурет

$$R_{\text{бал}12} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$$

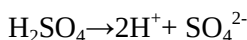
$$R_{\text{бал}34} = R_3 + R_4$$

Тізбектің жалпы кедергісі мынаған тең:

$$R_{\text{жал}} = R_{\text{бал}12} + R_{\text{бал}34}$$

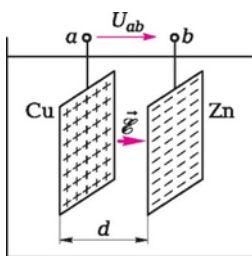
2.6. ТҰРАҚТЫ ТОКТАҒЫ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫНЫҢ КӨЗІ. ЭЛЕКТР ҚОЗҒАУШЫ КҮШ

Cu мыс және Zn мырыштан жасалынған, күкірт қышқылы ерітіндісіне салынған екі пластинадан тұратын, гальваникалық элемент мысалында (2.10, а суретін қараңыз) тұрақты токтың электр энергиясы көздерін қарастырайық. Таза қышқыл электр тогын өткізбейді. Алайда оны дистилдендірілген суда еріткен кезде ол оң және теріс зарядталған иондарға ыдырайды:



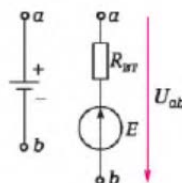
Қышқыл, сілті немесе тұздардың дистилдендірілген судағы немесе басқа еріткіштердегі ерітінділерін *электролиттер*, ал ерітінділер әсерінен химиялық қосылыстардың иондарға ыдырау процесін – *электролиттік диссоциация* деп атайды.

Химиялық процестер салдарынан Zn^{2+} мырыштың оң иондары, мырыштық пластинада теріс еркін зарядтардың артық мөлшерін қалдыра отырып, күкірт қышқылы ерітіндісіне өтеді. Күкірт қышқылы ерітіндісінде сол аралықта ауыр және аз қозғалатын Zn^{2+} мырыштың оң иондары, сутегінің жеңіл және қозғалғыш H^+ оң ион-



а

2.10-сурет



б

в

дарын, беткі жағында сутегінің бейтарап атомдарын қалпына келтіру жүріп жатқан мыс пластинасына қарай ығыстыра бастайды. Бұл ретте мыс пластинасы еркін теріс зарядтарын жоғалта бастайды, яғни оң зарядталады

Екі түрлі зарядталған пластиналардың арасында, иондардың ерітіндіде бағытталған қозғалысына кедергі келтіретін, $\vec{\xi}$ кернеулігіне ие біртекті электр өрісі туындайды. Өрістің $\xi = \xi_0$ кернеулік мәндерінде пластиналарда заряддардың жинақталуы тоқтайды. Заряд жинақталуы тоқтайтын, пластиналар арасындағы потенциалдар айырымына тең кернеу, заряд жинауға ұмытылатын *сыртқы күштің* (бұл жағдайда химиялық табиғатты) сандық өлшемі болып табылады.

Электр қозғаушы күш деп (ЭҚК) сыртқы күштердің сандық өлшемі аталады. Гальваникалық элемент үшін E ЭҚК:

$$E = \xi_0 d = U_{abx}$$

формуласымен анықталады, мұндағы d — пластиналар арасындағы арақашықтық; $U_{abx} = V_{ax} - V_{bx}$ — бос жүріс режиміндегі, яғни гальваникалық элементте ток болмаған кездегі пластиналар шықпасының арасындағы потенциалдар айырымына тең кернеу.

Егер гальваникалық элементтің шықпаларына қабылдағышты, иысалы резисторды қоссақ, онда тұйықталған тізбекте ток туындайды. Қышқыл ерітіндісіндегі иондардың бағытталған қозғалысы олардың өзара соқтығысуымен бірге жүреді, ал бұл гальваникалық элементтің тұрақты токқа *ішкі кедергісін* туындатады. Үлгілік бейнесі 2.10, а суретінде, ал принциптік схемадағы белгілері 2.10, б суретінде берілген гальваникалық элементті тізбектеп жалғанған E ЭҚК көзінен және оның ішкі кедергісіне тең $R_{\text{ш}}$ кедергісіне ие резистивті элементтен тұратын алмастыру схемасымен көрсетуге болады (2.10, в сурет). ЭҚК бағыттауыш сызығы гальваникалық элементтегі оң зарядтардың сыртқы күштер әсерінен қозғалысының бағытын көрсетеді. U_{ab} кернеуінің бағыттауыш сызығы, егер қабылдағышты гальваникалық элементке қоссақ, электр өрісі күштері әсерінен ондағы оң зарядтардың қозғалыс бағытын көрсетеді.

2.10, в суретіндегі алмастыру схемасы, гальваникалық элементтен ЭҚК мен ішкі кедергісінің физикалық табиғатымен ерекшеленетін тұрақты токтың электр энергиясының кез-келген басқа көздері үшін дұрыс болмақ.

Электр энергиясы көзі мен оған жалғанған $R_{\kappa c}$ жүктеме кедергісіне ие резистордан тұратын тізбектегі процестерді қарастырайық. Электр энергиясының көзін 2.10, *в* суретіндегі алмастыру схемасымен, ал бүкіл тізбекті – 2.11, *а* суретіндегі схемамен көрсетейік.

Электр энергиясы көзінің қасиеттерін *вольт-амперлік*, немесе *сыртқы сипаттама* – $U_{ab}=U$ шықпаларының арасындағы кернеудің энергия көзінің I тогына тәуелділігі, яғни $U(I)$ анықтайды:

$$U = E - R_{iш} I = U_x - R_{iш} I \quad (2.6)$$

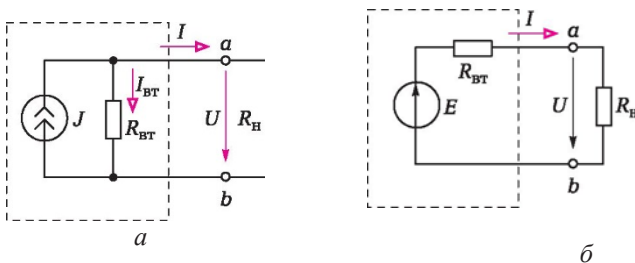
оған 2.12, *а* суретіндегі сызық сәйкес келеді. Токтың артуы кезіндегі энергия көзінің кернеуінің азаюуы, оның $R_{iш}$ ішкі кедергісіндегі кернеудің азаюуының өсуімен түсіндіріледі. $U = 0$ кернеу кезінде энергия көзі тогы қысқаша тұйықталу тогына тең: $I = I_{\kappa} = E / R_{iш}$

Токтың теріс мәндеріндегі сыртқы сипаттама бөлігі, энергия көзінің онымен салыстырғанда сыртқы тізбектен, мысалға аккумулятор зарядынан алып тұтынуымен сәйкес келеді.

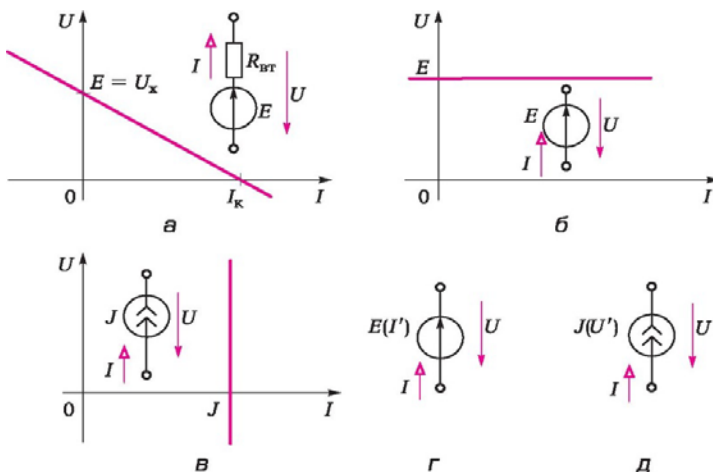
ЭҚК мен ток көзі электр энергиясы көзінің дара жағдайы болып табылады.

ЭҚК көзі. Егер электр энергиясының көзінің ішкі кедергісі жүктеме тізбегінің кедергісінен бірнеше есе аз болса, онда (2.6) бойынша энергия көзінің кернеуі Ом заңы бойынша $I = E / (R_{iш} + R_{\kappa c})$ ток және $R_{\kappa c}$ $R_{iш}$ кезінде ЭҚК тең болады:

$$U = E - \frac{R_{iш} E}{R_{iш} + R_{\kappa c}} = E - \frac{E}{1 + R_{\kappa c} / R_{iш}} \approx E = \text{const}$$



2.11-сурет



2.12-сурет

Ішкі кедергісі төмен электр энергиясы көздерін, $R_{\text{шт}}=0$ болатын идеалдандырылған моделмен алмастыруға болады. Мұндай идеалдандырылған электр энергиясының көзі *ЭҚК идеалды көзі* деп аталады және $E=U_x=U$ бір параметрімен сипатталады. Идеалды ЭҚК көзі шықпаларының арасындағы кернеу токқа тәуелсіз, ал сыртқы сипаттамасы, 2.12, б суретіндегі түзу сәйкес келетін

$$U = E = \text{const}, \quad (2.7)$$

өрнегімен анықталады. Сонымен қатар мұндай көздер *кернеу көзі* деп те аталады. Осы суретте ЭҚК идеал көзінің схемалардағы белгісі көрсетілген.

Ток көзі. Егер электр энергиясы көзінің ішкі кедергісі жүктеме тізбегінің кедергісінен бірнеше есе көп болса, онда энергия көзі тоғын $R_{\text{шт}}$ $R_{\text{кв}}$ кедергісі мәндерінде оның қысқаша тұйықталу тоғына тең деуге болады:

$$I = \frac{E}{R_{\text{шт}} + R_{\text{кв}}} \approx E / R_{\text{шт}} = I_{\text{к}} = J = \text{const}$$

Ішкі кедергісі жоғары электр энергиясының көзін, $R_{\text{шт}} \rightarrow \infty$ мен $E \rightarrow \infty$ және $E / R_{\text{шт}} = J$ теңдігі әділетті болатын идеалдандырылған моделмен алмастыруға болады. Электр энергиясының мұндай идеалдандырылған көзі токтың *идеалды көзі* деп аталады және $J = J_{\text{к}}$ бір параметрімен сипатталады. Көздегі ток оның шықпаларының

арасындағы кернеуге тәуелсіз, ал оның сыртқы сипаттамасы, 2.12, *в* суретіндегі түзу сәйкес келетін

$$I = J = \text{const}, \quad (2.8)$$

өрнегімен анықталады. Осы суретте ток көзінің схемалардағы белгісі берілген. Кернеудің теріс мәніне ие сыртқы сипаттамасының бөлігі, онымен салыстырғанда сыртқы тізбектен алынатын энергияны ток көзінің тұтынуына сәйкес келеді.

2.11, *а* суретіндегі энергия көзінің алмастыру схемасынан ток көзі бар баламалы алмастыру схемасына өтуге болады. Ол үшін (2.6) теңдеуінің барлық қосылғыштарын көздің $R_{iш}$ ішкі кедергісіне бөлейік:

$$U / R_{iш} = E / R_{iш} - I ,$$

немесе

$$E / R_{iш} = J = U / R_{iш} + I = I_{iш} + I$$

2.11, *б* суретіндегі баламалы алмастыру схемасы алынған теңдеуге сәйкес келеді. Шынайы электр энергия көздерін екі алмастыру схемасы түрінде көрсету тізбектің сыртқы бөлігіне қатысты баламалы болып табылады, екі жағдайда да көздердегі токтар мен олардың шықпаларының арасындағы кернеулер бірдей.

Тізбектер теориясында ЭҚК мен токтардың тәуелсіз және тәуелді көздерін ажыратады. Соңғы жағдайда олардың параметрлерінің мәндері басқа шамалардың мәндеріне тәуелді болады, мысалы $E(I')$ (2.12-сурет, *з*), $J(U')$ (2.12-сурет, *д*), мұндағы I' және U' — тізбектің қандайда бір тармағының тогы мен кернеуі.

2.8. КИРХГОФТЫҢ БІРІНШІ ЖӘНЕ ЕКІНШІ ЗАҢДАРЫ. ЖАЛПЫЛАНҒАН ОМ ЗАҢЫ

Кирхгофтың екі заңы — электр тізбектерінің негізгі заңдары.

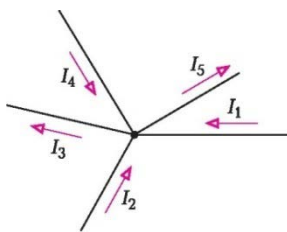
Кирхгофтың бірінші заңы. *Электр тізбегінің кез-келген түйініндегі токтардың алгебралық қосындысы нөлге тең:*

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

(2.9)

мұндағы n — түйінде жалғанатын тармақтар саны; k — тармақтың реттік нөмірі.

(2.9)-да «плюс» таңбасымен түйіннен оң бағытталған токтар, ал «минус» таңбасымен — түйінге қарай оң бағытталған токтар жазылады, немесе керісінше. Басқаша айтқанда, түйіндерден бағытталған токтар қосындысы, түйіндерге бағытталған токтар қосындысына тең. Мысалы, 2.13 суреттегі тізбек түйіндері үшін:



2.13-сурет

$$-I_1 - I_2 + I_3 + I_4 + I_5 = \sum_{k=1}^n I_k = 0$$

немесе

$$I_3 + I_5 = I_1 + I_2 + I_4.$$

Бұл заң, тұрақты ток тізбегінің түйіндерінде зарядтар жиналмайтындығының салдары болып табылады. Кері жағдайда, түйіндер потенциалы мен тармақтардағы токтар өзгертін еді.

Кирхгофтың екінші заңы. *Электр тізбегінің кез-келген контуры бөлігіндегі кернеулердің алгебралық қосындысы нөлге тең*

$$\sum_{k=1}^m U_k = 0$$

(2.10)

мұндағы m — контур бөліктерінің саны; k — бөліктің реттік нөмірі.

(2.10)-да «плюс» таңбасымен, оң бағыттары контур айналымының еркін тандап алынған бағытымен сәйкес келетін кернеулер, ал «минус» таңбасымен — қарама-қарсы бағытталған кернеулер жазылған, немесе керісінше.

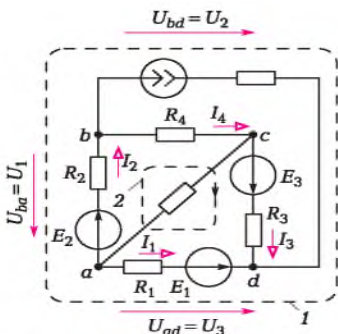
Тек ЭҚК көздері мен резистивті элементтерден ғана тұратын тізбек схемасының контуры үшін, *резистивті элементтердегі кернеулердің алгебралық қосындысы ЭҚК алгебралық қосындысына тең*, яғни Кирхгофтың екінші заңы:

$$\sum_{k=1}^n U_{Rk} = \sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{k=1}^m E_k$$

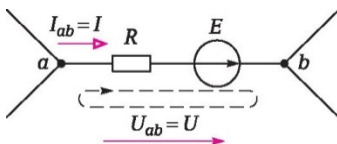
(2.11)

өрнегі түрінде болады, мұндағы n және m — контурдағы резистивті элементтер мен ЭҚК саны.

(2.11)-де «плюс» таңбасымен, оң бағыттары контур айналымының еркін тандап алынған бағытымен сәйкес келетін ЭҚК мен токтар, ал «минус» таңбасымен — қарама-қарсы бағытталған токтар жазылады, немесе керісінше.



2.14-сурет



2.15-сурет

Ток көздерінен тұратын контурлар үшін Кирхгофтың екінші заңы, (2.11)-ші түрінде емес, тек (2.10)-шы түрінде ғана жазылуына болады.

Мысалы, 2.14-суреттегі тізбек схемасының 1-контуры үшін (2.10) бойынша

$$-U_1 + U_2 - U_3 = 0$$

2-контуры үшін (2.11) бойынша

$$\sum_{k=1}^4 R_k I_k = -R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_4 I_4 + R_3 I_3 = \sum_{k=1}^3 E_k = -E_1 + E_2 + E_3.$$

(2.10)-шы Кирхгофтың екінші заңы, тұрақты электр өрісінде, тұйықталған контур бойымен оның кернеулік векторының айналымы нөлге тең болуының (1.5) салдары болып табылады.

Дара жағдайда тізбектің тек бір ғана тармағы контурға ене алады, сондықтан да ол тізбектің басқа тармақтарынан тыс тұйықталады (2.15-сурет). Бұл жағдайда (2.11)-ге сәйкес

$$RI_{ab} + U_{ab} = E$$

бұдан

$$I_{ab} = \frac{(U_{ab} + E)}{R} = \frac{V_a - V_b + E}{R}$$

$$\text{немесе } I = \frac{U + E}{R} \quad (2.12)$$

мұндағы тармақтың $U_{ab} = U$ кернеуі және $I_{ab} = I$ тогы бағыт бойынша сәйкес келеді.

(2.12) теңдеуі, қосынды кедергісі R және E ЭҚК ие кез-келген (ток көздерінсіз) тармақтың немесе осы тармақтың R мен E параметрлеріне ие жеке бөлігі үшін жалпыланған Ом заңын өрнектейді.

Жалпы жағдайда тізбек схемасының B тармағы мен Y түйіндері болады, оның ішінде B_I тармағы ток көздерінен тұрады.

Алдымен тізбек схемасының ток көздерінсіз есептеулерін, яғни $B_I = 0$ кезінде, содан соң жалпы жағдайды қарастырайық.

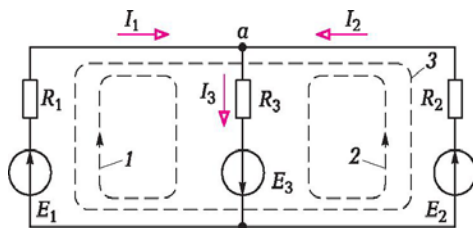
Ток көздерінсіз тізбек схемасы. ток көздерінсіз тізбек схемасын есептеу, B тармақтарындағы токтарды анықтауға саяды. Ол үшін, Кирхгофтың бірінші заңы бойынша $Y-1$ тәуелсіз теңдеулерді және Кирхгофтың екінші заңы бойынша $K = B - Y + 1$ тәуелсіз теңдеулерді құрастырайық. Осы теңдеулерге сәйкес келетін түйіндер мен контурлар *тәуелсіздер* деп аталады.

Планарлы схемалар үшін, яғни тармақтардың қиылысуынсыз жазықтықтағы бейнесіне жол беретін схемалар үшін, олардың әрқайсысында тек осы контурға тиесілі бір тармақтың бар болуы K тәуелсіз контурларды айрықшалаудың жеткілікті шарты болып табылады.

Кирхгофтың бірінші заңы бойынша тәуелсіз теңдеулердің саны түйіндер санынан бір санына кем, себебі әрбір тармақтың тогы ол жалғайтын түйіндерге арналған теңдеуге әртүрлі таңбалармен кіреді. Барлық түйіндердің қосылатын теңдеулерінің қосындысы нөлге теңбе-тең тең.

Теңдеулер жүйесін шешу тармақтар тогын анықтайды.

2.16 суреттегі, $Y=2$ түйіндерінен және $B=3$ тармақтарынан, яғни $K=B-Y+1=3-2+1=2$ тәуелсіз контурларынан (1 мен 2, немесе 1 мен 3, немесе 2 және 3) тұратын тізбек схемасының есептелуін қарастырайық.



2.16-сурет

I_1, I_2, I_3 тармақтар тогының оң бағыттарын дербес етіп таңдап аламыз. Кирхгофтың бірінші заңы бойынша бір ($Y-1 = 2 - 1 = 1$) тәуелсіз теңдеуін мысалы a түйіні үшін, және де Кирхгофтың екінші заңы бойынша — екі ($K = 2$) тәуелсіз теңдеуін, мысалы 1 және 2 контурлар үшін құрастырамыз:

$$\left. \begin{aligned} -I_1 - I_2 + I_3 &= 0; \\ R_1 I_1 + R_3 I_3 &= E_1 + E_3; \\ R_2 I_2 + R_3 I_3 &= E_2 + E_3, \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

мұндағы резистивті элементтердегі кернеу Ом заңы бойынша анықталады.

Үш белгісіз токтарға ие (2.13)-ші үш теңдеулер жүйесінің шешімі I_1, I_2, I_3 тармақтар тогын анықтайды.

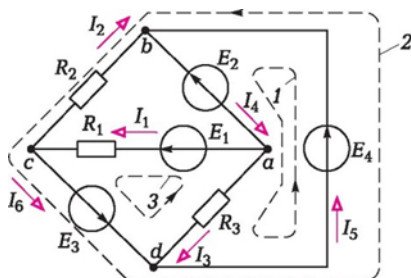
2.1-мысал. Ом мен Кирхгоф заңдарының көмегімен 2.17-суреттегі схеманың, элементтердің параметрлерінің мәні: $E_1 = 1$ В, $E_2 = 2$ В, $E_3 = 3$ В, $E_4 = 4$ В, $R_1 = 4$ Ом, $R_2 = 2$ Ом, $R_3 = 1$ Ом болған кездегі барлық тармақтарындағы токтарын анықтау.

Шешімі. Схема $B = 6$ тармақтардан, $Y = 4$ түйіндерден, $K = B - Y + 1 = 6 - 4 + 1 = 3$ тәуелсіз контурлардан тұрады.

Тармақтардағы $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ токтардың оң бағыттарын таңдаймыз және a, b, c, d түйіндерді белгілейміз.

2.17 суретте штрихты сызықтармен белгіленген 1, 2, 3 үш тәуелсіз контурды ($K = 3$) және оларды айналу бағытын таңдаймыз.

Кирхгофтың екінші заңы бойынша (1, 2, 3 контурлары үшін) үш ($K = 3$) тәуелсіз теңдеулерді, және Кирхгофтың бірінші заңы бойынша (a, b, c түйіндері үшін) үш ($Y-1 = 4 - 1 = 3$) тәуелсіз теңдеуді құраймыз, олардың шешімін тауып, тармақтар тогын анықтаймыз:



2.17-сурет

$$\left. \begin{aligned} R_3 I_3 &= E_1 - E_2 \text{ (контур 1);} \\ -R_2 I_2 &= E_3 + E_4 \text{ (контур 2);} \\ -R_3 I_3 + R_1 I_1 &= E_1 + E_3 \text{ (контур 3);} \end{aligned} \right\}$$

$$I_3 = (E_4 - E_2) / R_3 = (4 - 2) / 1 = 2 \text{ A;}$$

$$I_2 = -(E_4 + E_3) / R_2 = -(4 + 3) / 2 = -3,5 \text{ A;}$$

$$I_1 = (E_1 + E_3) / R_3 + (R_1 / R_3) / I_3 = (1 + 3) / 4 + (1 / 4) 2 = 1,5 \text{ A}$$

$$I_4 = I_1 + I_3 = 1,5 + 2 = 3,5 \text{ A (a түйіні);}$$

$$I_5 = -I_2 + I_4 = 3,5 + 3,5 = 7 \text{ A (b түйіні);}$$

$$I_6 = I_1 - I_2 = 1,5 + 3,5 = 5 \text{ A (c түйіні).}$$

d түйіні үшін Кирхгофтың бірінші заңының әділеттілігін

$$I_6 + I_3 - I_5 = 5 + 2 - 7 = 0$$

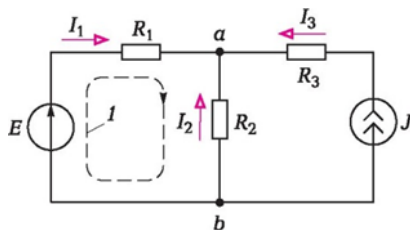
тексеру арқылы шешімнің дұрыстығына көз жеткізуге болады.

Жалпы жағдай. ЭҚК мен ток көздеріне ие схемаларды есептеу кезінде қысқартуларға жол беріледі. Шыныменде, ток көздеріне ие B_J тармақтарының токтары белгілі және ток көздерінің токтарына тең. Сондықтан да, Кирхгофтың екінші заңы бойынша теңдеу құрылуы қажет тәуелсіз контурлардың (ток көздерінсіз!) саны $K = B - B_J - Y + 1$ тең.

2.2-мысал. Ом мен Кирхгоф заңдарының көмегімен элементтердің параметрлері $E = 5 \text{ В}$, $J = 2 \text{ А}$, $R_1 = 2 \text{ Ом}$, $R_2 = 1 \text{ Ом}$, $R_3 = 3 \text{ Ом}$ болған кездегі, 2.18-суреттегі схеманың барлық тармақтарының токтарын анықтау.

Шешімі. Схема $B = 3$ тармақтар санынан тұрады, олардың ішінде ток көзіне ие $B_J = 1$ тармағы, $Y = 2$ (a мен b) түйіндері, $K = B - B_J - Y + 1 = 3 - 1 + 2 - 1 = 1$ (контур 1) тәуелсіз контурлары (ток көздерінсіз) бар.

Тармақтардағы токтардың оң бағытын тандап алып, оларды I_1 , I_2 , I_3 деп белгілейміз. ток $I_3 = J = 2 \text{ А}$.



2.18-сурет

Кирхгофтың екінші заңы бойынша бір (1-контур үшін, оның айналымы бағытын таңдай отырып) тәуелсіз теңдеуді және Кирхгофтың бірінші заңы бойынша (a түйіні үшін) бір ($\sum I = 0$) тәуелсіз теңдеуді құрамыз:

$$\left. \begin{aligned} R_1 I_1 - R_2 I_2 &= E \text{ (контур 1);} \\ I_1 + I_2 + I_3 &= 0 \text{ (} a \text{ түйіні);} \end{aligned} \right\} \text{ немесе } \begin{aligned} 2I_1 - I_2 &= 5; \\ I_1 + I_2 &= -2; \end{aligned}$$

Бірінші және екінші теңдеуді мүшелеп қосу арқылы $I_1 = 1A$ тогын, содан соң екінші теңдеуден $-I_2$ тогының $I_2 = -3A$ екендігін анықтаймыз.

Ом мен Кирхгоф заңдарын қолдана отырып, кез-келген электрлік тізбектің жұмыс режимін есептеп шығаруға болады. Есептеулерді қысқарту үшін түрлі есептеу әдістерін: схемаларды баламалы түрлендіру, контурлық токтар, түйіндік потенциалдар, түйін аралық кернеу және т.б. қолданылады.

2.10.

СХЕМАЛАРДЫ БАЛАМАЛЫ ТҮРЛЕНДІРУ ӘДІСІ

Егер электр тізбегінің алмастыру схемасындағы резистивті элементтер тобын, резистивті элементтері өзгеше жалғанған басқа баламалы топпен алмастырса, күрделі тізбектің есептеулерін қысқартуға болады. Алмастырғаннан кейін тізбектің басқа бөліктерінің жұмыс режимі өзгермейтіндігі, өзара баламалық болып табылады.

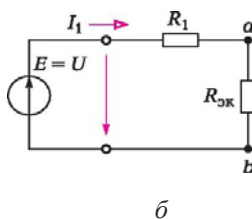
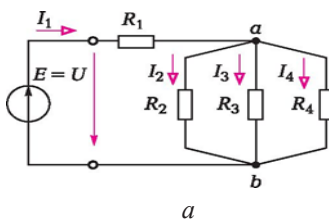
Резистивті элементтерді аралас жалғау. Схемаға қатысты сыртқы болып табылатын бір энергия көзінен тұратын схеманың бір бөлігін резистивті элементтердің аралас (тізбекті-параллель) жалғануы деп қарастыруға болады.

Есептеулер үшін мұндай схеманы резистивті элементтері тізбектей жалғанған баламалыға түрлендірген жөн. Мысалы, 2.19, a суретте a мен b түйіндері арасында кедергілері R_2, R_3 мен R_4 , яғни өткізгіштігі $G_2 = 1/R_2, G_3 = 1/R_3, G_4 = 1/R_4$, ал баламалы өткізгіштігі

$$G_{\text{бал}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \quad (2.14)$$

болатын үш резистивті элемент қосылған.

Резистивті элементтердің параллель жалғануларын, $R_{\text{бал}} = 1/G_{\text{бал}}$ кедергісіне ие баламалы резистивті элементпен алмастырып, тізбектей жалғанған R_1 және $R_{\text{бал}}$ екі резистивті элементтің баламалы схемасын (2.19-сурет, b) аламыз, ондағы ток:



2.19-сурет

$$I_1 = U / (R_1 + R_{\text{бал}}) \quad (2.15)$$

Бастапқы схемадағы параллель тармақтардағы токтар

$$I_2 = U_{ab} / R_2; \quad I_3 = U_{ab} / R_3; \quad I_4 = U_{ab} / R_4; \quad (2.16)$$

мұндағы $U_{ab} = R_{\text{бал}} I_1$.

Резистивті элементтерді жұлдыз және үшбұрыш түрінде жалғау. Резистивті элементтерден үш сәулелі жұлдыз түріндегі тізбектің алмастыру схемасын үшбұрыш түріндегі баламалы схемамен алмастыруға болады, немесе керісінше. Мұндай есептеулер, тұрақты ток пен үш фазалық (6-тарауды қараңыз) күрделі тізбектерінде қолданылады.

Үшбұрыш және жұлдыз түріндегі схемалардың баламасы (2.20-сурет), схеманың өзге бөліктерінен ажыратылып тасталған кедергі немесе өткізгіштіктің мәндерін осы схеманың біраттас түйіндерімен теңдестіру кезінде алынады.

a мен b түйіндері арасындағы кедергіні табайық. Үшбұрыштап жалғау схемасындағы (2.20-сурет, a) a мен b түйіндері арасындағы өткізгіштік:

$$\frac{1}{R_{ab}} + \frac{1}{R_{bc} + R_{ca}} = \frac{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}{R_{ab} R_{bc} + R_{ca} R_{ab}}$$

тең. a мен b түйіндері арасындағы кедергі – осы түйіндер арасындағы өткізгіштікке кері шама, яғни

$$r_{ab} = (R_{ab} R_{bc} + R_{ca} R_{ab}) / (R_{ab} + R_{bc} + R_{ca})$$

Жұлдыз түрінде жалғау схемасында (2.20-сурет, $б$), a мен b түйіндері арасындағы кедергі екі тармақтың кедергілерінің қосындысына тең: $R_a + R_b$.

$$R_a + R_b = \frac{R_{ab} R_{bc} + R_{ca} R_{ab}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} = \frac{R_{ab} R_{bc} + R_{ca} R_{ab}}{\sum R_{\Delta}} \quad (2.17)$$

баламалық шартының теңдеуі болып табылады, мұндағы $\sum R_{\Delta}$ — үшбұрыштап жалғау схемасындағы барлық тармақтардың кедергілерінің қосындысы.

(2.17)-де индекстерді айналып орынын ауыстыру, үшбұрыш және жұлдызды схемалардың аттас b және c түйіндері мен s және a түйіндері арасындағы кедергілер теңдігінің шарттарын анықтайды

$$R_b + R_c = \frac{R_{bc}R_{ca} + R_{ab}R_{bc}}{\sum R_{\Delta}}; \quad (2.18)$$

$$R_c + R_a = \frac{R_{ca}R_{ab} + R_{bc}R_{ca}}{\sum R_{\Delta}}. \quad (2.19)$$

(2.17) мен (2.19)-ды қосып және алынған қосындыдан (2.18)-ді алып тастасақ

$$R_a = R_{ab}R_{ca} / \sum R_{\Delta} \quad (2.20)$$

жұлдыз тармақтарының кедергілерінің өрнектерін табамыз.

(2.20)-да индекстерді айналып орынын ауыстыру жұлдыздың басқа екі тармақтарының кедергілеріне арналған өрнекті анықтайды

$$R_b = R_{bc}R_{ab} / \sum R_{\Delta} \quad (2.21)$$

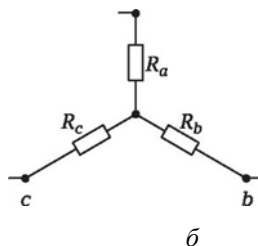
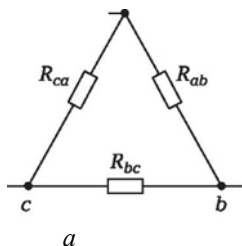
$$R_c = R_{ca}R_{bc} / \sum R_{\Delta} \quad (2.22)$$

Үшбұрыш тармақтарының кедергілерінің теңдігі кезінде ($R_{ab}=R_{bc}=R_{ca}=R_{\Delta}$), баламалы жұлдыздың тармақтарының кедергілері де бірдей:

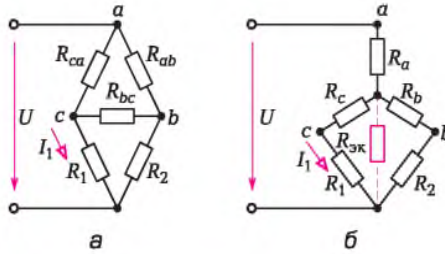
$$R_{\chi} = R_{\Delta}/3. \quad (2.23)$$

Резистивті элементтерден жасалынған жұлдыздың баламалы үшбұрышқа кері түрленуі де мүмкін. Ол үшін (2.20) — (2.22) өрнектерін қос-қостан көбейтіп, алынған көбейтінділерді қосайық:

$$R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a = R_{ab} R_{bc} R_{ca} / (R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}).$$



2.20-сурет



2.21-сурет

Бұл қатынасты (2.22)-ге бөліп, үшбұрыш тармақтарының кедергісін анықтаймыз:

$$R_{ab} = R_a + R_b + R_a R_b / R_c. \quad (2.24)$$

(2.24)-те индекстерді айналып орынын ауыстыру үшбұрыштың басқа екі тармақтарының кедергілеріне арналған өрнекті анықтайды:

$$R_{bc} = R_b + R_c + R_b R_c / R_a, \quad (2.25)$$

$$R_{cf} = R_c + R_a + R_c R_a / R_b. \quad (2.26)$$

2.3-мысал. Кедергілерінің мәндері $R_{ab} = R_{bc} = 10 \text{ Ом}$, $R_{ca} = 20 \text{ Ом}$, $R_1 = 2,5 \text{ Ом}$, $R_2 = 5 \text{ Ом}$ болған кездегі резистивті элементтердің жалғануының көпірлік схемасының (2.21-сурет, а) кедергісін есептеп шығару.

Шешімі. R_{ab} , R_{bc} , R_{ca} үшбұрыштап жалғанған резистивті элементтердің схемасын жұлдыз түрінде жалғаудың баламалы схемасына алмастырайық, оның тармақтарының кедергісін (2.20) – (2.22) формулалары бойынша анықтаймыз:

$$R_a = 5 \text{ Ом}, R_b = 2,5 \text{ Ом}, R_c = 5 \text{ Ом}.$$

Резистивті элементтерді аралас жалғаудың алынған схемасындағы екі параллель тармақтарды баламалы резистивті элементке ие бір тармақпен алмастырайық (2.21, б суретте штрих сызықтармен көрсетілген), оның кедергісін (2.14) бойынша анықтаймыз:

$$R_{\text{бал}} = \frac{(R_c + R_1)(R_b + R_2)}{R_c + R_1 + R_b + R_2} = 3,75 \text{ Ом}$$

Көпірлік схема мен екі резистивті элементтері тізбектеп жалғанған, алынған баламалы схеманың кедергісі $R_a + R_{\text{бал}} = 8,75 \text{ Ом}$ ға тең.