

Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігі
«Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс
университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Баймаганов А.С., Мусапирова Г.Д.

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНИКА
НЕГІЗДЕРІ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНИКА**

Оқу құралы

Алматы 2022

ӘОЖ 621.31 (075.8)

КБЖ 31.2

Б 20

Пікір берушілер:

Т.ғ.к., Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университетінің профессоры

Д.М. Алиханов,

PhD, Логистика және коммуникация академиясы “Автоматтандыру және телекоммуникациялар” институт директоры

А.Ж. Тойгожинова,

Т.ғ.к., Ғ. Даукеев атындағы КЕАҚ АЭЖБУ доценті

Б.К. Курпенев

АЭЖБУ Ғылыми кеңесі басуға ұсынды (___.__.2021ж. №__ хаттама).

АЭЖБУ 2021 ж. Ведомостік әдебиеттер басылымдарын шығарудың тақырыптық жоспары бойынша басылады, реті 31

Баймаганов А.С., Мусапирова Г.Д.

Б20 Электротехника және электроника негіздері. Электротехника және электроника. «В062 – Электротехника және энергетика» Жылуэнергетика бағыты білім беру бағдарламасы бойынша оқитын студенттерге арналған дәрістер жинағы. – Алматы: АЭЖБУ, 2022. – 108 б.: кесте 4, суреттер 113, әдеб. көрсеткіші 11 атау.

ISBN 978-601-358-021-0

«Электротехника және электроника негіздері» және «электротехника және электроника» оқу құралы аталған пәндерінің негізгі бөлімдерін қамтиды: электр тізбектері, электр машиналары және электроника негіздері.

Оқу құралы «В062 – Электротехника және энергетика» Жылуэнергетика бағыты білім беру бағдарламасы бойынша оқитын студенттерге арналған.

ӘОЖ 621.31 (075.8)

КБЖ 31.2

ISBN 978-601-358-021-0

© АЭЖБУ, 2022

Баймаганов А.С.,

Мусапирова Г.Д. 2022

Кіріспе

Электротехника – бұл электрлік және магниттік құбылыстардың электр энергиясын өндіру және түрлендіруде, шығынсыз алыс жерлерге жеткізуде, ақпаратты жеткізуде қолдануын қарастыратын ғылым және техника саласы.

Адамның барлық материалдық және рухани қажеті электр энергиясын пайдалану және қолдану арқылы өндіріледі. Электротехника ұғымы өте кең ұғым. Жалпы алғанда ол - электр энергиясын өндіруді, тасымалдауды және таратуды қарастырады. Электротехника және электрониканың негіздері пәні әртүрлі технологиялық үрдістерде қолданылатын, кең тараған негізгі электрлік қондырғылардың жұмысын, электроника элементтерін және осы элементтерден тұратын құрылғылардың жұмысын түсіну үшін жалпы мағлұмат беретін пән болып есептеледі.

«Электротехника және электроника негіздері» және «электротехника және электроника» пәндерінің негізгі бөлімдері бойынша келесі тақырыптар кіреді: электр тізбектері, электр машиналары және электроника негіздері. Тұрақты және айнымалы токтың сызықты және сызықты емес электр тізбектерін есептеудің негізгі анықтамалары мен әдістері, магниттік тізбектерді талдау және есептеу, сызықтық электр тізбектеріндегі өтпелі процестерді талдау келтірілген. Тұрақты және айнымалы ток трансформаторлары мен электр машиналарының дизайны, жұмыс принципі және сипаттамалары қарастырылған. Өнеркәсіптік электрониканың аналогты және сандық құрылғыларының негіздері қарастырылады.

Оқу құралы студенттерге жалпы ақпарат береді, әртүрлі құрылғылар мен қондырғылардың әрекетін түсініп, зерттей аласыз, оларды ғылым мен техниканың әртүрлі салаларында қолдануды үйренесіз.

1 Негізгі түсініктер мен анықтамалар. Тізбектердің негізгі заңдары. Электр тізбектерін баламалы түрлендіру

1.1 Негізгі түсініктер мен анықтамалар.

Электр тогы ол затта немесе вакуумда электр зарядын еркін тасымалдаушылардың бірбеткей бағытта қозғалу құбылысы. Электр тізбектерінде электр өткізгіштік токтың (*қарқындылығы*) интенсивтігі өткізгіштік ток ретінде қарастырылады. Ол шаманы өткізгіштік ток күші немесе өткізгіштік тогы дейді. Бұл шама скалярлық болып $I(i)$ әрпімен белгіленеді. Токтың өлшем бірлігі ампер (A).

Электрлік кернеу бұл потенциалдар айырымы. Статикалық электр өрісінде зарядталған денеге өрістің күштері әсер етеді, нәтижеде бұл дене қозғалып бір нүктеден екінші нүктеге жылжиды. Зарядталған бөлшекті A нүктесінен B нүктесіне жылжып өтуіне электр өрісінің күштерінің жұмысы себепші болады, осы жұмысқа пропорционалды шаманы кернеу деп айтуға болады. Кернеу U әрпімен белгіленеді. Кернеу скалярлық шама, өлшем бірлігі Вольт (V).

Қуат энергетикалық үрдістерінің қарқындылығын (интенсивтілігін) сипаттайды, қуат кернеу мен токтың көбейтіндісіне тең болып табылады.

Активті қуат-электромагниттік энергияны энергияның басқа түрлеріне, мысалы, жылу немесе механикалық энергияға қайтымсыз түрлендірудің қарқындылығы. P әрпімен белгіленеді және Ваттпен (W) өлшенеді. Белсенді қуат құрылғы жасалған материалды, оның өлшемдері мен бағасын анықтайды. Мысалы, қарсылық мәні 1 Ом болатын резисторды қарастырыңыз. Олардың біреуі қант дәнінен аз және аз белсенді қуатқа ие болуы мүмкін, ал екіншісі үстелден үлкенірек және сәйкесінше үлкен Белсенді қуатқа ие болуы мүмкін. Біріншісі электроника құрылғыларында, екіншісі бөлмені жылыту үшін қолданылатын қуатты құрылғының қыздыру элементі ретінде қолданылады.

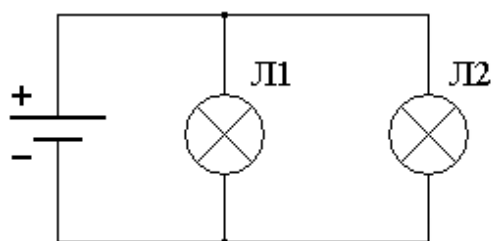
Реактивті қуат - электр өрісінің энергиясын магнит өрісінің энергиясына және керісінше түрлендіру қарқындылығы. Ол Q әрпімен белгіленеді және реактивті (var) вольт-ампермен өлшенеді.

Электр тізбегі, ол электромагниттік энергиясын өндіруге, тасымалдауға және қабылдауға арналған құрылғылар жиынтығы. Электр тізбегіндегі әрбір құрылғы тізбектің элементі деп аталады. Тізбектің барлық элементтері сызықты болса, тізбек *сызықты* ток тізбегі деп қарастырылады, ал арасында ең болмаса біреуі *Сызықты емес* болса, тізбек *Сызықты емес* ток тізбегіне жатады. *Сызықты* элементтердің параметрлері токтың немесе кернеудің шамасымен бағытына тәуелсіз деп саналады, керісінше жағдайда элемент *Сызықты емес* болып табылады. Элементтерді бір-бірімен жалғануын графикалық түрде кескіндейді.

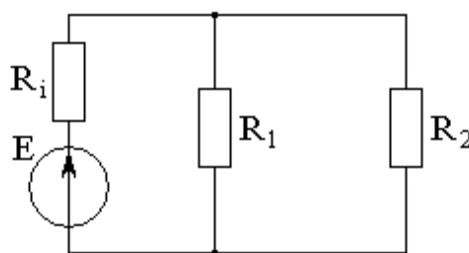
Электрлік сұлба – ол стандартқа сәйкес келтірілген шартты белгілер арқылы көрсетілген жеке құрылғылардың бір- бірімен жалғану суреті.

Тізбектерді талдауда және зерттеуде орын басарлық сұлбасы қолданылады. *Орын басарлық сұлба* тізбектің қасиеттерін белгілі дербес жағдайда негізгі параметрлері арқылы байланысуын көрсететін графикалық бейне. 1.1- суретте

тізбектің электрлік сұлбасы көрсетілген, ал 1.2- суретте осы тізбектің орынбасарлық сұлбасы келтірілген.



1.1 сурет - Тізбектің электрлік сұлбасы



1.2 сурет-Тізбектің орынбасарлық сұлбасы

Электротехникалық құрылғыларды атқаратын жұмысына орай жалпы үш топқа бөлуге болады.

Электромагниттік энергияны өндіретін элементтер *активті*, ал қабылдайтын элементтер *пассивті* деп аталады. *Электр энергиясының көзі* – басқа бір энергияны электр энергиясына түрлендіруге арналған қондырғы немесе аспап (мысалы аккумулятор, генератор, термоэлемент, фотоэлемент, химия элементі). *Электрлік қабылдағыш* (жүктеме) – электр энергиясының қабылдайтын элементтер. Мысалға бұл электр қозғалтқыштар, электр лампалары т.б.

Орынбасарлық сұлбаларда пассивтік элементтер ретінде резистивті, индуктивті және сыйымдылықты элементтер қарастырылады.

Электр энергиясын қабылдап, осы энергияны басқа түрлі энергияларға айналдыратын элементтерді – *резистивті* элемент деп атайды. Резистивті элементтің негізгі параметрі – кедергі. Кедергі – ток пен кернеудің арасындағы байланысты көрсететін коэффициент. Кедергі R әрпімен белгіленеді, өлшем бірлігі [Ом]. Джоуль-Ленц заңына сәйкесті кедергіні төмендегіше анықтауға болады

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{U \cdot I}{I^2} = \frac{U}{I}. \quad (1.1)$$

Кедергісін пайдалануға арналған элементтерді резистор деп атайды. Тізбектегі элементтер бір-бірімен сым арқылы жалғанады. Оның кедергісін табу үшін мына өрнек қолданылады

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.2)$$

l – сым ұзындығы, S – көлденең қимасы, ρ – меншікті кедергісі. Кедергіге кері шама *өткізгіштік* деп аталады, өлшем бірлігі Сименс

$$g = \frac{P}{U^2} = \frac{U \cdot I}{U^2} = \frac{I}{U}.$$

Индуктивті элемент (индуктивтік шарғы), индуктивтілігін пайдалану үшін арналған электр тізбегінің элементі. Индуктивті элементтің негізгі параметрі – индуктивтілік. Индуктивтілік шарғының магнит өрісін тудыратын қабілетін сипаттайтын параметр, L әрпімен белгіленеді. Индуктивтілік, ол – физикалық шама, магнит ағынының ілінісі және токтың арасындағы байланысты көрсететін коэффициент

$$L = \frac{\Psi}{i}. \quad (1.3)$$

Индуктивтіліктің өлшем бірлігі Генри [Гн], негізгі сипаттамасы вебер-амперлік сипаттама. Бұл элементтерде кернеу мен токтың арасындағы тәуелділік электромагниттік индукция заңы арқылы табылады:

$$-e = u = L \frac{di}{dt} \quad \text{немесе} \quad i = \frac{1}{L} \int u \cdot dt, \quad (1.4)$$

индуктивті элементтегі лездік қуат мынау өрнек бойынша анықталады:

$$p = u_L \cdot i = L \cdot i \cdot \frac{di}{dt}.$$

Катушка жинаған энергия, әрқашанда оң болып, былай анықталады:

$$W_L = \int_{-\infty}^t p dt = \int_{-\infty}^t Li \frac{di}{dt} dt = \frac{Li^2}{2}.$$

Сыйымдылықты элемент (конденсатор), ол – электр сыйымдылығын пайдалануға арналған электр тізбегінің элементі. Сыйымдылық – элементтің электр өрісін тудыру қабілетін сипаттайтын параметр, « C » әрпімен белгіленеді, өлшем бірлігі Фарад [Ф]. Негізгі сипаттамасы кулон-вольттық сипаттама

$$C = \frac{q}{u}. \quad (1.5)$$

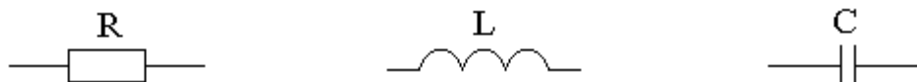
Кернеу мен токтың арасындағы тәуелділік

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt} \quad \text{немесе} \quad u_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int i dt. \quad (1.6)$$

Сыйымдылық элементіндегі электр өрісінің энергиясы

$$W_3 = \int_{-\infty}^t p dt = \int_{-\infty}^t C u_C \frac{du_C}{dt} dt = \frac{C u_C^2}{2}. \quad (1.7)$$

Резистивті, индуктивті және сыйымдылықты элементтердің шартты белгісі 1.3 – суретте көрсетілген.



1.3 сурет - Резистивті, индуктивті және сыйымдылықты элементтердің шартты белгілері

Идеалды және реалды энергия көздері.

Идеалды электр қозғаушы күш көзі (ЭҚК) бұл ішкі кедергісі нөлге тең деп алынған ЭҚК көзі. Идеалды ЭҚК көзінен тұратын тізбектерде ЭҚК, немесе қоректің қысқыштарының арасындағы кернеу токтың шамасына байланысты емес. ЭҚК көзінде зарядтар бөгде күштер әсерінен потенциалы төмен нүктеден потенциалы жоғары нүктеге тасымалданады деп келісілген. ЭҚК E әрпімен белгіленеді.

Идеалды ток көзінің ішкі өткізгіштігі нөлге тең болып, ал тоғы жүктеменің кернеуіне тәуелсіз. Тұрақты ток тізбектерінде ток көзінің тоғы J әрпімен белгіленеді. Қоректердің шартты белгісі 1.4 суретте келтірілген.



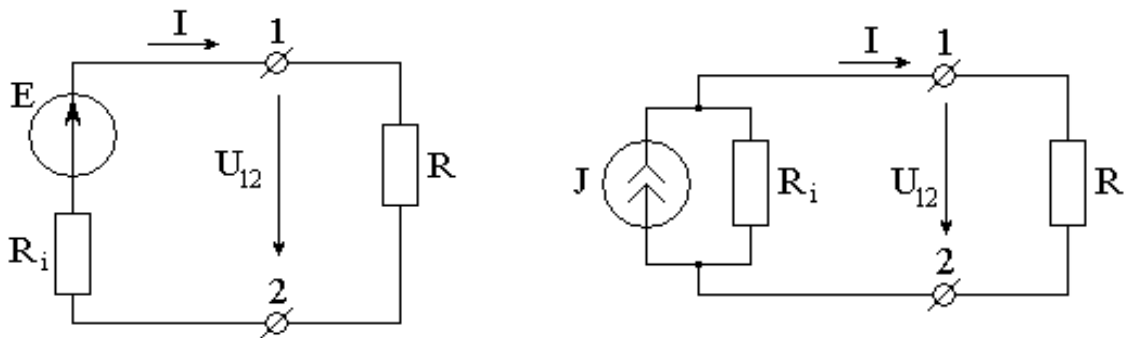
1.4 сурет - Қоректердің шартты белгісі

Реалды ЭҚК көзі ішкі кедергісі және ЭҚК-пен анықталады, реалды ток көзі тоғы және ішкі өткізгіштігімен сипатталады (1.5-сурет).

Бұл орынбасарлық сұлбалардан U_{12} кернеу төмендегі өрнектерден табылады:

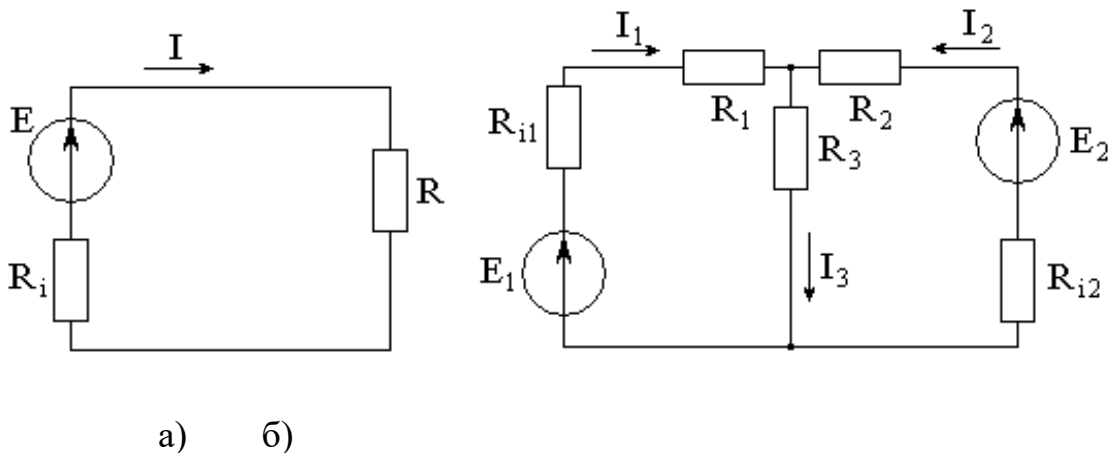
$$U_{12} = E - I \cdot R_i \quad \text{және} \quad U_{12} = J \cdot R_i - I \cdot R_i,$$

мұнда R_i – қоректердің ішкі кедергісі.



1.5 сурет - Реалды ЭҚК көзі және реалды ток көздердернің сипатталуы

Егер $E = J \cdot R_i$ болса, 1.5-суреттегі сұлбалар бір-біріне баламалы болып табылады. Тізбектің элементтері бір-бірімен әртүрлі сұлба бойынша жалғанады. Бұл сұлбалар тармақталмаған немесе тармақталған болуы мүмкін. Егер тізбек элементтерінен бір ток өтсе (1.6 а сурет), элементтер *тізбектей* (бірізді) жалғанған деп аталады, ал тізбектің осындай бөлігін *тармақ* дейміз. Бірнеше тармақтарды түйісетін жері *түйін* деп аталады. Түйін сұлбада нүктемен белгіленеді. Егер тармақтардың бастары бір түйінделіп, ал аяқтары өзара бір түйінделіп жалғанса, жалғану параллель деп аталады. Параллель және бірізді жалғанған бөліктердің жиынтығы тармақталған сұлба болып табылады (1.6 б сурет).



1.6 сурет - Тізбектей (бірізді) және тармақталған электр тізбектері

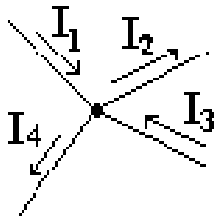
Бірнеше тармақтардың тұйықталған бөлігі *контур* (өнбойы) деп аталады.

1.2 Электр тізбектердің негізгі заңдары. Электр тізбектеріндегі эквивалентті түрлендірулер

Электр тізбектерін зерттеуде және талдауда Кирхгофтың заңдары қолданылады.

Кирхгофтың бірінші заңы: *түйіндегі токтардың алгебралық қосындысы нөлге тең*: $\sum I_i = 0$. Әдетте бірнеше ток түйінге бағытталса, бірнешесі түйіннен

бағытталады (1.7 сурет). Түйінге бағытталған токтардың таңбасын оң, түйіннен бағытталған токтардың таңбасын теріс деп алуға келісеміз (керісінше де алуға болады).



1.7 сурет – Түйіндегі токтардың бағыты

2.1 суреттегі түйін үшін Кирхгофтың бірінші заңы мынадай жазылады:

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0 \text{ немесе } I_1 + I_3 = I_2 + I_4.$$

Кирхгофтың II заңы: *тұйықталған контурдағы кернеулердің алгебралық қосындысы нөлге тең*

$$U_1 + U_2 + U_3 + U_4 = 0 \text{ немесе } \sum U_k = 0, \quad (1.8)$$

k – контурға кіретін элементтердің саны.

Егер контурға кіретін тармақтарда ЭҚК көзі болса, Кирхгофтың заңын былай жазады:

$$\sum U_k = \sum E_i. \quad (1.9)$$

Тұйықталған контурдағы кернеулердің алгебралық қосындысы осы контурдағы ЭҚК-дің алгебралық қосындысына тең. Бұл заң бойынша теңдеу құрастыруда контурды айналып өту бағыты еркінше талданады, осы бағытқа бағытты кернеулер мен ЭҚК-тер оң таңбамен алынады, ал қарсы бағытты кернеулер мен ЭҚК-тер теріс таңбамен алынады. Мысалға 1.8-суреттің сыртқы контуры үшін Кирхгофтың екінші заңы мынадай:

$$I_1 \cdot (R_{i1} + R_1) - I_2 \cdot (R_{i2} + R_2) = E_1 - E_2. \quad (1.10)$$

Мұнда контурды айналып өту бағыты сағат тілінің бағытында алынған.

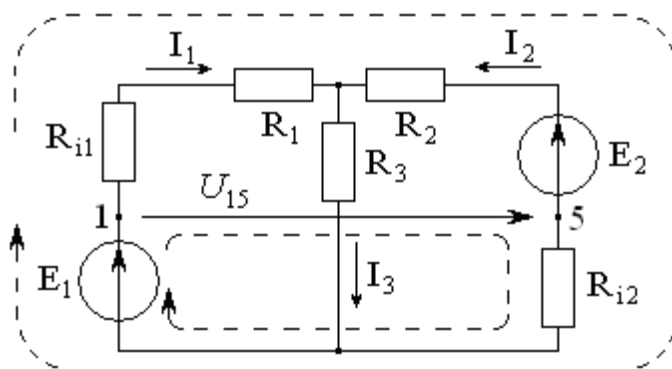
Тізбектердің бөліктеріндегі кернеулері мен токтарының арасындағы мөлшерлік байланыстар Ом заңымен анықталады. ЭҚК көздерінен және бірнеше резистордан тұратын тізбектің бөлігі үшін *Ом заңы* мынадай жазылады

$$I = \frac{U_{ab} + \sum E}{\sum R}, \quad (1.11)$$

мұнда: $\sum R$ – «ab» бөліктегі кедергілердің қосындысы;

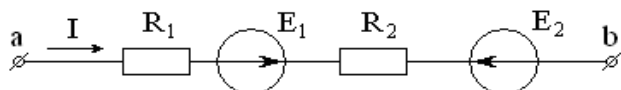
$\sum E$ – «ab» учаскесіндегі ЭҚК-тердің қосындысы;

$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ – «a» және «b» нүктелер арасындағы кернеу.



1.8 сурет – Контурлар бойынша Кирхгофтың екінші заңын жазу

Ток скалярлық шама болғанымен теңдеулерді құрастыруда токтардың бағыты есепке алынады. Сонда ток әрқашанда потенциалы жоғары нүктеден потенциалы төмен нүктеге бағытталады деп есептейміз. Егер ЭҚК токпен бағыттас болса, оның таңбасы оң, ал керісінше жағдайда теріс болып жазылады.



1.9 сурет –Тізбек бөлігі үшін орынбасарлық сұлба

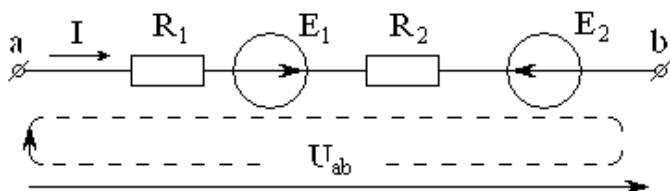
1.9-суретінде келтірілген орынбасарлық сұлба үшін Ом заңы

$$I = \frac{\phi_a - \phi_b + E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_{ab} + E_1 - E_2}{R_1 + R_2}. \quad (1.12)$$

Бұл өрнекті ықшамдап мына түрде жазуға болады:

$$I \cdot R_1 + I \cdot R_2 - U_{ab} = E_1 - E_2. \quad (1.13)$$

Соңғы теңдеуге мынадай орынбасарлық сұлба сәйкес келеді (1.10 сурет).



1.10 сурет - Орынбасарлық сұлба

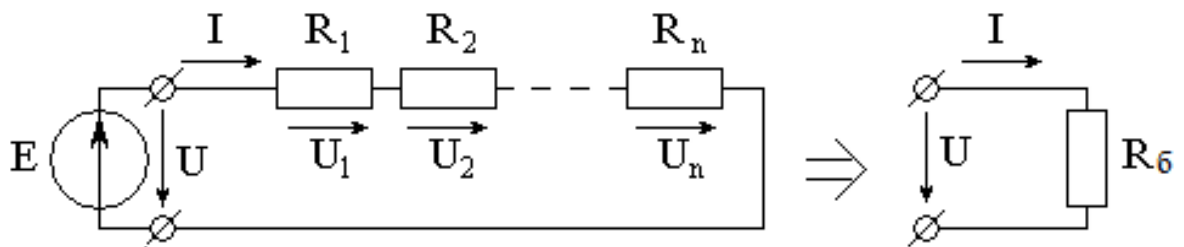
U_{ab} кернеуді «а» және «b» нүктелер арасында орналасқан кернеу көзінің кернеуі деп қарастыруға да болады, сонда 1.10-суретінде келтірілген сұлба тұйық контур болып табылады, ал соңғы өрнекті Кирхгофтың екінші заңы деп былайша тұжырымдауға болады: тізбектің кез келген екі нүктесінің арасындағы кернеу мен осы екі нүктені қосып тұрған тізбек бөлігіндегі кернеулердің алгебралық

қосындысы тізбектің осы бөлігіндегі ЭҚК-тердің алгебралық қосындысына тең. Кирхгофтың екінші заңымен қолданып екі нүкте арасындағы кернеуді табу мүмкін. Мысалға, 1.8-суреттегі U_{15} кернеуді табу үшін кернеу стрелкасы, R_{12} және E_1 параметрлерге сәйкесті элементтерден тұратын контурды қарастырамыз. Кирхгофтың екінші заңы бойынша жазылады, бұл жерден: $U_{15} - I_2 \cdot R_{12} = -E_2 + E_1$

Тізбектерді баламалы түрлендіру. Кирхгоф және Ом заңдарын қолданып күрделі тізбектерді қарапайым тізбекке, немесе тізбектің бірнеше бөлігін бір бөлікке алмастыруға болады. *Бірнеше тізбектей жалғанған резистивтік элементтерді баламалы бір резистивтік элементке ауыстыруға болады.* Оның баламалы кедергісі R_6 , Кирхгофтың екінші заңына сәйкесті жеке элементтердің кедергілерінің қосындысына тең болып анықталады: $R_6 = R_1 + R_2 + \dots + R_n$.

Түрлендіру 1.11-суретте көрсетілген.

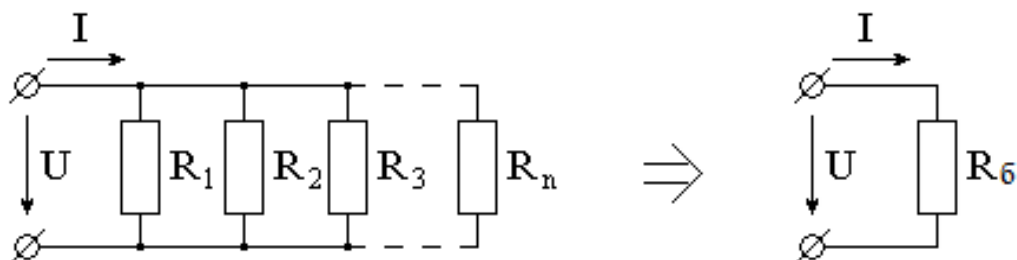
$$R_6 = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (1.14)$$



1.11 сурет – Тізбекті түрлендіру

Бірнеше параллель жалғанған резистивтік элементтерді баламалы бір өткізгіштігі $g_6 = 1/R_6$, резистивтік элементке ауыстыруға болады. Баламалы өткізгіштік Кирхгофтың бірінші заңына сәйкесті жеке элементтердің өткізгіштіктерінің қосындысына тең болып табылады (1.12 сурет)

$$g_6 = g_1 + g_2 + \dots + g_n \text{ немесе } \frac{1}{R_6} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (1.15)$$



1.12 сурет - Бірнеше параллель жалғанған резистивтік элементтерді Кирхгофтың бірінші заңына сәйкесті баламалау

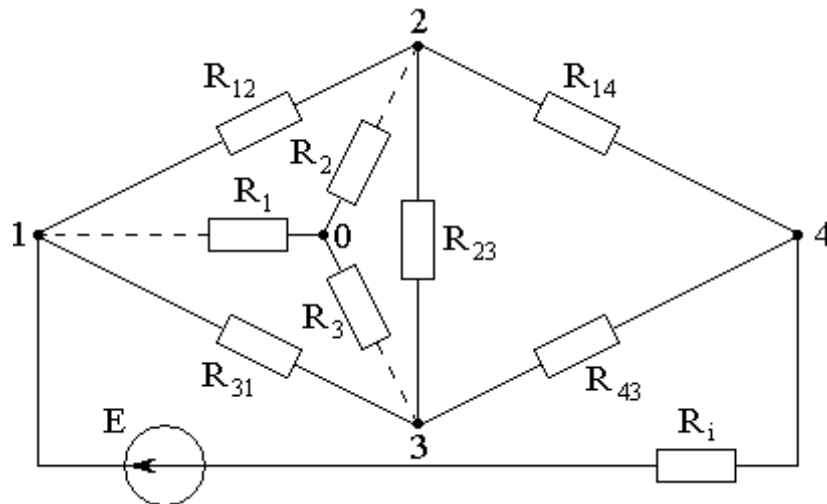
Екі параллель жалғанған резисторлық элементтердің жалпы кедергісі:

$$R_0 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (1.16)$$

Кейбір кезде элементтердің жалғануы не тізбектей, не параллель жалғануға жатпайды, мысалға 1.13-суретте көрсетілген көпір сұлбасында кедергілері R_{12} , R_{23} және R_{31} элементтер бір –бірімен үшбұрыш сұлбасы бойынша жалғанған. Осындай тұтынушының баламалы кедергісін есептеу үшін үшбұрыштап жалғанған элементтерді баламалы, үш сәулелі жұлдыз тәрізді жалғауға келтіруге болады. 1.13 -суретінде жұлдыз тәрізді жалғанған элементтердің кедергілері $R_1 R_2 R_3$ деп алынған. Кейбір кезде жұлдыз тәрізді жалғауды үшбұрыш схемасы бойынша жалғауға тұра келеді.

Үшбұрыштап жалғанған (1.13 сурет) элементтердің кедергілері арқылы жұлдызша кедергілері мынау өрнектерге сәйкесті табылады:

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad R_3 = \frac{R_{23} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (1.17)$$



1.13 сурет - Үшбұрыштап жалғанған элементтердің кедергілерін жұлдызша кедергілеріне баламалау

Алынған сұлбаның эквивалентті кіріс кедергісі мына формула бойынша анықталады

$$R_0 = R_i + R_1 + \frac{(R_2 + R_{14}) \cdot (R_3 + R_{43})}{R_2 + R_{14} + R_3 + R_{43}}. \quad (1.18)$$

Кедергі R_i және R_1 тізбектей қосылған, ал тармақтар кедергіге $(R_2 + R_{14})$ и $(R_3 + R_{43})$ параллель жалғанған.

Кедергі жұлдызын эквивалентті үшбұрышқа түрлендіру.

Кейде тізбекті жеңілдету үшін қарсылық жұлдызын эквивалентті үшбұрышқа айналдыру пайдалы. R_1 , R_2 және R_3 тең-қарсы жұлдызын 1, 2 және 3 түйіндер арасында қосылған R_{12} , R_{23} және R_{31} , кедергілерінің эквивалентті үшбұрышымен алмастырамыз.

Эквивалентті үшбұрыштың бүйірінің кедергісі жұлдыздың іргелес екі сәулесінің кедергісінің қосындысына және қалған сәуленің кедергісіне бөлінген олардың көбейтіндісіне тең. Үшбұрыштың жақтарының кедергісі мына формулалар бойынша анықталады:

Жұлдызша жалғауды баламалы үшбұрышшыға келтіру өрнектері

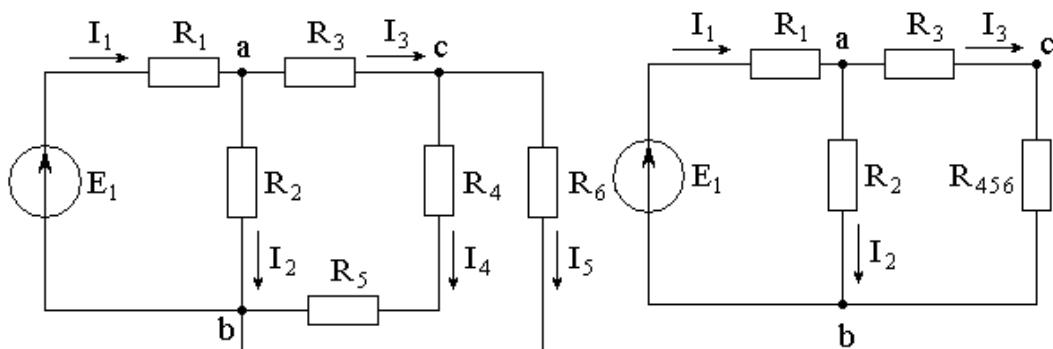
$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}; R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}; R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2}. \quad (1.19)$$

2 Тұрақты ток тізбектері. Бір энергия көзі бар тұрақты токтың сызықты электр тізбектерін есептеу

2.1 Сұлбаны жинақтау әдісі. Тармақталған тізбектерді бір тармаққа келтіру

Тармақталған бір қорек көзді тізбекті есептеуде параллель және бірізді жалғанған бөліктерін алмастырып тізбектегі пассивті элементтерді баламалы бір элементке келтіреді. Сонда тізбек бір активті және бір пассивті элементтен тұрады. Осы баламалы тізбектен негізгі схеманың толық тогы анықталады. Толық ток арқылы қарастырып отырған тізбектегі тармақтардың токтары есептелінеді. 2.1-суреттегі токтарды есептеуін қарастырайық. R_4 және R_5 кедергілі элементтер бір-бірімен тізбектей болып R_6 кедергілі элементке параллель жалғағандықтан R_{456} кедергі мынау теңдіктен табылады

$$R_{456} = \frac{(R_4 + R_5) \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6}. \quad (2.1)$$



2.1 сурет – Толық тармақталған тізбек сұлбасы

2.2 сурет - Орынбасарлық

Түрлендіру нәтижесінде тізбектің орынбасарлық сұлбасы ауысады (2.2 сурет) 2.2-суреттегі орынбасарлық сұлбаның баламалы кедергісінің өрнегі:

$$R_{kip} = R_1 + \frac{R_2 \cdot (R_3 + R_{456})}{R_2 + R_3 + R_{456}}. \quad (2.2)$$

Қарастырып отырған тізбектің толық тогы Ом заңына сәйкес есептелінеді:

$$I_1 = \frac{E_1}{R_{kip}}.$$

Тізбектің «ab» бөлімі үшін Ом заңы бойынша 2.2-суреттегі сұлбада I_2 және I_3 токтарын табамыз:

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2} = \frac{1}{R_2} \cdot I_1 \cdot \frac{R_2 \cdot (R_3 + R_{456})}{R_2 + R_3 + R_{456}} = I_1 \cdot \frac{(R_3 + R_{456})}{(R_2 + R_3 + R_{456})}; \quad (2.3)$$

$$I_3 = \frac{U_{ab}}{(R_3 + R_{456})} = \frac{1}{(R_3 + R_{456})} \cdot I_1 \cdot \frac{R_2 \cdot (R_3 + R_{456})}{R_2 + R_3 + R_{456}} = I_1 \cdot \frac{R_2}{(R_2 + R_3 + R_{456})} \quad (2.4)$$

Соңғы екі өрнек I_2 және I_3 параллель жалғанған тармақтардағы токтардың тармақталу (бөліну) өрнегі деп аталады. Осы формула бойынша, параллель тармақтардың біріндегі ток «бөтен» параллель тармақтың кедергісіне пропорционалды тармақталмаған тізбектегі токтың бір бөлігіне тең болады.

Осы өрнекпен қолданып I_4 және I_5 токтарды табамыз

$$I_4 = I_3 \cdot \frac{R_6}{(R_4 + R_5) + R_6}, \quad I_5 = I_3 \cdot \frac{(R_4 + R_5)}{(R_4 + R_5) + R_6}. \quad (2.5)$$

Есептеу нәтижелерін Кирхгофтың бірінші заңына сәйкес жасалған теңдеулерге ауыстыру арқылы тексеру қажет:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad \text{и} \quad I_3 - I_4 - I_5 = 0. \quad (2.6)$$

2.2 Бірлік ток әдісі (пропорционалдық шамалар тәсілі)

Пропорционалдық шамалар тәсілі сынжыр сұлбасы бойынша жалғанған тізбектерді есептеуде ынғайлы. Ең соңғы тармақтың тогын немесе кернеуін есептеуге ынғайлы санға теңестіріп отырып, Ом және Кирхгофтың заңдары арқылы тандап алынған шамаға сәйкесті тармақтардың токтары, тізбек бөліктерін кернеулері және ЭҚК-тің мәні табылады. Есептелген ЭҚК-ті берілген ЭҚК-пен салыстырып пропорционалдық коэффициент есептелінеді. $K = E / E'$. Сызықты тізбектерінде токтар және кернеулер сызықтық принципін орындайды,

сондықтан берілген ЭҚК-тің әсеріндегі токтар және кернеулер K есе арты болып табылады. 2.1-суретте келтірілген тізбектің бесінші тармақтың тогын бір амперге теңестіреміз $I'_5 = 1A$. Ом заңы бойынша $U'_{cb} = I'_5 \cdot R_6$. Төртінші тармақтың тогы мынау өрнектен табылады

$$I'_4 = \frac{U'_{cb}}{R_4 + R_5}. \quad (2.7)$$

Кирхгофтың заңдары бойынша: $I'_3 = I'_4 + I'_5$;

$$U'_{ac} = I'_3 \cdot R_3 \quad \text{и} \quad U'_{ab} = U'_{ac} + U'_{cb} = I'_3 \cdot R_3 + I'_5 \cdot R_6, \quad (2.8)$$

Ом заңынан $I'_2 = U'_{ab} / R_2$ тогын есептеп алып, Кирхгофтың бірінші заңынан $I'_1 = I'_2 + I'_3$ табамыз, ал Кирхгофтың екінші заңынан $E'_1 = I'_1 \cdot R_1 + U'_{ab}$ ЕҚК-ті табамыз. ЭҚК-нің табылған мәні берілген E -ден өзгеше, пропорционалдылық коэффициентін $k = E / E'$ есептейміз. Содан кейін токтар мен кернеулердің бұрын алынған мәндерін оларды k коэффициентіне көбейту арқылы қайта есептеу керек. Нәтижесінде біз олардың шынайы мәндерін аламыз:

$$I_1 = K \cdot I'_1; I_2 = K \cdot I'_2; I_3 = K \cdot I'_3; I_4 = K \cdot I'_4; I_5 = K \cdot I'_5; U_{ab} = K \cdot U'_{ab}; U_{cb} = K \cdot U'_{cb}. \quad (2.9)$$

2.3 Беттестіру әдісі

Беттестіру әдісі жоғарыда қарастырған қабаттасу қағидасына негізделген. Егер тізбектің құрамында бірнеше қорек орналасқан болса, қабаттасу қағидасына сәйкес тізбекті қарапайым, бір қорек көзді тізбектерге бөліп, жекеше токтарды есептеуге болады. Жекеше токтардың алгебралық қосындысы арқылы тармақтардың тогы табылады:

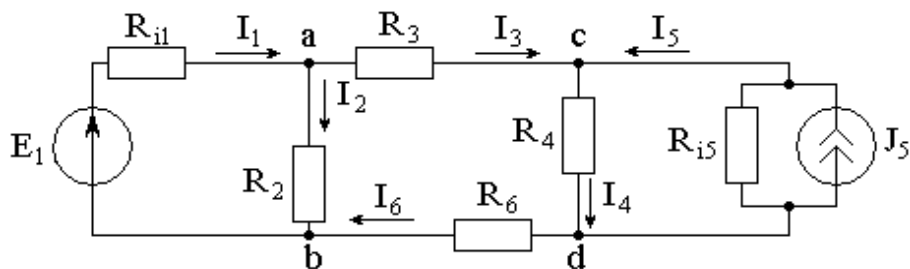
$$I_k = I_k^{(1)} + I_k^{(2)} + \dots + I_k^{(k)} + \dots + I_k^{(n)} = g_{k1} E_1 + h_{k2} J_2 + \dots + g_{kk} E_k + \dots + g_{kn} E_n, \quad (2.10)$$

мұнда $I_k^{(1)}, I_k^{(2)}, I_k^{(k)}, I_k^{(n)}$ – қорекке сәйкес келетін жеке токтар;

g_{kk} және g_{k1}, g_{k2}, g_{kn} – k -тармағын Кіріс және өзаралық өткізгіштіктері;

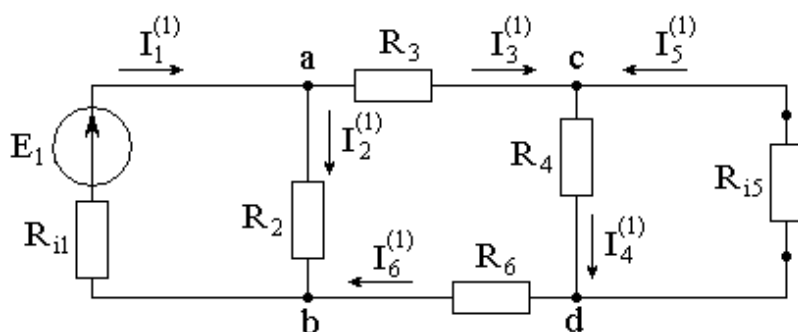
h_{k2} – k - тармағын ток бойынша беріліс коэффициенті.

2.3-суреттегі орынбасарлық сұлбаның токтарын есептеуде беттестіру әдісін қарастырайық



2.3 сурет – Тармақталған тізбектегі токтардың бағыты

Бірінші жекеше токтарды табу үшін 2.3-суреттегі сұлбадан ток көзі алынып тасталады, сонда бірінші жекеше токтар 2.4- сұлбадан анықталады.



2.4 сурет– Тармақталған тізбекті қарапайымдау

g_{11} және g_{21} , g_{31} , g_{41} , g_{51} , g_{61} өткізгіштерін пропорционалдық шамалар тәсілін қолданып анықтаймыз.

Бесінші тармақтың жекеше тогын бір амперге теңестіріп отырып $I_5^{(1)} = -1$ A, тізбектің бөліктеріндегі токтар мен кернеулер шамаларын анықтаймыз

$$U_{cd}^{(1)} = -I_5^{(1)} \cdot R_{i5}; I_4^{(1)} = \frac{U_{cd}^{(1)}}{R_4}; I_3^{(1)} = I_6^{(1)} = -I_5^{(1)} + I_4^{(1)}; \quad (2.11)$$

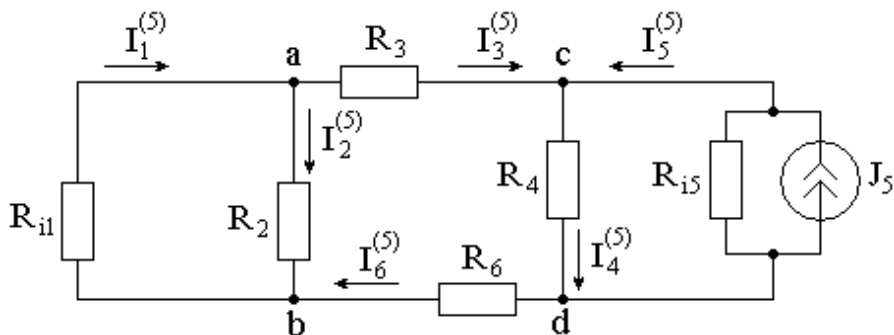
$$U_{ab}^{(1)} = I_3^{(1)} \cdot R_3 + U_{cd}^{(1)} + I_6^{(1)} \cdot R_6; I_2^{(1)} = \frac{U_{ab}^{(1)}}{R_2}; I_1^{(1)} = I_2^{(1)} + I_3^{(1)}; \quad (2.12)$$

$$E_1' = I_1^{(1)} \cdot R_{i1} + U_{ab}^{(1)}. \quad (2.13)$$

Кіріс және өзаралық өткізгіштіктер

$$g_{11} = \frac{I_1^{(1)}}{E_1'}; g_{21} = \frac{I_2^{(1)}}{E_1'}; g_{31} = \frac{I_3^{(1)}}{E_1'}; g_{41} = \frac{I_4^{(1)}}{E_1'}; g_{51} = \frac{I_5^{(1)}}{E_1'}; g_{61} = \frac{I_6^{(1)}}{E_1'}. \quad (2.14)$$

Екінші жекеше токтарды және ток бойынша беріліс коэффициенттерін 2.5-сұлбадан табамыз.



2.5 сурет- Екінші жекеше токтарды және ток бойынша беріліс коэффициенттерін табуға арналған сұлба

Бірінші тармақтың жекеше тогын бір амперге теңестіріп отырып $I_1^{(5)} = -1A$, h_{11} , h_{21} , h_{31} , h_{41} , h_{51} , h_{61} коэффициенттерді анықтаймыз:

$$U_{ab}^{(5)} = -I_1^{(5)} \cdot R_{i1}; I_2^{(5)} = \frac{U_{ab}^{(5)}}{R_2}; I_3^{(5)} = I_6^{(5)} = I_1^{(5)} - I_2^{(5)}; \quad (2.15)$$

$$U_{cd}^{(5)} = -I_3^{(5)} \cdot R_3 + U_{ab}^{(5)} - I_6^{(5)} \cdot R_6; I_4^{(5)} = \frac{U_{cd}^{(5)}}{R_4}; I_5^{(5)} = I_4^{(5)} - I_3^{(5)}; \quad (2.16)$$

$$J_5' = I_5^{(5)} + \frac{U_{cd}^{(5)}}{R_{i5}}. \quad (2.17)$$

Ток бойынша қарастыратын беріліс коэффициенттер:

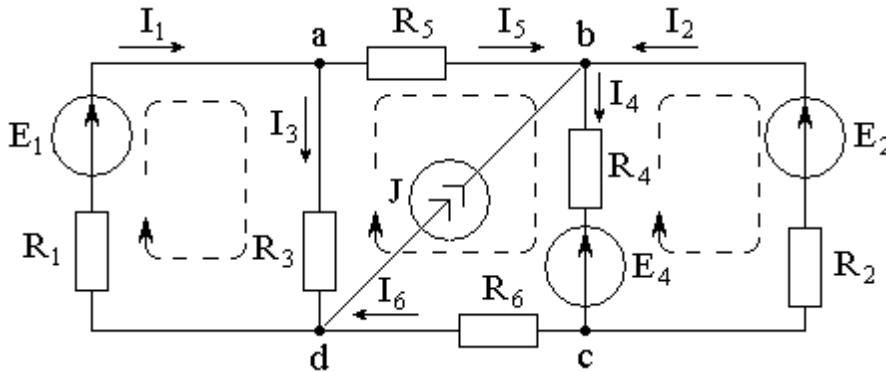
$$h_{55} = \frac{I_5^{(5)}}{J_5'}; h_{15} = \frac{I_1^{(5)}}{J_5'}; h_{25} = \frac{I_2^{(5)}}{J_5'}; h_{35} = \frac{I_3^{(5)}}{J_5'}; h_{45} = \frac{I_4^{(5)}}{J_5'}; h_{65} = \frac{I_6^{(5)}}{J_5'}. \quad (2.18)$$

Бастапқы тізбектің тармақтарындағы токтардың шынайы мәндері екі көздің әрекеті кезінде, қабаттасу принципіне сәйкес формулалар бойынша есептеледі:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_1^{(1)} + I_1^{(5)} = g_{11} \cdot E_1 + h_{15} \cdot J_5; & I_2 &= I_2^{(1)} + I_2^{(5)} = g_{21} \cdot E_1 + h_{25} \cdot J_5; \\ I_3 &= I_3^{(1)} + I_3^{(5)} = g_{31} \cdot E_1 + h_{35} \cdot J_5; & I_4 &= I_4^{(1)} + I_4^{(5)} = g_{41} \cdot E_1 + h_{45} \cdot J_5; \\ I_5 &= I_5^{(1)} + I_5^{(5)} = g_{51} \cdot E_1 + h_{55} \cdot J_5; & I_6 &= I_6^{(1)} + I_6^{(5)} = g_{61} \cdot E_1 + h_{65} \cdot J_5. \end{aligned} \quad (2.19)$$

2.4 Бірнеше энергия көздері бар тұрақты токтың тармақталған сызықты электр тізбектерін Кирхгоф және Ом заңдарын қолдана отырып есептеу

2.4-суреттегі орынбасарлық сұлбаны қарастырамыз. Орынбасарлық сұлба төрт түйіннен және алты токтары белгісіз тармақтардан тұрады. Белгісіз токтарды табу үшін алты теңдеуден тұратын теңдеулер жүйесін құрастыру қажет. Жалпы теңдеулер саны алтау. Кирхгофтың бірінші заңы бойынша құрастыратын теңдеулер саны $n = 4 - 1 = 3$ (түйіндер саны). Кирхгофтың екінші заңы бойынша құрастыратын теңдеулер саны $6 - 3 = 3$.



2.4 сурет - Орынбасарлық сұлба

Кирхгофтың бірінші және екінші заңдарына сәйкес құрылған алты теңдеулер жүйесін жазамыз:

$$\begin{cases} I_1 - I_3 - I_5 = 0 \\ I_5 + J + I_2 - I_4 = 0 \\ I_4 - I_2 - I_6 = 0 \\ I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot R_3 = E_1 \\ I_5 \cdot R_5 + I_4 \cdot R_4 + I_6 \cdot R_6 - I_3 \cdot R_3 = -E_4 \\ -I_2 \cdot R_2 - I_4 \cdot R_4 = E_4 - E_2 \end{cases} \quad (2.20)$$

Тізбектің параметрлері белгілі болса, есептеудің жаңа технологияларын қолданып тармақтардың токтарын табуға болады.

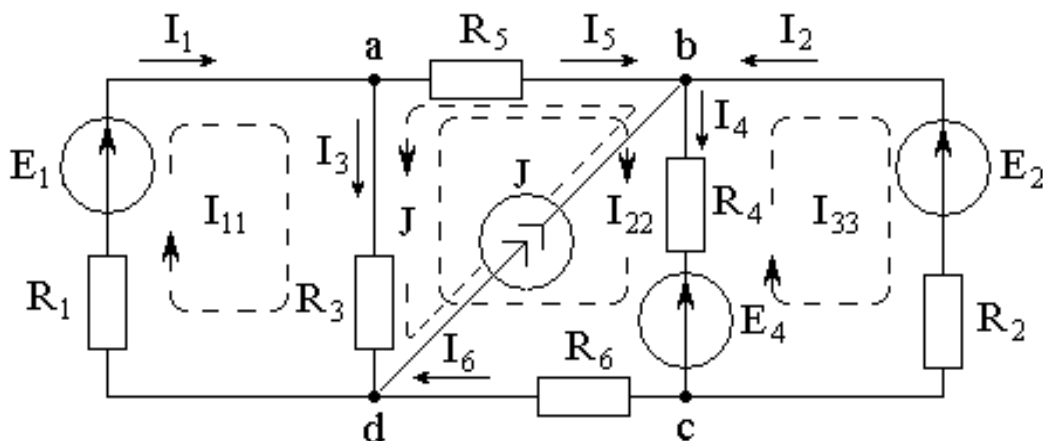
Қарастырып отырған әдістің кемшілігі жүйедегі теңдеулердің саны көптігінде. Теңдеулер санын кеміту мақсатында токтарды есептеуде басқа әдістер қолданылады.

2.4.1 Контурлық токтар әдісі (КТӘ)

Контурлық токтар әдісі бойынша есеп теориялық контурлық токтар үшін жүргізіледі. Контурлық токтардың саны тәуелсіз контурлардың санына тең болып табылады. Теңдеулер Кирхгофтың екінші заңына сәйкес құрастырылады.

Тармақтардың тогы контурлық токтар арқылы табылады. Контурлық токтарды I_{11}, I_{22}, I_{33} – деп белгілейді.

Контурлық токтардың бағыты ойша таңдалады, олардың бағыты сағат тіліне бағытталса немесе теріс болуы мүмкін. Ток көзінен тұратын контурдың тогы ток көзінің тоғына теңестіріледі. 2.5-суретте контурлық токтардың бағыты сағат тілімен алынған. Тәуелсіз контурлардың саны үшеу болғандықтан үш контурлық ток үшін теңдеулерді Кирхгофтың екінші заңына сәйкесті құрастырылып токтар анықталған.



2.5 сурет - Контурлық токтардың бағыты көрсетілген элетр тізбегі

Тәуелсіз тізбектер үшін Кирхгофтың екінші заңы негізінде теңдеулер жүйесін құрамыз. Іргелес тармақтардың элементтерінде осы тармақ бойымен өтетін барлық контурлық токтардан кернеудің төмендеуін ескеру қажет. Алынған теңдеулер жүйесі бұл *контур токтарының әдісі*

$$\begin{cases} I_{11} \cdot (R_1 + R_3) - I_{22} \cdot R_3 + I_{33} \cdot 0 = E_1 - J \cdot R_3 \\ -I_{11} \cdot R_3 + I_{22} \cdot (R_3 + R_5 + R_4 + R_6) - I_{33} \cdot R_4 = -E_4 + J \cdot (R_3 + R_5) \\ I_{11} \cdot 0 - I_{22} \cdot R_4 + I_{33} \cdot (R_2 + R_4) = E_4 - E_2 \end{cases} \quad (2.21)$$

Теңдеулер жүйесін шеше отырып, біз белгісіз контурлық токтарды, содан кейін тізбек тармақтарының қажетті токтарын есептейміз:

$$I_1 = I_{11}; I_2 = -I_{33}; I_3 = I_{11} - I_{22} + J; I_4 = I_{22} - I_{33}; I_5 = I_{22} - J; I_6 = I_{22}. \quad (2.22)$$

Есептеу нәтижелерін Кирхгофтың екінші заңы негізінде жасалған теңдеулерге ауыстыру арқылы тексеруге болады.

2.4.2 Түйіндік потенциалдар әдісі (ТПӘ)

ТПӘ жүйеде шешілетін теңдеулер санын Кирхгофтың бірінші заңы бойынша жазылған теңдеулер санына дейін азайтуға мүмкіндік береді.

Кирхгофтың бірінші заңы негізінде жасалған теңдеулерде токтар тізбектің бөлігі үшін Ом заңын қолдана отырып, түйіндердің потенциалы мен тізбек тармақтарының өткізгіштігі арқылы көрінеді. Белгісіз потенциалдардағы коэффициенттерді топтастырыңыз. Схема түйіндерінің белгісіз потенциалдарының саны жүйедегі теңдеулер санына тең болады. Бұл жағдайда теңдеулер жүйесінде жалғыз шешім болады. Содан кейін, түйіндердің потенциалдарының табылған мәндеріне сәйкес тізбек бөлігі үшін Ом заңын қолдана отырып, тізбек тармақтарының токтары есептеледі.

Мысалға 2.4 орынбасарлық сұлбаның токтарын табу үшін теңдеулер жүйесін құрастырайық. Түйіндік потенциалдар әдісі Кирхгофтың бірінші заңы мен Ом заңына негізделген. Тізбектің «d» түйіні жермен жалғастырылған, демек бұл түйіннің потенциалы нөлге тең $\varphi_d = 0$. Коэффициенттерді топтастырғаннан кейін қалған потенциалдар үшін Кирхгофтың бірінші заңы негізінде құрылған теңдеулер жүйесін аламыз. Теңдеулер жүйесі: Бұл теңдеулер жүйесі негізінен *түйіндік потенциалдар әдісі* болып табылады

$$\begin{cases} \varphi_a \cdot (g_1 + g_3 + g_5) - \varphi_b \cdot g_5 - \varphi_c \cdot 0 = E_1 \cdot g_1 \\ -\varphi_a \cdot g_5 + \varphi_b \cdot (g_2 + g_4 + g_5) - \varphi_c \cdot (g_2 + g_4) = E_2 \cdot g_2 + E_4 \cdot g_4 + J \\ -\varphi_a \cdot 0 - \varphi_b \cdot (g_2 + g_4) + \varphi_c \cdot (g_2 + g_4 + g_6) = -E_2 \cdot g_2 - E_4 \cdot g_4. \end{cases} \quad (2.23)$$

Теңдеулерді құрастыру ережелері:

а) егер ЭҚК және ТК-зінің тогы түйінге бағытталса $E \cdot g$ және J таңбасы оң болып алынады, ал түйіннен бағытталса таңбалары теріс алынады;

б) егер екі түйін арасында тек қана ЭҚК көзі орналасса, бұл екі түйіннен біреуінің потенциалы нөлге теңеседі.

Жүйенің шешімінен потенциалдардың мәніне қарай Ом заңын қолданып токтар табылады:

$$\begin{aligned} I_1 &= (\varphi_d - \varphi_a + E_1) \cdot g_1; & I_2 &= (\varphi_c - \varphi_b + E_2) \cdot g_2; & I_3 &= (\varphi_a - \varphi_d) \cdot g_3; \\ I_4 &= (\varphi_b - \varphi_c - E_4) \cdot g_4; & I_5 &= (\varphi_a - \varphi_b) \cdot g_5; & I_6 &= (\varphi_c - \varphi_d) \cdot g_6. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Егер кез келген тармақта тек ЭҚК-нің идеалды көзі болса, онда осы ЭҚК қосылған екі түйіннің біреуінің потенциалы нөлге тең болуы керек. Сонда басқа түйіннің потенциалы белгілі және ЭҚК шамасына тең болады. Бұл жағдайда теңдеулер саны азаяды.

2.4.3 Екі түйін әдісі

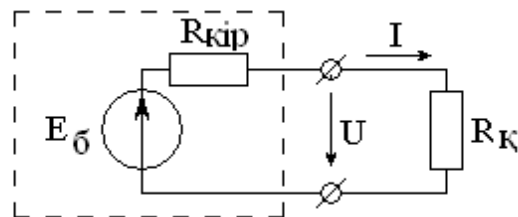
Тізбек екі түйін арасына жалғанған бірнеше тармақтардан тұрса, түйіндік потенциалдар әдісі екі түйін әдісі теп аталады. Екі түйін арасындағы кернеу мынау өрнектен табылады:

$$U_{12} = \frac{\sum_{i=1}^m E_i \cdot g_i + \sum_{i=1}^n J_i}{\sum_{i=1}^q g_i}, \quad (2.25)$$

мұнда m – ЭҚК көзді тармақтар саны, E_i ЭҚК-тері;
 n – ток көзді тармақтар саны, J_i – токтары,
 q – тармақтар саны.

2.4.4 Баламалы генератор әдісі

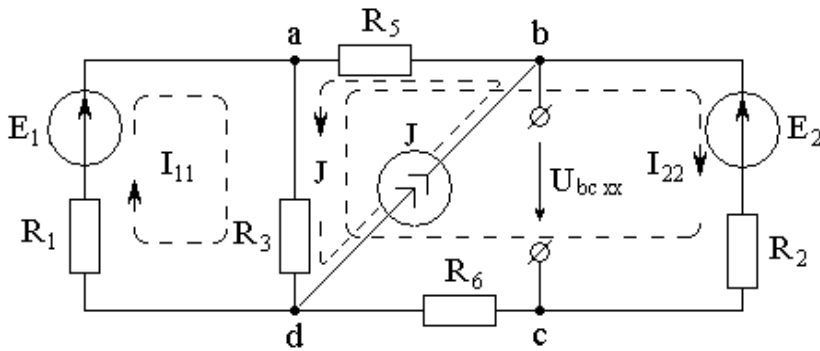
Баламалы генератор әдісі бір тармақтың тоғын есептегенде ыңғайлы деп табылады. Күрделі тізбек қарапайым элементтері тізбектей жалғанған схемаға ауыстырылады. Қарапайым сұлба реалды активті қоспөлүсті және қарастырып отырған тармақтан құрастырылады. Активті қоспөлүсті екі элементтен тұрады- баламалы генератордан және оның ішкі кедергісі $R_{iш}$ резисторлық элементтен. Бұл элементтердің параметрлерін табу үшін қарастырып отырған тармақ ажыратылады, осы қысқыштардың арасындағы кернеу бос жүріс кернеу деп аталады, баламалы генератордың ЭҚК-ші бос жүріс кернеуге тең болып табылады. Баламалы генератордың ішкі кедергісі осы ажыратылған қысқыштардың арасындағы пассивті тізбектің жалпы кедергісіне теңестіріледі.



2.6 сурет - Баламалы генератордың ішкі кедергісін жалпы кедергісіне теңестіру

2.4-суретіндегі I_4 тоғын баламалы генератор әдісін қолданып табамыз. $U_{бж}$ кернеуді 2.7-суретінен анықтаймыз:

$$E_{э2} = U_{bcxx} = E_2 + I_{22} \cdot R_2$$



2.7 сурет – Бос жүріс кернеуін анықтау сұлбасы

I_{22} тогын контурлық токтар әдісі арқылы есептейміз, эквивалентті генератордың ЭҚК есептейміз: $E_{\text{эз}} = U_{bc \text{ xx}} = E_2 + I_{22} \cdot R_2$, содан кейін оның $R_{\text{эз}}$ кіріс кедергісі және I_4 қажетті тогы:

$$R_{\text{эз}} = R_{\text{kip}} = \frac{R_2 \cdot (R_5 + R_{13} + R_6)}{R_2 + R_5 + R_{13} + R_6}, \text{ мұнда } R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}; I_4 = \frac{E_{\text{эз}} + E_4}{R_{\text{эз}} + R_4} \quad (2.26)$$

2.5 Қуатты есептеу. Қуаттар балансы

Тұрақты ток кезінде тек $P = UI$ активті қуаты болады.

Энергия көздерінің қуаты мен жүктемесі үшін есептеу формулалары:

- кернеу көзінің қуаты $P_E = E \cdot I$, егер ЭҚК мен ондағы токтың бағыттары сәйкес келсе, *плюс* белгісімен алынады (көздегі кернеу ЭҚК шамасына тең және оған қарама-қарсы бағытта, сондықтан кернеу, бұл жағдайда, көздің тогымен сәйкес келмейді) және *минус* белгісімен, егер ЭҚК мен көздің тогы *сәйкес* келмесе;

- ток көзінің қуаты $P_J = U_J \cdot J$, егер U_J көзіндегі кернеу мен J көзі тогының бағыттары сәйкес келмесе, *плюс* белгісімен алынады, ал егер олар сәйкес келсе, *минус* белгісімен алынады, өйткені бұл жағдайда көзі бермейді, бірақ энергияны тұтынады;

- *жүктеме қуаты* $P_n = U_R \cdot I = R \cdot I \cdot I = R \cdot I^2$ *плюс* белгісімен алынады, өйткені резисторларда ток пен кернеу әрқашан сәйкес келеді.

Электр тізбектерінде кез келген сәтте және соңғы уақыт аралығында, мысалы, синусоидалы функция кезеңінде $P_{\text{уст}}$ энергия көздерінің қуаты мен P_n жүктемесінің теңгерімі орындалуы тиіс.

Қуат балансының теңдеуі $P_{\text{уст}} = P_n$ кез-келген әдіспен есептеу нәтижелерін әмбебап тексеру болып табылады.

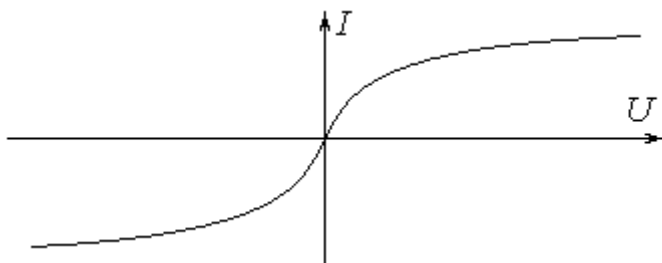
3. Сызықты емес тұрақты ток электр тізбектері және оларды есептеу тәсілдері

3.1 Негізгі анықтамалар

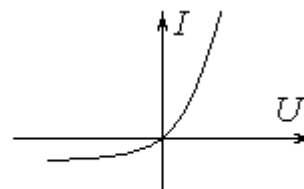
Құрамына Сызықты емес элементтер кіретін тізбектер Сызықты емес деп аталады. Сызықты емес элементтердің кедергілері токтан немесе кернеуден тәуелді болады. Бұл элементтердің негізгі сипаттамалары қисық сызық болып олардың теңдеулері Сызықты емес теңдеулермен өрнектеледі.

Вольт-амперлік сипаттамалар координаттар остері бойынша симметриялы (3.1 сурет) және бейсимметриялы (3.2 сурет) болуы мүмкін. Мысалға электр шамдардың және термисторлардың вольт-амперлік сипаттамалары симметриялы, ал диодтардың вольт-амперлік сипаттамалары симметриялы емес.

Вольт-амперлік сипаттамалары симметриялы элементтердің кедергілері токтың бағытына тәуелсіз, ал бейсимметриялы элементтердің кедергілері токтың бағытына тәуелді болып табылады.



3.1 сурет – Симметриялы вольт-амперлік сипаттама



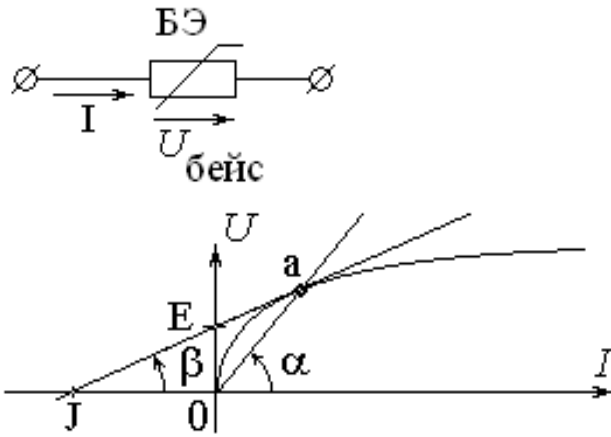
3.2 сурет – Бейсимметриялы вольт-амперлік сипаттама

Сызықты емес элементтің статикалық немесе интегралды кедергісі-бұл элементтегі кернеудің ток шамасына қатынасы. Бұл кедергі ток осі мен сипаттаманың «а» нүктесінен алынған түзу арасындағы α көлбеу бұрышының тангенсіне пропорционал

$$R_{cm} = \frac{U}{I} = \frac{m_u}{m_i} \cdot \frac{Ob}{ab} = \frac{m_u}{m_i} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (3.1)$$

Мұндағы: m_u, m_i - кернеу және ток остерін масштабы, α – «а» нүктесін координаттар басымен қосатын түзудің ток осімен жасайтын бұрыш.

Сызықты емес элементтердің дифференциалдық кедергісі деп кернеудің өсімшесімен (ΔU) оған сәйкесті токтың өсімшесіне (ΔI) айтады.



3.3 сурет - Сызықты емес элементтің дифференциалды немесе динамикалық кедергісі
 3.4-сурет - Сызықты емес элементтің статикалық немесе интегралды кедергісі

Сызықты емес элементтің дифференциалды немесе динамикалық кедергісі- Сызықты емес кедергідегі кернеудің шексіз кіші өсімінің тиісті ток өсіміне қатынасына тең шама.

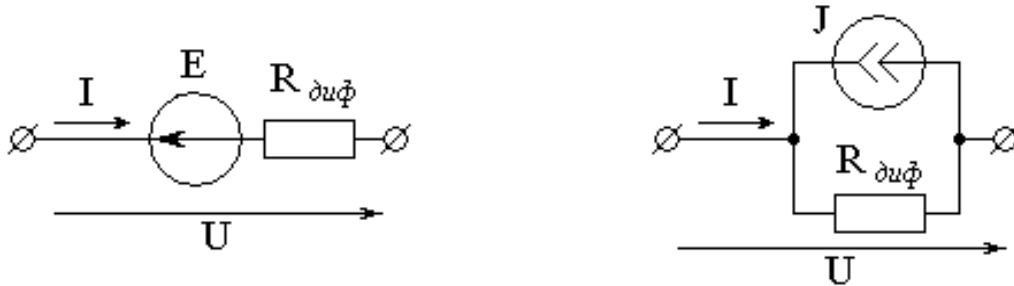
Бұл кедергі ток осі мен сипаттаманың «а» нүктесі арасындағы β көлбеу бұрыштың тангенсіне пропорционал:

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{m_u}{m_i} \cdot \frac{ab}{ob} = \frac{m_u}{m_i} \cdot \text{tg } \beta. \quad (3.2)$$

Мұндағы β -қисыққа «а» нүктесінде жүргізілген жанаманың ток осімен жасайтын бұрышы. Сонда Сызықты емес элементтердің дифференциалдық кедергісі $\text{tg } \beta$ -ға тура пропорционалды болып табылады. Вольт-амперлік сипаттаманы бір нүктесінен екінші нүктесіне өткен кезде статикалық және дифференциалдық кедергілердің шамалары өзгереді. Егер есеп тұрақты ток тізбектерінде «а» нүктеге сәйкесті режим үшін жүргізілсе, БЭ –ті элементті сызықты, кедергісі R_{cm} элементке ауыстыруға болады. 5.5-суретте баламалы орынбасарлық сұлбалар көрсетілген. Бұл тізбектердің күйін сипаттайтын теңдеулер:

$$U = E + I \cdot R_{\text{диф}}, I = \frac{U}{R_{\text{диф}}} - J, E = J \cdot R_{\text{диф}} \quad (3.3)$$

«E» және «J» жанаманы осьтермен қиылысқан нүктелер арқылы анықталады (3.4 сурет).



3.5 сурет - «E» және «J» жанама осьтермен қиылысқан нүктелер арқылы табу

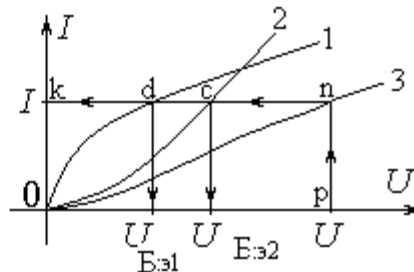
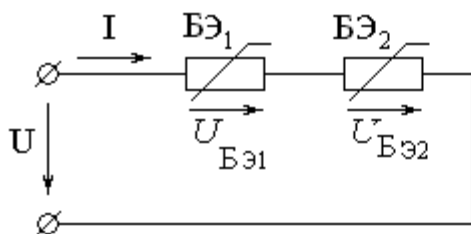
Сызықтық элементтің статикалық және динамикалық кедергісі бірдей және тұрақты болып қалады, яғни токқа немесе кернеуге тәуелді емес.

3.2 Тұрақты токтың сызықты емес тізбектерін есептеудің графоаналитикалық әдісі

Сызықты емес элементтердің кедергілері кернеулер немесе токтардың бағытына және шамасына тәуелді болғандықтан аналитикалық есептеу тәсілдер арқылы талдау қиын болады. Кирхгоф заңдарын ВАС-лар арқылы қарастырады. Сондықтан мұндай тізбектерді талдауда графо-аналитикалық тәсіл қолданылады. Екі бірізді сұлба бойынша жалғанған $CЭ_1$ және $CЭ_2$ элементті тізбектің есебін қарастырайық (3.6 сурет). Есепті жүргізу үшін Сызықты емес элементтердің ВАС-лары белгілі болуы қажет (3.7 сурет $CЭ_1$ ВАС 1 және $CЭ_2$ ВАС 2)

$$U(I) = U_{BЭ1}(I) + U_{BЭ2}(I) \quad (3.4)$$

Тізбектің I тогын табу үшін $BЭ_1$ және $BЭ_2$ сипаттамаларын бірдей токқа сәйкесті кернеу бойынша қосып жалпы (баламалы) сипаттаманы тұрғызамыз (3.6 сурет). Баламалы ВАС арқылы берілген кернеу әсеріндегі тізбектегі ток 3.7-суретінде көрсетілген «р-п-к» нүктелер бойынша табылады.

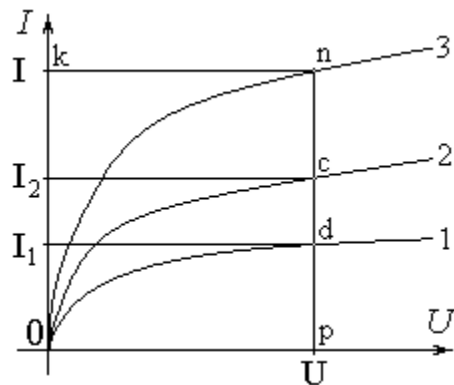
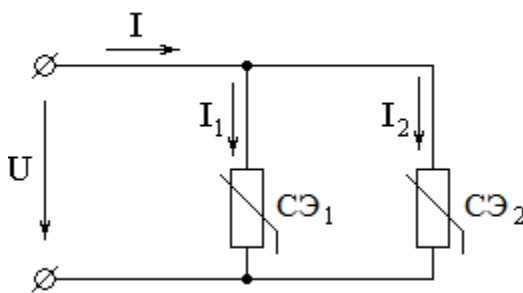


3.6 сурет - Екі бірізді сұлба бойынша жалғанған $CЭ_1$ және $CЭ_2$ элементті тізбек

3.7 сурет - Баламалы ВАС

Бірінші БЭ1-тің кернеуі «с», ал екінші БЭ2-тің кернеуі «d» нүктелеріне сәйкес келеді. Кернеулердің шамаларын ВАС-лар арқылы табу үшін масштаб таңдалады $Op = U/m_u$, мұнда m_u – кернеудің масштабы. Ток $I = kO \cdot m_i$, m_i – токтың масштабы. Элементтердің кернеулері $U_{\delta_{31}} = kd \cdot m_u$ и $U_{\delta_{32}} = kc \cdot m_u$.

Сызықты емес элементтер параллель жалғанған жағдайда кернеулері бірдей, ал токтары өзгеше болады. Тізбектің тармақталмаған бөлігіндегі ток Кирхгофтың бірінші заңына сәйкес анықталады. График арқылы жалпы токты табуда БЭ1 және БЭ2 элементтердің ВАС-лары токтар осі бойынша қосылады (3.7-суретінде үшінші сызық). Кез келген U кернеу үшін $U = Op \cdot m_u$ n нүктенің pn ординатасы pd және pc ординаталардың қосындысы болып табылады $pn = pd + pc$. Бұл ординаталар токтың масштабына сәйкес I_1 , I_2 , I_3 токтар болып табылады.

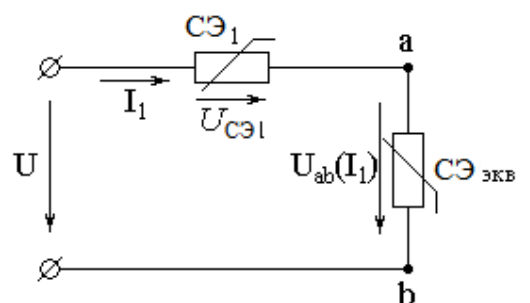
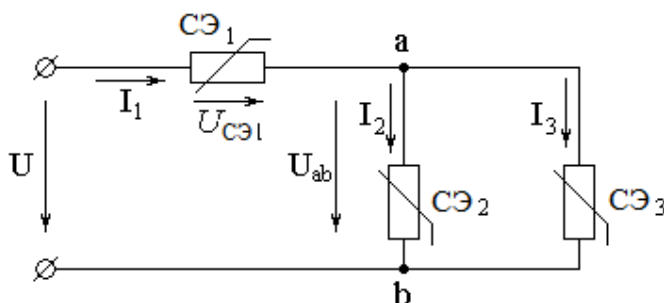


3.8 сурет - Сызықты емес элементтердің параллель жалғануы

3.9 сурет - График арқылы жалпы токты табу

ВАС-ны қолдана отырып, қолданылатын кернеудің кез келген мәні үшін U (op кесіндісі) жалпы токтың мәнін табуға болады I ($pn = Ok$). Бұл кернеу сонымен қатар m_i ток масштабын ескере отырып, жеке тармақтардағы I_1 және I_2 токтарының мәндерін анықтайды.

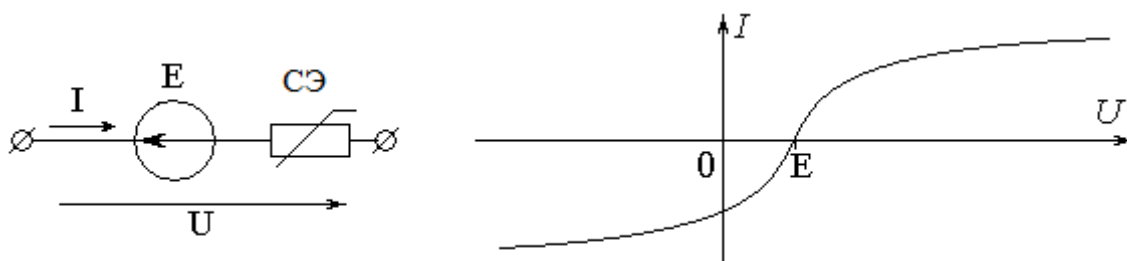
Аралас қосылыс жағдайында (3.10 сурет) алдымен параллель қосылған екі сызықты емес элемент бір эквивалентке ауыстырылады. Сұлба $CЭ_1$ және $CЭ_{экв}$ қосылған сұлбаға келтіріледі (3.11 сурет).



3.10 сурет- Аралас қосылыс ауыстырылымы

3.11 сурет-Эквиваленттік

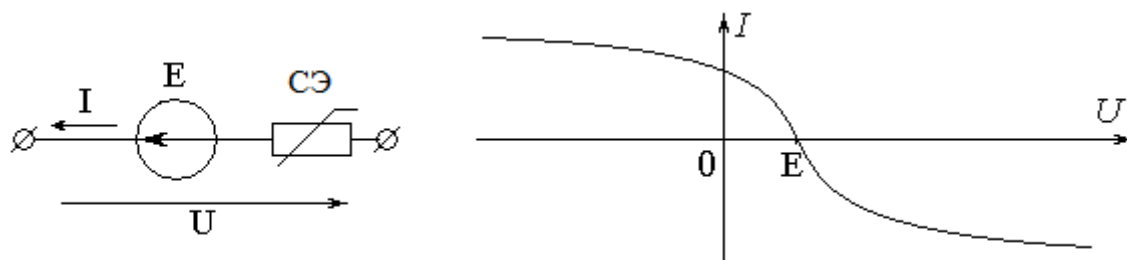
Бұл жағдайда тізбектің параллель бөлігі үшін жалпы ВАС-ма құрастырылады, сонда тізбек бірізді жалғану түріне келеді (3.11 сурет). Токтар жоғарыда қарастырғандай табылады. Егер тізбектің қарастырып отырған бөлігінде ЭҚК немесе ток көзі орналасқан болса вольтамперлық сипаттаманы баламалы сипаттамаға келтіруге болады. Баламалы сипаттама Кирхгоф заңдарына сәйкес салынады. Ток және кернеу бағытталса (3.12 сурет), Кирхгофтың екінші заңы мынадай жазылады $U(I) = E + U_{нэ}(I)$.



3.12 сурет - Ток және кернеу бағытталса болғандағы сұлба мен сипаттамасы

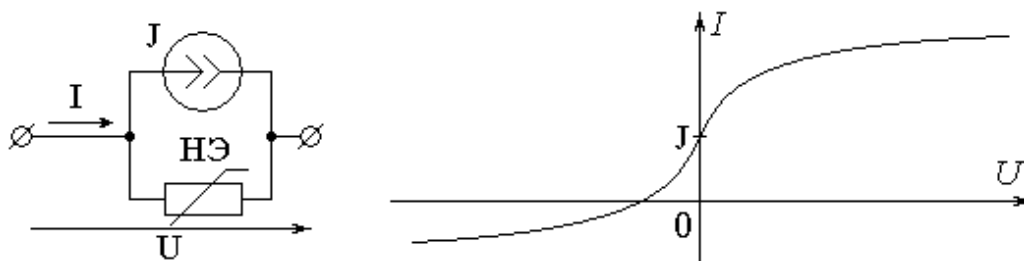
Баламалы ВАС кернеулер осінен оң жаққа ЭҚК-тің «E» шамасына жылжиды. Егер ЭҚК-тің бағыты теріс болса ВАС кернеулер осінен сол жаққа ЭҚК-тің «E» шамасына жылжиды.

Кернеу мен токтың бағыттары қарама-қарсы болса, сипаттама мынау өрнекке сәйкесті салынады. $U(I) = E - U_{нэ}(I)$ Баламалы ВАС токтар осі бойынша айна бейнесіндей қарастырылатын сипаттама кернеулер осі бойынша ЭҚК-тің «E» шамасына оң жаққа жылжиды.



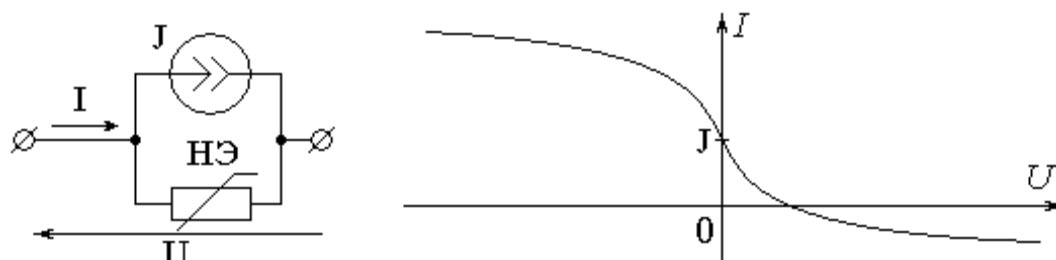
3.13 сурет - Баламалы ВАС

Баламалы ВАС 3.13-суретінде келтірілген. Егер ЭҚК-тің бағыты теріс болса баламалы ВАС кернеулер осі бойынша солға жылжиды. Ток көзі мен сызықты емес элемент параллель жалғанса орынбасарлық сұлба және баламалы ВАС мынадай:



3.14 сурет - Ток пен кернеу бағыттас кездегі ВАС

Баламалы ВАС Кирхгофтың бірінші заңы бойынша $I(U) = J + I_{нэ}(U)$ салынады. Ток пен кернеу бағыттас болса ВАС токтар осі бойынша жоғарыға жылжиды (3.14 сурет), ал бағыттас болмаса ВАС мынау теңдік арқылы $I(U) = J - I_{нэ}(U)$ және кернеулер осі бойынша айна бейнесіндей қарастырылатын сипаттама токтар осі бойынша жоғарыға жылжиды (3.15 сурет).



3.15 сурет - Ток пен кернеу бағыттас емес кездегі ВАС

4 Бір фазалы синусоидальды токтың сызықты электр тізбектері. Негізгі анықтамалар мен есептеу әдістері.

4.1 Негізгі анықтамалар

Айнымалы ауыспалы айнымалы электр тогы, оның мәні мен бағыты уақыт өте келе өзгереді. Ең көп таралған кернеу мен ток сигналдары болып табылады, олардың лездік мәні синусоидальды заңға сәйкес уақыт өте келе өзгереді. Бұл жағдайда электр жабдықтарының $S_{толық}$ (габаритті) қуаты барынша пайдаланылады, яғни $P^2 + Q^2 = S^2$. Синусоидальды емес сигнал формаларында $P^2 + Q^2 < S^2$.

Синусоидальды функция гармоникалық болып табылады, өйткені функцияның өзі, оның өзгеру жылдамдығы (бірінші туынды) және үдеу (екінші туынды) бір жиіліктің бірдей синусоидальды заңына сәйкес өзгереді.

Синусоидальды токтың ауқымы тұрақты токқа қарағанда әлдеқайда кең. Бұл синусоидальды заңға сәйкес өзгереді кернеуді трансформатордың көмегімен кез келген шекте оңай төмендетуге немесе арттыруға болатындығына байланысты. Бұл өте маңызды, өйткені электр қуатын ұзақ қашықтыққа тасымалдау жоғары кернеуде тиімді, ал төмен кернеуде тұтыну тиімді. Алайда, айнымалы ток тізбектерінде болатын физикалық процестер айнымалы магниттік

және электр өрістерінің болуына байланысты тұрақты ток тізбектеріне қарағанда қиынырақ.

Айнымалы ток немесе кернеудің мәні кез келген уақытта *лездік мән* деп аталады және i немесе u кіші әрпімен белгіленеді.

Уақыт функциясы периодтық деп аталады, егер оның мәні T периоды деп аталатын бірдей уақыт аралығында қайталанса.

Синусоидалы ток бұл периодтық ток, токтың мәні белгілі -бір уақыттан кейін қайталаанады.

$$i(t) = i(t + T). \quad (4.1)$$

Периодты шаманың толық бір өзгерісінің уақытын период деп атап T әрпімен белгілейді. Периодты шаманың бір секунд ішінде толық өзгерістерінің санын жиілік деп атайды $f = 1/T$. Жиіліктің өлшем бірлігі *Герц*. Периодты синусоидалы шамалар өрнегі

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_i) \quad (4.2)$$

Шаманың әрбір уақытқа сәйкес келетін мәні *лездік мән* деп аталады.

I_m, U_m – максималды мәні, яғни амплитудасы;

$\omega t + \varphi_i$ – фазасы; φ_i - бастапқы фаза, өлшем бірлігі радиан (*рад*);

ω – бұрыштық жиілік, ол $2\pi f$ -ке тең (*рад/с*).

Бір жиілікті кернеулер мен токтардың бастапқы фазасы бірдей болса, олардың арасында ығысу жоқ деп аталады, ал бірдей болмаса олардың арасындағы ығысу бұрыш $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ болып табылады. Айнымалы кернеулерді осцилограф арқылы көріп амплитудалы мәндерін өлшеуге болады, ал *электромагниттік* жүйесінің өлшеуіш аспаптарымен әрекеттік мәндері өлшенеді.

Гармоникалы шамалардың әрекеттік және орташа мәндері. Синусоидалық токтың, кернеудің, ЭҚК-ң лездік мәнінің бір период арасындағы орта квадраттық шамасының *әрекеттік мәні* дейді

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 \cdot dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (4.3)$$

Кирхгоф заңдары сызықты және сызықты емес электр тізбектерінде лездік және әрекеттік ток пен кернеу мәндеріне сәйкес келеді.

Ом заңы тек активті кедергідегі (яғни резистордағы) токтар мен кернеулердің лездік және әрекеттік мәндері үшін *сызықты* электр тізбектерінде қолданылады.

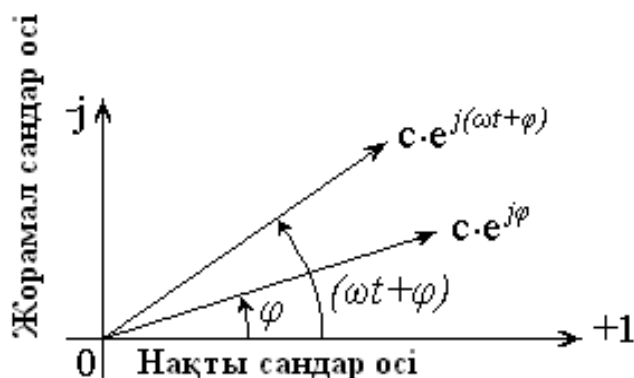
4.2 Синусоидальды функциялар уақытын жазудың кешенді және векторлар түрінде бейнелеу тәсілдері

Күрделі айнымалы ток тізбектерінде теңдеулер жоғарғы дәрежелі дифференциалдық теңдеу болғандықтан, белгісіз токтарды және есептеу үшін біртекті емес жоғарғы дәрежелі дифференциалдық теңдеулердің шешімін табуға тура келеді. Жоғарғы дәрежелі дифференциалдық теңдеулерді алгебралық түріне келтіру үшін синусоидалы шамаларды кешенді (комплекстік) шамалар арқылы бейнелейді. Бұл жағдайда тізбектің талдауы « t » уақыттық саласынан $-j\omega$ жиіліктік саласына ауысады, ал токтар және кернеулер кешенді шамалар болып табылады. Синусоидал шаманың амплитудалық немесе әрекеттік мәні кешенді шаманың модуліне, ал бастапқы фазасы – кешенді шаманың аргументіне сәйкес келтіріледі. Кешенді шаманы алгебралық, тригонометриялық және көрсеткіштік түрінде жазуға болады:

$$c \cdot e^{j\varphi} = a + jb, \quad c \cdot e^{j\varphi} = c \cdot \cos \varphi + jc \cdot \sin \varphi = a + jb. \quad (4.4)$$

Мұнда j -жорамал бірлік $j = \sqrt{-1}$, $j^2 = -1$, $c = \sqrt{a^2 + b^2}$ - кешенді шаманың модулі, a – кешенді шаманың нақты бөлігі, b - кешенді шаманың жорамал бөлігі, $e^{j\varphi}$ – кешенді шамалар жазықтығындағы бұрыштық вектор, $\varphi = \arctg(b/a)$.

Кешенді шаманы радиус-вектор арқылы кескіндеуге болады (4.1 сурет). Радиус-вектордың сағат тіліне қарама-қарсы бір айналып шығуы синусоидалы шаманың бір период ішінде айналуына сәйкес келеді. Бастапқы жағдайда ($t = 0$) радиус-вектор нақты сандар осінен φ бұрышқа ығысқан болса, біраз уақыттан кейін радиус вектор $(\omega t + \varphi)$ – бұрышына ығысады.



4.1 сурет - Кешенді шаманы радиус-вектор арқылы кескіндеу

$c \cdot e^{j(\omega t + \beta)}$ – кешенді амплитуда, кернеуге қатысты мынау өрнек жазылады.

$U_m \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} = \dot{U}_m \cdot e^{j\omega t}$, мұнда $U_m \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}$ – кернеудің уақыт бойынша кешенді функциясы $\dot{U}_m = U_m \cdot e^{j\varphi}$ – кернеудің кешенді амплитудасы;

$\dot{U} = U \cdot e^{j\varphi}$ – кернеудің кешенді әрекеттік мәні.

Эйлер формуласын қолданып мынау өрнекті жазуға болады:

$$U_m \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} = U_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) + j \cdot U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi).$$

Бұл өрнектің жорамал бөлігі синусоидалы кернеуге тең:

$$\text{Im}(U_m e^{j(\omega t + \varphi)}) = \text{Im}(U_m \cos(\omega t + \varphi) + j U_m \sin(\omega t + \varphi)) = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.5)$$

Бұл өрнектерден мынадай қорытынды шығып тұр: синусоидалы шаманың лездік мәнін кешенді санмен өрнектеуге болады. $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$.

Кешенді токтар, кернеулер ЭҚК-тер мынадай $\dot{I}, \dot{U}, \dot{E}$ белгіленеді. Әріптердің үстіндегі таңбалар шаманы уақытқа тәуелділігін көрсетеді, ал уақытқа тәуелсіз кешенді шамаларды белгілеу әріптерінің астында сызық көрсетіледі $\underline{Z}, \underline{Y}$.

Кешенді токтарды және кернеулерді кешенді сандар жазықтығында векторлармен кескіндеп қосып немесе азайтуға болады. Синусоидалы шамаларды амплитудалық және фазалық арақатынасын кескіндейтін векторлар жиынтығын векторлық диаграмма деп атайды. Векторлық диаграмма $t = 0$ уақыты үшін құрастырылады. Уақыт барысында бұл векторлар сағат тіліне қарама-қарсы ығысады, сондықтан векторларды бір-бірінен фазалары бойынша өсуін немесе қалуын байқауға болады. Кешенді сандар жазықтығында потенциалдардың тасымалдануын вектор арқылы кескіндеуге болады, осындай диаграмманы кернеулердің топографикалық диаграммасы деп атайды.

Идеалды пассивтік элементтердегі гармоникалық тербелістер.

Резисторлық элементтен тұратын тізбектерде кернеу және токтың арасындағы байланыс тура пропорционалды болғандықтан:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi). \quad (4.6)$$

Ток және кернеу арасындағы ығысу бұрыш 0-ге тең, бұдан шығатын қорытынды: *резисторлық элементтерде токтың пішіні кернеудің пішінін қайталайды*

Кешенді сандар арқылы:

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{R} = \frac{U_m \cdot e^{j\varphi}}{R} = I_m \cdot e^{j\varphi}, \quad \dot{U}_m = R \cdot \dot{I}_m, \quad (4.7)$$

мұнда $\dot{I}_m = I_m \cdot e^{j\varphi}$, $\dot{U}_m = U_m \cdot e^{j\varphi}$ – кернеудің және токтың кешенді амплитудалары. Кешенді жазықтықтағы векторлық бейнесі 4.2-суретте келтірілген.

Идеалды индуктивтік элементті тізбектерінде:

$$i = \frac{1}{L} \int u \cdot dt = -\frac{U_m}{\omega \cdot L} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) = \frac{U_m}{\omega \cdot L} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi - \pi/2). \quad (4.8)$$

Идеалды индуктивтік элементтерден тұратын тізбектерде ток пен кернеудің арасында 90° ығысу бұрыш пайда болады немесе индуктивтік элементтерде ток кернеуден 90° -қа қалады.

Кешенді сандар арқылы:

$$\dot{i}_m = \frac{\dot{U}_m}{j\omega \cdot L} = \frac{U_m \cdot e^{j\varphi}}{\omega \cdot L \cdot e^{j90^\circ}} = I_m \cdot e^{j(\varphi-90^\circ)}, \quad \dot{U}_m = j\omega \cdot L \cdot \dot{i}_m, \quad (4.9)$$

мұнда $\dot{i}_m = I_m \cdot e^{j(\varphi-90^\circ)}$, $\dot{U}_m = U_m \cdot e^{j\varphi}$ – ток және кернеудің кешенді амплитудалары. Шаманы j –ге бөлу ол шаманы -90° ығысуына сәйкес. 4.2, б) суретінде векторлардың бейнесі көрсетілген.

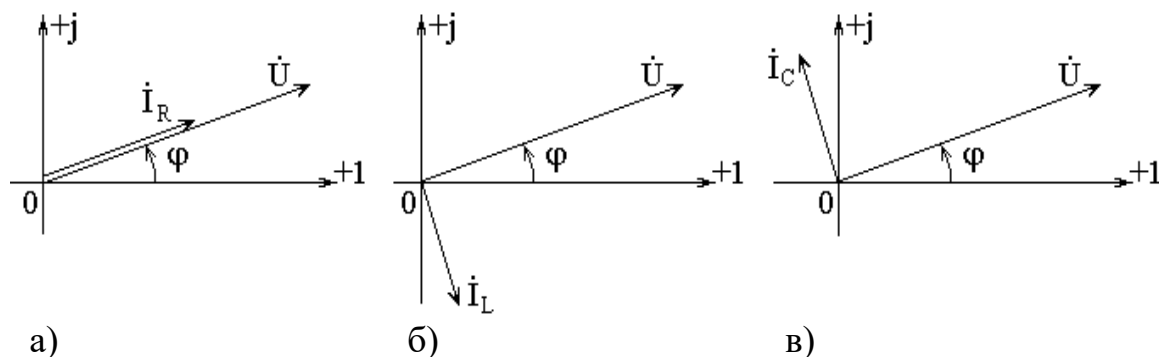
Сыйымдылықты тізбектерде кернеу мен токтың арасындағы байланыс дифференциал арқылы жазылады. Синусоидалы кернеу $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ болса, сыйымдылықтағы ток:

$$i = C \frac{du}{dt} = \omega \cdot C \cdot U_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) = \omega \cdot C \cdot U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi + \pi/2). \quad (4.10)$$

Конденсатор тогы кернеуден 90° озады. Кешенді түрде:

$$\dot{i}_m = j \cdot \omega \cdot C \cdot \dot{U}_m = \frac{\dot{U}_m}{-j \frac{1}{\omega \cdot C}} = \frac{U_m \cdot e^{j\varphi}}{\frac{1}{\omega \cdot C} \cdot e^{-j90^\circ}} = I_m \cdot e^{j(\varphi+90^\circ)}, \quad \dot{U}_m = -j \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot \dot{i}_m, \quad (4.11)$$

мұнда $\dot{i}_m = I_m \cdot e^{j(\varphi+90^\circ)}$, $\dot{U}_m = U_m \cdot e^{j\varphi}$ – ток және кернеудің кешенді амплитудалары. 6.3, в суретінде векторлық бейнесі көрсетілген.



4.2 сурет– Кернеудің және токтың кешенді жазықтықтағы векторлық бейнесі

Жоғарыда қарастырған өрнектерден мынадай қорытынды шығаруға болады: кешенді сандармен қолданып интегралды- дифференциалды теңдеулерді кешенді сандар арқылы алгебралық теңдеулерге келтіруге болады; интегралдау операциясын $j\omega$ –ге бөлу операциясына алмастыруға, ал дифференциалдау операциясын $j\omega$ –ге көбейту операциясына алмастыруға болады. Синусоидалы ток тізбектерін кешенді сандар арқылы талдауда мынадай ұғымдарды қарастырылады:

Реактивті индуктивтік кедергі және өткізгіштік:

$$jX_L = j\omega \cdot L, \quad -jb_L = \frac{1}{jX_L} = -j \frac{1}{\omega \cdot L}. \quad (4.12)$$

Реактивті сыйымдылықты кедергі және өткізгіштік:

$$-jX_C = \frac{1}{j\omega \cdot C} = -j \frac{1}{\omega \cdot C}, \quad jb_C = \frac{1}{-jX_C} = j\omega \cdot C. \quad (4.13)$$

Толық кешенді кедергі $\underline{Z} = R + jX = z \cdot e^{j\theta}$, мұнда R – активтік кедергі, X – реактивтік кедергі, $z = \sqrt{R^2 + X^2}$ – толық кедергінің модулі, $\theta = \arctg(X/R)$ – аргументі. Толық кешенді өткізгіштік:

$$\underline{Y} = \frac{1}{R + jX} = \frac{R - jX}{(R + jX) \cdot (R - jX)} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2} = g - jb = ye^{-j\theta}, \quad (4.14)$$

мұнда g – активтік өткізгіштік, b – реактивтік өткізгіштік, $y = \sqrt{g^2 + b^2}$ – толық кешенді өткізгіштіктің модулі, $\theta = \arctg(b/g)$ – аргументі.

Ом және Кирхгоф заңдарын кешенді түрде жазу. Синусоидал ток электр тізбектерін кешенді шамалар арқылы талдау тәсілдері.

$$\text{Ом заңы:} \quad \dot{I}_m = \dot{U}_m / R. \quad (4.15)$$

$$\text{Кирхгофтың бірінші заңы:} \quad \sum \dot{I}_{mi} = 0. \quad (4.16)$$

$$\text{Кирхгофтың екінші заңы} \quad \sum \dot{U}_{mk} = \sum \dot{E}_m. \quad (4.17)$$

Кешенді сандар жазықтығында тізбектің күйін сипаттайтын теңдеулер алгебралық болғандықтан тізбектің талдау әдістері тұрақты ток тізбектеріндегі әдістерімен бірдей болады. Есептеу ережесі: а) дифференциалдық түрде теңдеулер құрастырылады; б) теңдеулер кешенді шамалар арқылы жазылады; в)

белгілі әдіспен токтар анықталады; г) табылған токтар синусоидалы түріне келтіріледі.

4.3 Бір фазалы синусоидалы ток тізбектеріндегі резонанстық құбылыстар, пайда болу шарты, резонанстық контурлардың негізгі сипаттамаларын анықтау

Катушка және конденсаторлы тізбегінде кернеу мен токтың арасындағы ығысу бұрыш нөлге тең болу құбылысы фазалық резонанс деп аталады. Резонанс кезінде энергия жинаушы элементтердің кернеулері және тізбектің тогы аса көбеюі мүмкін. Электр тізбектерінде тербелмелі процестер электр өрісінің энергиясын магнит өрісінің энергиясына және магнит өрісінің энергиясын электр өрісінің энергиясына түрлендірумен байланысты. Демек электр тізбектерінде резонанстық құбылыстар тек қана катушка және конденсатордан тұратын тізбектерінде пайда болуы мүмкін. Реалды катушкадан ток өткенде катушканың сымдары қызады, басқа сөзбен айтқанда электромагниттік өрістің энергиясының бір бөлігі жылу энергиясына түрлендіріліп жойылады, сонда реалды катушка екі параметр арқылы қарастырылады- индуктивтілік L және кедергі R . Электр өрісінің әсері конденсатордың C параметрімен анықталады. Сонда R, L, C параметрлі тізбектерді *тербелмелі контур* деп айтуға болады. Тербелмелі контурда R, L, C параметрлеріне сәйкесті еркін тербелістерді байқауға болады. Осы себепті механикалық тербелмелі жүйесімен салыстырып отырып, электр тізбектеріндегі резонанстық құбылыстардың пайда болуы еркін тербелістердің жиілігімен сыртқы тербелістердің жиілігі бір-біріне теңескендіктің нәтижесі деп айтуға болады.

Тербелмелі контурдың негізгі сипаттамалары бұл резонанстық жиілік ω_0 (rad/c), немесе f_0 ($Гц$), контурдың сапалығы Q және толқындық кедергі.

Резонанс кезінде катушка және конденсатор арасында энергия алмасып тұрғандықтан, қоректің энергиясы қуаттың шығындысы болып табылады, сондықтан қорек үшін тербелмелі контур резистор рөлін атқарады, онда тізбектің кедергісі активті кедергі, немесе активтік өткізгіштік болып саналады. Ток және кернеудің фазалары бірдей болады. Тізбектің реактивті кедергісі немесе өткізгіштігі нөлге теңеседі:

$$I_m \{ \underline{z}_{кiр} \} = x_{эквкiр} = 0, \quad I_m \{ \underline{y}_{эквкiр} \} = b_{эквкiр} = 0. \quad (4.18)$$

Осы шарттан резонанстық ω_0 жиілік табылады.

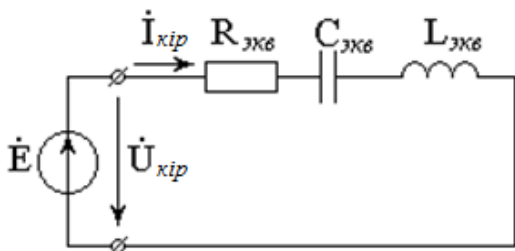
Контурдың сапалығы Q резонанс кезіндегі катушканың немесе конденсатордың кернеуімен (тогымен) Кіріс кернеудің (тогын) қатынасын көрсететін шама:

$$Q = \frac{U_L}{U_{кiр}} = \frac{U_C}{U_{кiр}} \text{ немесе } Q = \frac{I_L}{I_{кiр}} = \frac{I_C}{I_{кiр}} \quad (4.18)$$

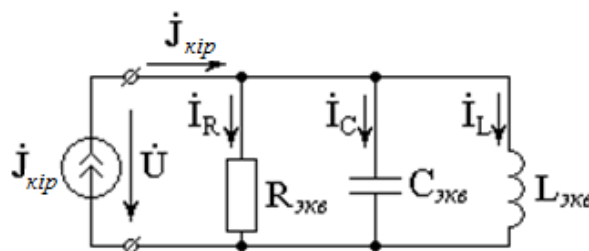
Контурдың сипаттамалық (толқындық) кедергісі реактивтік кедергі болып резонанс кезіндегі катушка немесе конденсатордың кедергісіне тең болып табылады:

$$\rho = \omega_0 \cdot L_{\text{экв}} = \frac{1}{\omega_0 \cdot C_{\text{экв}}} = \sqrt{\frac{L_{\text{экв}}}{C_{\text{экв}}}}, \text{ мұнда } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{экв}} \cdot C_{\text{экв}}}}. \quad (4.19)$$

Орынбасарлық сұлбалар 4.3 және 4.4 суреттерде келтірілген.



4.3 сурет - Кернеулер резонансы болатын сұлба



4.4 сурет - Токтар резонансы болатын сұлба

Бірізді тізбектің кешенді толық кедергісі:

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = R + jX, \text{ мұнда } R = R_{\text{экв}}, X_L = \omega \cdot L_{\text{экв}}, X_C = \frac{1}{\omega \cdot C_{\text{экв}}}. \quad (4.20)$$

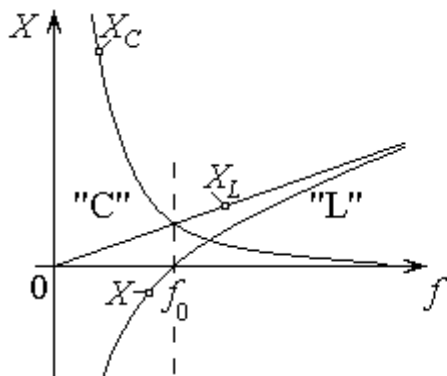
4.5-суретте бірізді контурдың X , X_L , $X_C = F(f)$ жиіліктік сипаттамалары көрсетілген.

Жиілік резонанстық жиіліктен кем болса мынау теңсіздік орындалады $X_C > X_L$, бұл жағдайда бірізді контурдың реактивтік кедергісі сыйымдылықты болады. Жиілік резонанстық жиілікке тең болған жағдайда реактивтік кедергі нөлге тең. Жиілік резонанстық жиіліктен асса реактивтік кедергі индуктивтілікті болып табылады.

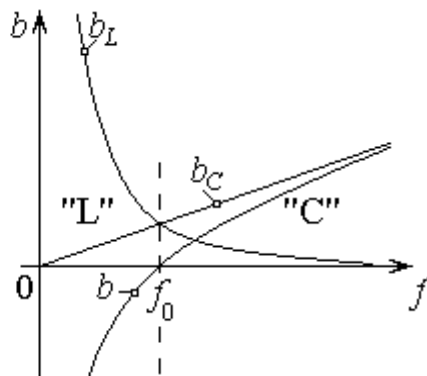
4.6-суретте параллель контурдың b , b_L , $b_C = F(f)$ жиіліктік сипаттамалары көрсетілген.

$$\underline{Y} = g + j(b_C - b_L) = g + jb, \quad g = \frac{1}{R_{\text{экв}}}, b_C = \omega \cdot C_{\text{экв}}, \quad b_L = \frac{1}{\omega \cdot L_{\text{экв}}} \quad (4.21)$$

$f < f_0$ реактивтік өткізгіштік b индуктивтілікті, $f = f_0$ болса $b = 0$, $f > f_0$ – сыйымдылықты сипаттамасы



4.5 сурет - Бірізді контурдың жиіліктік сипаттамалары



4.6 сурет - Параллель контурдың жиіліктік сипаттамалары

Бірізді контурда RLC кернеулер резонансы, ал параллель контурда токтар резонансы пайда болады.

4.4 Кернеулер резонансы. RLC тербелмелі контурдағы бірізді жиіліктің сипаттамалары

Резистор, катушка, конденсатор тізбектеп жалғанса (4.3 сурет) тізбекте кернеулер резонансы пайда болуы мүмкін. Катушка U_{mL0} және конденсатордың қысқыштарының арасындағы U_{mC0} кернеу қоректің кернеуіне қарағанда аса көбеюі мүмкін. U_{mL0} және U_{mC0} кернеулердің шамалары тең болып, фазалары қарама-қарсы болады. Резистордың U_{mR} кернеуі Кіріс кернеуге теңеседі $U_{mкір}$ 4.7-суретте кернеулердің топографикалық диаграммасы, ал 4.8 суретінде кернеулердің жиіліктік $U_L(f)$, $U_C(f)$, $U_R(f)$ сипаттамалары көрсетілген.

Бірізді контурдың негізгі сипаттамаларын қарастырайық.

Резонанстық жиілік:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{L_{\text{экв}} \cdot C_{\text{экв}}} \quad (4.22)$$

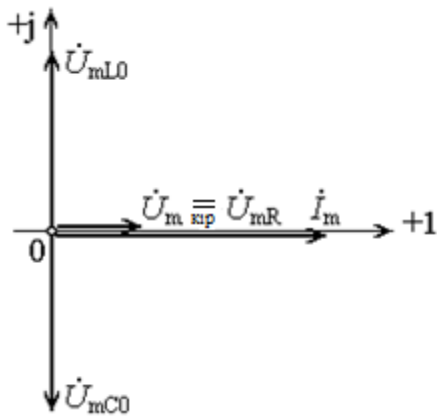
мынау теңдіктен есептелінеді:

$$\begin{aligned} I_m \{ \underline{z}_{\text{кір}} = R_{\text{экв}} + j(X_{L0\text{экв}} - X_{C0\text{экв}}) \} &= X_{L0\text{экв}} - X_{C0\text{экв}} \\ &= \omega_0 L_{\text{экв}} - \frac{1}{\omega_0 C_{\text{экв}}} = 0 \end{aligned} \quad (4.23)$$

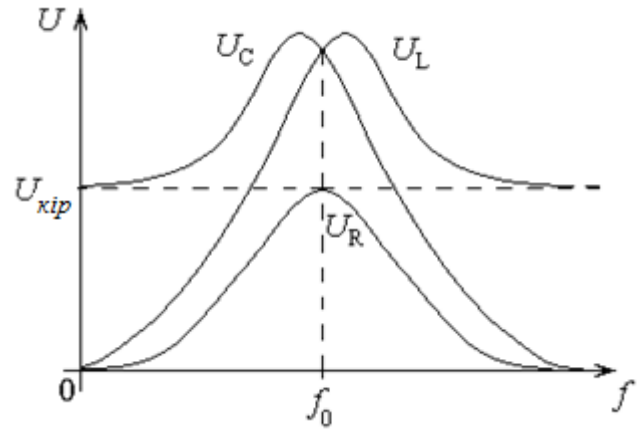
Контурдың сапалығы:

$$Q = \frac{U_{mL0}}{U_{mкір}} = \frac{U_{L0}}{U_{кір}} = \frac{I \cdot X_{L0\text{экв}}}{I \cdot R_{\text{экв}}} = \frac{U_{C0}}{U_{кір}} = \frac{I \cdot X_{C0\text{экв}}}{I \cdot R_{\text{экв}}} = \frac{\rho}{R_{\text{экв}}} \quad (4.24)$$

Сипаттамалық кедергісі ρ (4.19) өрнектен анықталынады.



4.7 сурет – Кернеулердің топографикалық диаграммасы

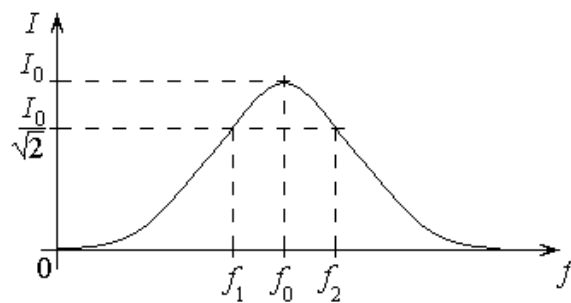


4.8 сурет - Кернеулердің жиіліктік сипаттамалары

Токтың жиіліктік сипаттамасы $I(f)$ резонанстық қисық деп аталады. Бұл сипаттама резистордың $U_R(f)$ жиіліктік сипаттамасын қайталайды (4.9 суретте келтірілген). Жиілік резонанстық жиілікке тең болса, ток ең жоғарғы мәніне ие болады $I_0 = \frac{U_{kip}}{R_{экв}}$.

Сапалық жоғары болса резонанстық жиілікке жақын жиіліктерде токтың сипаттамасы тік болады. Бұл дегені беріліс коэффициент жоғары болып табылады. Беріліс коэффициентіне қарай жиіліктер диапазоны мөлдірлік және кедерткілік (бөгеуші) алқаптарға бөлінеді.

Мөлдірлік алқабының шекаралық жиіліктері мынадай шамамен анықталады $I_0/\sqrt{2}$. Мөлдірлік алқабы тербелмелі контурдың сапасына байланысты. Сапалық қанша жоғары болса мөлдірлік алқабы сонша қысқа болады, басқа сөзбен айтқанда, сапалық жоғары болса резонанстық жиілікке жақын жиіліктерде токтың сипаттамасы тік болады.

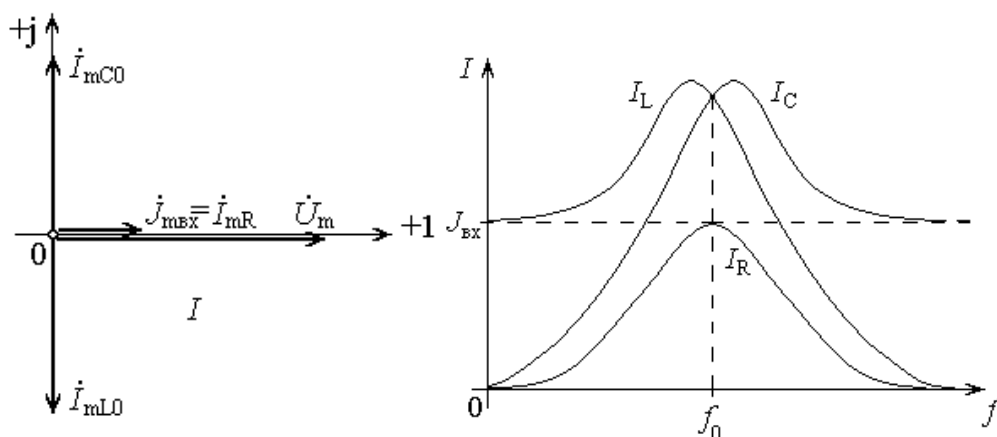


4.9 сурет - Токтың жиіліктік сипаттамасы
Сапалықты мына өрнектен табуға болады:

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{f_0}{f_2 - f_1}. \quad (4.25)$$

4.5 Токтар резонансы. RLC параллель тербелмелі контурдың жиіліктік сипаттамалары

Параллель тербелмелі контурда токтар резонансы пайда болуы мүмкін (4.4 сурет). Токтар резонансының негізгі қасиеттері – катушка және конденсатор тармақтарындағы токтардың шамасы I_{mL0} , I_{mC0} аса көбейеді, ал Кіріс токтың шамасы кемиді. Резистор тогы I_{mR} Кіріс $J_{mкiр}$ тогына тең болады. Токтардың векторлық диаграммасы 4.10-суретте көрсетілген, ал токтардың жиіліктік сипаттамалары 4.11-суретте келтірілген.



4.10 сурет - Токтардың векторлық диаграммасы

4.11 сурет –Токтардың жиіліктік сипаттамалары

Параллель контурдың негізгі сипаттамаларын анықтаймыз.

Резонанстық жиілік $\omega_0 = 1/\sqrt{L_{экв} \cdot C_{экв}}$ мына өрнектен есептелінеді

$$I_m \{ Y_{кiр} = g + j(b_{C0экв} - b_{L0экв}) \} = b_{C0} - b_{L0} = \omega_0 C_{экв} - \frac{1}{\omega_0 L_{экв}} = 0 \quad (4.26)$$

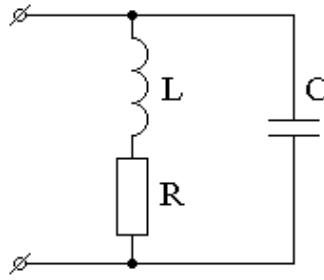
Контурдың сапалығы

$$Q = \frac{I_{mL0}}{J_{mкiр}} = \frac{I_{L0}}{J_{кiр}} = \frac{U \cdot b_{L0}}{U \cdot g} = \frac{I_{C0}}{J_{кiр}} = \frac{U \cdot b_{C0}}{U \cdot g} = \frac{R_{экв}}{\rho}, \quad g = \frac{1}{R_{экв}}. \quad (4.27)$$

Сипаттамалық кедергі ρ (4.19) өрнектен табылады.

Реалды катушкалы параллель резонанстық контурдың негізгі сипаттамаларын есептейміз (L тізбегіне катушканың активті кедергісі R қосылған) және C сыйымдылықты, 4.12 сурет

Реалды катушкалы параллель тербелмелі контурдың орынбасарлық сұлбасын қарастырайық (4.12 сурет).



4.12 сурет - Реалды катушкалы параллель тербелмелі контурдың орынбасарлық сұлбасы

Тізбектің бірізді RL бөлігін параллель жалғауға ауыстырамыз (4.12-сурет), конденсатордың сыйымдылығы C өзгермейді, $C_{\text{бал}} = C$.

Бірізді RL бөлігінің өткізгіштігі:

$$\underline{Y} = \frac{1}{R + j\omega \cdot L} = \frac{R - j\omega \cdot L}{R^2 + (\omega \cdot L)^2} = \frac{R}{R^2 + (\omega \cdot L)^2} - j \frac{\omega \cdot L}{R^2 + (\omega \cdot L)^2}. \quad (4.28)$$

Баламалы кедергілері (7.2-сурет)

$$R_{\text{бал}} = \frac{R^2 + (\omega \cdot L)^2}{R}, \quad X_{L_{\text{бал}}} = \omega \cdot L_{\text{бал}} = \frac{R^2 + (\omega \cdot L)^2}{\omega \cdot L}. \quad (4.29)$$

Резонанстық жиілік:

$$\omega = \omega_0 = 1 / \sqrt{L_{\text{бал}} \cdot C_{\text{бал}}} \quad (4.30)$$

сипаттамалық кедергі арқылы:

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (4.31)$$

осыдан:

$$R_{\text{бал}} = \frac{R^2 + (\omega_0 \cdot L)^2}{R} = \frac{\rho_0^2}{R}, \quad L_{\text{бал}} = L \cdot \frac{R^2 + (\omega \cdot L)^2}{(\omega \cdot L)^2} = L \cdot \frac{\rho_0^2}{\rho_0^2 - R^2}. \quad (4.32)$$

Тербелмелі RLC -контурдағы негізгі сипаттамаларды анықтаймыз. Контурдағы резонанстық жиілік:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{бал}} \cdot C_{\text{бал}}}} = \frac{1}{\sqrt{L} \cdot \sqrt{L \cdot \rho_0^2 \cdot C}} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{R^2}{\rho_0^2}}, \quad \rho_0^2 = \frac{L}{C}. \quad (4.33)$$

Сипаттамалық кедергі:

$$\rho = \sqrt{\frac{L_{\text{бал}}}{C_{\text{бал}}}} = \sqrt{\frac{L \cdot \rho_0^2}{(\rho_0^2 - R^2) \cdot C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0^2}{\rho_0^2 - R^2}}, \rho_0^2 = \frac{L}{C}. \quad (4.34)$$

Сапалық:

$$Q = \frac{R_{\text{бал}}}{\rho} = \frac{\rho_0^2}{R \cdot \rho_0} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0^2 - R^2}{\rho_0^2}} = \sqrt{\frac{\rho_0^2 - R^2}{R^2}} = \frac{\rho_0}{R} \cdot \sqrt{1 - \frac{R^2}{\rho_0^2}}, \rho_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (4.35)$$

Егер $R \ll \rho_0$ орындалса негізгі сипаттамалар идеалды жағдайға сәйкес келеді.

4.6 Синусоидалы ток тізбектеріндегі қуат. Қуаттар тепе-теңдігі. Келісілген жүктеме режимі

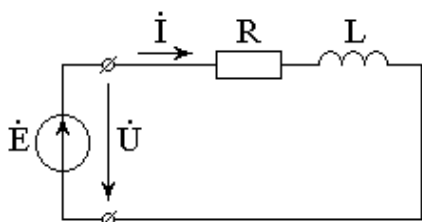
4.6.1 Электромагниттік энергияны түрлендіру үрдістері

Электр тізбектерінде энергия туралы екі үрдісті қарастыруға болады:

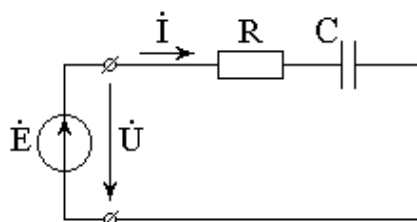
Электр энергиясын басқа түрлі энергияға (механикалық, жылу, жарықтық т.б. энергияларына) айландыру, бұл үрдістің қарқындылығы *активтік қуат* деп аталатын шамамен бағаланады. Активтік қуат P әріпімен белгіленеді, оның өлшем бірлігі *Ватт (Вт)*.

Энергияны айырбастауы: электр өрісінің және магнит өрісінің энергияларын бір-бірімен алмасуы, бұл үрдістің қарқындылығы *реактивтік қуат* деп аталатын ұғым арқылы қарастырылады. *Реактивтік қуат* Q , әріпімен белгіленеді, оның өлшем бірлігі *вольт-ампер реактивтік (Вар)*.

Екі орынбасарлық сұлбаны қарастырайық (4.13 және 4.14- суреттер).



4.13 сурет - Орынбасарлық сұлба



4.14 сурет - Орынбасарлық сұлба

Лездік кернеу мен лездік токтың мәндерінің көбейтіндісі лездік қуаттың мәні болып табылады:

$$p = u \cdot i = U_m \sin(\omega \cdot t + \varphi_u) \cdot I_m \sin(\omega \cdot t + \varphi_i). \quad (4.36)$$

Ескере отырып, түрлендіруден кейін:

$$2 \sin \alpha \cdot \sin \beta = \cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta), \quad (4.37)$$

Лездік қуат үшін өрнек аламыз:

$$p = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega \cdot t + \varphi)] = U \cdot I \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega \cdot t + \varphi)], \quad (4.38)$$

мұнда U және I – кернеу және токтың әрекеттік мәндері;

$\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ – кернеу және токтың бастапқы фазаларын ығысуы.

Электр тізбектерінде бір период арасындағы лездік қуаттың шамасын активтік қуат деп атайды:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T U \cdot I \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega \cdot t + \varphi)] \cdot dt = U \cdot I_a = U \cdot I \cos \varphi, \quad (4.39)$$

$I_a = I \cdot \cos \varphi$ – токтың әрекеттік мәнін *активтік құрамасы*.

Реактивтік қуат бұл активтік қуатпен салыстыру үшін енгізілген ұғым:

$$Q = U \cdot I_p = U \cdot I \sin \varphi, \quad (4.40)$$

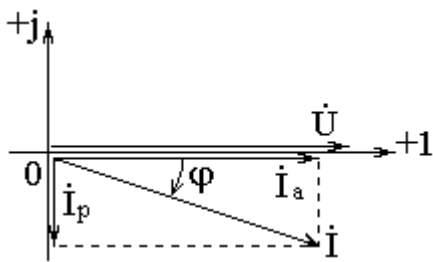
$I_p = I \cdot \sin \varphi$ – токтың әрекеттік мәнін *реактивтік құрамасы*.

I_a токтың активтік құрамасының бағыты кернеудің бағытымен бірдей болады, яғни токтың активтік құрамасы бұл кешенді кернеудің бағытына түсірген проекциясы болып қарастырылады, ал реактивтік құрамасы кернеуден 90° -ке озады немесе 90° -ке қалады. Тізбектің реактивтік элементі катушка болса (4.13 сурет) I_p кернеуден қалады, ал конденсатор болса (4.14 сурет) – озады. Токтардың диаграммасы 4.15 және 4.16-суреттерде келтірілген. 4.17, а - суретінде катушкалы тізбек үшін кернеудің, токтың активтік құрамасының лездік мәні және осы екі шамалардың көбейтіндісі p_a көрсетілген, ал 4.17, б-суретінде кернеудің, токтың реактивтік құрамасын лездік мәні және осы екі шамалардың көбейтіндісі p_p көрсетілген.

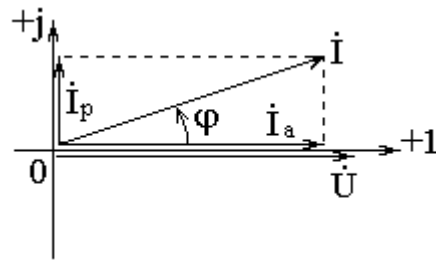
4.17, а - суреттегі p_a лездік қуаттың таңбасы әрқашанда оң екендігі көрініп тұр, демек энергия қоректен қабылдағышқа бағытталған дейміз.

4.17, а - суреттегі p_p лездік қуаттың таңбасы периодтың бірінші ширегінде теріс, бұл аралықта энергия қабылдағыштан қорекке бағытталған болып қарастырылады, екінші ширегінде p_p оң - энергия қоректен қабылдағышқа бағытталған, басқа сөзбен айтқанда қорек және қабылдағыштың арасында энергия айырбасталып тұр.

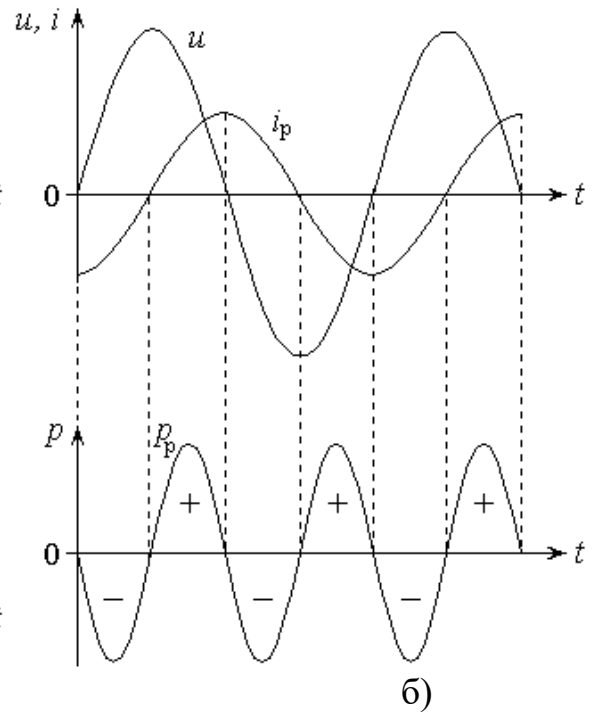
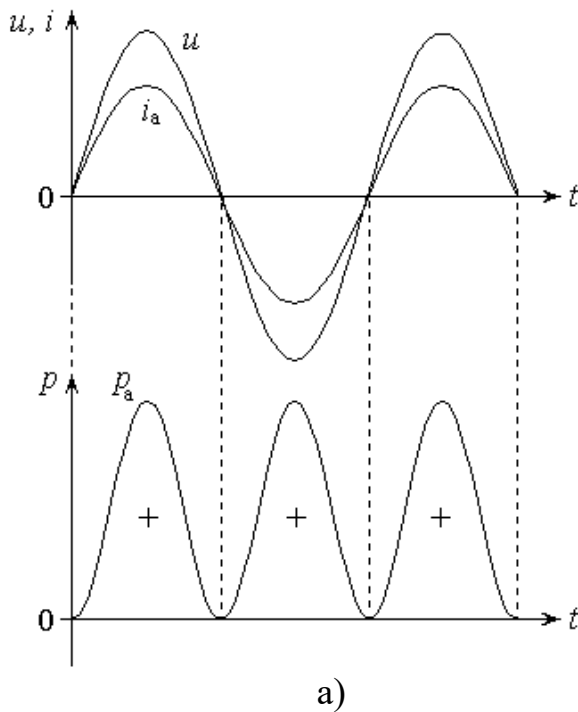
$$W = \int_0^T p_a \cdot dt = U \cdot I_a \cdot \int_0^T (1 - \cos 2\omega \cdot t) \cdot dt = U \cdot I_a \cdot T. \quad (4.41)$$



4.15 сурет - Тізбектің реактивтік элементі катушка кезіндегі токтың диаграммасы



4.16 сурет - Тізбектің реактивтік элементі сиымдылық кезіндегі токтың диаграммасы



4.17 сурет - Кернеудің, токтың реактивтік құрамасының лездік мәні және осы екі шамалардың көбейтіндісі

Энергия жинаушы элементтердегі энергия қорекке қайталанып беріледі. Электр қондырғылардың жұмысын бағалау үшін *толық қуат* деп аталатын ұғым қарастырылады. Толық қуат S әріпімен белгіленеді, оның өлшем бірлігі *Вольт-Ампер (ВА)* $S = U \cdot I$.

Егер кернеу және токтың арасындағы ығысу бұрышы нөлге тең болса $\cos \varphi = 1$, толық қуат S активті P қуатқа тең болады, ал кернеу және токтың арасындағы ығысу бұрыш 90° тең болса $\sin \varphi = 1$, толық қуат S реактивті Q қуатқа тең болады:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = U \cdot I \cdot \sqrt{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi} = U \cdot I, \quad (4.42)$$

мұнда $\cos \varphi = P/(U \cdot I) = P/S$ – активтік қуат коэффициенті, *қуат коэффициенті*;

$\sin \varphi = Q/(U \cdot I) = Q/S$ – реактивтік фазалардың ығысуы.

Қуат коэффициенті толық қуаттың қандай бөлігі қайтымсыз басқа энергияға түрлендірілгенін көрсетеді, басқа сөзбен айтқанда қуат коэффициенті қорек көзі өндірген электр энергиясының қаншалықты пайдаланғанын көрсетеді. Қуат коэффициенті нөлден бірге дейін мәндерді қабылдайды. Қуат коэффициенті электрлік қондырғылардың басты энергетикалық көрсеткіштерінің бірі болып саналады. Бұл шама қаншама жоғары болса соншама қабылдағыштың жұмысы өнімді болып табылады. Идеалды жағдайда $\cos \varphi$ бірге тең. Айнымалы ток тізбектерін символикалық әдісімен талдауда *кешенді қуат* ұғымын қолданады.

Кешенді қуат кешенді кернеудің әрекеттік мәнін кешенді токтың әрекеттік түйіндес мәнін көбейтісуіне тең болып табылады.

$$\dot{U} = U \cdot e^{j\varphi_u}, \quad I^* = I \cdot e^{-j\varphi_i},$$

$$\tilde{S} = \dot{U} \cdot I^* = U e^{j\varphi_u} \cdot I e^{-j\varphi_i} = U \cdot I \cdot e^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = U \cdot I \cos \varphi + jU \cdot I \sin \varphi = P + jQ \quad (4.43)$$

Кешенді қуаттың нақты бөлігі активті қуат P , жорамал бөлігі реактивті қуат Q . Активті қуат әрқашанда оң болады, реактивті қуат индуктивтікті тізбектерде оң, ал сыйымдылықты тізбектерінде теріс болады.

4.6.2 Қуаттар тепе-теңдігі

Электр тізбектерінде әрқашан белгілі уақыт ішінде, мысалға синусоидалы шаманың бір периодының арасында, активті қуаттар тепе-теңдігі орындалады. Қоректің активті қуаты $P_{қор}$ қабылдағыштың активті қуатына P_m тең $P_{қор} = P_m$.

Қоректің реактивті қуаты $Q_{қор}$ қабылдағыштың реактивті қуатына Q_m тең $Q_{қор} = Q_m$.

Қоректің кешенді толық қуаты:

$$\tilde{S}_{уст} = \sum \dot{E} \cdot I^* + \sum \dot{U}_J \cdot J^* = P_{?ор} + jQ_{уст}. \quad (4.44)$$

$\dot{E} \cdot I^*$, $\sum \dot{U}_J \cdot J^*$ шамалардың таңбалары оң немесе теріс болуы мүмкін: егер токтың бағыты ЭҚК –тің бағытымен бірдей болса $\dot{E} \cdot I^*$ –нің таңбасы оң, ал қарама-қарсы болса теріс болып алынады; ток көзін тогымен кернеу бағытас болса, ток көзі энергияны өндірмейді, сондықтан $\dot{U}_J \cdot J^*$ –дің бағыты теріс, қарама-қарсы болса – оң болады.

Қабылдағыштың кешенді қуаты:

$$\tilde{S}_n = \sum \dot{U} \cdot I^* = \sum I^2 \cdot \underline{Z}_n = \sum I^2 \cdot R_n + j \left(\sum I^2 \cdot X_{Ln} - \sum I^2 \cdot X_{Cn} \right) = P_n + jQ_n. \quad (4.45)$$

Белсенді қуат оң және тек резисторларда шығарылады. Индуктивтіліктің реактивті қуаты оң, ал сыйымдылығы - теріс.

Активті және реактивті қуаттың тепе-теңдік тендеулері кез келген әдіспен есептеу нәтижелерін әмбебап тексеру болып табылады.

4.6.3 Қоректен қабылдағышқа максималды қуатты жеткізу шарты. Келісілген жүктеме режимі

Қоректен қабылдағышқа максималды қуатты жеткізу шарты мынау шарттардан шығады

$$R_n = R_{уст}, \quad X_n = -X_{уст}, \quad (4.46)$$

сонда

$$\frac{dP_n}{dR_n} = 0 \quad \text{және} \quad \frac{dP_n}{dX_n} = 0, \quad P_n = I^2 \cdot R_n = \frac{E^2 \cdot R_n}{(R_n + R_{уст})^2 + (X_n - X_{уст})^2}. \quad (4.47)$$

Қоректен қабылдағышқа максималды қуатты жеткізу режим *келісілген жүктеме режимі* деп аталады. Бұл режимде пайдалы іс коэффициенті $\eta = 0,5$ -ке тең, яғни қуаттың жарты пайызы қоректің ішкі кедергісінде сарқылынады. Осы себепті энергетика жүйелерінде бұл жүктемелі режим қолданылмайды. Бұл режим автоматика, электроника және радиотехника жүйелерінде көптен қолданылады.

5 Үш фазалы ток тізбектері

5.1 Негізгі анықтамалар

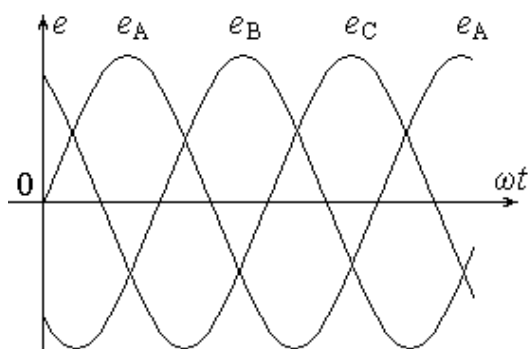
Үш фазалы жүйе жабдықтарын – генератор, трансформатор, электр желілері және асинхронды электр қозғалтқыштарды 1889 жылы құрастырып 1891 Германияда көрмеде орыс ғалымы М.О. Доливо-Добровольский бірінші болып енгізген. Үш фазалы симметриялы жүйелерді кең қолданылуы мынадай артықшаларына байланысты: үш фазалы айнымалы ток айнымалы магнит өрісін қоздырады; үш фазалы жүйе арқылы электр энергиясын алыс қашықтарға жеткізу, қабылдағыштарға бөлу экономика жағынан аса үнемді болып табылады; қосымша аспапсыз кернеудің түрлі екі санын алуға болады.

Үш фазалы симметриялы ЭҚК-тер жүйесі деп бірдей жиілікті және бірдей амплитудалы, ал фаза бойынша 120° -ығысқан үш синусоидалы ЭҚК-тің жиынтығын айтады. Үш фазалы симметриялы ЭҚК-тер жүйесін алу үшін үш фазалы синхронды генератор қолданылады. Оның статорында бір-бірінен 120° -қа ығысқан және өзара оқшауланған үш фазалық орама орналасқан.

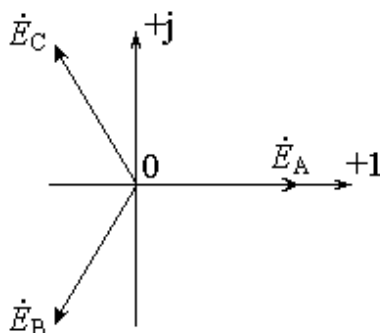
Ротор айналғанда осы орамаларда амплитудалары және жиіліктері бірдей, бірақ фаза бойынша 120° -қа ығысқан үш ЭҚК-тер пайда болады. Олардың біреуін e_A (\dot{E}_A), одан фаза бойынша 120° кеш қалған екіншісін e_B (\dot{E}_B), ал біріншіден фаза бойынша 120° озған ЭҚК-ді e_C (\dot{E}_C) деп белгілейміз. Генератордың орамаларын оның *фазалары* деп атайды да, А,В,С латын әріптері арқылы белгілейді. Фазалар кезектесуі деп ЭҚК-тердің белгілі бір мәнге ие болу кезіндегі ретін айтады. Егер бұл рет $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ болса, онда мұндай кезектесу тура кезектесу деп аталады. Симметриялы генератордың фазалық орамаларының ЭҚК-тердің лездік, кешенді амплитудалық және кешенді әрекеттік мәндері:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + 0^\circ), \dot{E}_{Am} = E_m \cdot e^{j0^\circ}, \dot{E}_A = E \cdot e^{j0^\circ}; \\ e_B &= E_m \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ), \dot{E}_{Bm} = E_m \cdot e^{-j120^\circ}, \dot{E}_B = E \cdot e^{-j120^\circ}; \\ e_C &= E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + 120^\circ), \dot{E}_{Cm} = E_m \cdot e^{+j120^\circ}, \dot{E}_C = E \cdot e^{+j120^\circ}. \end{aligned} \quad (5.1)$$

ЭҚК-тердің лездік мәндері 5.1-суретте көрсетілген, ал топографикалық диаграммасы 5.2- суретінде келтірілген.



5.1 сурет - Симметриялы генератордың фазалық орамаларының ЭҚК-терінің лездік, кешенді амплитудалық және кешенді әрекеттік мәндері



5.2 сурет- ЭҚК-тердің топографикалық диаграммасы

Үш фазалы симметриялы жүйесінде ЭҚК-тердің қосындысы нольге тең:

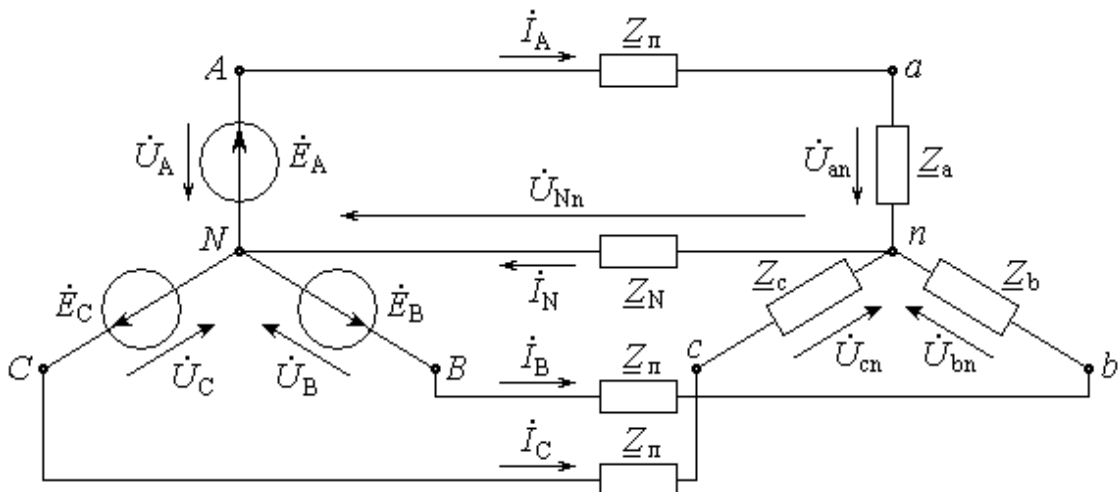
$$e_A + e_B + e_C = 0, \text{ немесе комплексті түрде } \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (5.2)$$

Үш фазалы тізбек деп үш фазалы э.қ.к.-тер жүйесі мен үш фазалы қабылдағыштың (жүктеменің) және жалғау сымдарының жиынтығын айтады. Үш фазалы тізбектің фазасы деп оның бойымен белгілі бір ток қана жүретін бөлігін айтады.

Сұлбаларда фазалардың бастапқы ұштары A, B, C әріптерімен, ал аяққы ұштары x, y, z әріптерімен белгіленеді. ЭҚК-дің бағыттарын аяққы ұштарынан бастапқы ұштарына қарай стрелкалармен көрсетеді. Үш фазалы жүйелерінде генератор мен жүктеменің фазаларын өзара *жұлдызша* немесе *үшбұрыш* сұлбасы бойынша қосылады.

5.2 Үш фазалы қабылдағышты жұлдызша сұлбасы бойынша жалғау

Жұлдызша сұлба бойынша жалғағанда ораманың аяққы ұштары x, y, z бір нүктеге (түйінге) қосылады және ол нүктені үш фазалы қоректендіргіштің *нөлдік нүктесі* немесе *бейтарап нүктесі* (0) деп атаймыз. Сол сияқты жүктеменің де фазаларының бір ұштары бір нүктеге (түйінге) қосылады және ол нүктені жүктеменің *нөлдік нүктесі* немесе *бейтарап нүктесі* ($0'$) деп атаймыз. Генератордың орамаларының басқы ұштарын жүктемемен қосатын сымдарды желілік сымдар деп атайды, ал олар арқылы жүретін токтар *желілік токтар* $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ деп аталады. Бұл токтар генератордан жүктемеге қарай бағытталған. Желілік сымдар арасындағы кернеулер *желілік кернеулер* деп аталады, ал желілік сымдар және бейтарап сымдар арасындағы кернеулер *фазалық кернеулер* деп аталады. Генератордың орамалары сәйкесті қабылдағыштармен бірізді жалғанғандықтан желілі токтарды фазалық деп айтуға да болады $I_{жс} = I_{\phi}$.



5.3 сурет- Кирхгофтың екінші заңына сәйкесті желілі және фазалық кернеулердің арасындағы байланыс

Кирхгофтың екінші заңына сәйкесті 5.3-суреттен желілі және фазалық кернеулердің арасындағы байланыс мынадай болып табылады

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B, \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C, \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \quad (5.3)$$

Симметриялы режимде $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\phi}$

$\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$ –жүктеме фазаларының кешенді кедергілері;

$\underline{Z}_{\text{л}}, \underline{Z}_N$ –желі және бейтарап сымның кешенді кедергілері;

Егер $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$ болса жүктеме симметриялы деп аталады, ал $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$, болса жүктеме бейсимметриялы деп аталады. Симметриялы режим кезінде $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c, I_A = I_B = I_C, I_0 = 0$. Симметриялық режим үшін негізгі байланыс $U_{\text{жс}} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}, I_{\text{жс}} = I_{\phi}$

5.2.1 Бейсимметриялы режимді талдау.

Егер бейтарап сымның кедергісін нөлге теңестірсе $\dot{U}_{nN} = 0$ нөлге тең болады. Бұл жағдайда генератор жағынан қарастыратын кернеулер қабылдағыштың кернеулерімен бірдей болып табылады. Сондықтан есеп әр-бір фаза үшін жеке жүргізіледі. Егер бейтарап сымның кедергісі нөлге тең болмаса бейтарап нүктелердің арасында ығысу кернеу пайда болады, оның әсерінде қабылдағыш жағынан қарастыратын фазалық кернеулер генератор жағынан қарастыратын фазалық кернеулерге тең болмайды. Есеп \dot{U}_{nN} кернеуді анықтаудан басталады. Ол кернеу екі түйін арасындағы кернеу өрнегі арқылы табылады

$$\dot{U}_{nN} = \dot{\varphi}_n - \dot{\varphi}_N = \frac{\dot{E}_A \cdot \dot{Y}_A + \dot{E}_B \cdot \dot{Y}_B + \dot{E}_C \cdot \dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_N}, \quad (5.4)$$

мұнда желінің кедергісін ескере отырып, жүктеме фазаларының кешенді өткізгіштігі мына формулалар бойынша анықталады:

$$\dot{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_{\text{л}} + \underline{Z}_a} = y_a \cdot e^{j\theta}, \dot{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_{\text{л}} + \underline{Z}_b} = y_b \cdot e^{j\theta}, \dot{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_{\text{л}} + \underline{Z}_c} = y_c \cdot e^{j\theta} \quad (5.5)$$

фазалардың толық кешенді өткізгіштіктері;

Бейтарап сымның кешенді өткізгіштігі:

$$\dot{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N} = y_N \cdot e^{j\theta} \quad (5.6)$$

Ом заңы бойынша токтар мынау өрнектерден табылады,

бейтарап сымның тогы $\dot{I}_N = \dot{U}_{nN} \cdot \underline{Y}_N$ және сызықты токтар, фазалық токтар:

$$\dot{I}_A = (\dot{E}_A - \dot{U}_{nN}) \cdot \underline{Y}_A, \dot{I}_B = (\dot{E}_B - \dot{U}_{nN}) \cdot \underline{Y}_B, \dot{I}_C = (\dot{E}_C - \dot{U}_{nN}) \cdot \underline{Y}_C \quad (5.7)$$

Жүктеменің фазалық кернеулері фазалардың ЭҚК-нен желінің кедергісіндегі кернеудің түсу шамасына және минусқа қарағанда \dot{U}_{nN} аз:

$$\dot{U}_{an} = \dot{E}_A - \dot{U}_{nN} - \dot{I}_A \cdot \underline{Z}_l, \dot{U}_{bn} = \dot{E}_B - \dot{U}_{nN} - \dot{I}_B \cdot \underline{Z}_l, \dot{U}_{cn} = \dot{E}_C - \dot{U}_{nN} - \dot{I}_C \cdot \underline{Z}_l. \quad (5.8)$$

Сызықтық жүктеме кернеулері фазалық кернеулердің айырмашылығына тең:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{an} - \dot{U}_{bn}, \dot{U}_{bc} = \dot{U}_{bn} - \dot{U}_{cn}, \dot{U}_{ca} = \dot{U}_{cn} - \dot{U}_{an}. \quad (5.9)$$

Үш фазалы қабылдағыштың активті қуаты:

$$P_n = P_{na} + P_{nb} + P_{nc} = U_{an} \cdot I_A \cdot \cos \varphi_{na} + U_{bn} \cdot I_B \cdot \cos \varphi_{nb} + U_{cn} \cdot I_C \cdot \cos \varphi_{nc}. \quad (5.10)$$

Үш фазалы қабылдағыштың реактивті қуаты:

$$Q_n = Q_{na} + Q_{nb} + Q_{nc} = U_{an} \cdot I_A \cdot \sin \varphi_{na} + U_{bn} \cdot I_B \cdot \sin \varphi_{nb} + U_{cn} \cdot I_C \cdot \sin \varphi_{nc}. \quad (5.11)$$

Үш фазалы қабылдағыштың толық қуаты:

$$S_n = S_a + S_b + S_c = U_{an} \cdot I_A + U_{bn} \cdot I_B + U_{cn} \cdot I_C. \quad (5.12)$$

Активті, реактивті және толық қуат көзі мен желісі бірдей есептеледі
Симметриялы режимді есептеу

Симметриялы режимді талдауда есепбір фаза үшін жүргізіледі.

Генератордың және қабылдағыштың нөлдік нүктелерінің арасындағы кернеу нейтралдың ығысу кернеуі нөлге тең болады $\dot{U}_{nN} = 0$.

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_n; \quad \underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c = \underline{Y} \quad \text{и} \quad \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (5.13)$$

Бір фазалы есептеулер үшін, әдетте «А», фазасы үшін жүргізіледі, басқа фазалардағы сәйкес мәндер тек бастапқы фазаларда ғана ерекшеленеді: «В» фазасында -120° , ал «С» фазасында $+120^\circ$.

Сызықты ток, "жұлдызша" сұлбасы бойынша жүктеме фазаларын қосу кезіндегі жүктеме фазалық токтарына тең:

$$\dot{I}_A = \dot{E}_A \cdot \underline{Y}_A, \dot{I}_B = \dot{I}_A \cdot e^{-j120^\circ}, \dot{I}_C = \dot{I}_A \cdot e^{+j120^\circ}, \quad I_A = I_B = I_C = I_l = I_{\phi n}. \quad (5.14)$$

Жүктеменің фазалық кернеулері:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{an} &= \dot{E}_A - \dot{I}_A \cdot \underline{Z}_l, \quad \dot{U}_{bn} = \dot{U}_{an} \cdot e^{-j120^\circ}, \quad \dot{U}_{cn} = \dot{U}_{an} \cdot e^{+j120^\circ}, \\ U_{an} &= U_{bn} = U_{cn} = U_{\phi n}. \end{aligned} \quad (5.15)$$

«Жұлдызша» сұлбасы бойынша жүктеме фазаларын қосу кезінде сызықтық жүктеме кернеулері фазалық кернеулердің айырмашылығына тең және симметриялы режимде фазалық кернеулерден $\sqrt{3}$ бір есе көп:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ab} &= \dot{U}_{an} - \dot{U}_{bn} = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_{an} \cdot e^{j30^\circ}, \quad \dot{U}_{bc} = \dot{U}_{bn} \cdot e^{-j120^\circ}, \quad \dot{U}_{ca} = \dot{U}_{cn} \cdot e^{+j120^\circ}, \\ U_{ab} &= U_{bc} = U_{ca} = U_{\text{лн}} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi n}. \end{aligned} \quad (5.16)$$

Симметриялы режимдегі жүктеменің үш фазасының активті қуаты:

$$P_n = 3 \cdot U_{an} \cdot I_A \cdot \cos \varphi_n = 3 \cdot U_{\phi n} \cdot I_{\phi n} \cdot \cos \varphi_n = \sqrt{3} \cdot U_{\text{лн}} \cdot I_{\text{лн}} \cdot \cos \varphi_n. \quad (5.17)$$

Симметриялы режимдегі жүктеменің үш фазасының реактивті қуаты:

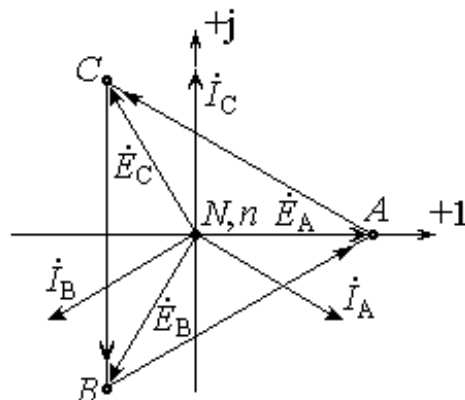
$$Q_n = 3 \cdot U_{an} \cdot I_A \cdot \sin \varphi_n = 3 \cdot U_{\phi n} \cdot I_{\phi n} \cdot \sin \varphi_n = \sqrt{3} \cdot U_{\text{лн}} \cdot I_{\text{лн}} \cdot \sin \varphi_n. \quad (5.18)$$

Симметриялы режимдегі жүктеменің үш фазасының толық қуаты:

$$S_n = 3 \cdot U_{\phi n} \cdot I_{\phi n} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{лн}} \cdot I_{\text{лн}}. \quad (5.19)$$

5.4-суретінде симметриялық режим үшін генератордың кернеулерін *топографикалық* диаграммасы және токтардың *векторлық* диаграммалары үшін симметриялық режимнің сұлбасы 5.3-суретте көрсетілген. Қабылдағыштың кернеулерін *топографикалық* диаграммасы және токтардың *векторлық* диаграммалары да осындай болып координаттар осі бойынша кішкене ығысады. Ығысу себебі \underline{Z}_l кедергіде кернеудің түсуі

$$\dot{\phi}_a = \dot{\phi}_A - \dot{I}_A \cdot \underline{Z}_l, \quad \dot{\phi}_b = \dot{\phi}_B - \dot{I}_B \cdot \underline{Z}_l, \quad \dot{\phi}_c = \dot{\phi}_C - \dot{I}_C \cdot \underline{Z}_l. \quad (5.20)$$



5.4 сурет - Симметриялық режим үшін генератордың кернеулерінің топографикалық диаграммасы және токтардың векторлық диаграммалары

5.3 Қабылдағыштың фазаларының үшбұрыш схемасы бойынша жалғау

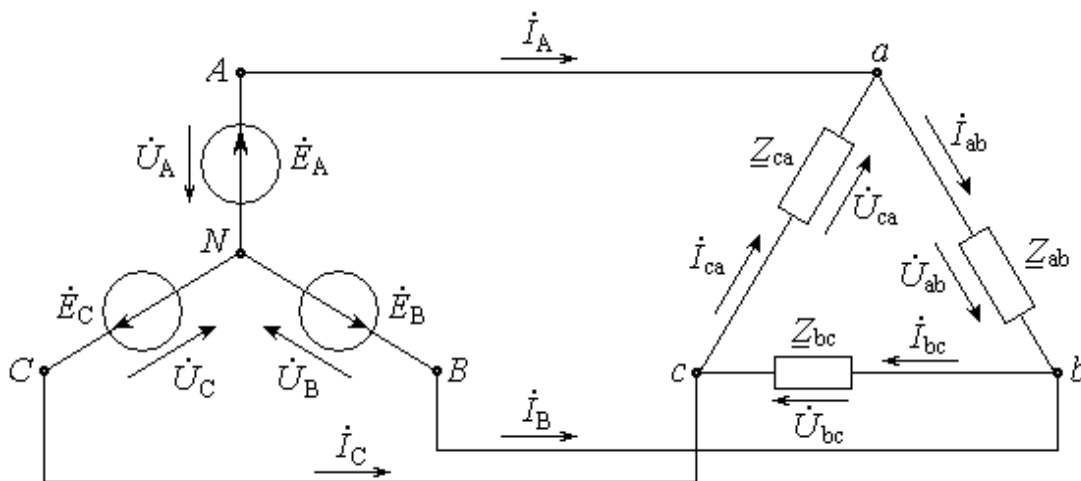
Қоректендіргіштің фазаларын үшбұрыш сұлбасы бойынша қосу үшін бір фазаның аяққы ұшын екінші фазаның басқы ұшымен, екінші фазаның аяққы ұшын үшінші фазаның басқы ұшымен, ал үшінші фазаның аяққы ұшын бірінші фазаның басқы ұшымен қосады. Бұл жағдайда мынау өрнек $\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0$ орындалуы қажет. Фазалы кедергілердің шамалары кіші болғандықтан практика жүзінде генератордың орамаларын үшбұрыштап қоспайды, себебі ең аз бейсимметрия нәтижесінде де контурда үлкен токтар пайда болуы мүмкін. Сондықтан практика жүзінде генератор орамалары жұлдызша сұлбасы бойынша жалғанады, ал үшфазалы қабылдағыш үшбұрыштап қосылады (5.5 сурет). 5.5-суреттен мынау теңдіктер белгілі болып тұр: *фазалы және желілі кернеулер бір-біріне тең* $U_{жс} = U_{ф}$; желілі кешенді токтар Кирхгофтың бірінші заңына сәйкесті

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \quad (5.21)$$

$\underline{Z}_{ab}, \underline{Z}_{bc}, \underline{Z}_{ca}$ – фазалардың кешенді кедергілері;

$\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – қабылдағыштың желілі токтары;

$\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$ – қабылдағыштың фазалы токтары.



5.5 сурет - Генератор орамалары жұлдызша сұлбасы бойынша, ал үшфазалы қабылдағыш үшбұрыштап қосылуы

5.3.1 Бейсимметриялы режимін талдау.

Симметриялы емес режимді есептеу жүктеме кедергісінің үшбұрышын эквивалентті жұлдызшаға түрлендіруден басталады (сұлба 5.3 суретте)

$$\underline{Z}_a = \frac{\underline{Z}_{ab} \cdot \underline{Z}_{ca}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}, \quad \underline{Z}_b = \frac{\underline{Z}_{ab} \cdot \underline{Z}_{ca}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}, \quad \underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}_{ab} \cdot \underline{Z}_{ca}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}. \quad (5.22)$$

Бейтарап нүктелер арасындағы ығысу кернеуі былай анықталады:

$$\dot{U}_{nN} = \dot{\varphi}_n - \dot{\varphi}_N = \frac{\dot{E}_A \cdot \dot{Y}_A + \dot{E}_B \cdot \dot{Y}_B + \dot{E}_C \cdot \dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C}. \quad (5.23)$$

Ом заңы бойынша желілі токтар есептелінеді:

$$\dot{I}_A = (\dot{E}_A - \dot{U}_{nN}) \cdot \underline{Y}_A, \quad \dot{I}_B = (\dot{E}_B - \dot{U}_{nN}) \cdot \underline{Y}_B, \quad \dot{I}_C = (\dot{E}_C - \dot{U}_{nN}) \cdot \underline{Y}_C. \quad (5.24)$$

Жүктеменің фазалық кернеулері фазалардың ЭҚК-нен желінің кедергісіндегі кернеудің түсу шамасына және \dot{U}_{nN} минусқа қарағанда аз:

$$\dot{U}_{an} = \dot{E}_A - \dot{U}_{nN} - \dot{I}_A \cdot \underline{Z}_l, \quad \dot{U}_{bn} = \dot{E}_B - \dot{U}_{nN} - \dot{I}_B \cdot \underline{Z}_l, \quad \dot{U}_{cn} = \dot{E}_C - \dot{U}_{nN} - \dot{I}_C \cdot \underline{Z}_l. \quad (5.25)$$

Қабылдағыштың желілі кернеулері фазалы кернеулеріне тең болып түрлендірілген орынбасарлық сұлбадан табылады:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{an} - \dot{U}_{bn}, \quad \dot{U}_{bc} = \dot{U}_{bn} - \dot{U}_{cn}, \quad \dot{U}_{ca} = \dot{U}_{cn} - \dot{U}_{an}. \quad (5.26)$$

Қабылдағыштың фазалықтоктары:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}, \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}, \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}. \quad (5.27)$$

Үш фазалы активті қуат:

$$P_n = P_{nab} + P_{nbc} + P_{nca} = U_{ab} \cdot I_{ab} \cdot \cos \varphi_{nab} + U_{bc} \cdot I_{bc} \cos \varphi_{nbc} + U_{ca} \cdot I_{ca} \cos \varphi_{nca}. \quad (5.28)$$

Үш фазалы реактивті қуат:

$$Q_n = Q_{nab} + Q_{nbc} + Q_{nca} = U_{ab} \cdot I_{ab} \sin \varphi_{nab} + U_{bc} \cdot I_{bc} \sin \varphi_{nbc} + U_{ca} \cdot I_{ca} \sin \varphi_{nca}. \quad (5.29)$$

Үш фазалы толық қуат:

$$S_n = S_{ab} + S_{bc} + S_{ca} = U_{ab} \cdot I_{ab} + U_{bc} \cdot I_{bc} + U_{ca} \cdot I_{ca}. \quad (5.30)$$

9.3.2 Симметриялы режимін есебі.

Қабылдағыштың фазаларын кедергілері бірдей болғандықтан баламалы жұлдызшаның кедергілері мынадай табылады $\underline{Z}_{Yn} = \underline{Z}_{\Delta n}/3$. Симметриялы режим үшін $\dot{U}_{nN} = 0$. Есепті «А» фаза үшін жүргізіп отырып, басқа фазалардың шамаларын 120° сәйкесті ығыстырады («В» фазаның шамаларын -120° , «С» фазаның шамаларын $+120^\circ$.)

Қабылдағыштың қуаттарын желілі кернеу және желілі ток арқылы табуға болады:

$$P_n = \sqrt{3} \cdot U_{лн} \cdot I_{лн} \cdot \cos \varphi_n, Q_n = \sqrt{3} \cdot U_{лн} \cdot I_{лн} \cdot \sin \varphi_n \text{ и } S_n = \sqrt{3} \cdot U_{лн} \cdot I_{лн}. \quad (5.31)$$

6 Электр тізбектеріндегі өтпелі үрдістер. Өтпелі үрдістерді классикалық әдіспен талдау

6.1 Өтпелі үрдістер туралы түсініктемелер және негізгі анықтамалар

Тізбекті бір орнықталған мәнінен екінші орнықталған мәніне өту үрдісін өтпелі үрдістер дейді. Өтпелі үрдістер энергия жинаушы элементтерден (катушка, конденсатор) тұратын тізбектерде коммутация нәтижесінде пайда болуы мүмкін. *Коммутация* деп тізбектің параметрін бірден өзгеруін атаймыз, мысалға тізбекті қорек көзіне қосылуы немесе ажыратылуы, тізбектің элементін бірден қосылуы немесе ажыратылуы. Коммутация лезде өтетін үрдіс деп саналады, бірақта энергия жинаушы элементтерде тізбектің әрбір орнықталған күйіне электромагниттік өрісінде жиналған энергияның шамасы сәйкес келеді. Өтпелі процестердің сипаты және ұзындығы тізбектің коммутациядан кейінгі параметрлеріне байланысты. Өтпелі процестің өтуіне біраз уақыт керек болып табылады, бұл уақыт қысқа болғанымен теорияда оны шексіздікке теңестіреді.

Өтпелі үрдістің ұзындығы τ - уақыт тұрақтысына байланысты болып $t = 4,6\tau$ деп саналады, егер $t = \tau$ болса токтың немесе кернеудің өтпелі үрдіс кезіндегі еркін құрамасы, бастапқы мәнімен салыстырғанда, $e = 2,72$ есе кеміді. Өтпелі процестерді есептеуде уақыт үш мезетке бөлінеді: коммутацияға дейінге мезет $t = (0_-)$, коммутация кезіндегі мезет- $t = 0$, коммутациядан кейінгі мезет- $t = (0_+)$. Осы уақыттарға сәйкес келетін кернеулер мен токтарды мынадай белгілейді: коммутацияға дейін $i(0_-)$, $u(0_-)$; коммутация кезінде $i(0)$, $u(0)$; коммутациядан кейін $i(0_+)$, $u(0_+)$.

Тізбектің күйі ауысқанда жиналған энергияның шамасы бірден өзгере алмайды. Шарғыда магнит өрісінің энергиясы жиналады, ал конденсаторда электр өрісінің энергиясы жиналады. Егер қысқа t уақытта электромагниттік өрісінің энергиясын бірден өзгереді деп қарастырса, оған сәйкес келетін қуаттың шамасы шексіздікке тең болуы қажет:

$$P = dW/dt \neq \infty. \quad (6.1)$$

Қуаты шексіздікке тең қоректер болмағандықтан өтпелі үрдістер лезде өте алмайды $W(0_+) = W(0_-)$.

Соңғы өрнектен коммутацияның екі заңы келіп шығады.

Коммутацияның бірінші заңы. Индуктивті элементтің магнит өрісінің энергиясы мынау өрнек арқылы анықталады:

$$W_M = \frac{\psi \cdot i}{2} = \frac{L \cdot i^2}{2}, \quad (6.2)$$

мұнда $\psi = L \cdot i$ – индуктивті элементтің ағын іліністігі. Мынау өрнекке сәйкесті $W_M(0_+) = W_M(0_-)$ индуктивті элементтердеағын іліністігі ψ немесе ток i_L бірден секіріп өзгермейді деп айтуға болады. Коммутация кезіндегі мезетте ($t = 0$) ағын іліністігі ψ немесе ток i_L бастапқы шамаларын сақтап қалады:

$$\psi(0_+) = \psi(0_-) | t = 0 \text{ немесе } i_L(0_+) = i_L(0_-) | t = 0. \quad (6.3)$$

Коммутацияның екінші заңы. Конденсаторда жиналған электр өрісінің энергиясы:

$$W_E = \frac{q \cdot u}{2} = \frac{C \cdot u^2}{2}, \quad (6.4)$$

мұнда $q = C \cdot u$ – конденсатордың заряды, $W_E(0_+) = W_E(0_-)$ болғандықтан сыйымдылық элементтердің заряды q немесе кернеуі u_C бірден секіріп өзгермейді деп айтуға болады. Коммутация кезіндегі мезетте ($t = 0$) заряд q немесе u_C кернеу бастапқы шамаларын сақтап қалады:

$$q(0_+) = q(0_-) | t = 0 \quad \text{жәкі} \quad u_C(0_+) = u_C(0_-) | t = 0. \quad (6.5)$$

$\psi(0)$, $i_L(0)$ және $q(0)$, $u_C(0)$ шамаларын тәуелсіз бастапқы шарттар дейді *БТШ*). Басқа бастапқы шамалар: индуктивті элементтің кернеуі $u_L(0)$, конденсатордың тоғы $i_C(0)$, резистордың кернеуі $u_R(0)$ және тоғы $i_R(0)$ тәуелді бастапқы шарттар деп аталады. Бұл шамалар үшін коммутация заңдары орындалмайды. Олар лезде өзгеруі мүмкін.

Өтпелі үрдістерді есептеуде классикалық, операторлық т.б. әдістер қолданылады.

6.2 Өтпелі үрдістерді классикалық әдісімен талдау

Классикалық әдіс дифференциалды теңдеулердің шешімін табуға негізделген. Энергия жинаушы элементті тізбектердің күйін сипаттайтын теңдеулер бір текті емес дифференциалды болып табылады. Осындай теңдеулердің шешімі екі бөліктен тұрады: жалпы және дербес шешімдер. Теңдеудің жалпы шешімі ол біртекті дифференциалды теңдеудің стандарттық шешімі. Дербес шешімі бастапқы шарттар арқылы табылады. Осыған сәйкесті өтпелі токтар және кернеулер екі құрамадан тұрады – орнықталған және еркін:

$$f(t) = f_{op}(t) + f_{ep}(t), \quad (6.6)$$

мұнда $f_{op}(t)$ – орнықты құрамасы;

$f_{ep}(t)$ – еркін құрамасы.

Токтың орнықталған мәні коммутациядан кейінгі тізбектің жаңадан орнықталған күйінен ыңғайлы әдістер (КТӨ, ТПӨ, т.б.) арқылы немесе Кирхгоф заңдары бойынша табылады. Бұл режим теориялық $t = \infty$ уақытқа сәйкес келеді. Тұрақты ток көзін әсерінде немесе тұрақты ЭҚК көзін әсеріндегі орнықталған токтар және кернеулер тұрақты болады, ал синусоидалы ток немесе ЭҚК көздерін әсеріндегі орнықты шамалар синусоидалы болып табылады.

Токтың (кернеудің) еркін құрамасы өтпелі үрдіс кезінде қарастырылады. Бұл шамалар қорексіз тізбектің жұмысына сәйкес келеді, сондықтан нөлге ұмтылады. Токтың (кернеудің) еркін құрамалары біртекті дифференциалды теңдеулердің шешімі болғандықтан олардың түрі сипаттамалық теңдеулердің түбірлеріне байланысты. Түбірлердің саны сипаттамалық теңдеудің дәрежесіне тең болып, энергия жинаушы элементтердің санына және жалғануына тәуелді болып табылады. Сипаттамалық теңдеуді құрастыру үшін коммутациядан кейінгі күйінде тізбектің $Z(p)$ Кіріс операторлық кедергісін анықтап нөлге теңестіреді.

Индуктивті элементтің және конденсатордың операторлық кедергілері:

$$X_L(p) = p \cdot L, \quad X_C(p) = \frac{1}{p \cdot C}. \quad (6.7)$$

Бір энергия жинаушы элементтен тұратын тізбекті бірінші дәрежелі тізбек деп атайды. Бұл тізбектерде сипаттамалық теңдеудің түбірі теріс нақты шама болғандықтан өтпелі үрдістің түрі *бейпериодты* болып мына өрнектен анықталады:

$$f_{ep}(t) = A \cdot e^{pt}, \quad (6.8)$$

A – интегралдау тұрақтысы.

Өтпелі үрдіс өтетін уақыттың шамасы $\Delta t_{ок} = 4.6\tau$ (анықтығы 1% дейін), τ – уақыт тұрақтысы, $\tau = -1/p$.

Екі энергия жинаушы элементтен тұратын тізбекті *екінші дәрежелі тізбек* деп атайды. Екінші дәрежелі тізбектердің сипаттамалық теңдеулері квадраттық теңдеу болып, түбірлерінің түрі D дискриминантқа байланысты қарастырылады.

$D > 0$ p_1 және p_2 әр түрлі нақты сан болып табылады, токтың еркін мәнін былай қарастыруға болады:

$$i_{ep}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (6.9)$$

Бұл жерде A_1 , A_2 – бастапқы тәуелсіз шарттар арқылы табылатын интегралдау тұрақтылары. Бұл жағдайда өтпелі үрдіс *бейпериодтық* деп аталады. Өтпелі үрдіс өтетін уақыттың шамасы $\Delta t_{m} = 4,6\tau$ ($\Delta t_{m} = 4,6\tau$, бұл жерде τ – екі уақыт тұрақтысынан үлкені:

$$\tau_1 = -\frac{1}{p_1} \text{ және } \tau_2 = -\frac{1}{p_2}.$$

$D = 0$ – сипаттамалық теңдеудің түбірлері нақты сан болып бірдей $p_1 = p_2 = p$, өтпелі үрдістің түрі бейпериодтық процестің шеткі жағдайы деп аталады. Теңдеудің шешімі:

$$f_{cs}(t) = (A_1 + A_2 \cdot t) \cdot e^{pt}. \quad (6.10)$$

Өтпелі үрдіс өтетін уақыттың шамасы $\Delta t_m = 4,6 \cdot \tau$, где $\tau = -1/p$.

$D < 0$ – сипаттамалық теңдеудің түбірлері кешенді және түйіндес $p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_{ep}$, α – өшу коэффициенті, ω_{ep} – еркін тербелістердің жиілігі. Өтпелі үрдістің түрі периодтық болып табылады:

$$f(t)_{ep} = e^{-\alpha t} (A_1 \sin \omega_{ep} t + A_2 \cos \omega_{ep} t) \pm j\omega_{ep} = A e^{-\alpha t} \sin(\omega_{ep} t + \psi), \quad (6.11)$$

мұнда:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}, \quad \psi = \arctg \frac{A_2}{A_1}, \text{ және } A_1 = A \cos \psi, \quad A_2 = A \sin \psi,$$

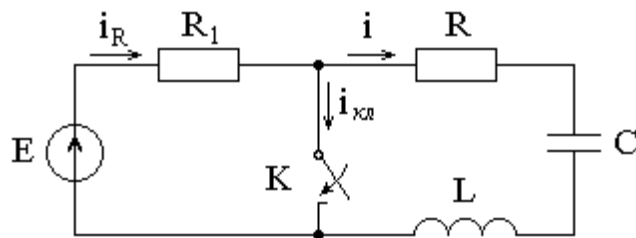
Өтпелі үрдіс өтетін уақыттың шамасы $\Delta t_{mn} = 4,6 \cdot \tau$, уақыт тұрақтысы $\tau = 1/\alpha$.

Жоғарыда келтірілген өрнектерде A_1 және A_2 немесе A және ψ интегралдау тұрақтылары. Бірінші дәрежелі тізбектерде интегралдау тұрақтысы бастапқы тәуелсіз шарттардан анықталады.

Екінші дәрежелі тізбектерде интегралдау тұрақтыларын табу үшін бастапқы тәуелсіз шарттар және бастапқы тәуелді шарттар қолданылады. Бастапқы тәуелсіз шарттар коммутация заңдарына сәйкес келеді, ал бастапқы тәуелді шарттар Кирхгоф заңдары бойынша құрастырған теңдеулерден анықталады.

6.3 Екінші ретті тізбектердегі өтпелі процестер

6.1-суретте бірізді жалғанған реалды шарғы мен конденсатор тұрақты ЭҚК ($E = const$) көзінен ажыратылады.



6.1 сурет - Бірізді жалғанған реалды шарғы мен конденсатор

1) Бастапқы тәуелсіз шарттарды $u_C(0_-)$ және $i_L(0_-)$ анықтау.

Коммутацияға дейін K кілт ашық болып тұр, $i_{кк} = 0$, ЭҚК тұрақты болғандықтан $i_L(0_-) = i = 0$, ал $u_C(0_-) = E - R_1 \cdot i_R - R \cdot i - u_L = E$.

Бастапқы тәуелді шарттарды табуда негізгі теңдіктер - $u_C = const$ және шарғының тогы $i_L = const$, осы себепті

$$i = i_C = C \frac{du_C}{dt} = 0, \text{ және } u_L = L \frac{di_L}{dt} = 0. \quad (6.12)$$

Бірінші БТШ-ты алынады $i_L(0_-) = i = i_C = 0$.

Екінші тәуелсіз бастапқы шартты табамыз: $u_C(0_-)$

Кирхгофтың екінші заңына сәйкес коммутацияға дейінгі тізбектегі конденсатордағы кернеу (екінші ННУ) ЭҚК-ке тең:

$$u_C(0_-) = E - R_1 \cdot i_R - R \cdot i - u_L = E. \quad (6.13)$$

2) Ток және кернеудің орнықталған мәндері коммутациядан кейін кілт жабылған жағдай үшін есептелінеді ($t = \infty$):

$$u_{Rop} = u_{Cop} = u_{Lop} = 0, i_{op} = 0, i_{кл} = i_R = E/R_1. \quad (6.14)$$

3) Сипаттамалық теңдеу коммутациядан кейінгі жағдай үшін құрастырылады:

$$Z(p) = R + \frac{1}{pC} + pL = 0. \quad (6.15)$$

Теңдеуді түрлендіріп дискриминантын анықтаймыз:

$$p^2 + \frac{R}{L} \cdot p + \frac{1}{L \cdot C} = 0, D = \left(\frac{R}{2L} \right)^2 - \frac{1}{LC}. \quad (6.16)$$

Дискриминант нөлден кем жағдай үшін $D < 0$ теңдеудің түбірлері кешенді және түйіндес болады:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm j \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L} \right)^2} = -\alpha \pm j\omega_{ep}. \quad (6.17)$$

$\omega_{св}$ жиілігі бар тербелмелі өтпелі процестің сипаты. Конденсатордағы кернеудің еркін мәні:

$$u_C = u_{Cep}(t) = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_{ep}t + \psi). \quad (6.18)$$

4) A және ψ интегралдау тұрақтыларын табу үшін теңдеулерді құрастырамыз. Ол үшін есептеу керек $t = 0_+$ кезінде, кернеу $u_C(0_+)$ және оның өзгеру жылдамдығы $du_C/dt(0_+)$.

Коммутациядан кейінгі сұлба үшін коммутация заңдары негізінде келесідей жазуға болады $u_C(0_+) = u_C(0_-) = E$ және $i_L(0_+) = i_L(0_-) = 0$.

Индуктивтілікпен бірдей ток конденсатор арқылы өтетінін ескере отырып, біз жазамыз $i_C(0_+) = i_L(0_+) = 0$. Әрі қарай, коммутациядан кейінгі алғашқы сәтте конденсатордағы кернеудің өзгеру жылдамдығын табамыз:

$$\frac{du_C}{dt}(0_+) = \frac{i_C(0_+)}{C} = 0. \quad (6.19)$$

Конденсатордағы кернеу үшін өрнектерді $t = 0_+$ кезінде оның өзгеру жылдамдығын жазамыз:

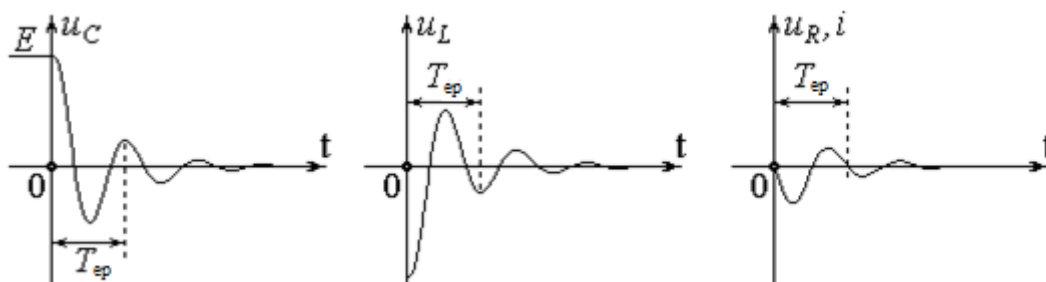
$$u_C(0_+) = u_{C\text{мәж}}(0_+) + u_{Cep}(0_+) = Ae^{-\alpha \cdot 0} \sin(\omega_{ep} \cdot 0 + \psi) = A \cdot \sin\psi = E; \quad (6.20)$$

$$\frac{du_c}{dt}(0_+) = -\alpha A \sin\psi + \omega_{ep} A \cos\psi = 0, \text{ бұдан } A \cos\psi = \frac{\alpha \cdot E}{\omega_{ep}}. \quad (6.21)$$

(6.20) және (6.21) теңдеулерден A және ψ мынадай болып табылады:

$$A = \sqrt{E^2 + \left(\frac{\alpha \cdot E}{\omega_{ep}}\right)^2} = E \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{\omega_{ep}}\right)^2}, \quad \psi = \arctg \frac{\omega_{ep}}{\alpha}.$$

Уақыттық диаграммалар $u_c(t)$, $u_L(t)$, $u_R(t)$ және $i(t)$ 6.2-суретте келтірілген.



6.2 сурет - $u_c(t)$, $u_L(t)$, $u_R(t)$ және $i(t)$ уақыттық диаграммалары

7 Магнит тізбектері

7.1 Негізгі анықтамалар

Магнит тізбектері деп магнит ағынына жол түзетін, ал магниттік үрдістерді магнит қозғаушы күш, магнит ағыны және магниттік потенциалдар айырымы ұғымдарымен түсіндірілетін құрылғылардың жиынтығын атайды. Бұл тізбектерді зерттеуде және талдауда мынадай негізгі магниттік шамалар қолданады: магнит өрісінің кернеулігі \overline{H} , магниттік индукция \overline{B} , магнит ағыны Φ , ағын ілесуі Ψ , магнит өтімділігі μ . Магнит өрісінің шамасын және бағытын сипаттайтын шама бұл кернеулік – \overline{H} . Кернеуліктің өлшем бірлігі – А/м. Кернеуліктің әсерінде магниттік орта өзгереді. Ортаның өзгеруін магниттік индукция B сипаттайды. Бұл шама магнит өрісінде қозғалып келе жатқан зарядқа әсер ететін күшті көрсетеді. Магниттік индукция мен кернеуліктің арасындағы байланысты магниттену сызығымен сипаттайды немесе мына өрнек көрсетеді

$$\overline{B} = \mu_a \cdot \overline{H} = \mu_0 \cdot \mu \cdot \overline{H}, \quad (7.1)$$

мұнда, μ_a – ортаның абсолюттік магниттік өтімділігі; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$; магнит тұрақтысы немесе вакуумның өтімділігі, $\mu = \mu_a / \mu_0$ – салыстырмалы магниттік өтімділік.

Салыстырмалы магниттік өтімділіктің шамасына қарай заттар *диамагнетикте* ($\mu < 1$), *парамагнетиктер* ($\mu > 1$), *ферромагнетиктер* ($\mu \gg 1$) деп аталатын заттарға бөлінеді.

Темір, никель, кобальт ферромагнетиктерге жатады. Магнит тізбектері екі негізгі бөліктен тұрады: а) магнит ағынын қоздырушы бөлік бұл тогы бар шарғы немесе тұрақты магнит; б) магнит ағынына жол түзетін бөлік-электротехникалық болаттан жасалған ферромагниттік өзек. Магнит тізбектері электр тізбектері сияқты тұрақты және айнымалы ток, тармақталмаған және тармақталған тізбектеріне бөлінеді; одан басқа біртекті, біртекті емес болуы мүмкін. Магнит тізбектерін конфигурациясы да әртүрлі болады:

Магнит тізбектеріндегі үрдістер магнит қозғаушы күш – *МҚК* және магнит ағыны арқылы талданады. Магнит қозғаушы күштің өлшем бірлігі *ампер* (A), магнит ағынын өлшем бірлігі *вебер* ($Bб$). Магнит қозғаушы күшті тұрақты магнит немесе электромагнит тудырады. Электромагнит ферромагниттік өзектен және ток өтетін индуктивтік шарғыдан тұрады. Электромагниттің магнит қозғаушы күші мына өрнектен анықталады:

$$F = I \cdot w, \quad (7.2)$$

мұнда I – индуктивті шарғының тогы, w – шарғының орам саны.

Магнит ағыны Φ деп белгілі -бір S аудан арқылы өтіп жатқан магниттік индукция векторының ағынын айтады:

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS}. \quad (7.3)$$

мұнда $\vec{B} \cdot \vec{dS} = B \cdot dS \cdot \cos(\vec{B}, \vec{dS})$ – векторлардың скаляр көбейтіндісі \vec{B} және \vec{dS} .

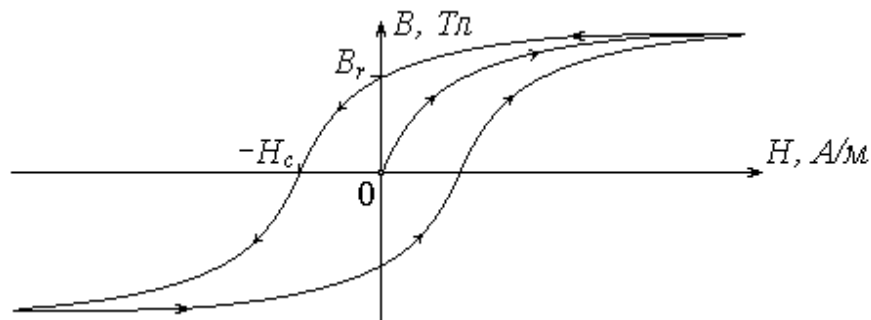
Егер магнит өрісі біртекті болса $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$,

α - магниттік индукция векторы мен аудан элементіне тұрғызылған перпендикулярдың арасындағы бұрыш. Ал магниттік индукция векторы қарастырып отырған ауданға перпендикуляр болса $\Phi = B \cdot S$, $\cos \alpha = 1$.

Ферромагниттік заттардың негізгі қасиеті- бұл шарғы тудырған магнит өрісін мыңнан аса есе күшейту.

7.2 Ферромагниттік материалдардың қасиеттері

Ферромагниттік материалдардың магниттік қасиетін магнит өрісінің индукциясының кернеуліктен тәуелділігі сипаттайды. Бұл тәуелділік 7.1-суретте көрсетілген гистерезис тұзағы деп аталатын қисықтардан шығады



7.1 сурет - Магнит өрісінің индукциясының кернеуліктен тәуелділігі

Кернеулік H өскенде магниттік индукция B басында тез өседі, кейін қанығу процесі кезінде өзгермейді. Кернеулікті азайтса индукция да азая бастайды, бірақ оның мәні бастапқы мәнінен гистерезис нәтижесінде өзгеше болады. Кернеулік нөлге тең болғанда магниттік индукция нөлге тең болмайды, ол B_r – қалдық магнит индукциясына тең болады. Ал енді кернеуліктің бағытын өзгертіп өзекті магнитсіздендірсе, кернеулік H_c шамасына жеткенде магниттік индукция нөлге тең болады. H_c коэрцитивтік (ұстап қалу деген сөзді белгілейді) күш деп аталады. Коэрцитивтік күштің шамасына орай ферромагниттік материалдар үш топқа бөлінген.

Коэрцитивтік күші жоғары материалдар $H_c > 400$ (А/м) қатты магниттік материалдар деп аталады. Бұл материалдардан тұрақты магниттер жасалады. Коэрцитивтік күші төмен материалдар $H_c < 200$ (А/м) жұмсақ магниттік материалдар деп аталады. Олардан электрмашиналардың және трансформаторлардың ферромагниттік өзектері жасалады. Үшінші топтың материалдары арнайы магниттік материалдар деп аталады, бұл материалдар ерекше гистерезис тұзағына және жоғары қасиеттерге ие болады.

Осылайша, ферромагниттік материалдардың $B = f(H)$ тәуелділігі сызықты емес. Бұл тәуелділіктер анықтамалықтарда кесте түрінде немесе магниттеу қисықтары деп аталатын қисықтар түрінде келтірілген.

7.3 Магнитті тізбектерді талдау

Магнитті тізбектерді талдауда толық ток заңы және магнит индукциясын, немесе магнит ағындарының үздіксіз екендігін көрсететін теңдеу қолданылады.

Интегралды түріндегі толық ток заңы: қарастырып отырған электрлік және магниттік тізбектерінің бойындағы \vec{H} кернеуліктің векторының айналуы осі l бойында жататын токтардың алгебралық қосындысына тең

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_k \cdot w_k = \sum F_k. \quad (7.4)$$

Егер орамдар саны w_1 және w_2 , ал токтары I_1 және I_2 -ге тең екі шарғы орналасқан болса, магнит қозғаушы күштердің қосындысы $\sum F_k = F_1 + F_2$ болып табылады. Әдетте интегралдау өнбойдың бағыты магнит өрісінің күштерінің

сызықтарына бағытталып алынады, сонда \overline{H} және \overline{dl} векторлардың арасындағы бұрыш нөлге тең болады (\overline{dl} вектордың бағыты интегралдау өнбойының жанамасымен бағыттас), осы себепті $\overline{H} \cdot \overline{dl}$ векторлық шамалардың скалярлық көбейтіндісі $H \cdot dl$ скалярлық шамалардың көбейтіндісіне алмасады. Бұл жағдайда \overline{H}_i қалыпталған тізбектің бөліктерінде $\oint \overline{H} \cdot \overline{dl}$ интегралын $\sum H_i \cdot l_i$ магниттік кернеулердің қосындысына ауыстыруға болады. Мұнда H_i қарастырып отырған бөліктің кернеулігі, ал l_i магниттік индукцияның сызықтарының орташа ұзындығы. Осыған сәйкесті (7.4) өрнекті мына түрге келтіруге болады

$$\sum H_i \cdot l_i = \sum I_k \cdot w_k = \sum F_k. \quad (7.5)$$

Магниттік тізбектердің өнбойы үшін жазылған бұл өрнек электр тізбектері үшін қарастырылған *Кирхгофтың екінші заңына* сәйкес келеді.

Магниттік кернеудің және магнит ағынын қатынасы R_m *магниттік кедергі* деп аталады

$$R_m = \frac{H \cdot l}{\Phi} = \frac{H \cdot l}{B \cdot S} = \frac{H \cdot l}{\mu_a \cdot H \cdot S} = \frac{l}{\mu_a \cdot S}, \quad (7.6)$$

мұнда S – магнит тізбегінің бөлігін көлденең кесімінің ауданы;

l – бөліктің ұзындығы;

μ_a – магнит тізбегінің бөлігін абсолюттік магниттік өтімділігі.

Интегралды түріндегі магнит ағындарының үздіксіздігі: тұйық S кеңістікті қиып өтетін \overline{B} магнит индукциясының векторы нөлге тең

$$\oint_S \overline{B} \cdot \overline{dS} = 0. \quad (7.7)$$

\overline{dS} векторы кеңістікке перпендикуляр бағыттас болғандықтан \overline{B} магниттік индукцияға бағыттас, сондықтан векторлардың $\overline{B} \cdot \overline{dS}$ скалярлық көбейтіндісін $B \cdot dS$ скалярлық шамалардың көбейтіндісіне ауыстыруға болады.

Бұл жағдайда \overline{B}_i индукция және S_i қалыпталған тізбектің бөліктерінде $\oint \overline{B} \cdot \overline{dS}$ интегралын магниттік ағындарының қосындысына ауыстыруға болады

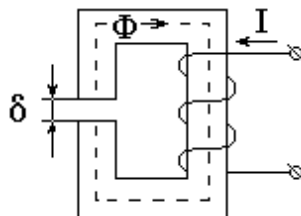
$$\sum B_i \cdot S_i = \sum \Phi_i = 0.$$

Осы талқылауларды ескере отырып, (7.7) теңдеу магниттік тізбектің түйіндеріндегі магнит ағынының үздіксіздігі теңдеуіне өтеді:

$$\sum B_i \cdot S_i = \sum \Phi_i \quad (7.8)$$

Бұл магнит тізбектерінің түйіні үшін жазылған өрнек электр тізбектерінің түйіні үшін жазылатын *Кирхгофтың бірінші заңына ұқсас*.

Тармақталмаған магнит тізбегінің есебін қарастырайық. 7.2-суретіндегі ферромагниттік өзектің S -көлденең кесімінің ауданы, l_{opt} – магнит өрісінің сызықтарының орташа ұзындығы, δ – ауа саңылауының ені. Өзекке тогы I орама орналасқан.



7.2 сурет - Ферромагниттік өзек

Тура есеп бойынша Φ магнит ағыны белгілі, ал F – $M\Phi K$ белгісіз болып саналады. $M\Phi K$ -ті анықтау үшін алдымен $B = \Phi/S$ өзектің индукциясын табу қажет. Магниттану қисықтары $B = f(H)$ арқылы өзектің материалына сәйкесті H кернеулік табылады. Индукцияның сызықтары үздіксіз болғандықтан саңылаудың индукциясы өзектің индукциясымен бірдей болып табылады.

Саңылаудағы магнит өрісінің кернеулігі былай есептелінеді $H_0 = B / \mu_0 = B / (4\pi \cdot 10^{-7})$

Ораманың $M\Phi K$ -і

$$F = H \cdot l_{cp} + H_0 \cdot \delta. \quad (7.9)$$

Кері есеп бойынша белгілі $M\Phi K$ арқылы белгісіз Φ магнит ағыны табылады. Мұндай есептер сызықты емес тізбектердің есептеулері сияқты графика-аналитикалық әдістермен жүргізіледі. Алдымен қойылады бірнеше мәндермен Φ ағымын құрып және магниттік тізбегінің сипаттамасы $F = f(\Phi) = H \cdot l_{cp} + H_0 \cdot \delta$. Ойша алынған бірнеше Φ магнит ағындары үшін F сипаттама құрастырылады.

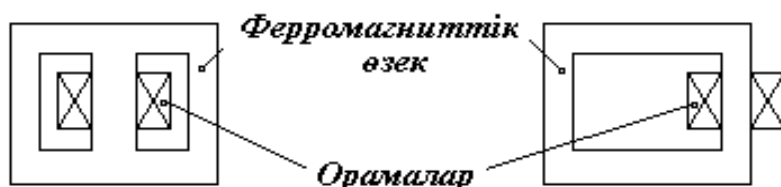
8 Трансформаторлар

8.1 Трансформатордың құрылысы

Бірдей жиіліктегі кернеулердің шамасын түрлендіруге арналған электромагниттік аппарат трансформатор деп аталады. Барлық трансформаторлар тұйықталған ферромагниттік өзек және бірнеше орамалардан тұрады. Кернеу көзіне қосылған орама *бірінші ретті* орама деп аталады, ал қабылдағышқа қосылған орама *екінші ретті* деп аталады.

50 немесе 60 Гц жиіліктерде істейтін трансформаторлардың ферромагниттік өзегі электротехникалық болат табакшалардан жинастырып

жасалады. Трансформатор жұмыс істеп тұрғанда өзек екі себептен қызып, онда энергия шығындалады: өзектің қайталап магниттенетіндігінен және өзекте құйынды токтардан қызуын азайту үшін, оның кедергісін көбейту және ток жүретін аймақты шектеу мақсатында, табақшалар бір-бірінен лакпен оқшауланады. Табақшалар *I, III* – тәрізді немесе тілікше етіп жасалатындықтан, олар бірін-бірі байлап тұрады. Трансформатордың өзегі екі түрге бөлінеді-сауытты(броньді) және стерженьді. 8.1-суретте *III*-тәрізді өзегі сауытты трансформатор, ал 8.2-суретте *II* -тәрізді өзегі стерженьді көрсетілген



8.1 сурет - *III*-тәрізді өзек

8.2 сурет - *II* -тәрізді өзек

8.2 Трансформатордың жүксіз режимі

Трансформатордың жүксіз режимінде бірінші ретті орамалар айнымалы кернеу көзіне жалғанады, ал *екінші ретті* орамалар ашық қалады.

Бірінші ретті ораманың тогы i_{10} өзекті магниттандыратын айнымалы магнит өрісін тудырады. Токтың әсерінде пайда болған магнит ағынын екі ағын ретінде қарастырады: негізгі магнит ағыны Φ және $\Phi_{1\sigma}$ – шашырынды магнит ағыны. Негізгі магнит ағыны Φ трансформатордың өзегінде, ал шашырынды ағын $\Phi_{1\sigma}$ ауа арқылы тұйықталады (8.3 сурет). w_1 және w_2 – трансформатордың орамалары. Синусоидалы магнит ағыны Кіріск және шықпалы орамаларды қиып өтіп электромагниттік индукция заңы бойынша, оларда ЭҚК тудырады.

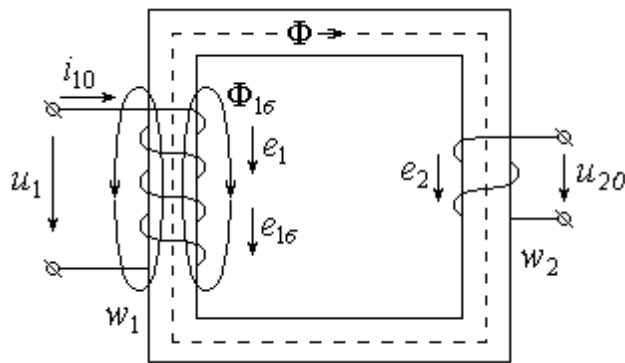
$$e_1 = -w_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}. \quad (8.1)$$

Магнит ағыны синусоидалы болғандықтан, ЭҚК-тің лездік мәні гармоникалық заң бойынша өзгереді:

$$\Phi(t) = \Phi_m \cdot \sin \omega t. \quad (8.2)$$

Бастапқы орамадағы ЭҚК лездік мәндері:

$$e_1 = -w_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t = w_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \sin(\omega t - 90^\circ). \quad (8.3)$$



8.3 сурет - Трансформатор

ЭҚК-тің амплитудалық мәні:

$$E_{1m} = w_1 \cdot \omega \cdot \Phi_m = 2\pi \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_m. \quad (8.4)$$

ЭҚК-тің әрекеттік мәні:

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot B_m \cdot S. \quad (8.5)$$

Сонғы өрнек «4,44 өрнегі» деп аталады. Шықпалы орамада да:

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad E_2 = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot B_m \cdot S. \quad (8.6)$$

Негізгі магнит ағыны тудырған E_1 және E_2 ЭҚК-тер трансформаторлық ЭҚК-тер деп аталады, олар негізгі магнит ағынынан 90° ығысып артта қалады.

Шашырындымагнит ағыны Кіріс орамада шашырынды ЭҚК –ті тудырады

$$e_{1\sigma} = -L_{1\sigma} \cdot \frac{di_{10}}{dt}, \quad (8.7)$$

мұнда $L_{1\sigma}$ – Кіріс ораманың шашырынды индуктивтілігі.

Кирхгофтың екінші заңы бойынша Кіріс орама үшін мынау өрнекті жазуға болады $e_1 + e_{1\sigma} = -u_1 + i_{10} \cdot R_1$, бұдан кіріс кернеу былай табылады

$$u_1 = -e_1 - e_{1\sigma} + i_{10} \cdot R_1 = -e_1 + i_{10} \cdot R_1 + L_{1\sigma} \cdot \frac{di_{10}}{dt}. \quad (8.8)$$

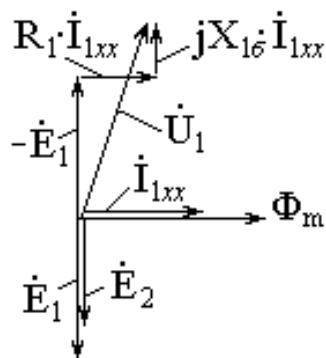
Кіріс ораманың кернеуі үш құрамадан тұрады: резистордағы кернеудің түсуінен ($i_{10}R_1$), трансформаторлық ЭҚК-ті теңестіретін кернеуден ($-e_1$) және

шашырынды кернеуді теңестіргің кернеуден ЭҚК-тен ($-e_{1\sigma}$). (12.8) кернеу кешенді шамалар арқылы мынадай жазылады

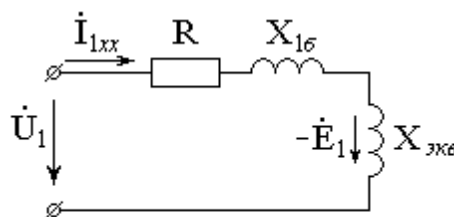
$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \cdot \dot{I}_{10} + j\omega L_{1\sigma} \cdot \dot{I}_{1xx} = -\dot{E}_1 + R_1 \cdot \dot{I}_{10} + jX_{1\sigma} \cdot \dot{I}_{10}, \quad (8.9)$$

мұнда $X_{1\sigma} = \omega \cdot L_{1\sigma}$ – Кіріс ораманың шашырындыиндуктивті кедергісі.

8.4-суретте трансформатордың жүксіз режимін кернеулерінің және токтарының векторлық диаграммасы келтірілген.



8.4 сурет - Трансформатордың жүксіз режимі



8.5 сурет - Трансформатордың орынбасарлық сұлбасы

\dot{E}_1 және \dot{E}_2 трансформаторлық ЭҚК векторлары негізгі Φ_m магнит ағынынан 90° -ке ығысып артта қалады. $R_1 \cdot \dot{I}_{10}$ кернеу векторы \dot{I}_{10} тогына параллель, ал $jX_{1\sigma} \cdot \dot{I}_{10}$ кернеу векторы \dot{I}_{1xx} токтың векторынан 90° -ке озады. Кіріс ораманың қысқыштарының арасындағы \dot{U}_1 кернеу векторы $-\dot{E}_1$, $R_1 \cdot \dot{I}_{1xx}$ және $jX_{1\sigma} \cdot \dot{I}_{1xx}$ векторлардың қосындысына тең болып табылады.

8.5-суретінде (8.8) өрнегіне сәйкесті трансформатордың орынбасарлық сұлбасы көрсетілген. $X_{бал.}$ – магнит ағынын қоздыруға сарпылданған реактивті қуатқа пропорционалды индуктивті кедергі. Бос жүріс режимінде $U_{20} = E_2$ және $U_1 \approx E_1$. K_T бос жүріс тәжірибесінен табылады.

Трансформация коэффициенті:

$$K_T = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}}. \quad (8.10)$$

8.3 Трансформатордың жүктемелі жұмысы

Егер трансформатордың бірінші ретті орамаларын айнымалы кернеу көзіне жалғап, ал екінші ретті орамаларын тұтынушыға қосса, орамалардан I_1 және I_2 токтар өтіп Φ_1 және Φ_2 магнит ағындарын қоздырады. Бұл ағындар бір-біріне қарама-қарсы бағытталған болады, осы себепті жалпы магнит ағыны

кемиді. Жалпы магнит ағыны тудырған E_1 және E_2 ЭҚК-тердің шамалары да азаяды. U_1 кернеудің шамасы өзгермейді. E_1 ЭҚК-тің азаю I_1 токтың көбеюіне алып келеді, сонымен бірге Φ_2 ағынының әсерін жою үшін Φ_1 магнит ағыны асады. Жалпы магнит ағынын шамасын жуықтап қарастырғанда өзгермейтін болады, теңділіктік бұрынғы қалыпына келеді.

Жүктелген трансформаторда, негізгі ағыннан басқа $\Phi_{1\sigma}$ және $\Phi_{2\sigma}$ шашыранды магнит ағындары қоздырылып ауа арқылы шашырап тұйықталады. Шашыранды магнит ағындары рамаларда шашырынды ЭҚК-терді тудырады:

$$\dot{E}_{1\sigma} = -jX_{1\sigma} \cdot \dot{I}_1, \quad \dot{E}_{2\sigma} = -jX_{2\sigma} \cdot \dot{I}_2. \quad (8.11)$$

Бұл жерде $X_{2\sigma}$ – шықпалы ораманың шашырынды индуктивті кедергісі. Кіріс ораманың күйін сипаттайтын теңдеу:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \cdot \dot{I}_1 + jX_{1\sigma} \cdot \dot{I}_1. \quad (8.12)$$

Шықпалы ораманың күйін сипаттайтын теңдеу:

$$\dot{E}_2 = R_2 \cdot \dot{I}_2 + jX_{2\sigma} \cdot \dot{I}_2 + \underline{Z}_n \cdot \dot{I}_2, \quad (8.13)$$

мұнда R_2 – шықпалы ораманың активті кедергісі;

\underline{Z}_n – жүктеменің толық кешенді кедергісі.

Трансформатордың негізгі магнит ағыны бірінші және екінші ретті орамалардың МКК – терінің қосындыларының әсері болып табылады:

$$\Phi_m = f(\dot{I}_1 \cdot w_1 + \dot{I}_2 \cdot w_2). \quad (8.14)$$

E_1 трансформаторлық ЭҚК негізгі магнит ағынына пропорционал болып, шамалап алғанда U_1 кернеуге тең болады. Оның әрекеттік мәні қалыптасқан болады, сондықтан трансформатордың негізгі ағыны қабылдағыштың кедергісіне тәуелді емес, ол кедергі нөлден шексіздікке дейін өзгерсе де, негізгі ағын өзгермейді, яғни $\Phi_m = const$ болса:

$$\dot{I}_1 \cdot w_1 + \dot{I}_2 \cdot w_2 = const = \dot{I}_{10} \cdot w_1. \quad (8.15)$$

(8.15) өрнегі МКК-тердің тепе-теңдігі деп аталады. (8.12), (8.12) және (8.15) теңдеулер трансформатордың негізгі теңдеулері болып саналады. Бірінші ретті ораманың тогы 12.15 теңдіктен анықталады:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} - \dot{I}_2 \cdot \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}_{10} - \dot{I}_2 \cdot \frac{1}{K_T}. \quad (8.16)$$

Кіріс ораманың тогы бос жүріс және магниттендіру токтарынан тұратыны соңғы теңдіктен көрініп тұр. 12.13 теңдеуді оң және сол жақтарын K_T трансформация коэффициентіне көбейтеміз:

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 \cdot K_T &= \dot{E}_1 = K_T \cdot R_2 \cdot \dot{I}_2 + jK_T \cdot X_{2\sigma} \cdot \dot{I}_2 + K_T \cdot \underline{Z}_n \cdot \dot{I}_2 = \\ &= K_T^2 \cdot R_2 \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} + jK_T^2 \cdot X_{2\sigma} \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} + K_T^2 \cdot \underline{Z}_n \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} = \\ &= R_2' \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} + jX_{2\sigma}' \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} + \underline{Z}_n' \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T}, \end{aligned} \quad (8.17)$$

мұнда $R_2' = K_T^2 \cdot R_2$ и $X_{2\sigma}' = K_T^2 \cdot X_{2\sigma}$ – екінші ретті ораманың келтірілген активті және индуктивті кедергілері;

$\underline{Z}_n' = K_T^2 \cdot \underline{Z}_n$ – қабылдағыштың келтірілген кедергісі;

$\dot{U}_2' = K_T \cdot \underline{Z}_n \cdot \dot{I}_2 = K_T \cdot \dot{U}_2$ – қабылдағыштың келтірілген кернеуі.

Магниттендіру токтың шамасы кіші болғандықтан оны қарастырмаса да болады, бұл жағдайда:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} - \dot{I}_2 \cdot \frac{1}{K_T} \approx -\dot{I}_2 \cdot \frac{1}{K_T}. \quad (8.18)$$

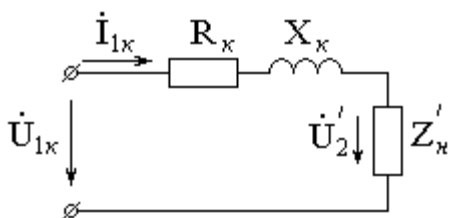
(8.17) өрнекті (8.12) салса:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -R_2' \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} - jX_{2\sigma}' \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} - \underline{Z}_n' \cdot \frac{\dot{I}_2}{K_T} + R_1 \cdot \dot{I}_1 + jX_{1\sigma} \cdot \dot{I}_1 = \\ &= R_2' \dot{I}_1 + jX_{2\sigma}' \dot{I}_1 + \dot{U}_2' + R_1 \dot{I}_1 + jX_{1\sigma} \dot{I}_1 = (R_1 + R_2') \dot{I}_1 + j(X_{1\sigma} + X_{2\sigma}') \dot{I}_1 + \dot{U}_2', \end{aligned} \quad (8.19)$$

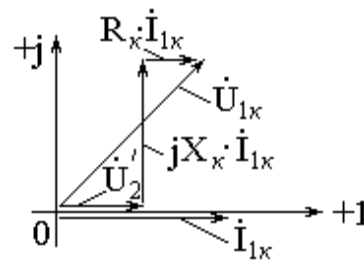
мұнда $R_k = R_1 + R_2' = R_1 + K_T^2 \cdot R_2$ және $X_k = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' = X_{1\sigma} + K_T^2 \cdot X_{2\sigma}$

трансформатордың қысқа тұйықталу активті және индуктивті кедергілері.

(8.19) өрнекке сәйкес келетін ықшамдалған орын басарлық сұлба 8.6-суретте келтірілген.



8.6 сурет - Ықшамдалған орын басарлық сұлба



8.7 сурет - Сәйкесті векторлық диаграммасы

Ықшамдалған орынбасарлық сұлбаның параметрлері *қысқа тұйықталу тәжірибесінен* табылады. Қысқа тұйықталу тәжірибесінде Кіріс ораманың қысқыштарына $I_{1к} = I_{1ном}$ тең болатын төмендетілген кернеуді беріп отырып және шықпалы ораманың қысқыштарын тұтастырып $U_{1к}$, $I_{1к}$, P_k шамалар өлшенеді. Қысқа тұйықталу кедергілер былай анықталады:

$$R_k = P_k / I_{1к}^2, \quad z_k = U_{1к} / I_{1к}, \quad X_k = \sqrt{z_k^2 - R_k^2}, \quad (8.20)$$

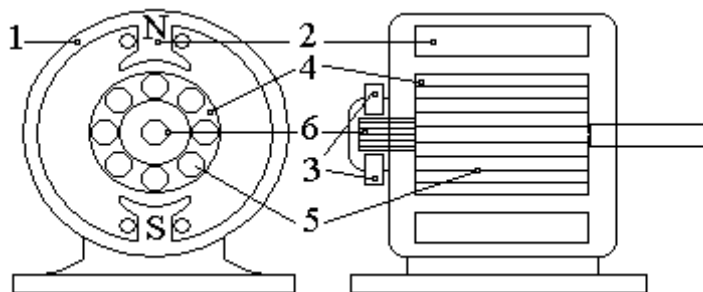
z_k – толық қысқа тұйықталу кедергісінің модулі.

8.7-суретінде ықшамдалған орынбасарлық сұлбасына сәйкесті салынған трансформатордың векторлық диаграммасы бейнеленген. Жүктеме ретінде активті кедергісі R_n резистор алынған, \dot{I}_1 токтың бағыты нақты сандар өсіне бағытталып қарастырылған. $\dot{U}'_2 = \underline{Z}'_n \cdot \dot{I}_1$ кернеудің бағыты токтың векторына бағытталып. $jX_k \cdot \dot{I}_1$ кернеудің векторы токтың бағытына, ал $R_k \cdot \dot{I}_1$ кернеудің векторы \dot{I}_1 тоғына бағытталып, Кіріс \dot{U}_1 кернеудің үш вектордың қосындысына тең болып табылады.

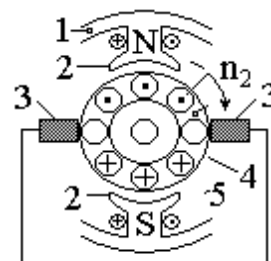
9. Электр машиналары

9.1 Тұрақты ток машиналарының құрылымы

Электрлік энергияны механикалық немесе механикалық энергияны электрлік энергиясына түрлендіретін құрылғылар электр машиналары деп аталады. Электр машиналары тұрақты ток және айнымалы ток машиналарына бөлінеді. Тұрақты ток машиналары мынадай бөліктерден тұрады: полюстік жүйе, якорь, коллектор, электродтық түкшелер, қаптама, вентиляциялатын жабдықтары. Негізінде тұрақты токтың электр машинасы қозғалмайтын (*индуктор*) және айнымалы (*якорь*) бөліктерден тұрады. 9.1-суретте тұрақты ток машинасын қарапайым сұлбасы көрсетілген.



9.1 сурет - Тұрақты ток машинасы



9.2 сурет - Айнымалы бөлігі

Индуктор - негізгі магнит ағынын қоздыратын жүйе (полюстік жүйе) деп саналады. Ол ферромагниттік материалдан (электротехникалық болаттан)

жасалған цилиндр тәрізді қаптамадан, қаптамаға отырғызған негізгі - 2 және қосымша *полюстерден* тұрады. Полюстерге қоздыру орамалары(*ҚО*) орналастырылады. Қоздыру орамаларынан I_k тұрақты ток өтіп полюстерде негізгі магнит ағынын қоздырады. Негізгі магнит ағыны якорь орамаларын қиып болат қаптама бойымен тұйықталады. Негізгі магнит ағынын *тұрақты магниттер* мен де қоздыруға болады. Қоздыру орамаларын (*ҚО*) жалғануына байланысты *магнит өрісін қоздыру* тәсілдері төртеу болып табылады:

тәуелсіз қозба, бұл жағдайда ҚО басқа бір қорек көзіне жалғанады (тұрақты магниттер арқылы өрісті қоздыру тәуелсіз қозба тәсіліне жатады);

параллель қозба – ҚО якорь орамасы мен параллель жалғанады;

бірізді қозба – ҚО якорь орамасы мен тізбектей жалғанады;

аралас қозба, мұнда ҚО-лары екеу болады: біреуі параллель, екіншісі бірізді жалғанады. Параллель ҚО-ның орамдар саны көп болып, ал сымның диаметрі кіші жасалады, бірізді ҚО-ның орамдар саны аз болып, ал сымның диаметрі якорьдің сымына сәйкесті есептеліп үлкен болып жасалады. Қозба орамалары негізгі полюстерге орналасады.

Негізгі полюстердің ортасынан геометриялық бейтарап сызық өтеді, осы сызықтың бойымен қосымша полюстер орналастырылады. Қосымша полюстердің ҚО якорьдің орамаларымен бірізді жалғанады. Қосымша полюстердің магнит ағыны *якорь реакциясын* жояды. Якорьдің магнит өрісінің полюстердің магнит өрісіне әсерді *якорь реакциясы* дейді.

Якорь цилиндр тәрізді ферромагнит өзектен -4 және өзектің сыртқы бетінің бойындағы ойықтарда орналасатын орамалардан -5 тұрады. *Якорьдің* өзегі жұқа бір-бірінен оқшауланған болат парақшалардан жиналады. Орамалардың ұштары коллектор тіліктеріне шығарылып, дәнекерленген.

Коллектор бір-бірінен және біліктен оқшауланған мыс тіліктерінен тұратын цилиндр. Коллекторға мыс графиттен немесе қола графиттен жасалған сырғыма түкше 3 жанасып тұрады. Осы түкше арқылы якорьдің орамалары қорекке немесе қабылдағышқа жалғанады.

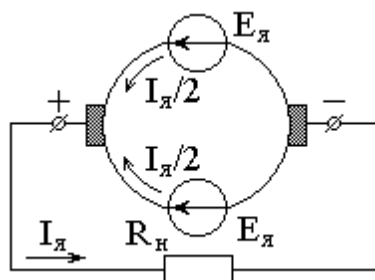
Контакттық түкшелер *геометриялық бейтарап сызық* бойымен орналасады, оларға келетін сымдарда *ЭҚК* қоздырылмайды, оның себебі -бұл сымдар магниттік индукция сызықтарына параллель болып табылады. Магниттік индукция сызықтарына перпендикуляр болып негізгі полюстердің ортасында орналасқан сымдарда максималды *ЭҚК* қоздырылады.

9.2 Тұрақты ток машиналарының жұмыс паркы

9.2-суретте тұрақты ток генераторының сұлбалық бейнесі көрсетілген. Якорь орамаларының сымдарын 5 ашық, изоляциясыз және якорьдің үстінде деп қарастырамыз. Түкшелерді 3 сымдардың үстіне орналастырып отырып *ЭҚК*-тердің бағыттарын мынадай белгілеуге келісеміз: жазықтықтан шығатын *ЭҚК*-тер нүктемен белгілінеді, ал жазықтыққа кіретін *ЭҚК*-тер «+» белгілінеді

Якорь сағат тілімен бағыттас болып бір қозғалтқышпен айналдырылса, якорь орамасында *ЭҚК* пайда болады, оның бағыты *оң қол ережесімен* анықталады. Егер якорьдің орамаларының сымдары бір-бірімен қағидаға

сәйкесті тізбектеп жалғанса, олардың ЭҚК-тері қосылады, сонда якорьдің жалпы ЭҚК-ші нөлге тең болады, орамада токтың шамасы да нөлге тең болады. Түкшелер якорьдің орамасын екі параллель тармаққа бөледі. Тармақтардың ЭҚК-тері бір біріне қарама-қарсы бағыттталып (9.3 сурет), түкшілерге бірдей болып қарастырылады.



9.3 сурет - Якорь

Пайда болатын ЭҚК машинаның конструкциялық параметрлерінен, ораманың айналу жылдамдығынан және полюстің магнит ағынынан тәуелді, яғни

$$E_{я} = C_e \cdot \Phi \cdot n, \quad (9.1)$$

мұндағы C_e – якорьдың орамдарының санына және якорьдың диаметріне тәуелді константа.

Егер якорьдың орамасына $R_я$ кедергілі қабылдағыш жалғанса, параллель тармақтарда бірдей $I_я/2$ ток пайда болады, қабылдағыштан $I_я$ толық ток өтеді.

Генератор режимінде $E_{я}$ ЭҚК мен $I_я$ ток бағыттас болып табылады, ал қозғалтқыш режимінде – $E_{я}$ және $I_я$ қарама-қарсы бағытталады. $I_я$ тогы бар сымдарға негізгі полюстер жағынан қоздырылған магнит өрісінің нәтижесінде күш әсер етеді. Бұл күштің бағыты сол қол ережесі бойынша анықталады. Ол күш машинаның білігінде генератор режимінде тормозды, ал қозғалтқыш режимінде айналдырушы электромагниттік момент тудырады

$$M_{эм} = C_m \cdot \Phi \cdot I_я, \quad (9.2)$$

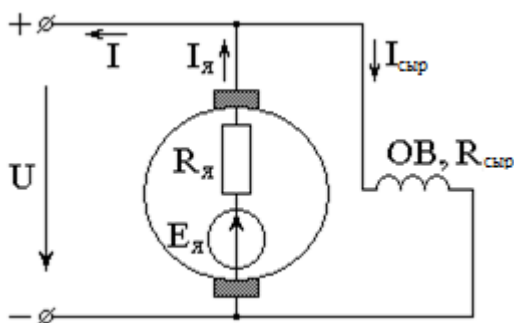
C_m – машинаны конструкциясына тәуелді коэффициент.

Әрбір электрмашинасы генератор немесе қозғалтқыш режимінде жұмыс істеуі мүмкін.

9.3 Тұрақты ток машиналарының генератор режиміне сәйкесті тендеулері

Параллель қозбалы генератордың орынбасарлық сұлбасы 9.4-суретте келтірілген. Параллель қозбалы генератордың екі негізгі сипаттамасы қарастырылады. Бұл бос жүрістік сипаттама және сыртқы сипаттама.

Бос жүрістік сипаттама қабылдағыштың тоғы $I = 0$ және $n = const$ кезінде генератордың электр қозғаушы күшін қозба $I_{сыр}$ токқа тәуелділігін көрсетеді $E_{я} = f(I_{сыр})$, ал сыртқы сипаттама $I_{сыр} = const$ кезіндегі генератор кернеуін $U = f(I)$ қабылдағыштың тогына тәуелділігі.



9.4 сурет - Параллель қозбалы генератордың орынбасарлық сұлбасы

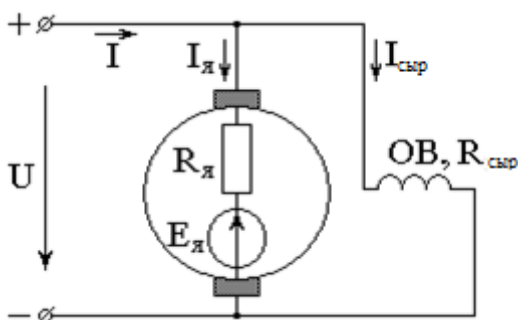
$$\begin{cases} I = I_{я} - I_{сыр} \\ U = E_{я} - R_{я} \cdot I_{я}; \\ U = R_{сыр} \cdot I_{сыр} \end{cases} \quad (9.3)$$

$$E_{я} = C_{сыр} \cdot \Phi \cdot n; \quad (9.4)$$

$$M_{эм\ теж} = C_{м} \cdot \Phi \cdot I_{я}. \quad (9.5)$$

9.4 Тұрақты ток машиналарының қозғалтқыш режиміне сәйкесті теңдеулері

9.5-суретінде параллель қозбалы қозғалтқыштың электр сұлбасы көрсетілген.



9.5 сурет -Параллель қозбалы генератордың орынбасарлық сұлбасы

$$\begin{cases} I = I_{я} - I_{сыр} \\ U = E_{я} - R_{я} \cdot I_{я}; \\ U = R_{сыр} \cdot I_{сыр} \end{cases} \quad (9.6)$$

$$E_{я} = C_{сыр} \cdot \Phi \cdot n; \quad (9.7)$$

$$M_{ЭМ \text{ айн.}} = C_M \cdot \Phi \cdot I_{я}. \quad (9.8)$$

Қозғалтқыштың айналу жиілігі мен айналдырушы моменттің арасындағы тәуелділік негізгі байланыс болып саналады, оны механикалық сипаттама деп $U = const$, $I_e = const$ кезінде алады. Қозғалтқыш кернеу көзіне қосылғанда ($n = 0$), якорьдың орамасында $E_{я} = 0$, орамада жіберу тогы пайда болады. Жіберу токтың шамасын азайту үшін якорь орамасына параллель жіберу реостаты жалғанады.

9.5 Тұрақты ток қозғалтқышының механикалық сипаттамалары. Якорьдың айналу жылдамдығын реттеу

(9.6) теңдеулерден мына өрнектерді жазуға болады:

$$I_{я} = \frac{M}{C_M \cdot \Phi}; \quad E_{я} = U - R_{я} \cdot I_{я}; \quad n = \frac{E_{я}}{C_e \cdot \Phi}; \quad (9.9)$$

$$n = f(M) = \frac{E_{я}}{C_e \cdot \Phi} = \frac{U}{C_e \cdot \Phi} - \frac{R_{я} \cdot I_{я}}{C_e \cdot \Phi} = \frac{U}{C_e \cdot \Phi} - \frac{R_{я} \cdot M}{C_e \cdot C_M \cdot \Phi^2} \quad (9.10)$$

(9.10) теңдеу параллель қозбалы қозғалтқыштың механикалық сипаттамасын белгілейді. Бұл теңдеу түзу сызықтың теңдеуі болып табылады.

Тұрақты ток қозғалтқыштарының айналу жиілігін реттеу тәсілдері осы өрнектен келіп шығады: кернеудің шамасын өзгерту тәсілі, қосымша кедергіні мәнін өзгерту тәсілі және магнит ағынын өзгерту тәсілі. Ең өнімді болып үшінші тәсіл табылады.

- магнит ағынының Φ төмендеуіне байланысты жылдамдықтың номиналдыдан жоғары жоғарылауы. Бұл әдіс шағын айналмалы сәттерде тиімді;

– жылдамдығын өзгерту енгізу есебінен біртіндеп оралатын зәкір қосалқы резистора (ұлғаюы $R_{я}$). Бұл әдіс үлкен айналмалы сәттерде тиімді, қосымша резистордағы ауырсыну күшінің бөлінуіне байланысты тиімділігі төмен;

– кернеуді реттеу U арқылы жылдамдықты өзгерту. Бұл әдіс моменттің өзгеруінің барлық диапазонында тиімді, тиімділігі жоғары, сондықтан тұрақты электр қозғалтқышының жылдамдығын реттеудің ең қолайлы әдісі болып табылады.

9.6 Үш фазалы электр машиналары. Үш фазалы асинхронды қозғалтқыштар. Құрылысы, жұмыс парқы және негізгі сипаттамалары

Айнымалы ток машиналары екі түрге бөлінеді: асинхронды және синхронды. Үш фазалы синхронды генератор үшфазалы ЭҚК-ді тудырады.

Үш фазалы ЭҚК-тер жүйесінің негізгі қасиеті бұл айналмалы электрмагниттік өрісін тудыру. Осы құбылыс үш фазалы қозғалтқыштардың жұмыс парқының негізі болып саналады.

Асинхронды машиналар негізінде қозғалтқыш ретінде қолданылады. Үш фазалы асинхронды машинаның негізгі бөліктері бұл электрлік орамалар орналастырылған статор және ротордың ферромагниттік өзектері. Статордың орамалары бір-бірінен 120° ығысқан үш фазалы орама болып айналмалы магнит өрісін тудырады, өрістің айналу жиілігі мынадай анықталады:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (9.11)$$

мұнда f_1 – үш фазалы кернеудің жиілігі (50 немесе 60 Гц);

p – жұп полюстер саны ($p = 1, 2, 3$ немесе 4).

9.1-кестеде жиілік $f_1 = 50$ Гц болуына сәйкесті және жұп полюстер санына байланысты өрістің айналу жиілігі келтірілген.

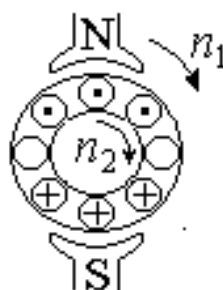
9.1 кесте

p	1	2	3	4
$n_1, \text{айн/мин}$	3000	1500	1000	750

Ротордың орамасы қысқа тұйықталған орамдардан тұрады. Ротордың орамаларына орай асинхронды машиналар қысқа тұйықталған және фазалық роторлы машиналарына бөлінеді.

Тұйықталған ротордың ойықтарында ораманың қызметін екі жағынан сақынамен тұйықталған жасаушылары алюминий шыбықтары болатын цилиндр атқарады.

Фазалық ротордың орамалары жұлдызша сұлбасы бойынша жалғанады, ал ұштары білікке кигізілген түйістік сақиналарға дәнекерленеді. Статордың үш фазалы орамаларын синусоидалы кернеу көзіне қосса, орамалардың тогы айналатын магнит өрісін тудырады. Магнит өрісі n_1 айналу жиілігімен айналып ротордың орамаларында ЭҚК-ті тудырады. Бұл ЭҚК әсерінде ротордың тұйықталған орамаларында ток пайда болып магнит ағынын қоздырады. (9.6 сурет)



9.6 сурет - Ротордың тұйықталған орамы

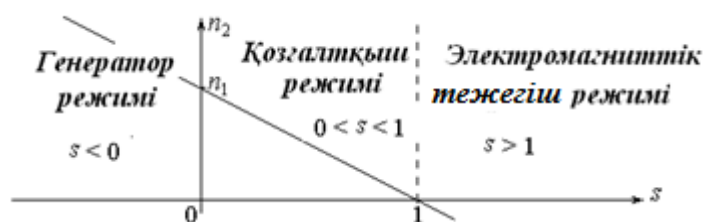
Осы екі магнит ағындарының әсерінде айналдырушы момент пайда болып роторды жылжытады. Нәтижеде ротор n айналу жиілігімен айналады. Ротордың айналу жиілігі n статордың өрісінің айналу жиілігінен кіші болады, сондықтан машина асинхронды деп аталады. Осы екі n_1 және n_2 айналу жиіліктерінің салыстырмалық айырымын *сырғанау* дейді және мына өрнек бойынша есептейді.

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (9.12)$$

Сырғанау нөлге тең болуы мүмкін емес, себебі егер екі айналу жиіліктері бірдей болса роторда токтар пайда болмас еді, сондықтан айналдырушы электрмагниттік момент те пайда болмас еді. Айналдырушы электрмагниттік момент оған қарсы әсер ететін тормозды моментке теңеседі $M_{2эм} = M_2$. Біліктегі жүктемені көбеюі тежеу моментінің көбеюіне алып келеді, нәтижесінде сырғанау өседі. Сырғанаудың асуымен ротордың орамаларында ЭҚК және токтардың мәндері өсе бастайды, сонда айналдырушы момент көбейіп тежеу моментіне теңеседі.

Ротордың айналу жиілігін сырғанауға тәуелділігі $n_2 = (1 - s) \cdot n_1$.

9.2-суретте асинхронды машинаның үш жұмыс режимі үшін келтірілген. Ротор орамаларының тоғын және ЭҚК-шін жиілігі $f_2 = s \cdot f_1$ болып анықталады



9.7 сурет - Асинхронды машинаның үш жұмыс режимі

Асинхронды машинаның *электрмагниттік тормоз* режимі трансформатордың қысқа тұйықталу режимі секілді. Негізгі магнит ағыны статор және ротор орамаларында E_1 және $E_{2к}$ ЭҚК-терді қоздырады:

$$E_1 = 4.44 \cdot \Phi_m \cdot w_1 \cdot k_{айн1} \cdot f_1 \text{ және } E_{2к} = 4.44 \cdot \Phi_m \cdot w_2 \cdot k_{айн2} \cdot f_1 \quad (9.13)$$

мұнда Φ_m – негізгі магнит ағынын максималды мәні;

w_1 және w_2 – статор мен ротордың орамдарының саны;

f_1 – қорек кернеуінің жиілігі;

$k_{айн1}$ және $k_{айн2}$ – статор мен ротордың орамдарының коэффициенттері, олардың шамасы бірден сәл кішірек

Айналмалы ротордың ЭҚК:

$$E_2 = 4.44 \cdot \Phi_m \cdot w_2 \cdot k_{айн2} \cdot f_2 = 4.44 \cdot \Phi_m \cdot w_2 \cdot k_{айн2} \cdot s \cdot f_1 = s \cdot E_{2к}. \quad (9.14)$$

Токтың активті бөлігі I_a айналдырушы электромагниттік моментін тудырады:

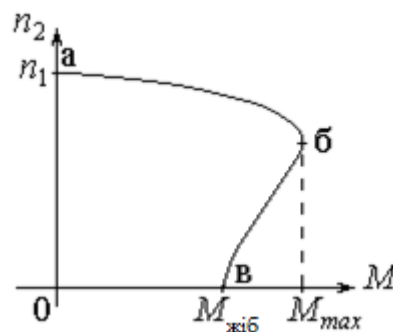
$$M_{эм\ айл.} = C_m \cdot \Phi \cdot I_a. \quad (9.15)$$

Ротордың орамасын индуктивтік кедергісі $x_2 = 2\pi f_2 \cdot L_2$. Жүргізу басында ротордың айналу жиілігі $n_2 = 0$, $s = 1$, сонда $f_2 = s \cdot f_1 = f_1$, болғандықтан токтың активті бөлігі кіші болады. Сол себепті айналдырушы жүргізу моментінің $M_{жіб}$ шамасы да кіші болады. Жіберу кезіндегі айналдырушы моментін көтеру үшін фазалық ротор орамасына кедергісі жоғары реостат жалғанады. Ротордың айналу жиілігі көбеюімен реостаттың кедергісін азайтады, сонымен бірге s , f_2 және x_2 12...50 есе азаяды. Жіберудің аяғында жіберу реостаты тұйықталады.

Магнит ағыны Φ және I_a ток кернеуге тура пропорционал болғандықтан айналдырушы момент кернеудің квадратына тура пропорционал болып табылады. Егер қоректің кернеуі 10% -ке кемісе, айналдырушы момент 19% -ға азаяды ($0,9^2 = 0,81$).

Асинхронды қозғалтқыштың айналу жиілігінің біліктегі моментке тәуілділігі $n_2 = f(M_2)$ механикалық сипаттама деп аталады ($f_1 = \text{const}$). 9.8 суретінде типтік механикалық сипаттама келтірілген.

Механикалық сипаттаманы сырғану арқылы да көрсетуге болады.



9.8 сурет - Типтік механикалық сипаттама

Қозғалтқыштың орнықты жұмыс істейтін режимі сипаттаманы а-б учаскесіне сәйкес келеді. Бұл аралықта жүтеменің шамасы артуымен (айналу жиілігі азаяды) айналдырушы момент M_{max} шамасына жетеді, оған сырғанаудың s_k шамасы сәйкес келеді. б-в аралықта айналдырушы момент азайып барады, қозғалтқыш в нүктеде тоқтап қалады. Механикалық сипаттаманы мынау өрнек арқылы есептеуге болады:

$$M = M_{max} \cdot \frac{2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}, \quad s_{кр} = s_{ном} \cdot (\lambda_{max} + \sqrt{\lambda_{max}^2 - 1}). \quad \text{және} \quad \lambda_{max} = \frac{M_{max}}{M_{ном}} \quad (9.16)$$

Ротордың орамасында пайда болатын электромагниттік қуат:

$$P_{2эм} = M_{2эм} \cdot \omega_2 = \frac{2\pi}{60} \cdot n_2 \cdot M_{2эм} = \frac{n_2}{9,55} \cdot M_{2эм}. \quad (9.17)$$

Асинхронды қозғалтқыштардың құрылысы өте қарапайым, қолдануы жеңіл және сенімді болғандықтан көптен-көп қолданылады. Бірақ асинхронды қозғалтқыштардың мынадай кемшіліктері бар: жіберу моментінің мәні кіші, қозғалтқыштың айналу жиілігін реттеу күрделі.

Айналу жиілігінің бағытын өзгерту реверс деп аталады. Үш фазалы асинхронды қозғалтқыштардың реверсін жасау үшін статордың орамаларына жалғанған желілі сымдардың фазаларын реті ауыстырылады.

9.7 Үш фазалы синхронды қозғалтқыштар мен генераторлар. Құрылысы, жұмыс парқы және негізгі сипаттамалары

Магнит өрісінің айналу жиілігі мен ротордың айналу жиілігі бірдей машиналар синхронды машиналары деп аталады. Синхронды машиналар генератор, қозғалтқыш және қарымталауыш ретінде жұмыс істеуі мүмкін.

Синхронды машиналардың статорының асинхронды машиналардың статорынан айырмашылығы жоқ. *Статордың орамалары* үш фазалы кернеу көзіне жалғанып айналмалы өрісті тудырады. Өрістің айналу жиілігі кернеудің жиілігіне және машинаның жұп полюстер санына байланысты $n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$.

Ротор полюстері көрініп тұратын айқын полюсті немесе полюстері көрінбейтін айқын полюсті емес болуы мүмкін. Айқын полюсті машиналардың жылдамдығы төмен, ал айқын полюсті емес машиналардың жылдамдығы жоғары болып табылады. Ротордың орамасы тұрақты кернеу көзінен қоректендіріледі. Ротордың орамасынан өтетін ток негізгі магнит өрісін қоздырады, сондықтан бұл ток магниттендіру тоғы деп аталады. Негізгі магниттендіру өріс статордың орамаларында E_0 ЭҚК-ті тудырады:

$$E_0 = 4.44 \cdot \Phi \cdot w_1 \cdot k_{\text{айн1}} \cdot f_1 \quad (9.18)$$

Үш фазалы синхронды машинаның электромагниттік қуаты мына өрнектен анықталады:

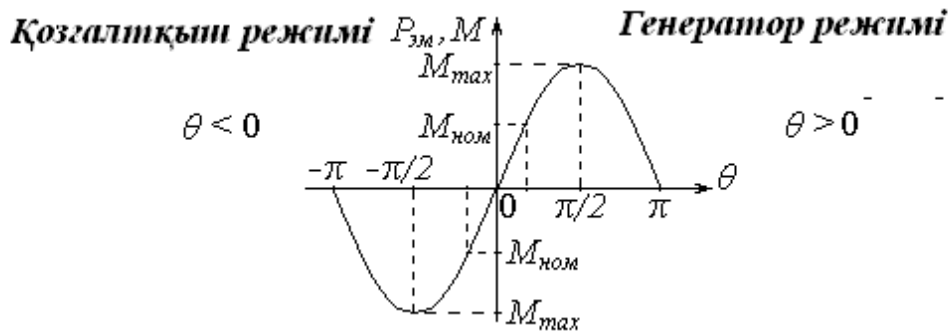
$$P_{\text{эм}} = \frac{3 \cdot U_1 \cdot E_0}{x_c} \cdot \sin \theta, \quad (9.19)$$

мұнда U_1 – фазалы кернеу; x_c – машинаның синхронды индуктивтік кедергісі; θ – ротор қоздырған магнит өрісінің және статор өрісінің остерінің арасындағы ығысу бұрышы.

Үш фазалы синхронды машинаның электромагниттік моменті:

$$M_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega_1} = \frac{3 \cdot U_1 \cdot E_0}{\omega_1 \cdot x_c} \cdot \sin \theta = M_{\text{max}} \cdot \sin \theta. \quad (9.20)$$

$U_1 = const$, $E_0 = const$ кезінде қарастырылған. $P_{эм} = f(\theta)$ немесе $M_{эм} = f(\theta)$ тәуелдіктер бұрыштық сипаттама деп аталады. Бұрыштық сипаттама 9.9-суретте келтірілген.



9.9 сурет - Бұрыштық сипаттама

Қозғалтқыш режимінде θ бұрышы теріс болады. Ротордың орамалары қоздырған магнит өрісінің осі статордың орамалары қоздырған өрістің осінен θ бұрышына ығысып артта қалады. $0 > \theta > -\pi/2$ аралығында θ жүктеме асса (θ -ні шамасы артса) айналдырушы моменттің шамасында асады, сондықтан бұл аралық орнықты жұмыс аралығы деп саналады. Синхронды қозғалтқыштардың роторына әсер ететін электромагниттік момент бір период арасында екі рет бағытын ауыстырады, сол себепті қозғалтқыштардың жіберуші моменті болмайды. Ротор қозғала алмайды. Синхронды қозғалтқышты жүргізу үшін асинхронды жүргізу қолданылады. Ротордың ойықшаларына қосымша қысқа тұйықталған жүргізуші орама орналастырылады. Статордың айналмалы моменті қосымша жүргізуші қысқа тұйықталған орамада қума токтарды тудырады. Бұл токтар мен статордың электромагниттік өрісінің әсерлесуі нәтижесінде асинхронды электромагниттік айналдырушы момент пайда болып роторды жүргізеді.

Ротордың айналу жиілігі статордың өрісінің айналу жиілігіне жақындағанда ротор синхронизмге кіріп n_1 жиілігімен айналады. Қосымша жүргізуші қысқа тұйықталған ораманың ЭҚК-ші және тоғы нөлге теңеседі.

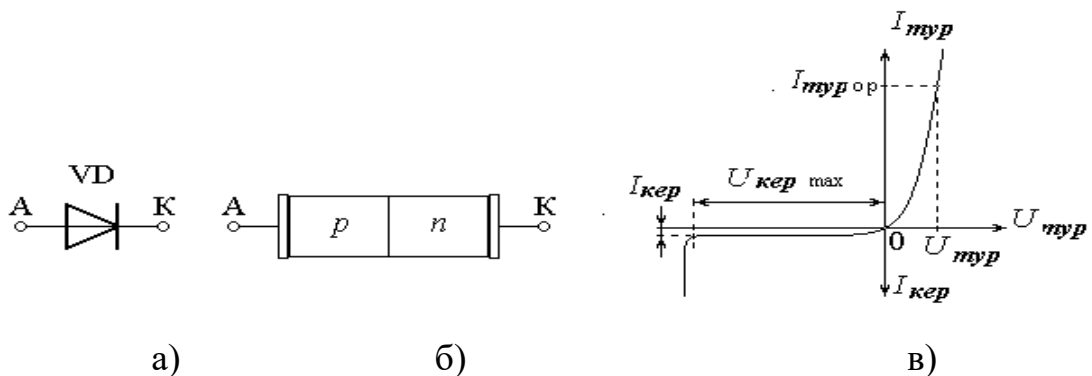
Генератор режимінде жүктеме бұрышы θ оң болады, яғни ротордың орамалары қоздырған магнит өрісінің осі статордың орамалары қоздырған өрістің осінен θ бұрышына ығысып озады. Орнықты жұмыс аралығы $0 < \theta < \pi/2$ болып табылады. Бұл аралықта жүктемені көбеюі электромагниттік қуаттың көбеюіне алып келеді. $\pi/2 < \theta < \pi$ аралығында θ бұрыштың көбеюі электромагниттік қуаттың азаюына алып келеді. Бұл аралық орнықты емес жұмыс аралығы деп аталады. Орнықты емес жұмыс аралығы авариялық режим болып саналады.

10 Электрондық құрылғылар. Аналогты және цифрлық электроника

10.1 Шала өткізгіш диодтар, стабилитрондар, тиристорлер

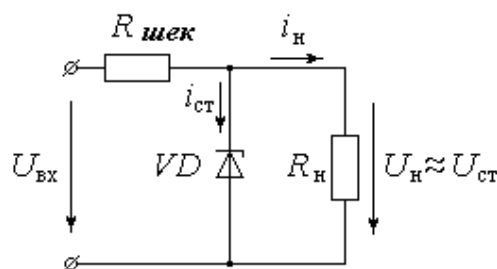
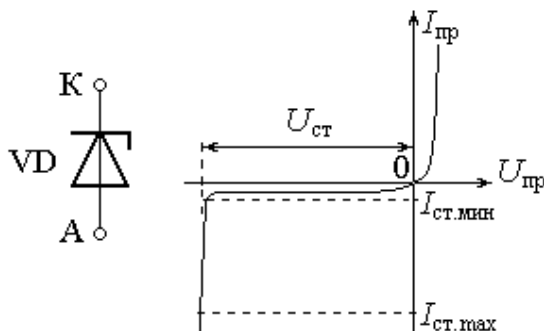
Бір p - n өтпесінен тұратын және екі шықпасы бар аспап шала өткізгішті диод деп аталады. p - n өтпенің негізгі қасиеті бұл токты бір бағытта өткізу. Жұмыс істеу тәртібіне және атқаратын міндетіне қарай диодтар түзеткіштік диод, стабилитрон, варикап, фотодиод, тиристор т.б. түрлерге бөлінеді. Түзеткіштік диодтар айнымалы токты түзетуге арналған болып табылады. Токтың түріне және жиілігіне байланысты түзеткіштік диодтар төмен жиіліктік ($f = 0,010 \dots 100 \text{ кГц}$), жоғары жиіліктік ($100 \dots 100000 \text{ кГц}$) және импульстік, ерекше болып қарастырылады. Ерекше диодтар деп *стабилитрон* және *тиристорлар* аталады. Түзеткіштік диодтардың p - n өтпесінің ауданы үлкен (*жазықтық*) немесе кіші (*нүктелік*) болуы мүмкін. Жазықтық диодтар жиіліктері кіші мәндері жоғары токтарды түзетуге арналған, ал нүктелік диодтар жиіліктері жоғары, мәндері кіші токтарды түзетуге арналған. 10.1-суретте диодтың: а) – шартты белгісі; б) – структуралық сұлбасы және в) – вольтамперлық сипаттамасы келтірілген. p -типті шала өткізгіштікке жалғанған электрод (А) *анод* деп аталады, ал n -типті шала өткізгіштікке жалғанған электрод, – *катод* (К) деп аталады. Диод токты анодтан катодқа қарай өткізеді.

Түзеткіштік диодтар рұқсат етілген тура $I_{тур}$, $U_{тур}$ және кері $I_{кер}$, $U_{кер}$ шамалармен сипатталады.



10.1 сурет - Диодтың : а) – шартты белгісі; б) – структуралық сұлбасы және в) – вольтамперлық сипаттамасы

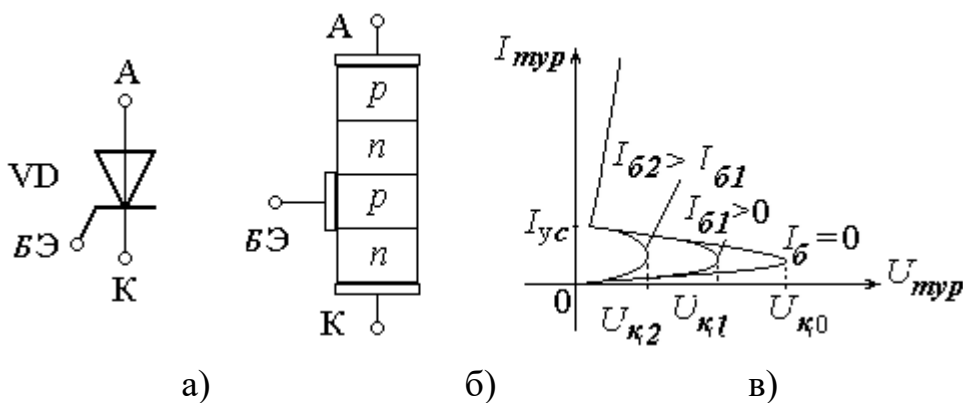
Стабилитрон – кернеуді тұрақтандыру үшін қолданылады. Бұл диодтарда бір $U_{ст}$ кернеу мәні кезінде электрлік тесу көшкіндік тесу p - n өтпеде бүлдірмейтін құбылысы пайданылады. Ток $I_{ст.мин}$ ден $I_{ст.маx}$ дейін өзгерсе да кернеу өзгермейді. Стабилитрон тоғының шамасын шектеу үшін оған тізбектеп кедергісі $R_{шек}$ резистор жалғанады. Стабилитрон тура бағытта қосылса ол диод сияқты істейді. 10.2-суретте стабилитрондың шартты белгісі және вольт-амперлық сипаттамасы келтірілген. 10.3-суретте қарапайым стабилизатордың сұлбасы көрсетілген. Стабилитрондарды $U_{ст}$ кернеуі және $I_{ст}$ тогы бойынша таңдайды. $R_{шек}$ кедергіні анықтауда кернеудің өзгеруі токты $I_{ст.мин}$ дейін $I_{ст.маx}$ өзгеруі шектеріне сәйкес келетін шарт бойынша есептейді.



10.2 сурет - Стабилитрон

10.3 сурет - Қарапайым стабилизатор

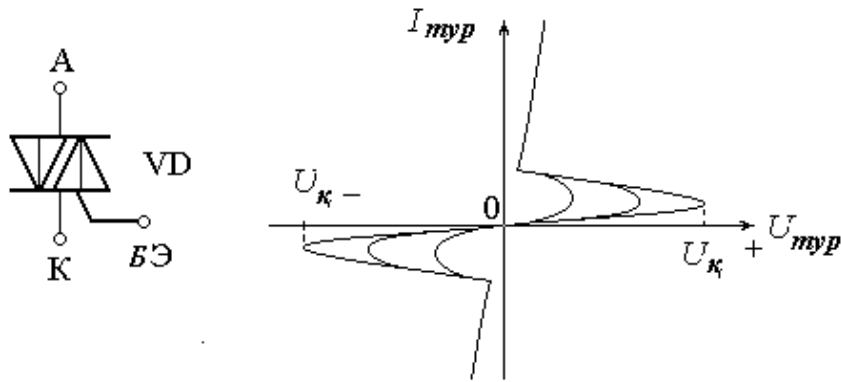
Тиристор – бұл басқарылатын диод, анодтан катодқа бағытталған $U_{тур}$ тура кернеу және $I_б$ басқарушы токтың импульсі әсерінде диод ашық күйіне өтеді. Тиристор өткізгіштігі әртүрлі төрт қабатты шала өткізгіштіктерден және үш *анод* (А), *катод* (К), *басқарушы электрод* (УЭ) электродтардан құрастырылады. Тиристордың шартты белгісі, құрамасы және вольт-амперлық сипаттамасы 10.4-суретте келтірілген. Тиристордың негізгі параметрлері: рұқсат етілген кері кернеу $U_{кері.макс}$; тура кернеу $U_{тур}$; рұқсат етілген тура орташа ток $I_{тур ор}$; тиристорды қосу уақыты $t_{қосу}$ және ажырату уақыты $t_{ажыр}$; тиристорды ашық күйінде ұстау тогы I_{yc} .



10.4 сурет -Тиристор

Симметриялы тиристор – бұл *симистор*. Симистордың шартты белгісі мен вольт-амперлық сипаттамасы 10.5-суретте келтірілген.

Симисторлар токты екі бағытта – тура және кері бағыттарда өткізе алады.



10.5 сурет - Симистор

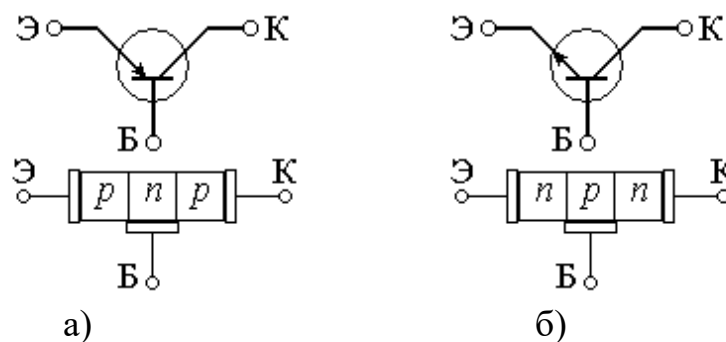
Тиристорлар және симисторлар кернеулерді реттейтін және күшті түрлендіретін жабдықтарда қолданады.

10.2 Транзисторлар

Транзисторлар – басқарылатын резисторлардың рөлін атқаратын аспаптар. Бұл аспаптар қуатты күшейтуге арналған. Қос *n-p* өтпелігі бар транзисторлар биполярлық деп аталады.

Биполярлық транзисторлар *n-p* (10.6 а сурет) және *n-p-n* (10.6 б сурет) өтпелікті транзисторларға бөлінеді.

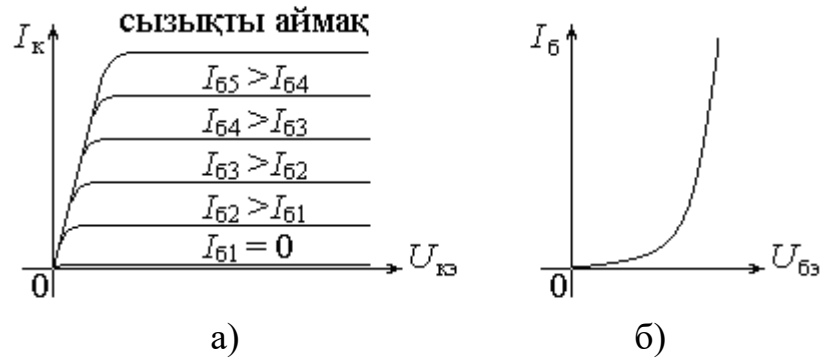
Биполярлық транзисторлардың жұмысы заряд тасушылардың қос таңбасын пайдалануға негізделген. Биполярлық транзистордың ортаңғы аймағы база деп, ал, бір шеткі аймағы – эмиттер (Э), басқасы коллектор (К) деп аталады. База, эмиттер және коллектордан шықпалы қысқыштар шығарылады. Негізгі ток эмиттер және коллекторарқылы өтеді. База тогы басқарушы ток болып саналады, ол токтың мәні негізгі токтан кіші болады.



10.6 сурет - Биполярлық транзисторлар

10.7 а және 10.7 б-суреттерде биполярлық транзистордың Кіріс $I_o = f(U_{oэ})$ және шықпалы $I_k = f(U_{кэ})$ сипаттамалары келтірілген. Транзисторлар кілт (ашық – жабық) немесе сызықтық режимдерінде жұмыс істейді.

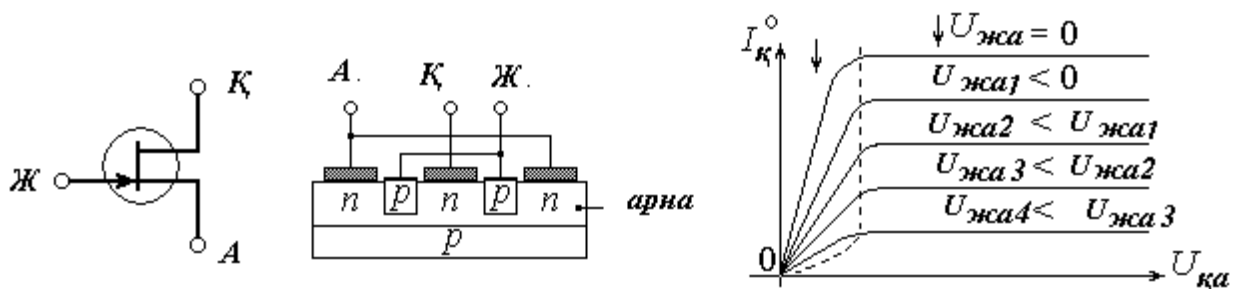
Өрістік транзистор деп арнадағы тогы жаптырық пен құйылмаға берілген кернеудің электр өрісі арқылы басқарылатын шала өткізгішті аспапты айтады. Өрістік транзистордың ерекшелігі: канал тогы тек бір зарядтың таңбасына байланысты (оң таңба $-p$ -каналда және теріс таңба n -каналында), токтың басқаруы электр өріспен жасалады. Кедергісі жаптырықтың потенциалына байланысты өзгеріп отыратын аймақты арна деп атайды, арнадан негізгі электр тасымалдаушыларды әкетіп отыратын электрод ағызба (А) деп аталады.



10.7 сурет - Биполярлық транзистордың кіріс және шығыс сипаттамалары

Арнаға негізгі заряд тасымалдаушы беретін электрод құйылма (К) деп аталады, арнаның электр өткізгіш қимасын реттеуге арналған электрод жаптырық (Ж) деп аталады. Жаптырық пен құйылмаға берілетін кернеу $p-n$ өтпесіне кері бағытта болуы керек. Бұлайша жалғау арна мен жаптырық арасындағы екі өтпенің кедергісін, кернеуді реттей отырып, өзгертуге мүмкіндік береді. Жаптырықтың түріне қарай өрістік транзисторлар екі топқа бөлінеді: басқарушы $p-n$ өтпелі және изоляцияланған жаптырықтық.

10.8-суретте басқарушы $p-n$ өтпелі өрістік транзистордың құрылысы, шартты белгісі және шықпалы сипаттамалары $I_c = f(U_{cu})$ келтірілген



10.8 сурет - Өрістік транзистордың құрылысы, шартты белгісі және шығыс сипаттамалары

10.3 Бір фазалы және үш фазалы түзеткіштер

Дәрістің мақсаты: бір фазалы және үш фазалы түзеткіштердің сұлбаларымен және сыйымдылықтық сүзгіштермен танысу

Әдетте электр тораптарымен айнымалы ток таратылады, ал электроника құрылғыларында энергия көзі ретінде тұрақты ток қолданылады. Тұрақты ток немесе кернеу қоректерінің құрамасына бір фазалы және үш фазалы түзеткіштер кіреді. Түзеткіштер айнымалы токты (кернеуді) тұрақты токқа (кернеуге), тек бір бағытта солықтайтын шамаларға түрлендіреді. Кернеудің солықтауын азайту үшін түзеткіштің қысқыштарына параллель, сүзгі ретінде, конденсатор жалғанады, ал токтың солықтауын азайту үшін түзеткіштің қысқыштарына бірізді шарғы жалғанады. Бұл элементтер *жатықтайтын сүзгі* деп аталады. Егер жатықтайтын *сүзгі* ретінде конденсатор алынса, оның сиймдылығын мынау өрнекке сәйкесті табуға болады:

$$C_{\phi} = \frac{1}{2 \cdot R_n \cdot f_{\text{нег.гарм}} \cdot K_c}, \quad (10.1)$$

мұнда $f_{\text{нег.гарм}}$, K_c және R_n – негізгі гармониканың жиілігі, кернеудің солықтау коэффициенті, қабылдағыштың кедергісі.

10.3.1 Бір фазалы жарты периодты түзеткіш

Бір фазалы жарты периодты түзеткіш жүктемемен бірізді жалғанған бір диодтан тұрады (10.9-сурет). Түзеткішке берілген u айнымалы синусоидалы кернеудің оң жарты периодында VD диод ашық болып (кедергісі төмен) тізбектен i_n ток өтіп кедергісі R_n қабылдағыштың қысқыштарында u_n кернеуді тудырады.

Кернеудің теріс жарты периодында VD диод жабық болады (кедергісі жоғары), тізбектен ток өтпейді, кедергісі R_n қабылдағыштың қысқыштарында u_n нөлге тең болады, әрі қарай үрдіс қайталанып отырады.

Бір фазалы жарты периодты түзеткіштің негізгі параметрлері:
түзетілген кернеудің тұрақты құрамасы және токтың шамасы:

$$U_n = U_{n.c.p} = \frac{1}{T} \int_0^T u_n dt = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_m \sin \omega t \cdot dt = \frac{U_m}{\pi} \quad \text{және} \quad I_n = I_{n.c.p} = \frac{I_{nm}}{\pi} = \frac{U_m}{\pi \cdot R_n}; \quad (10.2)$$

$$\text{қабылдағыштың қуаты:} \quad P_n = U_n \cdot I_n = U_{n.c.p} \cdot I_{n.c.p}; \quad (10.3)$$

түзетілген кернеудің негізгі гармоникасының амплитудасы:

$$U_{n\sim} = \frac{2}{T} \int_0^T u_n(t) \sin \omega t dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_m \sin \omega t \cdot \sin \omega t dt = \frac{2U_m}{2T} \int_0^{\frac{T}{2}} (1 - \cos 2\omega t) dt = \frac{U_m}{2}; \quad (10.4)$$

солықтау коэффициенті;

$$K_n = \frac{U_{н\sim}}{U_{н.ср}} = \frac{U_{н\sim}}{U_n} = \frac{U_m \cdot \pi}{2 \cdot U_m} = \frac{\pi}{2} = 1,57; \quad (10.5)$$

трансформатордың (U_1, I_1) Кіріс және (U_2, I_2) шықпалы қысқыштарының кернеулерін әрекеттік мәндері, $P_{тр}$ трансформатордың есептелген қуаты; түзетілген кернеудің негізгі гармоникасын $f_{нег.гарм}$ жиілігі қоректің кернеуін f_1 жиілігіне тең.

Диодтың негізгі параметрлері:
- максималды кері кернеуі:

$$U_{\square кер.ор.мах} = U_m = \pi \cdot U_n = 3,14 \cdot U_n; \quad (10.6)$$

диодтың тура орта ток $I_{д.тұр.ор} = I_{н.ор}$.

Бір фазалы екі жарты толқындық түзеткіштің көпір сұлбасы және оның жұмысын түсіндіретін уақыт диаграммалары 10.10-суретте көрсетілген.

Айнымалы u кернеудің оң жарты периодында VD_1 және VD_3 диодтар ашық болады (VD_2 және VD_4 жабық), ал теріс жарты периодында керісінше- VD_2 және VD_4 ашық, VD_1 және VD_3 жабық болады. Нәтижеде i_n жүктеме тогы бір бағытта болып (оңнан солға бағыттталып) R_n кедергілі жүктемеде u_n кернеуді тудырады.

Түзеткіштің негізгі параметрлері:

түзетілген кернеу мен жүктеме тогының тұрақты компоненттері жарты толқындық түзетумен салыстырғанда екі есе өсті:

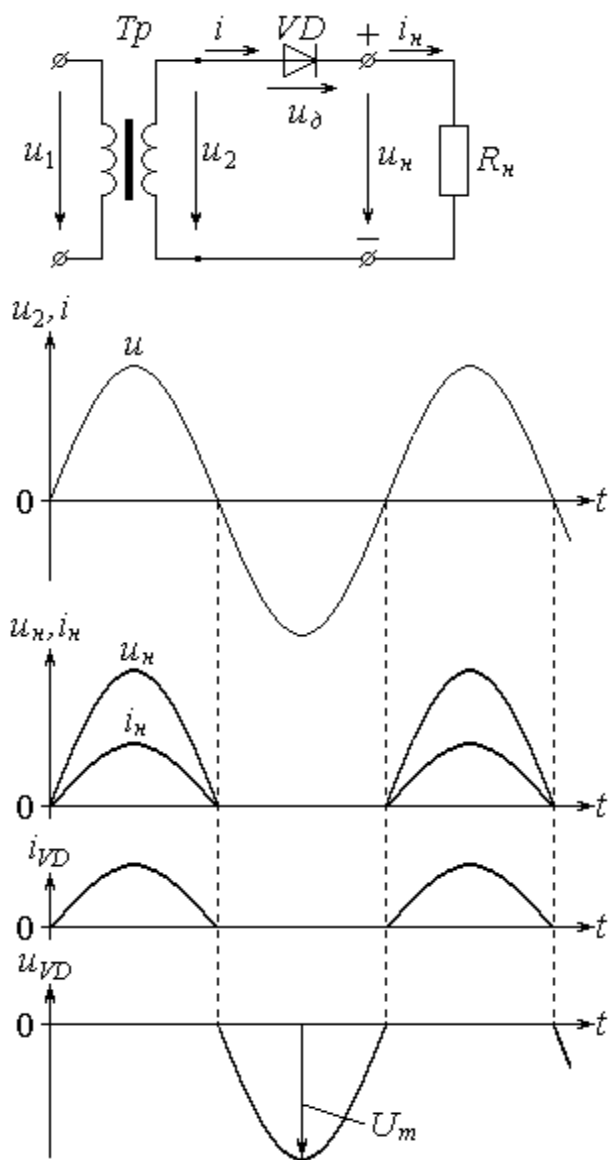
$$U_n = U_{н.ср} = 2 \cdot \frac{U_m}{\pi} \quad \text{және} \quad I_{н.ср} = 2 \cdot \frac{I_{нм}}{\pi} = 2 \cdot \frac{U_m}{\pi \cdot R_n}; \quad (10.7)$$

түзетілген кернеудің негізгі гармоникасының жиілігін солықтауы $f_{нег.гарм}$ қорек кернеуінің жиілігінен екі есе артық болады $f_{нег.гарм} = 2 f_1$;
түзетілген кернеудің негізгі гармоникасының амплитудасы:

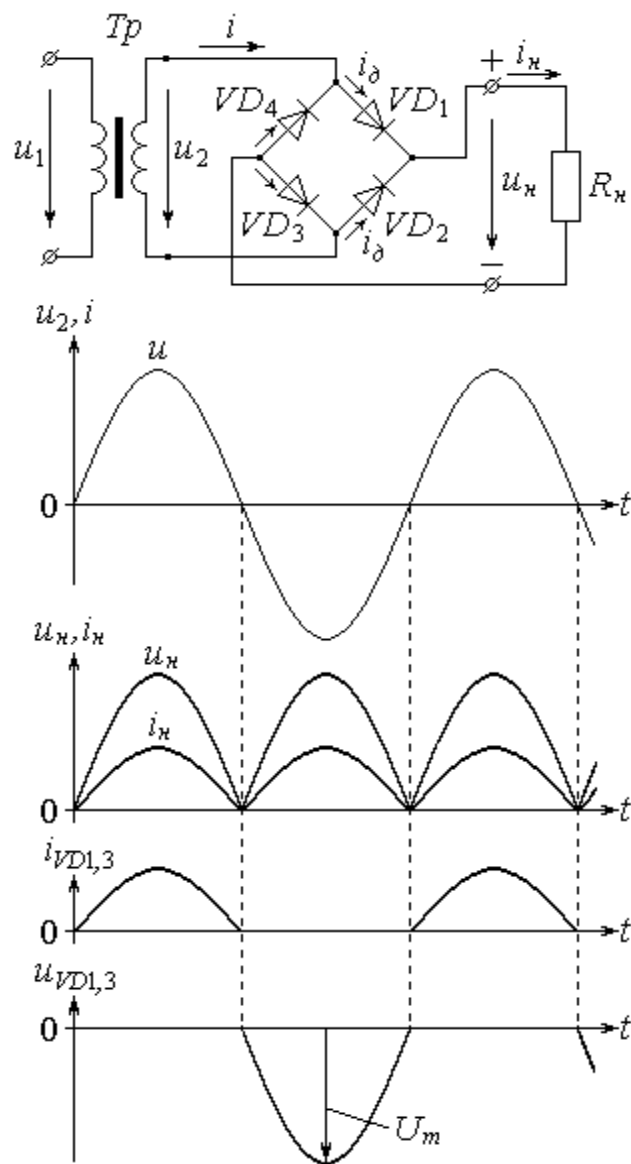
$$U_{н\sim} = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} u_n(t) \cdot \cos 2\omega t \cdot dt = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_m \sin \omega t \cdot \cos 2\omega t \cdot dt = -\frac{4U_m}{3\pi}; \quad (10.8)$$

пульсация коэффициенті:

$$K_n = \frac{U_{н\sim}}{U_{н.ср}} = \frac{U_{н\sim}}{U_n} = \frac{4 \cdot U_m \cdot \pi}{3 \cdot \pi \cdot 2 \cdot U_m} = \frac{2}{3} = 0,67. \quad (10.9)$$



10.9 сурет - Бір фазалы жарты жарты толқындық түзеткіш



10.10 сурет - Бір фазалы екі периодты түзеткіш

Диодтардың негізгі параметрлері:
максимал кері кернеуі:

$$U_{кер.макс} = U_m = \frac{\pi \cdot U_n}{2} = 1,57 \cdot U_n ; \quad (10.10)$$

диодтың тура орташа тогы $I_{д.тур.ор} = 0,5I_{н.ор}$.

10.3.2 Жартылай өткізгіш диодтардағы үш фазалы түзеткіштер

10.11-суретінде үш фазалы жарты периодты түзеткіштің орынбасарлық сұлбасы және уақыттық диаграммалары келтірілген. Диодтар үш фазалы трансформатордың жұлдызша сұлбасы бойынша жалғанған екінші ретті орамаларына жалғанған. Токты анодында оң бағытты кернеуі жоғары диод өткізеді. Түзетілген кернеудің негізгі гармоникасының жиілігін солықтауы

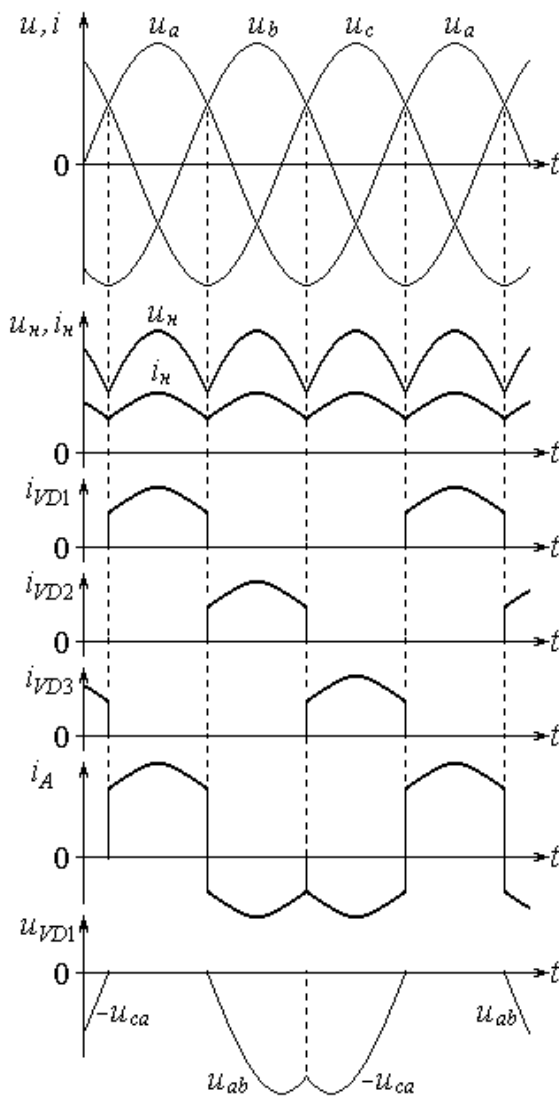
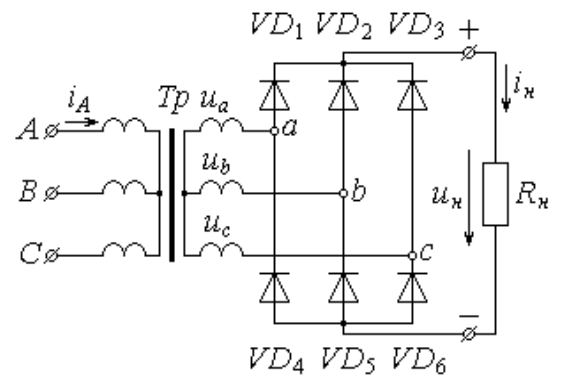
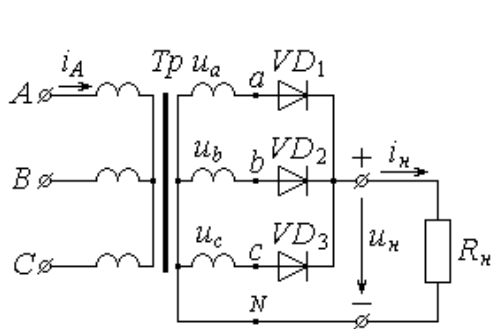
$f_{нег.гарм}$ қорек кернеуінің жиілігінен үш есе артық болады $f_{нег.гарм} = 3 f_1$. Солықтау коэффициенті $K_n = 0,25$ бір фазалы түзеткіштердің солықтауынан аса кіші болғандығы сүзгінің C_ϕ сыйымдылығын төмендетуге мүмкіндік тудырады. Трансформатордың екінші ретті ораманың тогын тұрақты құрамасы ферромагнитті өзекті магниттендіруі бір және үш фазалы жарты периодты түзеткіштердің негізгі кемшілігі болып саналады.

10.12-суретте үш фазалы екі жарты периодты түзеткіштің көпір (Ларионов сұлбасы) орынбасарлық сұлбасы және уақыттық диаграммалары келтірілген. Уақыттың әрбір кезінде токты алты диодтан анодында оң бағытты кернеуі жоғары, ал катодында теріс кернеуі жоғары екі диод өткізеді. Түзетілген кернеудің негізгі гармоникасының жиілігін солықтауы $f_{нег.гарм}$ қорек кернеуінің жиілігінен алты есе артық болады $f_{нег.гарм} = 6 f_1$. Өшу коэффициенті ең төменгі $K_n = 0,057$.

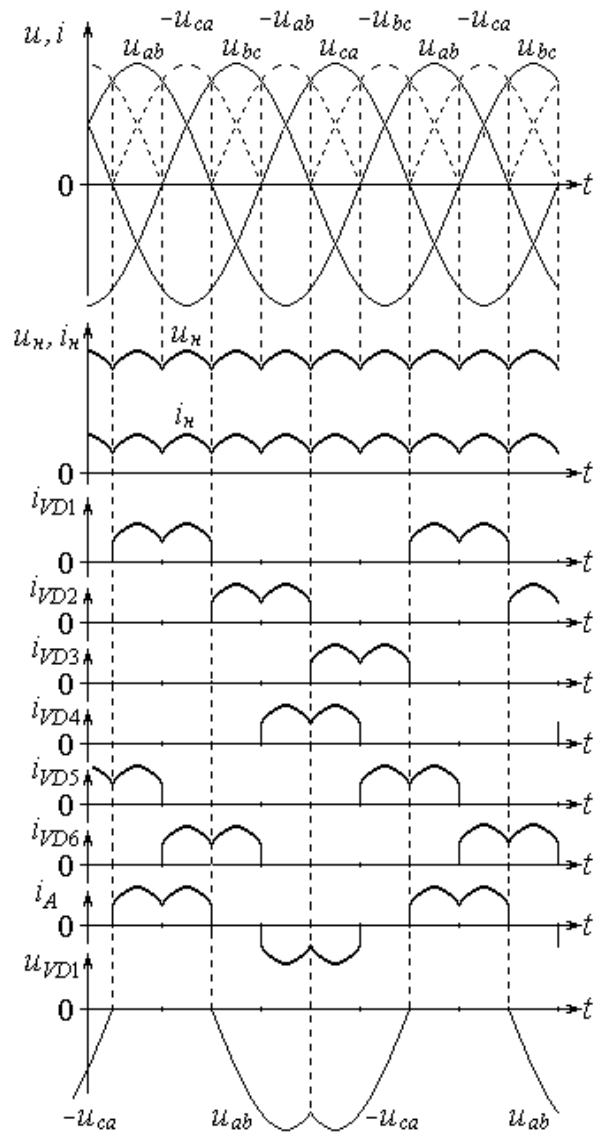
Қарастырып отырған түзеткіштердің негізгі параметрлері 10.1-кестесінде келтірілген, мұнда n – трансформатордың трансформациялау коэффициенті.

10.1 кесте - Түзеткіштердің негізгі параметрлері

Түзеткіштің параметрлері	Түзеткіштің түрі			
	Бір фаз. жарты периодты	Бір фазалы көпір сұлбасы	Үш фазалы бейтарап сымды	Үш фазалы Көпір сұлбасы
Екінші ретті ораманың кернеуін әрекеттік мәні $U_{2\phi}$	2,2 $2U_H$	1,11 U_H	0,85 $5U_H$	0,43 U_H
Екінші ретті ораманың тогын әрекеттік мәні I_2	1,5 $7I_H$	1,11 I_H	0,58 I_H	0,82 I_H
Бірінші ретті ораманың тогын әрекеттік мәні I_1	1,5 $7I_H/n$	1,11 I_H/n	0,48 I_H/n	0,82 I_H/n
Трансформатордың есептелген қуаты $P_{тр}$	3,4 $8P_H$	1,23 P_H	1,35 P_H	1,04 $5P_H$
Диодтегі максимал кері кернеу $U_{обр.мах}$	3,1 $4U_H$	1,57 U_H	2,1 U_H	1,05 U_H
Диодтың тура орташа тогы $I_{мур.ор}$	I_H	$0,5I_H$	0,33 I_H	0,33 I_H
Диод тогын әрекеттік мәні I_δ	1,5 $7I_H$	0,78 $5I_H$	0,58 $7I_H$	0,58 I_H
Диод тогын амплитуд. мәні $I_{\delta.мах}$	3,1 $4I_H$	1,57 I_H	1,21 I_H	1,05 I_H
Негізгі гармониканың жиілігін солықтауы	f_1	$2f_1$	$3f_1$	$6f_1$
Түзету коэффициенті	1,5 7	0,67	0,25	0,05 7



10.11 сурет - Үш фазалы жарты екіпериодты түзеткіш



10.12 сурет - Үш фазалы жарты периодты түзеткіш

10.4 Импульстік кернеу тұрақтандырғыштары

Дәрістің мақсаты: импульстік кернеу тұрақтандырғыштарын құру принциптерімен және ендік-импульстік модуляциямен танысу.

Қазіргі уақытта импульсті немесе негізгі қуат көздері олардың негізгі артықшылықтарына байланысты кеңінен қолданылады: жоғары ПӘК, шағын өлшемдер мен масса, жоғары нақты қуат. Қуат көздері бұл қасиеттерді жоғары жиілікті және электр транзисторларының негізгі жұмыс режимін қолдану арқылы алды. Негізгі режимде транзистордың жұмыс нүктесі көбінесе қанықтыру аймағында немесе кесу аймағында болады. Қанықтыру аймағында U_T транзисторындағы кернеу нөлге жақын, ал кесу аймағында I_T транзисторындағы ток нөлге тең, сондықтан $P_T = U_T I_T$ транзисторындағы шығындар өте аз. Негізгі транзисторлардағы аз шығындар салқындатқыш радиаторларды азайтуға немесе толығымен алып тастауға ықпал етеді

Қуат көзінің массалық өлшемдерінің жақсаруы жоғары жиілікті, демек, жоғары жиілікті трансформаторлар мен дроссельдердің (катушканын индуктивтілігі) қолданылуына байланысты, олардың өлшемдері мен салмағы төмен жиілікті трансформаторлар мен дроссельдерге қарағанда әлдеқайда аз.

Коммутациялық қуат көздерінің кемшіліктері: тізбектің күрделілігі, жоғары жиілікті шу мен кедергілерді құру, шығыс кернеуінің жоғарылауы, жұмыс режиміне ұзақ уақыт.

10.4.1 Импульсті электрмен қоректендіру көздерінің құрылымдық сұлбасы

Импульстік қуат көздерінің жалпыланған құрылымдық сұлбасы 10.13-суретте көрсетілген. Оған төрт негізгі блок кіреді:

- сыйымдылығы бар сүзгісі бар желілік түзеткіш;
- желі кернеуінің жоғары жиілікті инверторы;
- жоғары жиілікті инверторды басқару сұлбасы;
- жоғары жиілікті шығыс түзеткіші.

Жоғары жиілікті инвертор мен басқару тізбегі бірге импульстік түрлендіргішті құрайды.

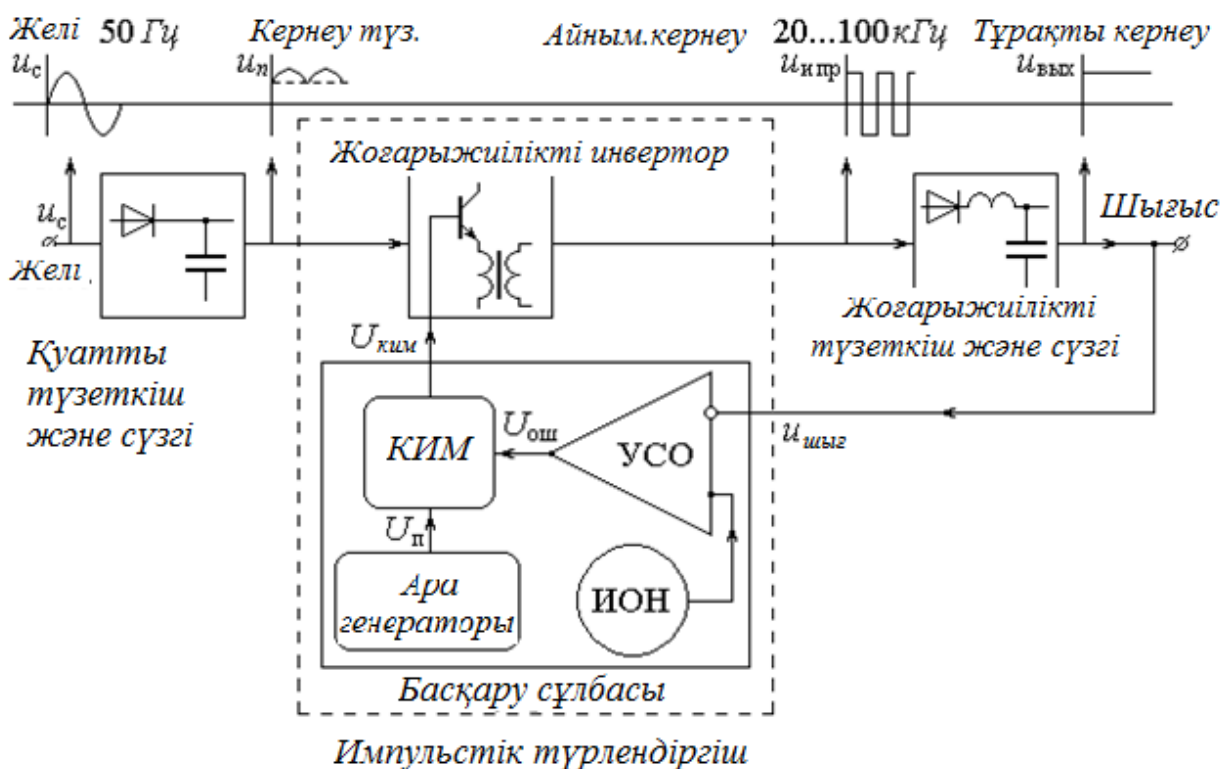
Желінің синусоидальды кернеуі (50 немесе 60 Гц) желілік түзеткішпен түзетіліп, үлкен сыйымдылығы бар сүзгі конденсаторын зарядтайды.

Түзетілген және тегістелген кернеу импульстік түрлендіргіштің кірісіне түседі, ол оны 20...100 кГц жиілігі бар тікбұрышты пішінді жоғары жиілікті импульстарға айналдырады. Түрлендіру жиілігінің жоғарылауымен нақты қуат артады, бірақ сонымен бірге түрлендіргіш элементтеріндегі шығындар да артады, бұл оның тиімділігінің төмендеуіне әкеледі. Жоғары жиілікті кернеу жоғары жиілікті трансформаторда немесе инвертордың автотрансформаторында қажетті деңгейге ауысады.

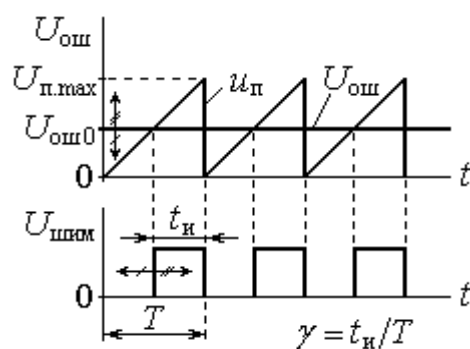
Бұл кернеу жоғары жиілікті түзеткішке және филт-р-ге түседі.

Шығу кернеуін реттеу негізгі транзистордың базасына берілетін және оны ашық күйге аударатын басқару импульстарының ендік-импульстік модуляциясы (ЕИМ) көмегімен қамтамасыз етіледі. Импульстік ендік реттеу басқару

тізбегінде жүзеге асырылады, оның кірісіне оның шамасын бақылау үшін қуат көзінің шығуынан кернеу беріледі. Ендік модуляцияланған импульстарды алу әдісі 10.3-суретте көрсетілген. Ендік импульсті модуляцияның тереңдігі толтыру коэффициентімен сипатталады мысалы $\gamma = t_n/T$, мұндағы t_n - басқару импульсінің ұзақтығы, ал $T = 1/f$ – қайталау кезеңі. Егер импульстің ұзақтығы кезеңнің жартысы болса, онда $\gamma = 0,5$, яғни 50%.



10.13 сурет - Импульстік қуат көздерінің жалпыланған құрылымдық сұлбасы



10.14 сурет – Ендік модуляцияланған импульстарды алу әдісі

Импульстің ұзақтығының жоғарылауымен $T - t_n$ үзілісінің ұзақтығы төмендейді, ал толтыру коэффициенті 100% дейін артады. Толтыру коэффициентінің өзгеру диапазоны: $0 \leq \gamma \leq 100\%$.

10.13-суреттегі басқару тізбегінде қате сигнал күшейткішінде (ҚСК) қуат көзінің шығыс кернеуінің нормадан ауытқуына пропорционалды $U_{қате}$ қате сигналы пайда болады. Ол үшін ҚСК кірістеріне $U_{шығ}$ және $U_{тірек}$ кернеуінің тіректері беріледі, онда олар салыстырылады және олардың айырмашылығы, яғни «қате» күшейтіледі. Тірек кернеуі арнайы тұрақтандырылған кернеу көзі (ТКК) арқылы жасалады.

Ендік-импульстік модулятор тізбегінде (ЕИМ) $U_{қате}$ қатесінің кернеуі арнайы тұрақтандырылған генератормен жасалған u_n , пішінді сызықты өсіп келе жатқан кернеумен салыстырылады. Егер ЕИМ бастапқы күйі $U_{ош0} = U_{n,max}/2$ деп қабылданса, мұнда $U_{n,max}$ - аралық кернеудің максималды мәні, содан кейін бастапқы күйде толтыру коэффициенті $\gamma_0 = 50\%$, 10.14-суретте көрсетілгендей.

Шығу кернеуі $U_{n,ном}$ -ден жоғары болған кезде, пом қате сигналы $U_{ош} > U_{ош0}$ арттырады, ал басқару импульсінің ұзақтығы төмендейді.

Шығу кернеуі $U_{n,ном}$ -ден төмен болған кезде, ном сигнал қателер, сондай-ақ азаяды $U_{ош} < U_{ош0}$, ал импульстің ұзақтығы басқармасының артып келеді.

t_n импульсінің ұзақтығының өзгеруі күш транзисторының қосылған күйінің ұзақтығының өзгеруіне және сәйкесінше шығыс кернеуінің пропорционалды өзгеруіне әкеледі. Осылайша, реттелетін ЕИМ инверторы шығыс кернеуін тұрақтандыруды қамтамасыз етеді.

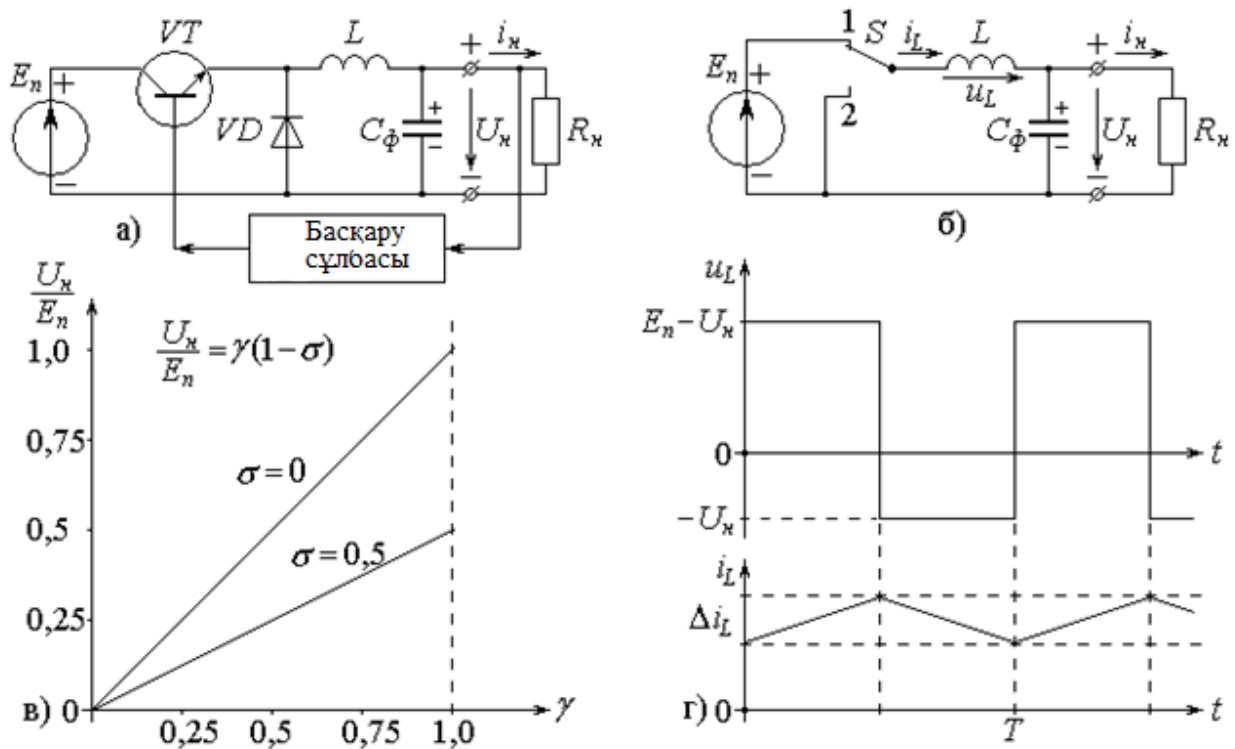
10.4.2 Импульстік кернеу тұрақтандырғыштарының сұлбалары

Күш элементтерінің қосылуымен ерекшеленетін импульстік кернеу тұрақтандырғыштарының үш сұлбасын қарастырыңыз: L индуктивтілігі (дроссель), VT негізгі Транзисторы және VD диоды.

Кернеуді төмендететін импульстік тұрақтандырғыштың сұлбасы 10.15, а-суретте көрсетілген. L кумулятивті индуктивтілік (дроссель) R_n жүктемесімен қатар қосылады. VT негізгі Транзисторы қуат көзі арасында қосылады (сүзгісі бар желілік түзеткіш, 10.13 сурет) $E_n = U_n$ және L индуктивтілігі. VT транзисторының кілті ашылған кезде индуктивтілік тогы VD диоды арқылы өтеді. Диодтың тізбекке қосылуы индуктивтіліктегі токтың үздіксіздігін қамтамасыз етеді және осылайша коммутация кезінде транзистордағы кернеудің қауіпті шығарындыларының пайда болуын болдырмайды. R_n жүктемесіне параллель кернеу импульстарын тегістеу үшін C_ϕ сүзгі конденсаторы қосылған.

10.15, б-суретте тұрақтандырғышты ауыстырудың эквивалентті сұлбасы келтірілген, оның жұмыс принципін түсіндіреді. Онда VT негізгі транзисторы мен VD диоды S айналдыру кілтімен ауыстырылады, басқару импульсі транзистордың негізіне түскен кезде S кілті «1» күйіне орнатылады (VT транзисторы ашық), E_n қуат көзінен алынған энергия L сақтау индуктивтілігіне, SF сүзгі конденсаторына және тікелей жүктемеге түседі. Басқару импульсі болмаған кезде S кілті 2 күйіне орнатылады (транзистор жабық, ал VD диоды ашық), осылайша L дроссельіндегі және жүктемедегі токтың үздіксіздігін қамтамасыз етеді. Осы уақыт аралығында E_n қуат көзі өшіріліп, VT транзисторы ашылған кезде алдыңғы жұмыс циклінде жинақталған L дроссельінен және SF

сүзгі конденсаторынан энергия R_n жүктемесіне түседі. L индуктивтілігіндегі u_L кернеуі мен i_L тогының уақыт диаграммалары 10.15, г- суретте көрсетілген.



10.15 сурет - Импульстік кернеу тұрақтандырғышының төмендету тізбегі

Энергия сақтау кезеңіндегі дроссельдегі кернеу $u_L = E_n - U_n$. S кілтін «2» күйіне ауыстырғаннан кейін дроссельдегі кернеу $u_L = -U_n$ мәнін алады. Дроссельдегі кернеудің толық айырмашылығы E_n тең. Жүктемедегі кернеу толтыру коэффициентіне γ пропорционал:

$$U_n = E_n \cdot \gamma(1 - \sigma), \quad (10.11)$$

мұндағы $\sigma = r_L/R_n$ – дроссель мен жүктеменің белсенді қарсылықтарының қатынасы.

Тұрақтандырғыштың реттеу сипаттамасы тұрақтандырғыштың шығыс кернеуінің салыстырмалы мәнінің $U_n/E_n=f(\gamma)$ импульстарын толтыру коэффициентіне тәуелділігін көрсетеді:

$$\frac{U_n}{E_n} = \gamma \cdot (1 - \sigma). \quad (10.12)$$

Реттеу сипаттамасы 10.15, в - суретте көрсетілген.

Дроссельдегі үздіксіз ток режимін қамтамасыз ету үшін оның индуктивтілігі L шартты қанағаттандыруы керек:

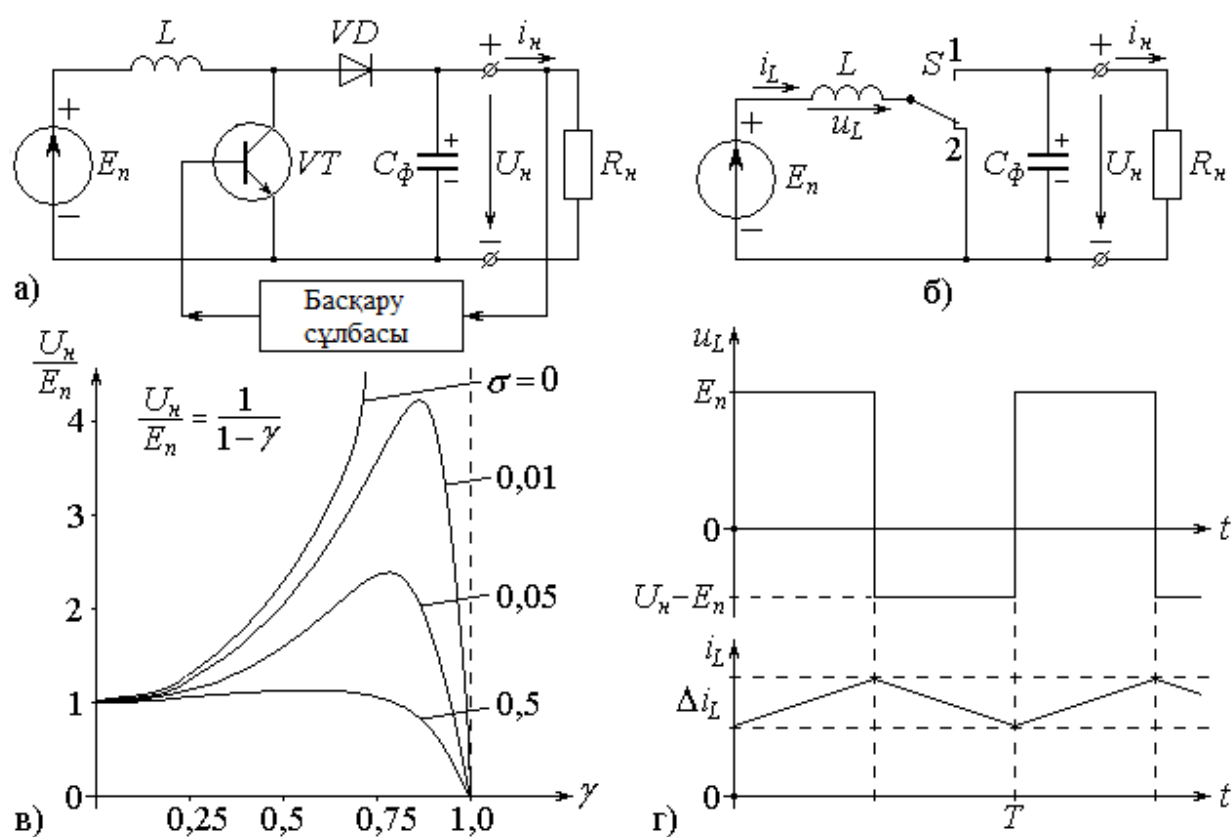
$$L \geq T \cdot R_n \cdot (1 - \gamma) / 2. \quad (10.13)$$

C_ϕ сүзгісінің сыйымдылығы мына формула бойынша есептеледі:

$$C_\phi = \frac{1}{2 \cdot R_n \cdot f \cdot K_n}, \quad (10.14)$$

мұндағы f және K_n - негізгі гармониканың жиілігі және U_n жүктеме кернеуінің пульсация коэффициенті.

Импульсті тұрақтандырғыштың жоғарылату схемасы 10.16, а) суретте көрсетілген.



10.16 сурет - Импульсті кернеу тұрақтандырғыштың жоғарылату сұлбасы

VT транзисторын құлыптағаннан кейін S кілті «2» күйіне өтеді және L дроссель C_ϕ сүзгі конденсаторына және R_n жүктемесіне параллель қосылады. VT транзисторының коммутациясынан кейін дроссель тогы бағытын өзгертпейтіндіктен, а дроссельіндегі кернеудің полярлығы, демек, жүктемедегі кернеу қуат көзінің полярлығына қарама-қарсы болады. Осылайша, қуат кернеуі инверттеледі. u_L кернеуі мен L дроссельдің i_L тогының уақыт диаграммалары 10.16, г - суретте көрсетілген.

Сұлба элементтеріндегі шығындарды ескерместен *инверторлық* тұрақтандырғыштың алдын-ала сипаттамасы, яғни $r_L = 0$ және $\sigma = 0$ кезінде 0 ге тең:

$$-\frac{U_n}{E_n} = \frac{\gamma}{(1-\gamma)}. \quad (10.15)$$

Реттеу сипаттамасы 10.16, в-суретте келтірілген.

10.5 Биполярлық транзисторлардағы электрондық күшейткіштер

Электрлік сигналдарды күшейту - бұл процестерді басқарудың, сондай-ақ алынған сигналдарды күшейтудің, мысалы, көміртегі оксидінің концентрациясы үшін датчиктерден сигналдарды күшейтудің және т.б. жасаудың жалпы инженерлік міндеттерінің бірі.

Күшейткіштер - бұл қуат көзінің энергиясынан кіріс сигналының кернеуін, тогын немесе қуатын күшейтуге арналған электронды құрылғылар. Күшейту процесі - бұл шын мәнінде, қуаты аз кіріс сигналының уақытына байланысты өзгеру заңына сәйкес қуат көзінің қуатын басқару процесі. Электронды түтіктер, биполярлы немесе өрісті транзисторлар, сондай-ақ жұмыс күшейткіштері басқару немесе күшейту элементі ретінде қолданылады.

Қазіргі кезде вакуумдық түтіктер сирек қолданылады, өйткені олар жоғары вольтты қуат көздерін қажет етеді және транзисторлармен салыстырғанда үлкен. Дегенмен, олардың маңызды артықшылығы бар, бұл өте маңызды паразиттік сыйымдылықтар, олар жоғары қуатты күшейту қабілетіне ие, сондықтан олар осы уақытқа дейін қуатты жоғары жиілікті радиобайланыс таратқыштарында қолданылады.

Тұтасымен күшейткіштің және күшейткіш каскадтың негізгі параметрлерінің бірі - бұл күшейту коэффициенті. Кернеу бойынша күшейту k_U , ток бойынша күшейту k_I және қуат бойынша күшейту k_P коэффициенттерін ажыратады:

$$K_U = \frac{U_{\text{шығ}}}{U_{\text{кір}}} = \frac{I_K \cdot R_{\text{шығ}}}{I_6 \cdot R_{\text{кір}}} = \frac{h_{21} \cdot R_K}{h_{11} + (1 + h_{22} \cdot R_K)} \approx h_{21} \frac{R_K}{h_{11}} = \beta \frac{R_K}{h_{11}}$$

$$K_I = \frac{I_{\text{шығ}}}{I_{\text{кір}}} = \frac{U_{\text{шығ}} \cdot (1 + h_{22} \cdot R_K)}{R_K} \cdot \frac{R_{\text{бЭКВ}} \cdot h_{11}}{U_{\text{шығ}} + (R_{\text{бЭКВ}} + h_{11})} = \frac{h_{21} R_{\text{бЭКВ}}}{R_{\text{бЭКВ}} + h_{11}}$$

$$K_P = K_U \cdot K_I. \quad (10.16)$$

Көп каскадты күшейткіштің күшейту коэффициенті жекелеген каскадтардың күшейту коэффициенттерінің көбейтіндісімен анықталады.

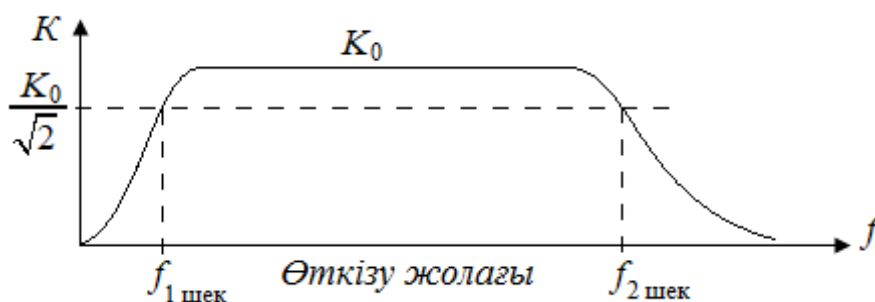
Олардың негізгілеріне тағы екі параметр кіреді, бұл айнымалы ток үшін күшейту кезеңінің кіріс және шығыс кедергісі:

$$R_{\text{ШЫҒ}} = \frac{u_{\text{ШЫҒ}}}{i_{\text{ШЫҒ}}} = \frac{U_{\text{ШЫҒ}}^{\text{б.ж.}}}{I_{\text{ШЫҒ}}^{\text{к.т.}}} \quad (10.17)$$

Сигнал көзінен жүктемеге максималды қуатпен энергияны беру үшін сигнал көзі, күшейткіш кезеңдері мен жүктеме сәйкес келуі керек. Бұл күшейткіш каскадтың кіріс кедергісі сигнал көзінің ішкі кедергісіне, ал шығыс кедергісі келесі күшейткіш сатысының кіріс кедергісіне, ал жүктеме кедергісі соңғы күшейткіш сатысының шығыс кедергісіне тең болуы керек дегенді білдіреді.

Күшейткіш каскадтың негізгі сипаттамасы – k күшейткіш коэффициентінің амплитудалық-жиіліктік сипаттамасының (АЖС) f жиілігіне тәуелділігі. RC - байланысы бар күшейткіштің жиілік реакциясының шамамен көрінісі 10.17-суретте келтірілген. Күшейткіштің өткізу қабілеттілігі - күшейткіштің күшейту күші өзгеріссіз қалатын және сипаттаманың шеттерінде фактордан аспайтын төмендейтін жиілік диапазоны.

Күшейту коэффициентін $\sqrt{2}$ есе төмендету 3 дБ әлсіреуіне және f_1 мен f_2 өткізу жолағының шектік жиіліктеріне сәйкес келеді.



10.17 сурет – RC -байланысты күшейткіштің АЖС

Төмен жиілікті аймақтағы күшейтудің төмендеуі байланыстырушы конденсаторлардың кедергісінің жоғарылауымен түсіндіріледі, ал бұл өз кезегінде олардағы кернеудің төмендеуінің жоғарылауына және соған байланысты күшейтілген кернеудің төмендеуіне әкеледі.

Жоғары жиілікті аймақтағы күшейтудің төмендеуі коллектор мен параллельді сыйымдылықтың кедергісін төмендетумен түсіндіріледі, бұл қосылыстарды айналып өтетін p - n түйіспелері, нәтижесінде күшейткішсіз кіріс сигналы күшейткіштің шығысына енеді.

Жиілік диапазонына байланысты өткізу жолақтары:

ТЖК – төменгі жиілікті күшейткіш (10 Гц – 40...100 кГц);

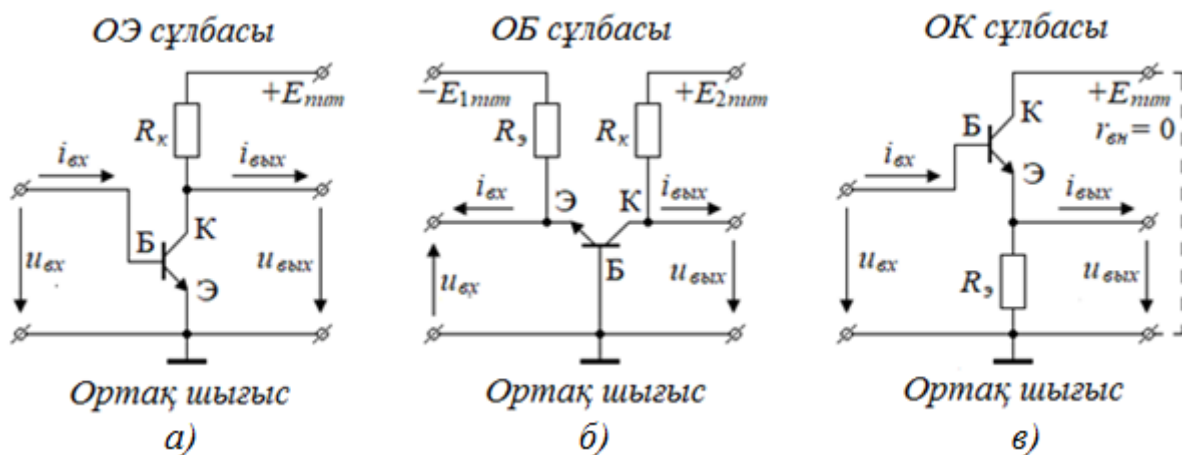
АЖК – аралық жиілікті күшейткіш (100 кГц – 1 МГц);

ЖЖК – жоғары жиілікті күшейткіш (1 МГц – 100 МГц);

АЖК – аса жоғары жиілікті күшейткіш (100 МГц – 1 ГГц).

Транзисторды қосу әдісі бойынша күшейту каскадтарының үш негізгі тізбектері бар. Олардың әрқайсысының айрықша ерекшелігі – транзисторшықпаларының бірі, эмиттер (Э), база (Б) немесе коллектор (К) айнымалы ток кіріс және шығыс тізбектеріне ортақ болады.

Сыртқы элементтерсіз ауыспалы ток арқылы транзисторларды қосудың блок-схемалары 10.18-суретте көрсетілген.



10.18 сурет – Күшейткіш каскадтардың құрылымдық сұлбасы

10.5.1 Күшейткіш каскадтарда транзистордың жұмыс істеу режимдері

Транзистордың кіріс I_b ($U_{бэ}$) және I_k (I_b) сипаттамаларын, сондай-ақ күшейткіш каскадтың 10.19-суретте көрсетілген жүктеме сызығын қарастырамыз, бұл жұмыс нүктесінің A режиміне сәйкес орналасуын көрсетеді.

Транзистордың жұмыс режимі жалпы нүктеге қатысты транзистордың базасына берілетін тыныштықты ығыстыру кернеуімен белгіленеді. A режимінде жұмыс нүктесі транзистордың I_b ($U_{бэ}$) және I_k (I_b) сипаттамаларының сызықтық бөлімінің ортасында болады, бұл минималды сызықтық емес бұрмаланулармен сигналдың күшеюін қамтамасыз етеді, бірақ транзистор көп энергияны тұтынады, өйткені $I_{к0}$ коллектор тогы мен тыныштық жағдайының кернеуі $U_{кэ0}$ үлкен мәнге ие болады. Күшейткіштің тиімділігі төмен, сондықтан A режимі қуаты төмен сигналдарды күшейтудің алдын-ала каскадтарында қолданылады.

B режимінде транзистордың базасындағы кернеу нөлге жақын, жұмыс нүктесі кіріс және беру сипаттамаларының сызықтық бөлімінің басында болады, сондықтан транзистордағы ток синусоидалы сигналдың жарты кезеңінде ғана жүреді. Тыныштық жағдайында транзистордағы ток іс жүзінде нөлге тең, ол энергияны тұтынбайды, ПӘК жоғары, сондықтан бұл режим екі тактілі шығыс каскадтарында қолданылады, мұнда транзисторлар жұбы кіріс сигналының әрбір жарты толқындарын толқын формасын бұрмаламай күшейтеді.

C режимінде шығыс тізбегіндегі ток кіріс сигналының жартысынан аз уақыт аралығында жүреді, гармоникалық бұрмалану үлкен.

Күшейткіштердегі кері байланыс. Күшейткіштердегі кері байланыс шығыс кернеуінің бір бөлігін оның кірісіне беруі болып табылады. Егер кері кернеу кіріс

кернеуіне қосылса, кері байланыс оң деп аталады (ОКБ). ОКБ күшейткіштерде оны өздігінен қоздыру үшін қолданылады және осылайша сигнал генераторларын жасайды.

Егер кері байланыс кернеуі кіріс кернеуінен алынып тасталса, ондай байланыс теріс кері байланыс деп аталады (ТКБ). ТКБ электронды күшейткіштерде параметрлерін тұрақтандыру және күшейткіштің сипаттамаларын жақсарту мақсатында кеңінен қолданылады.

Сонымен, тізбекті ТКБ күшейту коэффициентін кемуіне қарамастан, келесіні қамтамасыз ете алады:

- қоршаған орта температурасы өзгеруіне және транзистор тозуына байланысты оның параметрлерінің өзгеруіне қарамастан күшейту коэффициентінің тұрақтылығы;

- сызықтық емес бұрмалану деңгейін төмендету;

- күшейткіштің кірісін көбейту және шығыс кедергісін азайту;

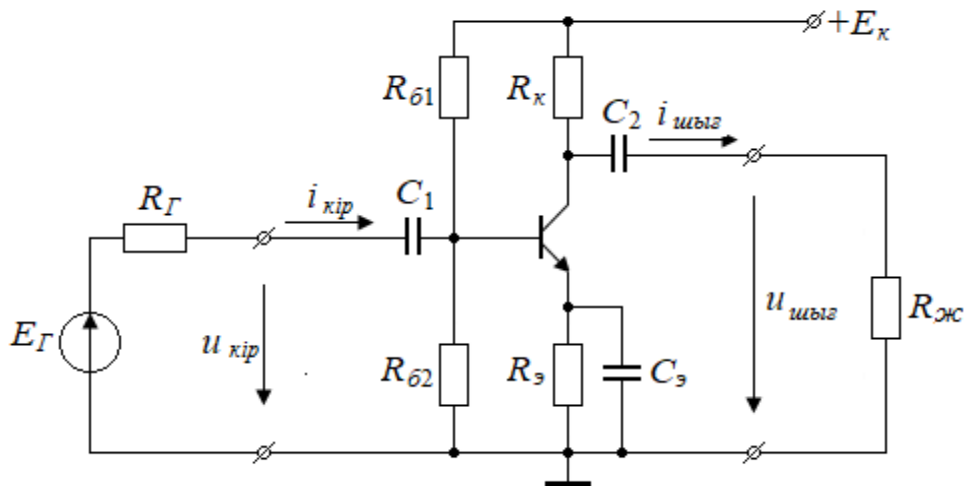
- күшейткіштің өткізу жолағын үлкейту.

Ортақ эмиттерлі күшейткіш каскад (ОЭ)

ОЭ бар күшейткіш каскадтың сызбасы 10.19-суретте көрсетілген. Күшейткіштің жұмыс істеу принципін түсіндіретін күшейткіштің кіріс және шығыс токтары мен кернеулерінің уақыт диаграммалары 10.20-суретте көрсетілген.

R_{B1} және R_{B2} резисторларындағы кернеуді бөлгіш транзистордың негізінде тыныштық кернеудің (кіріс сигналы болмаған кезде) тұрақты мәнін орнатады, осылайша транзистордың жұмыс нүктесін орнатады. Бөлгіштің кедергілері айнымалы ток үшін олардың баламалы кедергісі транзистордың кіріс кедергісінен әлдеқайда көп болатындай етіп таңдалады, бұл транзистордың h_{11} параметрі. Айнымалы ток үшін R_{B1} және R_{B2} резисторлары параллель жалғанғанын ескеру керек, өйткені олар E_k ішкі көздің кедергісімен нөлге теңдетіледі. U_{B0} өзгеріссіз қалуы үшін бөлгіштегі ток $i_b = (5 \dots 10) \cdot i_{b0}$ болу керек, мұндағы $i_{b0} = i_{r0}/h_{21}$.

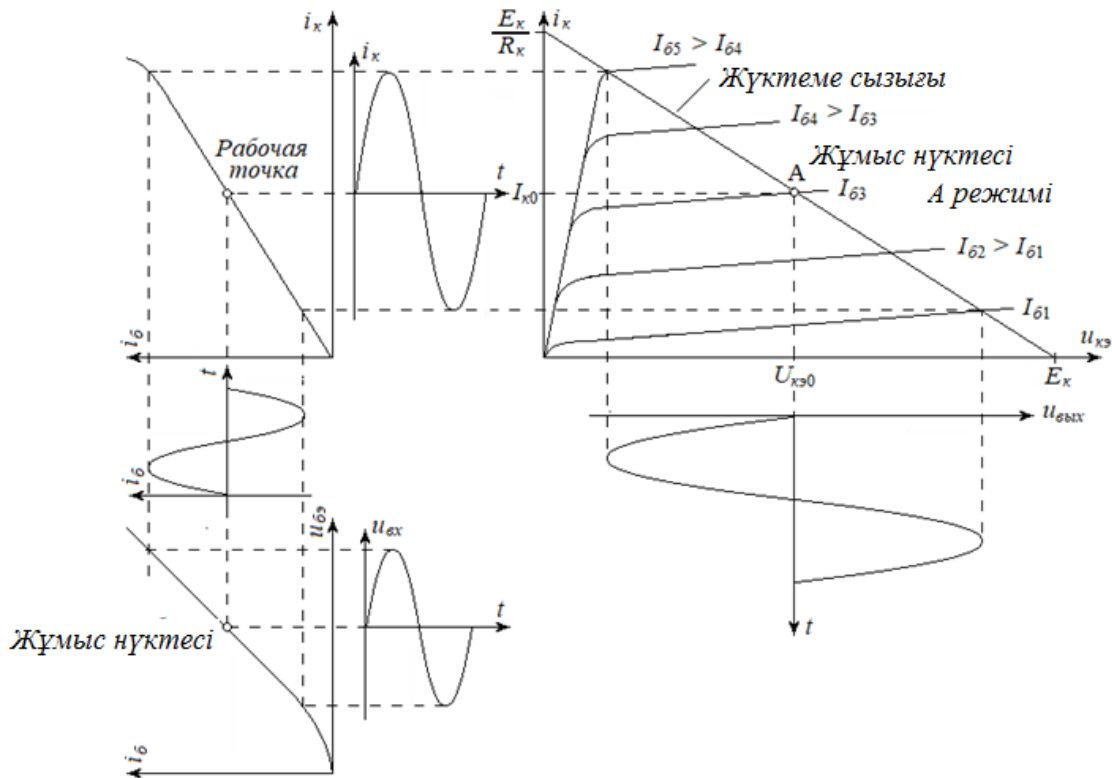
R_k кедергісі транзистордың шығыс сипаттамаларының жанұясының екі нүктесінен өтетін жүктеме сызығын $I_k(U_{кэ})$ белгілейді: 10.20-суретте көрсетілгендей, кернеу осындағы E_k және ток осындағы E_k/R_k . R_k резисторының кедергісі жүктеме сызығы U_{kmax} , I_{kmax} және P_{kmax} рұқсат етілген мәндерінен солға және одан төмен түсіп, транзистордың сипаттамасының жеткілікті ұзын сызықтық қимасын қамтамасыз ететін етіп таңдалады $I_k(I_b)$, бұл кіріс сигналын бұрмалаусыз күшейтеді. $I_k(I_b)$ транзисторының беріліс сипаттамасы I_k (ток) транзисторының шығу сипаттамалары тобының I_{b1} базалық тоқының әртүрлі мәндеріне сәйкес келетін жүктеме сызығымен қиылысу нүктелерінде кескінделеді. Тасымалдау сипаттамасының көлбеуі транзистордың h_{21} ток күшімен анықталады, ол көбінесе β деп белгіленеді. $I_c(U_{ке})$ транзисторының шығу сипаттамалары тобының таяз кесінділерінің кернеу өсіне көлбеу бұрышының тангенсі h_{22} транзистордың шығыс өткізгіштігін анықтайды. R_k кедергісі, әдетте, бірнеше жүз Ом немесе кОм бірліктерінің ретіне ие болады.



10.19 сурет – Ортақ эмиттерлі күшейткіш каскад

C_1 және C_2 конденсаторлары айнымалы токпен байланыстырғыш және тұрақты тұрақты кернеу бойынша бөлгіш болып табылады. C_1 байланыстырғыш конденсатор арқылы $u_{кiр}(t)$ айнымалы кіріс кернеуі транзистордың базасына беріледі, ал C_2 конденсатор арқылы күшейтілген айнымалы кернеу $R_ж$ жүктеме кедергісіне беріледі. Сонымен қатар, C_1 және C_2 конденсаторларының арқасында базадағы және транзистордың коллекторындағы тұрақты кернеулер сигнал көзіне де, жүктемеге де енбейді. Конденсаторлардың сыйымдылықтарының мәні күшейткіштің өткізу жолағының төменгі кесу жиілігінде $X_{C1} \ll R_{кiр}$ кедергісі және $X_{C2} \ll R_ж$ кедергісі болатындай етіп таңдалады.

Транзистордың эмиттерлік тізбегіне $R_э$ резисторының қосылуы тізбектелген теріс ток кері байланысының әсерінен транзистордың жұмыс нүктесінің жағдайының температуралық тұрақтануын қамтамасыз етеді: температураның жоғарылауымен транзистордың коллектор тогы артады, демек, эмиттерлік ток, бұл $R_э$ резисторындағы кернеудің төмендеуінің артуына әкеледі және осыған байланысты транзистордың базалық эмиттерлік кернеуінің төмендеуіне әкеледі, бұл өз кезегінде коллектор тогын бұрынғы мәніне қайтарады. $R_э$ кедергісінің шамасын тыныштық күйінде кернеудің төмендеуі $E_к$ -ден 10 ... 30% құрайтындай қылып таңдаймыз. $R_э$ резисторы күшейтілген айнымалы кернеудің шамасына әсер етпеуі үшін, ол $C_э$ конденсаторымен ажыратылады. $C_э$ конденсаторы сыйымдылығының мәні өткізгіштің төменгі кесу жиілігінде $X_{C_э}$ кедергісі болатындай етіп таңдалады $\ll R_э$.



10.20 сурет – Ортақ эмиттерлі күшейткіш каскадтың жұмыс істеу принципі

Ортақ эмиттерлі күшейткіш каскадтың негізгі параметрлері:
Күшейткіш каскадтың кіріс және шығыс кедергілері

$$R_{\text{кір}} = \frac{R_{\text{бэқв}} \cdot h_{11}}{R_{\text{бэқв}} + h_{11}}, \text{ бұл жерде } R_{\text{бэқв}} = \frac{R_{\text{б1}} \cdot R_{\text{б2}}}{R_{\text{б1}} + R_{\text{б2}}}. \quad (10.17)$$

$(1/h_{22}) < R_{\text{к}}$ және $R_{\text{шығ}} \approx R_{\text{к}}$ екенін ескере отырып

$$R_{\text{шығ}} = \frac{R_{\text{к}} \cdot (1/h_{22})}{R_{\text{к}} + (1/h_{22})} = \frac{R_{\text{к}}}{1 + (h_{22} \cdot R_{\text{к}})} \quad (10.18)$$

Кернеу бойынша күшейту коэффициенті

$$K_U = \frac{U_{\text{шығ}}}{U_{\text{кір}}} = \frac{I_{\text{к}} \cdot R_{\text{шығ}}}{I_{\text{б}} \cdot R_{\text{кір}}} = \frac{h_{21} \cdot R_{\text{к}}}{h_{11} + (1 + h_{22} \cdot R_{\text{к}})} \approx h_{21} \frac{R_{\text{к}}}{h_{11}} = \beta \frac{R_{\text{к}}}{h_{11}} \quad (10.19)$$

Ток бойынша күшейту коэффициенті

$$K_I = \frac{I_{\text{шығ}}}{I_{\text{кір}}} = \frac{U_{\text{шығ}} \cdot (1 + h_{22} \cdot R_{\text{к}})}{R_{\text{к}}} \cdot \frac{R_{\text{бэқв}} \cdot h_{11}}{U_{\text{шығ}} + (R_{\text{бэқв}} + h_{11})} = \frac{h_{21} R_{\text{бэқв}}}{R_{\text{бэқв}} + h_{11}} \quad (10.20)$$

Қуат бойынша күшейту коэффициенті $K_P = K_U \cdot K_I$.

А режимінде жұмыс істей отыра ОЭ күшейткіш каскады, жұмыс нүктесі I_k (I_b) беріліс сипаттамасының сызықтық бөлімінің ортасында болған кезде, кернеуді де, тоқты да минималды сызықтық емес бұрмаланумен күшейтеді.

Сонымен қатар, тыныштық режимінде транзистор айтарлықтай қуатты тұтынады (кернеудің үлкен мәндері $U_{кэ0}$ және тыныш ток $I_{к0}$), бұл күшейткіштің тиімділігі өте төмен, 50% -дан төмен. Бұл күшейткіштің үлкен кемшілігі болып табылады. Демек, мұндай сұлба күшейтудің кішігірім көлемі күшейтілетін кіріс күшейту кезеңдерінде қолданылады. ОЭ-лі каскадтың кемшіліктеріне үлкен шығыс кедергісін де жатқызуға болады.

Ортақ коллекторлы күшейткіш каскады (ОК)

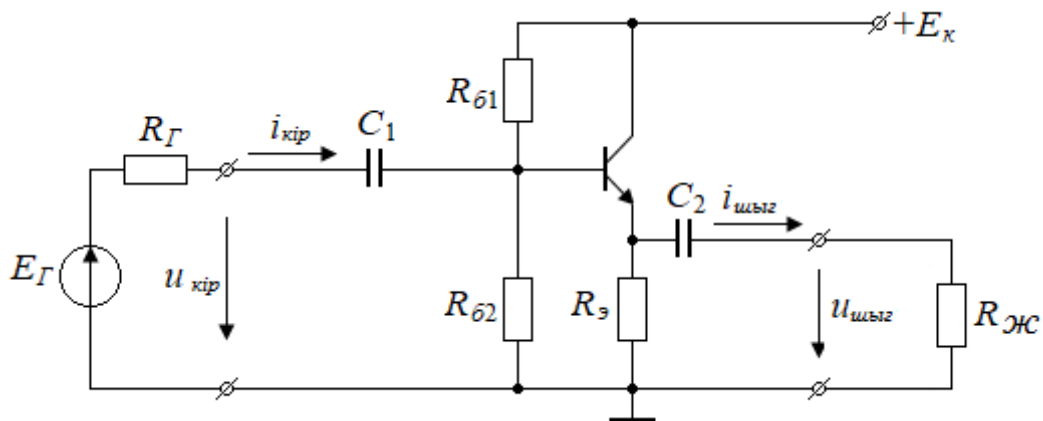
Ортақ коллекторлы күшейткіш каскадтың сұлбасы 10.21-суретте келтірілген. Тізбек элементтерінің мақсаты жоғарыда ОЭ-лі күшейткіш кезеңдегіде қарастырылғандай. Коллекторлық тізбекте резистор жоқ, айнымалы ток құрамына арналған коллектор транзистордың ортақ нүктесіне қосылған. Транзистордың тұрақты жүктемесі $R_э$ эмиттерлік тізбегіне енгізілген резистор болып табылады, ол сонымен қатар транзистордың жұмыс нүктесінің температуралық тұрақтануын қамтамасыз етеді.

Транзистордың базасындағы тыныштық кернеуі мына формула бойынша есептеледі:

$$U_{бэ0} = \frac{E_k \cdot R_{б2}}{R_{б1} + R_{б2}} - R_э \cdot I_{э0}. \quad (10.21)$$

Бұл кернеу транзистордың жұмыс нүктесі шамамен кіріс режимінің I_b ($U_{бэ}$) немесе А режиміне сәйкес келетін I_k (I_b) сипаттамасының сызықтық бөлімінің ортасында орналасады.

ОК бар каскадтың айрықша ерекшелігі - шығыс кернеуі әрқашан кіріс кернеуінен сәл аз немесе оған тең, кернеу күшейуі шамамен келесі бірлікке тең: $K_U \approx 0,9...0,99$. Шығыс кернеуі де кіріс кернеуімен бір фазада болады, сондықтан ОК күшейткіш каскады көбінесе эмитенттің ізбасары деп аталады. Бұл каскад тоқты күшейтеді, ток бойынша күшейту шамамен транзистордың ағымдағы ток күшіне тең $K_I \approx h_{21} = \beta$.



10.21 сурет – Ортақ коллекторлы күшейткіш каскад

Ортақ коллекторлы күшейткіш каскадтың кіріс кедергісі, $R_{б\text{экв}}$ ескерілмейді

$$R_{\text{кір}0} = \frac{h_{11}}{1-K_U}, \text{ мұнда } K_U \approx 0,9 \dots 0,99. \quad (10.22)$$

Формуладан ОК-лі каскадтың кіріс кедергісі транзистордың h_{11} кіріс кедергісінен едәуір асып, 10 кОм-ден 1 МОм-ге дейін болатындығын көруге болады. Транзистор базасының кернеу бөлгішінің эквивалентті кедергісін ескере отырып, ОК күшейткіш каскадының кіріс кедергісі аздап төмендейді және келесі формула бойынша есептеледі:

$$R_{\text{кір}} = \frac{R_{б\text{экв}} \cdot R_{\text{кір}0}}{R_{б\text{экв}} + R_{\text{кір}0}}, \text{ мұндағы } R_{б\text{экв}} = \frac{R_{б1} \cdot R_{б2}}{R_{б1} + R_{б2}} \quad (10.23)$$

Эмиттерлік қайталағыштың шығыс кедергісі

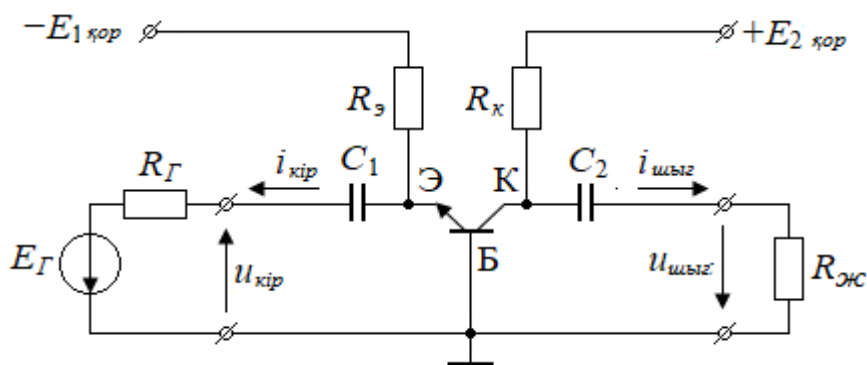
$$R_{\text{шығ}} \approx \frac{h_{11}}{1+h_{21}} = \frac{h_{11}}{1+\beta} \quad (10.24)$$

Формуладан ОК бар кезеңнің шығыс кедергісі өте аз және 5 Ом-нан 100 Ом-ға дейін болатындығын көруге болады.

Кіріс кедергісінің жоғары мәні және шығыс кедергінің төмен мәні осы күшейткіштің артықшылығы болып табылады. Бұл каскадтар буферлік болып табылады, олар ішкі кедергісі үлкен сигнал көздерін төменгі кедергісі бар жүктемемен сәйкестендіру үшін қолданылады.

Ортақ базалы күшейткіш каскад

Ортақ базалы күшейткіш каскадтың схемасы 10.22-суретте келтірілген. Бұл биполярлық транзистор үшін ең жылдам коммутациялық сұлба, сондықтан ол кіріс каскадта жоғары және аса жоғары жиіліктегі әлсіз сигналдарды алдынала күшейту үшін қолданылады.



10.22 сурет – Ортақ базалы күшейткіш каскад

Кернеу арқылы күшейтеді. Төмен кіріс кедергісі және жоғары шығысы бар: $R_{\text{кір}} = 10 \dots 100$ Ом и $R_{\text{шығ}} = 100$ кОм...1 МОм.

10.6 Логикалық элементтер және триггерлер

Жалпы ақпарат. Цифрлық техниканың аналогтық техникадан айырмашылығы, ақпаратты минималды бұрмаланумен немесе мүлдем бұрмаланбай таратуға және өңдеуге мүмкіндік береді, өйткені пайдалы сигнал аналогтық сигнал емес, логикалық нөлдер мен бірліктердің тіркесімін қамтитын сандық код болып табылады.

Физикалық тұрғыдан, логикалық нөлдер және бірлер бір-бірінен ерекшеленетін аналогтық сигналдар болып табылады. Мысалы, номиналды кернеуі 5 В болатын цифрлық микросұлбалар үшін логикалық нөл және логикалық бірдің физикалық деңгейі: 0-ден 0,4 В-қа дейінгі логикалық нөлге және 2,4-тен 5,0 В-қа дейін логикалық бір. Тізбектердің кірісіндегі кернеу деңгейінің амплитудасы бойынша үлкен таралу мүмкіндігі, цифрлық сигналдың шуылға қарсы тұрақтылығын айтарлықтай арттырады.

10.6.1 Негізгі логикалық функциялар және Буль алгебрасының теоремалары

Логикалық айнымалылармен жұмыс істеу операциялардың негізгі үш түрі бар, олар конъюнкция (логикалық көбейту), дизъюнкция (логикалық қосу) және терістеу. Логикалық айнымалылар алгебрасы Буль алгебрасы болып табылады. Логикалық алгебрада логикалық айнымалыларға негізгі операцияларды көрсету үшін келесі белгілер қолданылады:

конъюнкция (ЖӘНЕ – логикалық көбейту): $y = x_1 \wedge x_2 = x_1 \cdot x_2 = x_1 x_2$;

дизъюнкция (НЕМЕСЕ – логикалық қосу): $y = x_1 \vee x_2 = x_1 + x_2$;

терістеу (ЕМЕС): $y = \bar{x}$.

Осы логикалық амалдар үшін келесі теоремалар адал:

Коммутативтік заң

$$x_1 \cdot x_2 = x_2 \cdot x_1; \quad (10.25)$$

$$x_1 + x_2 = x_2 + x_1.$$

Ассоциативтік заң:

$$x_1 \cdot (x_2 \cdot x_3) = (x_1 \cdot x_2) \cdot x_3; \quad (10.26)$$

$$x_1 + (x_2 + x_3) = (x_1 + x_2) + x_3.$$

Дистрибутивтік заң:

$$x_1 \cdot (x_2 + x_3) = x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3; \quad (10.27)$$

$$x_1 + x_2 \cdot x_3 = (x_1 + x_2) \cdot (x_1 + x_3).$$

Жүту ережесі:

$$x_1 \cdot (x_1 + x_2) = x_1; \quad (10.28)$$

$$x_1 + x_1 \cdot x_2 = x_1.$$

Қайталау ережесі:

$$x \cdot x = x; \quad (10.29)$$

$$x + x = x.$$

Терістеу ережесі:

$$x \cdot \bar{x} = 0; \quad (10.30)$$

$$x + \bar{x} = 1.$$

Екі рет терістеу ережесі:

$$\bar{\bar{x}} = x. \quad (10.31)$$

Де Морган теоремасы:

$$\overline{x_1 \cdot x_2} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2; \quad (10.32)$$

$$\overline{x_1 + x_2} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2.$$

0 және 1 арқылы амалдар:

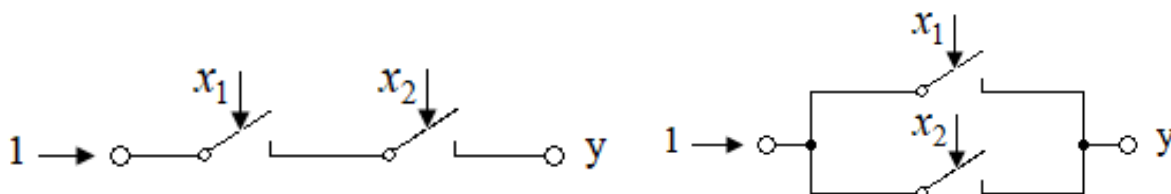
$$x \times 1 = x; \quad x + 0 = x; \quad x \times 0 = 0;$$

$$x + 1 = 1; \quad \bar{0} = 1; \quad (10.33)$$

$$\bar{1} = 0.$$

Конъюнкция (логикалық ЖӘНЕ) және дизъюнкция (логикалық НЕМЕСЕ) үшін функциялар сәйкесінше 10.2 ақиқат кестелерінде келтірілген.

Конъюнкция (ЖӘНЕ) мен дизъюнкцияның (НЕМЕСЕ) логикалық функцияларының механикалық эквиваленттері сәйкесінше 10.23 және 10.24-суреттерде көрсетілген.



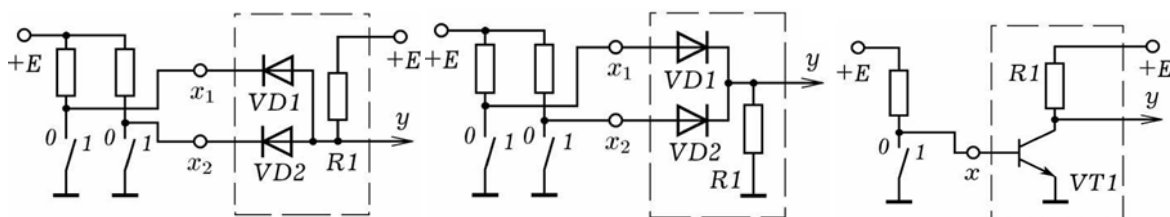
10.23 сурет – Конъюнкция (ЖӘНЕ) 10.24 сурет – Дизъюнкция (НЕМЕСЕ)

10.2 кесте – Конъюнкция (ЖӘНЕ), дизъюнкция (НЕМЕСЕ)

x_1	x_2	y (ЖӘНЕ)	конъюнкция	y (НЕМЕСЕ)	дизъюнкция
0	0	0		0	
0	1	0		1	
1	0	0		1	
1	1	1		1	

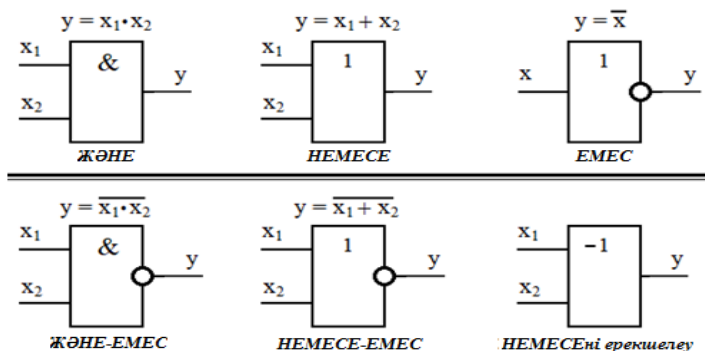
10.6.2 Логикалық элементтер

Негізгі логикалық функциялар бір, екі немесе одан көп кірісі бар және бір шығысы бар сәйкес электронды сұлбалар көмегімен жүзеге асырылады. Мұндай электронды сұлбалар логикалық элементтер деп аталады. Тізбектің кірістеріндегі кернеудің физикалық деңгейі және логикалық функцияны іске асыру әдісі шығыс кезіндегі кернеу деңгейін анықтайды. Бірдей логикалық функцияны әр түрлі электронды схемалар жүзеге асыра алады. Логикалық функцияларды жүзеге асырудың мысалдары 10.25, 10.26 және 10.27 суреттерінде көрсетілген.



10.25 сурет – «ЖӘНЕ» 10.26 сурет – «НЕМЕСЕ» 10.27 сурет – «ЕМЕС»

Қарапайымдылық үшін логикалық элементтердің әдеттегі графикалық белгілері енгізілген, олардың логикалық функциялары ғана бейнеленді және іске асыру сұлбаларының ішкі құрылымымен ешқандай байланысты емес. Логикалық элементтердің кәдімгі графикалық белгілері 10.28-суретте көрсетілген.



10.28 сурет – Логикалық элементтердің шартты графикалық белгіленуі

10.6.3 Триггерлер

Триггер дегеніміз - ол екі тұрақты күйге ие құрылғы, оларда ерікті түрде ұзақ уақыт қалуға болады. Осы күйлердің бірі «1» логикалық бір деп аталады, ал екіншісі «0» логикалық нөлге тең. Асинхронды және синхронды триггерлерді ажыратады. Асинхронды триггердің бір күйден екінші күйге ауысуы оның кірістерінің біріне белсенді логикалық деңгей берілген кезде орындалады (мысалы, тікелей басқарулы триггерлердегі «1» логикалық бір немесе кері триггерлердегі логикалық нөл «0»). Қарапайымдылық үшін келесіде біз «1» логикалық бірдің белсенді деңгейімен тікелей басқарылатын триггерлерді қарастырамыз. Синхронды флип-флоптың бір күйден екінші күйге ауысуы, егер оның кірістерінің бірінде белсенді логикалық деңгей болса, санау синхронды импульсінің алдыңғы жағында (/ -С) немесе ыдырауда (\ -С) жүреді.

Кірістің белсенді деңгейі жойылған кезде триггер ауыспайды және өзінің ағымдағы күйінде қалады. Осылайша, триггер жадтың қарапайым элементі болып табылады, ол бір бит ақпаратты сақтай алады: «1» немесе «0». Сондай-ақ, триггерлер цифрлық электрондық құрылғыларды жасау үшін қолданылады, мысалы, қандай да бір технологиялық процесті басқару үшін.

Триггердің ақпараттық кірістері оның түріне байланысты келесі түрде белгіленеді: R (ысыру - негізгі триггер шығысын «0» қалпына келтіру), S (орнату - негізгі триггер шығысын «1» қалпына келтіру), J - қолданылған әмбебап триггерлер және S кірісінің аналогы, K - әмбебап триггерлерде қолданылады және R кірісінің аналогы болып табылады.

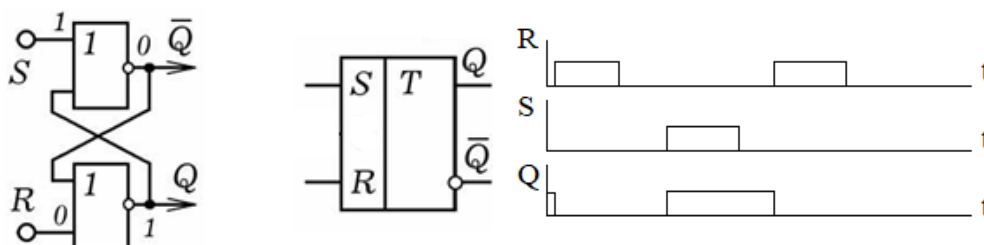
Асинхронды және синхронды триггерлерді ажыратады. Асинхронды триггердің шығыс күйі белсенді деңгей сәйкесті ақпарат кірісіне жеткенде бірден өзгереді: S (немесе J) кірісте логикалық «1» пайда болған кезде триггердің шығысы сол сәтте «1»-ге орнатылады, және керісінше, R (немесе K) логикалық «1» кірісінде пайда болған кезде, шығысында сол сәтте «0» орнатылады. Синхронды триггерлер синхронды импульстарға арналған «/ -С» немесе «\ -С» кірісіне қосымша ие, оның көтерілуінде немесе төмендеуінде триггердің шығыс күйі оның ақпараттық кірістерінде сәйкес сигналдар болған кезде өзгереді.

Кідіріс триггері (ағылш. Delay - кідірту сөзінен шыққан) - D-триггер және терістегіш триггер (Tumble) - T-триггердің әрқайсысында сәйкесінше D немесе T әріптерімен белгіленетін және синхрондау үшін кірістермен белгіленетін бір ақпарат кірісі бар, сондай-ақ синхрондаушы импульстерге арналған «/ -С» немесе «\ - С» кірістері бар. D-триггерінде оның ақпараттық кіріс сигналы пайда болған сәтте емес, синхронды импульстардың шеті немесе құлауы бойынша кідіріспен беріледі. T-триггерінде оның сигналдық кірісінде белсенді сигнал деңгейінің пайда болуы синхронды импульстардың көтерілу немесе төмендеу жиігінде триггер шығысының күйін керісінше аударады: «/ -С» немесе «\ -С».

Триггерлер, әдетте, пайдаланудың қарапайымдылығы үшін екі шығысқа ие, негізгі (тікелей) Q және қосымша (кері).

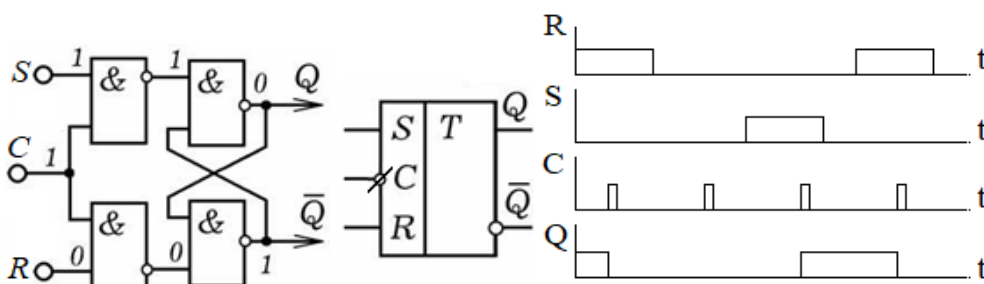
Төменде триггерлердің қарапайым тізбектері, олардың шартты графикалық белгілері және триггерлердің жұмысын түсіндіретін кіріс және шығыс сигналдарының уақыт диаграммалары келтірілген.

Асинхронды RS триггер екі кірісті екі НЕМЕСЕ-ЕМЕС элементтен тұрады. Асинхронды RS-триггер жұмысын түсіндіретін диаграммасы, кіріс және негізгі шығыс кезіндегі сигнал деңгейлерінің шартты графикалық белгіленуі мен уақыт диаграммалары 10.29-суретте көрсетілген.



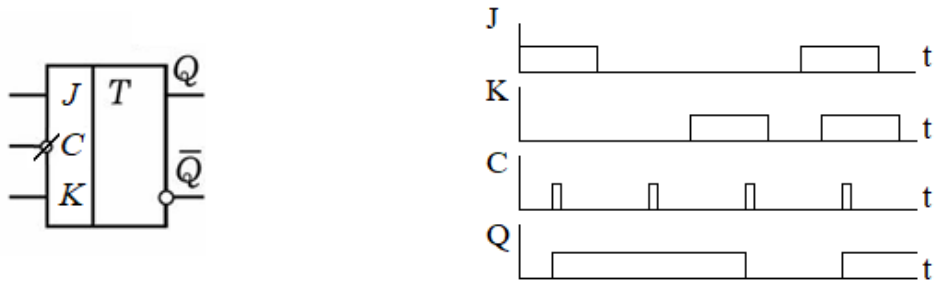
10.29 сурет – Асинхронды RS-триггер, сұлбасы, шартты графикалық белгіленуі және жұмысын түсіндіретін уақыттық диаграммалары

Синхронды RS-триггер төрт екі кірісті ЖӘНЕ-ЕМЕС элементтерінен тұрады. Оның шартты графикалық белгіленуі, синхронды RS-триггер жұмысын түсіндіретін диаграммасы, кіріс және негізгі шығыс сигнал деңгейлерінің уақыт диаграммалары 10.30-суретте көрсетілген.



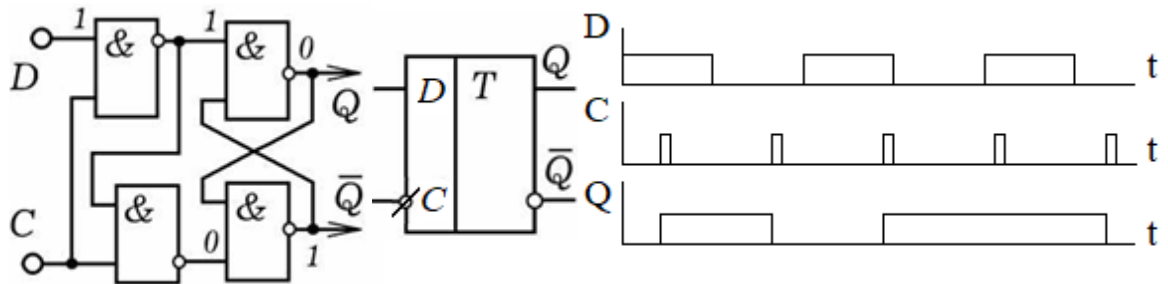
10.30 сурет – Синхронды RS-триггер, сұлбасы, шартты графикалық белгіленуі және жұмысын түсіндіретін уақыттық диаграммалары

Әмбебап асинхронды және синхронды JK триггерлері, сәйкесінше, асинхронды және синхронды RS-триггерлерімен бірдей жұмыс істейді, олардың айырмашылығы белсенді логикалық деңгейі J және K кірістерінде бір уақытта пайда болған кезде, JK -триггерінің шығыс күйі қарама қарсыға өзгертіледі, яғни бұл жағдайда ол T-триггер сияқты жұмыс істейді. Синхронды JK-триггердің жұмысын түсіндіретін кіріс және негізгі шығысындағы сигналдар, шартты графикалық белгіленуі мен сигнал деңгейлерінің уақыт диаграммалары 10.31-суретте көрсетілген.



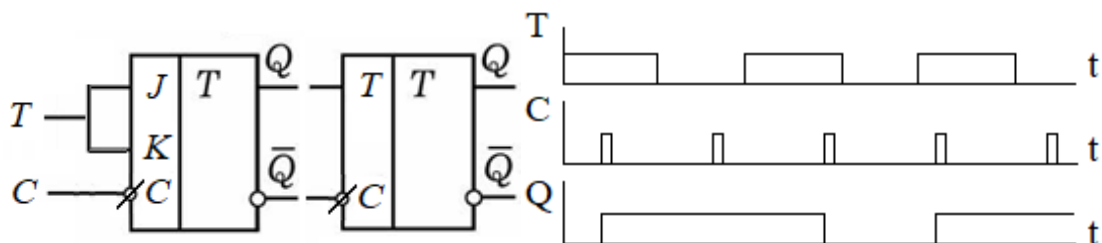
10.31 сурет– Синхронды *JK*-триггер, шартты графикалық белгіленуі мен жұмысын түсіндіретін уақыттық диаграммалары

Синхронды D-триггер төрт екі кірісті ЖӘНЕ-ЕМЕС элементтерінен тұрады. Оның диаграммасы, синхронды D-триггердің жұмысын түсіндіретін синхронды импульстар мен ақпараттық деңгейдегі, синхронды импульстар мен сигнал деңгейлерінің графикалық белгіленуі мен уақыт диаграммалары 10.32-суретте көрсетілген.



10.32 сурет – Синхронды *D*-триггер, сұлбасы, шартты графикалық белгіленуі мен жұмысын түсіндіретін уақыттық диаграммалары

Синхронды T-триггер арнайы микросұлба түрінде жасалмайды, ол D-триггерден немесе әмбебап JK триггерден құрастырылады. Синхронды T-триггердің жұмысын түсіндіретін синхронды импульстар, сигнал деңгейлерінің графикалық белгіленуі мен уақыт диаграммалары, 10.33-суретте көрсетілген.



10.33 сурет – Синхронды *T*-триггер, сұлбасы, шартты графикалық белгіленуі мен жұмысын түсіндіретін уақыттық диаграммалары

Әдебиеттер тізімі

Новожилов О.П. Электротехника (теория электрических цепей) в 2 ч. Часть 1: Учебник. – М.: Юрайт, 2019. – 403 с.

Новожилов О.П. Электротехника (теория электрических цепей) в 2 ч. Часть 2: Учебник. – М.: Юрайт, 2019. – 247 с.

Немцов М.В. Электротехника. Том 1: Учебник. – в 2 кн. Кн. 1. – М.: Академия, 2014. – 240 с.

Немцов М.В. Электротехника. Том 2: Учебник. – в 2 кн. Кн. 2. – М.: Академия, 2014. – 288 с.

Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник для бакалавров / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., исправ. и доп. – М.: Юрайт, 2016. – 704 с.

Нәдиров Е.Ғ., Балабатыров С.Б., Ғали Қ.О., ж.б. Электротехника және электроника негіздері. Алматы «Эверо» баспасы. 2012. – 588 б.

Немцов М. В. Электротехника и электроника: Учебник. – 3-е изд., стер. – М.: Академия, 2010. – 432 с.

Данилов И. А. Общая электротехника: Учебное пособие для учащихся вузов и техникумов, бакалавров, специалистов / И.А. Данилов. – М.: Юрайт, 2010. – 673 с.: ил.

Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник для бакалавров /Л. А. Бессонов. – 11-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2013. – 701 с.

Прянишников В. А. Электроника: Полный курс лекций. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: Учитель и ученик: КОРОНА принт, 2003. – 416 с., ил.

Микросхемы для импульсных источников питания и их применение. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательский дом «Додека-XXI», 2001. – 608 с.

Мазмұны

Кіріспе.....	3
Негізгі түсініктер мен анықтамалар. Тізбектердің негізгі заңдары. Электр тізбектерін баламалы түрлендіру.....	4
1. 1 Негізгі түсініктер мен анықтамалар	4
1.2 Электр тізбектердің негізгі заңдары. Электр тізбектеріндегі эквивалентті түрлендірулер.....	8
2 Тұрақты ток тізбектері. Бір энергия көзі бар тұрақты токтың сызықты электр тізбектерін есептеу.....	13
2.1 Сұлбаны жинақтау әдісі. Тармақталған тізбектерді бір тармаққа келтіру.....	13
2.2 Бірлік ток әдісі (пропорционалдық шамалар тәсілі).....	14
2.3 Беттестіру әдісі.....	15
2.4 Бірнеше энергия көздері бар тұрақты токтың тармақталған сызықты электр тізбектерін Кирхгоф және Ом заңдарын қолдана отырып есептеу	18
2.4.1 Контурлық токтар әдісі (КТӘ).....	18
2.4.2 Түйіндік потенциалдар әдісі (ТПӘ).....	19
2.4.3 Екі түйін әдісі.....	20
2.4.4 Баламалы генератор әдісі.....	21
2.5 Қуатты есептеу. Қуаттар балансы.....	22
3. Сызықты емес тұрақты ток электр тізбектері және оларды есептеу тәсілдері.....	23
3.1 Негізгі анықтамалар.....	23
3.2 Тұрақты токтың сызықты емес тізбектерін есептеудің графоаналитикалық әдісі.....	25
4 Бір фазалы синусоидалы токтың сызықты электр тізбектері. Негізгі анықтамалар мен есептеу әдістері	28
4.1 Негізгі анықтамалар.....	28
4.2 Синусоидальды функциялар уақытын жазудың кешенді және векторлар түрінде бейнелеу тәсілдері.....	30
4.3 Бір фазалы синусоидалы ток тізбектеріндегі резонанстық құбылыстар, пайда болу шарты, резонанстық контурлардың негізгі сипаттамаларын анықтау.....	34
4.4 Кернеулер резонансы. <i>RLC</i> тербелмелі контурдағы бірізді жиіліктің сипаттамалары	36
4.5 Токтар резонансы. <i>RLC</i> параллель тербелмелі контурдың жиіліктік сипаттамалары.....	38
4.6 Синусоидалы ток тізбектеріндегі қуат. Қуаттар тепе-теңдігі. Келісілген жүктеме режимі.....	40
4.6.1 Электромагниттік энергияны түрлендіру үрдістері.....	40
4.6.2 Қуаттар тепе-теңдігі.....	43
5 Үш фазалы ток тізбектері.....	44
5.1 Негізгі анықтамалар.....	44
5.2 Үш фазалы қабылдағышты жұлдызша схемасы бойынша жалғау.....	46
5.3 Қабылдағыштың фазаларының үшбұрыш схемасы бойынша жалғау...	50

6 Электр тізбектеріндегі өтпелі үрдістер. Өтпелі үрдістерді классикалық әдіспен талдау.....	52
6.1 Өтпелі үрдістер туралы түсініктемелер және негізгі анықтамалар...	52
6.2 Өтпелі үрдістерді классикалық әдісімен талдау.....	54
6.3 Екінші ретті тізбектердегі өтпелі процестер.....	56
7 Магнит тізбектері.....	58
7.1 Негізгі анықтамалар.....	58
7.2 Ферромагниттік материалдардың қасиеттері.....	59
7.3 Магнитті тізбектерді талдау.....	59
8 Трансформаторлар.....	62
8.1 Трансформатордың құрылысы.....	62
8.2 Трансформатордың жүксіз режимі.....	63
8.3 Трансформатордың жүктемелі жұмысы.....	65
9 Электр машиналары.....	68
9.1 Тұрақты ток машиналарының құрылымы.....	68
9.2 Тұрақты ток машиналарының жұмыс парқы.....	69
9.3 Тұрақты ток машиналарының генератор режиміне сәйкесті теңдеулері.....	70
9.4 Тұрақты ток машиналарының қозғалтқыш режиміне сәйкесті теңдеулері.....	72
9.5 Тұрақты ток қозғалтқышының механикалық сипаттамалары. Якордың айналу жылдамдығын реттеу.....	72
9.6 Үш фазалы электр машиналары. Үш фазалы асинхронды қозғалтқыштар. Құрылысы, жұмыс парқы және негізгі сипаттамалары....	72
9.7 Үш фазалы синхронды қозғалтқыштар мен генераторлар. Құрылысы, жұмыс парқы және негізгі сипаттамалары.....	76
10 Электрондық құрылғылар. Аналогты және цифрлық электроника.....	78
10.1 Шала өткізгіш диодтар, стабилитрондар, тиристорлер.....	78
10.2 Транзисторлар.....	80
10.3 Бір фазалы және үш фазалы түзеткіштер.....	81
10.3.1 Бір фазалы жарты периодты түзеткіш.....	82
10.3.2 Жартылай өткізгіш диодтардағы үш фазалы түзеткіштер.....	84
10.4 Импульстік кернеу тұрақтандырғыштары	87
10.4.1 Импульсті электрмен қоректендіру көздерінің құрылымдық схемасы.....	87
10.4.2 Импульстік кернеу тұрақтандырғыштарының сұлбалары.....	89
10.5 Биполярлық транзисторлардағы электрондық күшейткіштер.....	92
10.5.1 Күшейткіш каскадтарда транзистордың жұмыс істеу режимдері....	94
10.6 Логикалық элементтер және триггерлер.....	100
10.6.1 Негізгі логикалық функциялар және Буль алгебрасының теоремалары.....	100
10.6.2 Логикалық элементтер.....	102
10.6.3 Триггерлер.....	103
Әдебиеттер тізімі.....	106

Алиаскар Саинович Баймаганов
Гульзада Даулетбековна Мусапирова

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНИКА НЕГІЗДЕРІ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ЖӘНЕ ЭЛЕКТРОНИКА

Электротехника және электроника негіздері. Электротехника және электроника.
«B062 – Электротехника және энергетика» Жылуэнергетикабағыты білім беру
бағдарламасы бойынша оқитын студенттерге арналған Оқу құралы

Басылымға қол қойылды ____ . ____ . ____ .
Таралым 100 дана. Пішімі 60x84 1/16

Баспаханалық қағаз №2
Оқу-бас.ә. 6.8 Тапсырыс № ____
Бағасы 3400 теңге.

«Ғұмарбек Дәукеев атындағы «АЭЖБУ» КЕАҚ
Алматы қ., Байтұрсынұлы к., 126/1

«Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс
Университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамының
Көшірме-көбейту бюросы
050013, Алматы қ., Байтұрсынұлы к., 126/1