

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Ы. ТУҒАНБАЕВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКАНЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ

ОҚУЛЫҚ

Алматы, 2012

ББК 621.3 (075.8)
УДК 31.2 я 73
Т 77

*Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің «Оқулық»
республикалық ғылыми-практикалық орталығы бекіткен*

Пікір берушілер:

техника ғылымдарының кандидаты **М. И. Арпабеков**;
техника ғылымдарының докторы, профессор **Б. Өтеғұлов**;
техника ғылымдарының докторы, профессор **Т. Ә. Садықбек**.

Т 77 **Туғанбаев Ы. Т.**

Электротехниканың теориялық негіздірі: Оқулық. /Ы. Т. Туғанбаев
Алматы: Экономика. 2012. 500 бет.

ISBN 978-101-225-454-9

Электротехниканың теориялық негіздерінде электромагниттік құбылыстар, электротехникалық құрылымдардың және жүйелердің үдерістері қаралған.

Электротехниканың теориялық негіздері сабағы электро-энергетика, электротехника, механика және электротехнология мамандықтарының студенттерінің инженерлік білім алу жолындағы арнаулы сабақтарын іргелі біліммен және әдістемелікпен қамтамасыз етеді.

ББК 621.3 (075.8)
УДК 31.2 я 73

ISBN 978-101-225-454-9

© Туғанбаев Ы. Т., 2012
© ҚР Жоғары оқу орындарының
қауымдастығы, 2012
© «Экономика» баспасы» ЖШС, 2012

Алғы сөз

Электротехниканың теориялық негіздері көптеген жоғары оқу орындарының негізгі пәндерінің бірі болып саналады. Электротехниканың теориялық негіздері үш семестр бойы оқылады. Осыған байланысты оқулықтың материалдары үш бөлімге бөлінген: 1-2 бөлімдері электртізбегіне арналған, ал 3-бөлімі электромагнит өрісінің теориясына арналған.

Оқулықтың мазмұны Білім және ғылым министрлігінің осы мамандықты оқытатын барлық жоғары оқу орындарына арналып бекітілген бағдарламаға сәйкес келеді.

Электротехниканың теориялық негіздерінде электромагниттік құбылыстар, электротехникалық құрылымдардың және жүйелердің үдерістері қаралған.

Электротехниканың теориялық негіздері сабағы электроэнергетика, электротехника, механика және электротехнология мамандықтары студенттерінің инженерлік білім алу жолындағы арнаулы сабақтарын іргелі біліммен және әдістемелікпен қамтамасыз етеді.

Қазіргі уақытта электр энергиясы барлық өнеркәсіп салаларында, көлікте, ауыл шаруашылығында, үй тұрмысында және халықтың басқа да тұрмыс қажетіне кеңінен пайдаланылады.

Электр техникасы деп электр магниті құбылыстарын практика жүзінде кең қолданылуын айтамыз. Барлық электр техникасы салалары бір-бірімен байланысты болғандықтан техникалық жоғары оқу орындарында "Электр техникасының теориялық негіздері" курсы ашуға тура келді. Бұл курс әртүрлі электр техникасы пәндерінің негізгі базасы болып есептелінеді.

Осы курстың негізгі міндеті – құбылыстарды токтар, кернеулер, қуаттар, магнит ағындары, т.б. түсініктер арқылы есептеу, зерттеу. Сондай-ақ құбылыстарды электр кернеулігі, магнит өрісінің индукциясы, қуат ағындары, т.б. түсініктер арқылы есептеу, зерттеу. Осы міндеттердің біріншісі, тізбектерді, ал екіншісі электр магниті өрістерін есептеуге, зерттеуге арналған.

Электр техникасының өсіп-дамуы электр магниті құбылыстарын жете зерттеуді, оқып білуді, практика жүзінде пайдалануды керек етеді.

Оқулықтың құндылығы – физика, математика, механика ғылымдарымен байланысты ғылымдардың түрлі салалары бойынша қазақ тілінде жарық көрген төлтума және аударма оқулықтарды пайдалануы, материалды баяндау кезінде физика, математика ғылымдарының терминологиясының қол жеткен табыстарын кең қолдануы және кейбір терминдерді ғылыми қағидаларға сай келеді деп кітапқа енгізуі және күндізгі бөлімдердегі студенттермен бірге сырттай оқитын студенттердің де пайдаланатындығы ескеріліп, теориялық мәселелер мүмкіндігінше қарапайым тілмен түсіндірілген. Теориялық тұжырымдардың инженерлік тәжірибеде қолдану амалдары көрсетілген.

Бұл оқулық – автордың бірнеше жылдар бойы жоғары оқу орындарының студенттерімен жүргізген еңбектерінің және Ресей энергетикалық, электротехникалық университеттерінде өткен стажировкаларының нәтижесі.

Техникалық жоғары оқу орындарында осы оқулықтар кеңінен пайдаланылады.

Кіріспе

Электротехника – электр және магнит құбылыстарын іс жүзінде қолданатын ғылым, ал электроэнергетика – еліміздің экономикасының басты саласы. Ол ғылыми техникалық прогресстің және барлық өндіріс салаларының қарқынды түрде дамуында белгілі рөл атқарады. Электротехника осы замандағы қоғамның барлық маңызды салаларында қолданылады. Электр энергияның ерекшелігі: оның энергияны аз шығынмен алыс қашықтыққа беруі, оңай түрлендірілуі, әр түрлі қуаты бар қабылдағыштарға жеңіл таралуы және оны пайдаланғандағы ерекше үнемділігі.

Электр энергиясы қазіргі қоғамның барлық салаларында қолданылады. Энергиялардың басқа түрлеріне қарағанда электроэнергияның төмендегідей ерекше қасиеттерін көрсетуге болады:

а) энергияның басқа (механикалық, жарық, жылу, химиялық, т.б) түрлеріне жеңіл түрлендіріледі.

б) алыс қашықтыққа жоғары П.Ә.К-мен оңай түрде энергия беру және оны тұтынушыларға жеңіл таратуы;

в) басқа энергия түрлеріне қалтықсыз ауыстырылуы;

г) түрлі қуаттағы қондырғыларды бір қуат көзіне қосу мүмкінділігі;

д) кернеу не тоқ параметрлерінің оңай түрде өзгертілуі;

е) алыс қашықтыққа сигналдарды(телефон, телеграф, радиотехника) іс жүзінде тез жеткізу мүмкіндігі.

Электр энергияның осы қасиеттері тарихи өте қысқа уақытта, тек электроэнергияның негізгі сұрақтарын шешуге ғана емес, сонымен қатар «электр емес техниканың» жанғыртылуына, электр құралдары көмегімен бақылау және басқаруды жаңа сапалы деңгейге көтеруге мүмкіндік береді. Электротехниканың ғылыми базасы арқылы электротехника, радиотехника, түрлі электротехникалық және электромеханикалық қондырғылардың өндірісі, соның ішінде есептеу техникасы дамыды.

Электротехниканың пайда болуы, тұрақты тоқ көзінің шығару кезеңі ХІХ ғ. басы болып саналды және осыған жалғас ашылған электр мен магнетизм саласындағы жаңалықтар жатады. Электрлік және магниттік құбылыстар ерте заманнан белгілі болған, ал бұл құбылыстар туралы ғылыми дамуының басталуы

1600 жыл екендігі ағылшын физигі Гильберт электрлік және магниттік құбылыстарды зерттеп, оның қортындысы жарық көргеннен кейін қабылданған. Электр туралы ғылымның дамуының маңызды баспалдағы электр табиғатының құбылысын М. В. Ломаносов, Г. В. Рихман, Б. Франклин, Ш. О. Кулон және басқалардың зерттеп тапқан жұмыстарының нәтижесі болды.

Электротехниканың дамып аяқ басуына, бірінші үздіксіз ток көзінің – вольт бағанасының (А. Вольт, 1800 ж.), одан кейін неғұрлым жетілдірілген гальваникалық элементтердің пайда болуының шешуші маңызы болды. Бұл XIX ғасырдың алғашқы жылдарында электр энергиясының әсерінен химиялық, жылу, жарық және магниттік құбылыстарға көптеген зерттеулер жүргізуге ықпал етті. Осы кезеңде электр зарядтарының өзара әсерін оқып зерттейтін электродинамиканың негізі қаланды. Ол өзіне бірқатар жекелей және неғұрлым қарапайым жағдайдағы қозғалмайтын зарядтардың өзара әсері туралы электростатиканы кіргізеді. Қозғалыстағы зарядтардың арасындағы қарым-қатынасты, электрлік және магниттік өріс түсінігі арқылы түсіндіруге болады, оны бір-бірінен бөліп алуға болмайды.

Электр және магниттік құбылыстардың өзара байланыстары өткен ғасырдың 20-шы жылдары орнатылды, А. М. Ампер мен Х. К. Эрстед, электр тоғы бар болса, магнит өрісінің пайда болатындығын дәлелдеген. Электр және магнит өрістерінің байланысын ақырғы дәлелдеп – растаған М. Фарадей, ол (1831-1832 ж.ж) электромагниті индукция құбылысын ашқан. Олардың дамуына мүмкіндік тудырған - индукциялы токтар бағыттары заңы, ЭҚҚ қарсы зерттеулер және зәкір ықпалы, электр және магнит тізбектері есептеу

Электромагнитті өріс теориясын математикалық формасында 1873 ж. Дж. К. Максвелл құрады. Оның электромагниті толқындар туралы көріністі ашуы тәжірибеде Г.Р. Герц жұмыстарымен дәлелденді, 1895 ж. А. С. Павловқа сымсыз электр сигналын беруге жағдай туғызды. Электротехниканың жаңа бөлігі – радиотехника пайда болады.

Электр тоғының химиялық әсерін зерттеу гальванотехниканың пайда болуына әкелді, ал электр энергияны жарыққа айналдыру – жарық техникасын туғызды. Электр жарығының кеңінен таралуы электроэнергетика жүйесінің құралуымен байланысты. П. Н. Яблочковтың бірінші жарықтандыру құрылғы-

ларында энергия жүйесінің барлық негізгі элементтері болды: алғашқы қолзғалтқыш, генератор, электр тоғын беретін желі, трансформатор, энергия қабылдағыш. Термоэлектронды эмиссия және жартылай өткізгіштің электр қасиеттерінің ашылуы электрониканың негізін құрады. Электр сигналдарын сымдармен беру, телефон мен телеграф байланыстарының негізі болды.

XIX ғасырдың 70-80 жж. электр энергиясын технологиялық үдерістерде қолдану басталды: алюминий, жоғарғы сапалы болат, мыс, мырыш табуда, металдарды кесу мен дәнекерлеу, термиялық өңдеу арқылы бөлшектерді қатайту және т.б.

Дуғалы электр пісіру әдісін Н. Н. Бенардес (1885 ж.) және Н. Г. Славянов (1892 ж.) ұсынды.

Үш фазалы тоқтар жүйесінің пайда болуы (М. О. Доливо-Добровольский, 1891 ж.) электротехниканың дамуының жалғасы болды, ал үш фазалы асинхронды қозғалтқыш өнербасы электр жетегінің пайда болуына әсер етті. Үш фазалы жүйенің тәжірибеде қолдануы, электротехниканың қазіргі кездегі дамуының негізі болады.

Ол өндірістің электрлендіру деңгейінің өсуімен сипатталады: агроөндіріс кешенінің, көлік және өндірістік емес тұрмыстық орталар (денсаулық сақтау, сауда, т.б)

Электротехникалық құрылғыларды жетілдіруге ғылыми пәндердің қалыптасуы әсер етті, олар: жоғарғы кернеу техникасы, электр тізбек теориясы, электр машиналар теориясы, электр жетегі, электротехника жетістіктері, радиотехника, электроника, телемеханика, кибернетика, т.б. дамуына маңызды ықпал етті.

XX ғасырдың басында электротехниканың теориялық негіздері, физика курсынан, дербес пән ретінде бөлінді. 1904 ж. Петербургтің политехникалық институтының профессоры В.Ф. Миткевич “электр және магнитті құбылыс теориясы” курсынан дәріс беруді бастады (электротехника теориясы мен физикалық негізін қалаушы). 1905 ж. Москваның жоғарғы техникалық училищесінің профессоры К.А. Круг “ауыспалы тоқтар теориясы” курсынан оқи бастады. “Электротехника негіздері” оқулығы белгілі (т.1-2, 6 изд.1946 г.). Алға қарай бұл теориялық пәндер, жаңа физикалық ойларға, электромагнитті құбылыстарды зерттеудің жаңа әдістеріне сәйкес дамыды, жаңа “Электротехника теориялық негіздері” пәні пайда болды (ЭТН).

ЭТН пәнінің мақсаты – электромагнитті құбылысты сапалы мен санды түрінде және түрлі электротехникалық құрылғылардағы үдерістерді оқып білу және есептер шешімінің жолын белгілеу, арнайы электротехникалық пәндерде пайда болуы. Сондықтан ЭТН-ды, электротехникалық және радиотехникалық мамандар дайындаудың іргетасы деп атайды.

Түсініктемелер

A – төртұштының параметрі; үш фазалы тізбек фазасының белгіленуі;

a – фазалық оператор – e^{j120° ;

B – төртұштының параметрі, үш фазалы тізбек фазасының белгіленуі; магнит индукциясының векторы; $B\bar{\sigma}/m^2$

b – реактивті өткізгіштік; См

b_C – сыйымдылықты өткізгіш; См

b_L – индуктивті өткізгіш; См

C – электр сыйымдылығы; Ф: үш фазалы тізбек фазасының белгіленуі; төртұшты параметрі;

c – жарық жылдамдығы (=300000 км/сек);

E – тұрақты электр қозғалтқыш күші;(ЭҚК); айнымалы ЭҚК әсерлік мәні; электр өрісі кернеулігінің векторы; В

\dot{E} – ЭҚК-кешенді мәні; В

Em – ЭҚК-амплитуда мәні; В

e – синусоидалы ЭҚК лездік мәні; В; натуралды логарифмнің негізі ($\approx 2,718$) ;

F(j ω) – спектралды функция;

F(p) – функцияның Лаплас бойынша бейнеленуі; комплексі жиілігі функциясы;

f – периодты функциясының жиілігі; Гц

G – төртұшты параметрі;

g – активті өткізгіш; См

H – төртұшты параметрі;

I – тұрақты ток; синусоидалы токтың әсерлік мәні; А

\dot{I} – кешенді ток; А

Im - синусоидалды токтың амплитудалық мәні; А

I – синусоидалды токтың лездік мәні; А

Ki – ток арқылы беру коэффициенті;

Ku – кернеу арқылы беру коэффициенті;
 L – индуктивтілік; Гн
 L_S – таралған индуктивтілік; Гн
 m – сүзгіш тұрақтылығы, айнымалы шама амплитуда индексі
 M – өзара индуктивтілік; Гн
 P – активті қуат; Вт
 p – активті қуаттың лездік мәні; Вт
 Q – реактивті қуат, ВАР; ізгілік (добротность) коэффициенті;
 q – электр заряды; Кулон; активті өткізгіш; См
 R – активті кедергі; Ом
 S – толық қуат; Ва; көлденең кесіктің ауданы; м²
 T – тербеліс периоды; сек
 t – уақыт координаты; сек
 U – тұрақты кернеу; айнымалы кернеудің әсерлік мәні; В
 u – кернеудің лездік мәні; В
 W – активті энергия; Дж
 w – орам саны; лездік энергия; Дж
 X_C – реактивті сымдылық кедергі; Ом
 X_L – реактивті индуктивты кедергі; Ом
 X_M – өзара индуктивтілік кедергісі; Ом – кешендік өткізгіштік; См ; төртұшты параметрі;
 $Y(p)$ – операторлық өткізгіш; См
 Z – кешендік кедергі; Ом ; төртұшты параметрі;
 Z_B – желінің кешенді толқынды кедергісі; Ом
 Z_c – мінездемелі кедергі; Ом
 Z_{ii} – **i** -түйіндік немесе контур кіріс кедергісі; Ом
 Z_{ki} – **i** не **k** түйіннің не контурдың берілетін кедергісі; Ом
 $Z(ik)$ – **i** және **k** контурлардың жалпы кедергісі; Ом
 $Z(p)$ – жинақталған (операторлық) кедергі; Ом
 Z – толық кедергі (комплексті толық кедергі модулі); Ом
 α – желінің әлсіреу коэффициенті; 1/м
 β – желі фазасының коэффициенті; 1/м
 γ – желінің таратылу коэффициенті; 1/м
 Δ – теңдеулер жүйесінің анықтағышы;
 Δ_{ik} – **i** жолы мен **k** бағанасының элементтік алгебралық қосындысы;
 ϵ_a – абсолюттік диэлектрикалық өтімділік; $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф / м
 μ_a – абсолютті магниттік өтімділік; ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м)
 λ – толқын ұзындығы; м

ρ – меншікті электр кедергісі; Ом*м; заряд тығыздығы; Кул / м² ;

τ – уақыт; тұрақты уақыт; секунд

Φ – магнит ағымы; Вб

\mathbf{B} – магнит индукцияның векторы; Вб/м²

\mathbf{D} – электр индукция векторы; Кл

Ψ – магнит ағымының ілісуі; Вб

φ – бас фаза ; градус

1, 2, 0 – тікелей, керісінше және нөлдік реттілікті білдіретін индекстер;

ВАС – вольт ампер сипаттамасы;

K_a – амплитуда коэффициент;

K_ϕ – форма коэффициент;

$\cos \varphi$ – қуат коэффициент;

Бөлікті және еселі бірліктеріне қосымшалар

Қосымшаның аты	Белгіленуі	Негізгі бірлікке қатынас	Қосымшаның аты	Белгіленуі	Негізгі бірлікке қатынас
Пико	п	10 ⁻¹²	Сант	с	10 ⁻²
Нано	н	10 ⁻⁹	Гекто	г	10 ²
Микро	мк	10 ⁻⁶	Кило	к	10 ³
Милли	м	10 ⁻³	Мега	М	10 ⁶

СИ жүйесіндегі электр және магнитті шамаларының өлшемдері

№	Шама	Өлшем	
		аттары	белгіленуі
1	Ток	Ампер	А
2	Заряд	Кулон	Кл
3	Әлеует, кернеу, ЭҚК	Вольт	В
4	Электр өрісінің кернеулігі	Вольт/метр	В/м
5	Кедергі	Ом	Ом
6	Сыйымдылық	Фарада	Ф
7	Магнит ағымы	Вебер	Вб
8	Магнит индукциясы	Тесла	Т
9	Индукциялық	Генри	Г
10	Магнит қозғауыш күш	Ампер	А
11	Магниттік өрісті кернеулік	Ампер/метр	А/м
12	Энергия	Джоуль	Дж
13	Күш	Ватт	Вт

БІРІНШІ БӨЛІМ

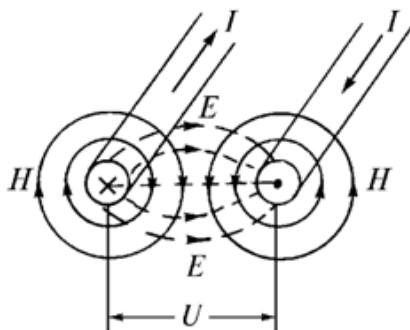
I ТАРАУ

1. Тұрақты тоқ сызықты электр тізбегі

1.1 Электр тізбегін сипаттайтын негізгі шамалар

1.1.1 Электр өрісінің кернеулігі

Электр өрісінің ауыспалы магнитті өрісінен және магнит өрісінің ауыспалы электр өрісінен пайда болуы электр және магнит өрісінің жеке, бір-біріне қатынассыз пайда бола алмайтынын көрсетті. Оны тоқ беретін желі мысалынан көруге болады (1.1-сурет).



1.1-сурет

Электр энергиясын бергенде бір-бірінен бөлек тұрған сымдарда U кернеуі пайда болады. Сол себептен, сымдардың арасында, пунктирмен көрсетілген күш желілеріндегі E кернеулігі бар электр өрісі пайда болады. бағыты сызығы. Сымдарда I тоғы өткендіктен суретте тұтас сызықпен көрсетілгендей, олардың ішінде де, сыртында да, H кернеулігі бар магнит өрісі пайда болады.

1.1-суреттен, электр және магнит өрісінің айырмашылығын анық көруге болады:

- магнит күш сызықтары тұйықталған олардың басы да, аяғы да жоқ.
- электр өрісінің күш сызықтары тұйықталмаған олар зарядталған сымнан басталып аяқталады;

Электр өрісінің жәй көрінісі қозғалмайтын электр зарядтар өрісі болады, ол электростатикалық деп аталады.

Электростатикалық өрісінің әр нүктесі E кернеулігі векторымен сипатталады. Электр өрісінің кернеулігі дегеніміз – нүктеде орналасқан нүкте зарядына өріспен әсер ететін F

механикалық күш пен осы зарядтың қатынасы. Электр өрісінің кернеулік вектор бағыты күш векторымен бірыңғай беттеседі. Сондықтан,

$$\underline{E} = \frac{\underline{F}}{q_0} \left[\frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м.Кл}} = \frac{A \cdot B \cdot C}{M \cdot A \cdot C} = \frac{B}{\text{м}} \right]. \quad (1.1)$$

Нүктелі заряд деп зарядталған денені айтамыз, оның сызықты өлшемдері өте аз, сондықтан заряды зерттеп жатқан өріске әсер етпейді.

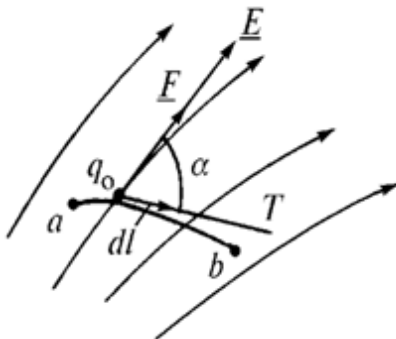
Егерде $q_0 = 1$, то $\underline{E} = \underline{F}$ болса. Бұдан, электр өрісінің кернеулігі сан бойынша өріс күшіне тең, бір электр зарядына әрекет ететін кернеулік векторының бағыты, оң зарядты бөлігіне әрекет ететін күш бағытымен теңеседі.

Егерде, өрістің барлық нүктесінде кернеулігі бірдей болса, онда электр өрісін **біртекті** деп атайды.

1.1.2 Электр әлеуеті және кернеу

Электр өрісінің күшінің әсерінен зарядталған бөліктер жылжығанда, электр өрісінің энергиясының өзгеруі арқылы жұмыс өндіріледі.

Мысалы, оң зарядты бөлік, электр өрісінде a нүктесінен b нүктесіне белгілі жолмен жылжыды дейік (1.2-сурет).



1.2-сурет

$\underline{F} = q_0 \underline{E}$ күші, өріс жақтан бөлікке әсер ететін, жолдың әр нүктесіне, кернеулік өрісінің сызығына бағытталған, сол нүктеден өтіп E -ге бағытталған.

$a - b$ күшімен осы нүкте траекториясындағы T – ға сүйкелудің оң бағытын E мен $d\ell$ арасындағы бұрышы деп есептейміз.

Бөлшек жылжуына қарай бағытталған $d\ell$ векторды $d\ell$ элементіне тең деп белгілейміз.

Зарядталған бөлік ℓ жолымен жылжығанда өріс күші жұмыс жасайды:

$$dA = F D l \cos \alpha = q_0 E D l \cos \alpha = q_0 \underline{E D l}. \quad (1.2)$$

Өріс күшімен жасалатын жұмыс, бөліктің a нүктесінен b нүктесіне жылжығанда:

$$A = \int_a^b F \cos \alpha dl = \int_a^b E q_0 \cos \alpha dl = q_0 \int_a^b \underline{E dl}. \quad (1.3)$$

Жұмысты Джоулмен [Дж] өлшейді. Электр өрісі әр нүктеде әлеуетті энергияны иемденеді, немесе жұмыс жасау қабілеттімен көрінеді. Бұл қабілеттілік әлеуетті функциямен анықталады, яғни φ әлеуетімен, ол скалярлы бөлігі болып келеді. Бір өлшем зарядты осы нүктеден шексіздікке жылжитқандағы, яғни өріс сыртына шыққандағы ($\varphi_b = 0$) жұмысты айтады.

$$\varphi_a = \frac{A_a}{q_0} = \int_a^{\infty} \underline{E dl} \text{ [В]}. \quad (1.4)$$

Электростатика нақты есептерінде, жер бетінің әлеуетін нөлге тең деп алады. Зарядталған нәрсе, кеңістіктің шектеулі аймағында орналасса және шексіз диэлектрикалық ортамен қоршаулы болса, нүкте әлеуеттерін нөлге тең деп алады, зарядталған нәрседен шексіз қашықталған. q зарядтан қашықтағы өрістің кез келген нүктесіндегі әлеует, келесі формуламен анықталады:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi R \varepsilon_a}, \quad (1.5)$$

R - нүкте мен заряд арақашықтығы

ε_a - заттың абсолюттік диэлектрикалық өтімділігі.

Электр өрісінің күшімен нүктелі зарядті a нүктесінен b нүктесіне жылжитқанда, төмендегідей жұмыс жасалады:

$$A_{ab} = A_a - A_b = \varphi_a q_0 - \varphi_b q_0 = q_0 (\varphi_a - \varphi_b). \quad (1.6)$$

Сондықтан, жұмыс электр әлеуетінің айырылымына пропорционал болады. Электр өрісінің екі нүктесінің әлеуетінің айырылымын, **электр кернеуі** деп аталады:

$$u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \frac{A_{ab}}{q_0} = \int_a^b \frac{E dl}{a} \quad [\text{В}]. \quad (1.7)$$

Сонымен, электр кернеуі дегеніміз – бір өлшем зарядты өрістің бір нүктесінең екінші нүктеге жылжытқандағы жұмыстың шығыны.

Кернеу-скалярлы шама, оның мәні арасынан анықталатын нүктелердің орналасуына байланысты, бірақ, заряд жылжитын жолдарына байланысты емес.

Біркелкі электр өрісінің кернеулігі мен әлеует, a және b айырылымы араларындағы байланысы нүктелерінің арақашықтығы d болса, мына формуламен көрсетіледі:

$$u_{ab} = Ed. \quad (1.8)$$

1.1.3 Электр тоғы. Ток тығыздығы

Электр өрісінің әсерімен электр зарядтарының еркін тасушылар бағытты жүрістері **электр тоғы** деп аталады. Электр тоғы сан түрінде Δq заряд қатынасының шегіне тең, Δt уақыт арасында, белгілі бір кеңістіктен өтіп, нөлге жетуге тырысады, яғни:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}. \quad (1.9)$$

Электр тоғы уақытымен өзгермесе, **тұрақты ток** деп аталады, ал уақытымен өзгерсе, **айнымалы ток** болады. Тұрақты ток мағынасы, электр немесе заряд санымен анықталады, 1с өткізгіштің көлденең кесігінен өтетін:

$$I = \frac{Q}{t} \left[\frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А} \right]. \quad (1.10)$$

Шексіз ұзындығы мен кесігі бар екі қатарлы өткізгіштен өтетін арақатынас күші $2 \cdot 10^{-7}$ Н тең, әр метр ұзындыққа, өзара

кашықтығы 1м вакуумде орналасқан, өткізгіштерден өтетін өзгермейтін тоқты – **ампер** дейміз.

Электр тоғының оң бағыты электр энергия қорек көзінің плюсінен минусқа бағытталған оң зарядтың жылжу шартты бағытын есептейді. Схемада, ол нускамен көрсетілген.

Электр тоғының үздіксіз жүру шарттары мыналар:

1) Зарядтар арасындағы әлеуеттер айырымын сүйеп тұратын қорек көзінің болуы.

2) Заряд жүретін жолдардың тұйықталуы.

Тоқты амперметрмен өлшейді. Сымдардың электр токпен жүктелуін білу үшін **тоқ тығыздығы** ұғымы қолданылады.

Тоқ тығыздығы дегеніміз – векторлы шамасы элементтер үстінен өтетін тоқ қатынасының шегіне тең, осы элементке бағытталған зарядталған бөлік жүрісіне сәйкес үдеріс, ол нөлге жетуге тырысады:

$$\underline{\delta} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \left[\frac{\Delta i}{\Delta s} \right]. \quad (1.11)$$

Тоқ тығыздығының шет мөлшері, мысалы электр машинасының орамасының сымындағы тығыздық 3...7 А/мм². Егерде тоқ өткізгіш кесігінде біркелкі тараса, онда тоқ тығыздығын табу формуласы мынадай:

$$\delta = \frac{I}{s}. \quad (1.12)$$

1.2 Электр тізбек элементтері

Біріккен қорек көзін, электр энергиясының қабалдағыштарын және оларды қосатын сымдарды **электр тізбегі** деп атайды. **Электр энергиясының қорек көзі** – түрлі энергияларды электр энергиясына айналдыратын құрылғылар болады. Айналдыратын энергия түріне қарай электр энергия қорек көзі химиялық және физикалыққа бөлінеді. Электр энергияның химиялық қорек көзі деп, химиялық реагентер арасындағы тотықтандырып – қалпына келтіру үдерісі арқылы электр энергиясын шығаратын құрылғыларды айтады.

Химиялық қорек көзіне жататындар: алдыңғы (гальваникалық элементтер және батареялар) қайталанатын (аккумуляторлар және аккумулятор батареялары), және электрохимиялық генераторлар (отынды элементтер).

Электр энергияның физикалық қорек көзі деп, механикалық, жылулық, электромагнитті, жарықты, радиация сәулесін (излучение) ядролық ыдырауын және басқа да энергияларды электр энергиясына айналдыратын құрылғыларды айтады. Физикалық қорек көзіне жататындар: электромашиналы генераторлар (турбо, гидро және дизель генераторы), термо-электр генераторы, термоэмиссиялы түрлендіргіштер, МГД-генераторлар, және күн сәулесін және атом ыдырау энергияларын түрлендіргіш генераторлар.

Электр энергия қабылдағыштары (электр қозғалтқыштар, электр пеші, қыздыратын құралдар, жарық шамы, резисторлар т.б.) электр энергиясын, энергияның басқа түріне түрлендіреді.

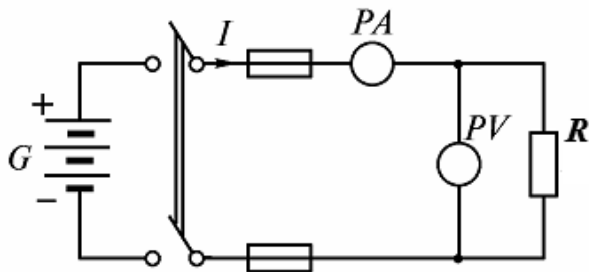
Электр тізбекке кіретіндер:

а) коммутациялы аппараттар, электр жабдықтары мен құрылғыларды қосатын және айыратын құралдар;

б) бақылап-өлшейтін құралдар (амперметр, вольтметр т.б.);

в) қорғаныс аппараттар (балқытылу қорғанышы, автоматтар).

Электр тізбегінің графикалық көрінісі нақты элементтері шартты белгімен берілген (1.3-сурет), ол электр сұлбасы деп аталады. Сұлбадағы жалпы шартты белгілер: G -қорек көзі, $P(PA, PV)$ және т.б.)-өлшейтін құралдар, R -энергия қабылдағыш электр тізбегінің үдерісін талдауын жеңілдету үшін оны есепті сұлбамен алмастырады, осы алмасу сұлбасындағы электр энергиясының қорек көздері, резисторлар, индуктивті катушкалар, конденсаторлары бар элементтер.



1.3-сурет

Кез келген энергияны электр энергиясына айналдырған қорек көзінде электр қозғалтқыш күші (ЭҚК) пайда болды. Электр қозғалтқыш күші (ЭҚК) E , тұрақты және айнымалы тоқ қорек көзіндегі электр емес күш әсерін сипаттайды. Электр емес күштер электр энергиясы қорек көзінің ішіндегі зарядталған бөлшектерді қимылдатады. Тұйықталған өткізгіш контурда, ол бір оң зарядтың осы контурда жылжыған жұмыс күшіне тең. Электр емес күштер, электр энергия қорек көзінің ішінде зарядталған бөлшектерді қимылдатады: генераторларда, гальваникалық элементтерде және т.б.

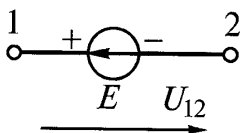
ЭҚК, қайнар көзінің ішіндегі зарядталған бөлшектерді жылжытатын электр емес күштер жұмысының A , соның зарядына қатынасы түрінде анықталады:

$$E = \frac{A_n}{q} \quad (1.13)$$

Егерде $q = 1$ Кл болса, $E = A_n$

Сол себептен, ЭҚК санды түрде, әлеуеттер немесе кернеу V алымына тең, 1 және 2 энергия қорек көзінің оң және теріс қысқыштар арасында, онда тоқтың жоқ кезінде (1.14)

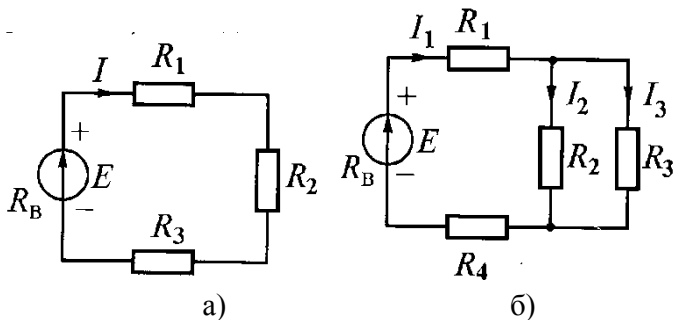
$$E = \phi_1 - \phi_2 = U_{12} \quad (1.14)$$



1.4-сурет

Тұйықталған электр тізбекте ЭҚК әсерімен I тоғы пайда болады. Тізбек, тоқ уақытымен өзгермесе, тұрақты тоқ тізбегі болады. Электр тізбегі тармақталған және тармақталмаған болады.

Егерде, тізбектің барлық саласында тоқ бірдей болса, тармақталмаған деп аталады (1.5 а-сурет). Тармақталған тізбектің әр тармағында өз тоғы жүреді (1.5 б-сурет).



1.5-сурет

Схеманың геометриялық конфигурациясында келесі түсініктер бар: тармақ, түйін, контур.

Тармақ – бірдей тоқ өтетін электр тізбек саласы.

Түйін – электр тізбектегі тармақтардың қосылған жері (үштен кем емес)

Контур – тармақтар мен түйіндерден пайда болған тұйықталған жол.

1.3 Ом заңы

1827 жылы неміс физигі Г. Ом бір неше тәжірибе өткізіп, электр тоғының негізгі заңын шығарды: «Гальваникалық тізбектің тоқ шамасы, кернеу сомасына пропорционалды және берілген ұзындық жиынына кері пропорционалды» (“берілген ұзындық” дегеніміз сыртқы тізбек кедергісі) Ом заңы екі түрде жазылады: дифференциалды және интегралды.

Дифференциалды түрі тоқ тығыздығы $\underline{\delta}$ және өріс кернеулігі \underline{E} арасындағы байланысты көрсетеді, өткізетін ортада γ мөлшерлі өткізгіштің формуласы:

$$\underline{\delta} = \gamma \underline{E}. \quad (1.15)$$

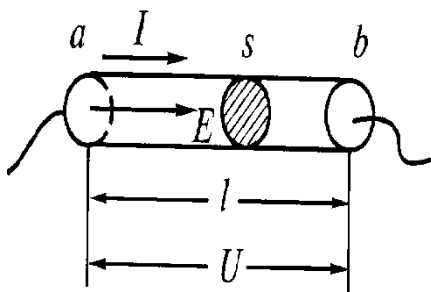
Өткізетін ортадағы кез келген нүктедегі тоқ тығыздығы, сол нүктедегі электр өрісінің кернеулігіне пропорционалды. Тоқ тығыздығының сызық бағыты өріс кернеулігінің сызық бағытымен сәйкес.

Мөлшерлі өткізгіштік өлшемі:

$$[\gamma] = \left[\frac{\delta}{E} \right] = \frac{\frac{A}{\text{ММ}^2}}{\frac{\text{М}}{\text{М}}} = \frac{1}{\text{ОМ} \cdot \text{М}}$$

Тұрақты кесімі S бар тік сызықты өткізгішті қарастырамыз (1.6-сурет)

$$I = \delta s = \gamma E s = \gamma \frac{U}{l} s = \frac{U}{\frac{l}{\gamma s}} = \frac{U}{R}. \quad (1.16)$$



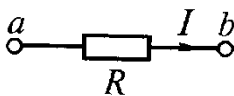
1.6-сурет

Бұл ЭҚК жоқ тізбек саласындағы Ом заңының екінші жазу түрі. Оның тұжырымы мынадай: өткізгіштегі токтың, өткізгіш саласындағы кернеудің электр кедергісіне қатынасы:

$$[R] = \left[\frac{U}{I} \right] = \frac{B}{A} = \text{ОМ}$$

Электр кедергісі R ұзындық l -ға тура пропорционалды, өткізгіштің көлденең кесігінің ауданына S кері пропорционалды:

$$R = \frac{l}{\gamma S}$$



1.7-сурет

1.7-суретте тізбек саласы көрсетілген шеткі нүктелері a, b мен белгіленген. Тоқ бағыты $I, \varphi_a > \varphi_b$. Сондықтан

$$u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b. \quad (1.17)$$

Сонымен кедергі – тізбектің өткізгіштік мағынасын сипаттайтын скалярлы шама, ол тізбек саласындағы тұрақты кернеудің салада ЭҚК жоқ кездегі тоқ қатынасына тең:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (1.18)$$

Кедергі – тізбектің осы саласындағы энергияның өзгеруін көрсететін шама.

Кедергіге керісінше шама **өткізгіштік** деп аталады:

$$g = \frac{I}{R}. \quad (1.19)$$

Өткізгіштілік өлшемі – Сименс. $1 \text{ см} = 1/\text{Ом}$

Мөлшерлі кедергі:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} [\text{Ом} \cdot \text{м}] \quad (1.20)$$

Сонда,

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (1.21)$$

Мөлшерлі кедергі барлық материалдарларға тәжірибе түрінде анықталған анықтамаларда келтіріледі.

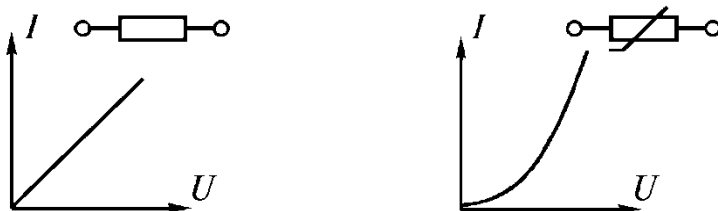
Көп мөлшерлі кедергісі бар қорытпадан (нихром, фехраль және т.б.) реостат және қыздырғыш құралдар орамасы дайындалады.

Тоқты шектейтін және реттейтін электр тізбекке қосылған құрылғылар, **айнымалы резисторлар** деп аталады.

Резистор тоғы I -дың, берілген кернеуі U -ға тәуелділігі вольт-амперлі сипаттама (ВАС) деп аталады

Егер де, резистор кедергісі, тоққа бағышты болмаса, ВАС координат басынан өтетін тіке сызық болады (1.8-сурет). Бұндай

резистор **сызықты** деп аталады. Егер, ВАС тік сызықты болмаса, резисторлар **сызықты емес** деп аталады



1.8-сурет

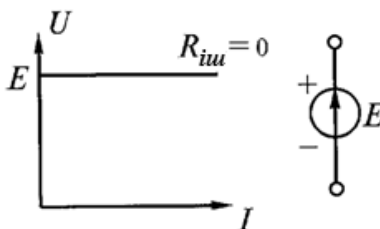
Сызықты элементтері бар электр тізбегі **сызықты** деп аталады. Егер де, тізбекте бір сызықты емес элемент болса, тізбек **сызықты емес** деп аталады.

Нақты электр тізбектерінің көбі сызықтыға жатады. Сондықтан сызықты электр тізбегінің есептеу әдісі мен қасиеттерін білумен қатар, оның практикалық маңызы бар.

1.4 ЭҚК қорек көзі және тоқ қорек көзі

Электр тізбектерін есептеуде және талдауда энергия қорек көзін эквиваленті ЭҚК қорек көзі немесе тоқ қорек көзі ретінде елестетеміз.

Мінсіз ЭҚК қорек көзі (1.9-суретте берілген) ЭҚК-сы өтетін тоққа байланысты емес, ал энергия қорек көзінің ішкі кедергісі нөлге тең.

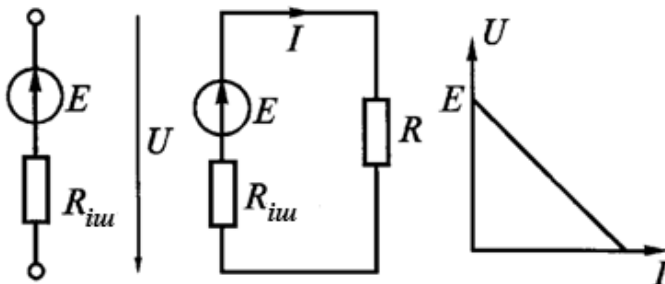


1.9-сурет

1.9-сурет. Мінсіз ЭҚК қорек көзінің вольт-амперлі сипаттамасы (ВАС) мен шартты белгілері көрсетілген.

Қорек көзінің ЭҚК оң бағытына сол қорек көзінің ішіндегі әлеует өсуінің бағыты алынады.

Ішкі кедергі $R_{iш}$, қорек көзінің шығаратын энергиясының бөлігінің ішінде жоғалатынын көрсетеді. Нақты қорек көзінің алмастыру сұлбасы ($R_{iш} \neq 0$), ЭҚК-ның мінсіз қорек көзі және сыртына шыққан ішкі кедергі түрінде көрсетілген. Нақты қорек көзі, кернеу қорек көзі деп аталады. Оның шартты белгілері мен вольт-амперлі сипаттамасы 1.10-суретте көрсетілген.



1.10-сурет

Нақты қорек көзді тізбектегі ток Ом заңымен анықталады:

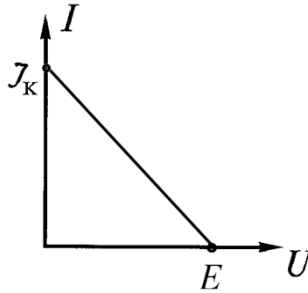
$$I = \frac{E}{R + R_{iш}} \quad (1.22)$$

Ішкі кедергінің электр тізбектегі токқа әсер ететінін соңғы формуладан көруге болады .

Қорек көзінің шығысындағы немесе жүктемедегі кернеу мына формуламен анықталады (1.10-сурет):

$$U = IR = \frac{ER}{R + R_{iш}} = E - IR_{iш} \quad (1.23)$$

Нақты қорек көзіндегі ВАС-ты екі тәжірибе мәліметі бойынша салуға болады.



1.11-сурет

Бос жүріс кезінде:

$$R=\infty; I=0; U=E$$

Қысқа тұйықталу кезінде:

$$R=0; U=0; I_k = \frac{E}{R_{iш}}$$

Тоқ қорек көзі деп электр энергияның мінсіз қорек көзін айтамыз, тізбекте J тоғын тудыратын, R жүктемеге байланысты емес және нақты қорек көзінің ЭҚК-ның ішкі кедергіге бөлінгеніне тең:

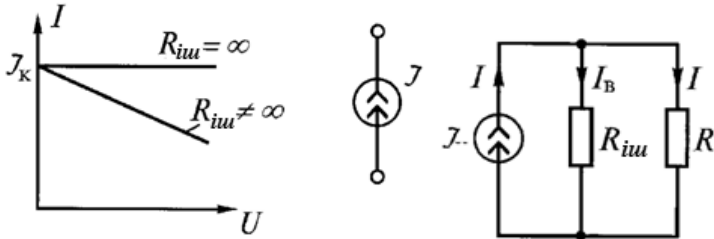
$$I_k = \frac{E}{R_{iш}} \quad (1.24)$$

Тұрақты тоқ J мен қамтамсыз ету үшін, R жүктеме кедергісіне байланысты емес, келесі шарттарды орындау керек:

А) $R_{iш} \rightarrow \infty$;

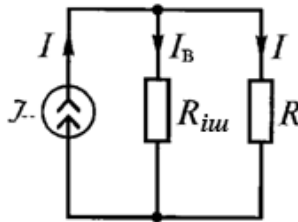
Б) $E \rightarrow \infty$; мінсіз тоқ қорек көзінен, егер де ішкі кедергісін $R_{iш}$ қатарластырып жүктеме кедергісіне қосса нақты қорек көзін табуға болады.

Тоқ қорек көзінің ВАС 1.12 суретте көрсетілген (1-мінсіз, 2-нақты).



1.12-сурет

Тоқтың нақты қорек көзі алмастыру сұлбасы 1.13-суретте берілген.



1.13-сурет

Жүктемедегі ток:

$$I = J \frac{R_{iш}}{R + R_{iш}} = \frac{ER_{iш}}{R_{iш}(R + R_{iш})} = \frac{E}{R + R_{iш}} \quad (1.25)$$

Сондықтан, тізбекті есептеуде, ток қорек көзін ЭҚК қорек көзімен және керісінше алмастыруға болады. Қорек көзінің екі сұлбасы да теңдес.

Қорек көзінің эквивалентілігі, екі шарт орындалғанда жүзеге асады:

- а) бос жүрістегі кернеу тепе-теңдігі;
- б) қысқа тұйықталудағы ток тепе-теңдігі.

1.5. ЭҚК-сы бар тізбек саласының Ом заңы

Резистор және ЭҚК-сы бар тізбек саласын қарастырайық (1.14-сурет)



1.14-сурет

a мен c нүкте арасындағы әлеуеттер алымы формуласы

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c. \quad (1.26)$$

a нүктесінің әлеуетін c нүктесінің әлеуеті деп аламыз. Осы мақсатпен, b нүктесінің әлеуетін c нүктесінің әлеуеті деп аламыз. Сосын a нүктесінің әлеуетін, b нүктесінің әлеуеті деп аламыз (тоқ үлкен әлеуетті нүктеден кішкентай әлеуетті нүктеге өтеді деп және ЭҚК бағыты әлеует өсуін көрсетеді деп есептейміз)

1.14 а-сурет сұлбасына: $\varphi_b = \varphi_c - E$; $\varphi_a = \varphi_b + IR$ немесе $\varphi_a = \varphi_c - E + IR$. Сонда

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = IR - E. \quad (1.27)$$

Сурет 1.14 б сұлбасына: $\varphi_b = \varphi_c + E$; $\varphi_a = \varphi_b + IR$ немесе $\varphi_a = \varphi_c + E + IR$

Сонда

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = IR + E \quad (1.28)$$

(1.27) теңдеуден а сұлбасына

$$I = \frac{U_{ac} + E}{R}. \quad (1.29)$$

(1.28) теңдеуден б сұлбасына

$$I = \frac{U_{ac} - E}{R}. \quad (1.30)$$

Жалпы жағдайда

$$I = \frac{U_{ac} \pm E}{R}. \quad (1.31)$$

Соңғы теңдеу Ом заңын математикалық формада ЭҚК-сы бар тізбек саласын көрсетеді.

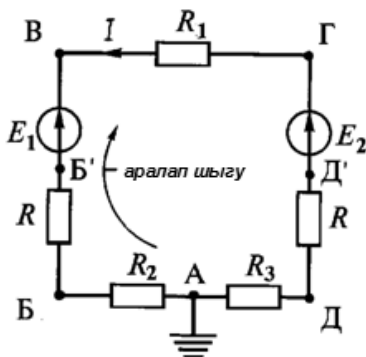
Егер де, ток пен ЭҚК бағыттары сәйкес болса қорек көзі генератор режимінде жұмыс жасайды, яғни, $E > U_{ac}$, және керісінше, $U_{ac} > E$ тұтынушы режимінде.

U_{ac} кернеудің оң бағытын, a дан c нүктеге нұсқар көрсетеді.

$U_{ca} = \varphi_c - \varphi_a = -U_{ac}$ болғандықтан кернеу оң және теріс болуы мүмкін.

1.6 Әлеует диаграммасы

Электр тізбектегі әлеуетті таралу кестесі түрінде көруге болады. Электр тізбек нүктелеріндегі әлеуеттік таралуын анықтауды радиотехникадан көруге болады. Тізбек саласындағы немесе тұйықталған контурдағы әлеует өзгеруінің кестесі **әлеует диаграммасы** деп атайды.



1.15-сурет

Әлеует диаграммасының салуын нақты мысалмен қарастырайық.

(1.15-сурет):

$E_1 = 18 \text{ В}; E_2 = 32 \text{ В}; R = 1 \text{ Ом}; R_1 = 4 \text{ Ом}; R_2 = 3 \text{ Ом};$
 $R_3 = 5 \text{ Ом}.$

1) Тізбектегі тоқты табамыз:

$$I = \frac{E_2 - E_1}{R_1 + R_2 + R_3 + R + R} = \frac{32 - 18}{4 + 3 + 5 + 1 + 1} = 1 \text{ А};$$

2) А - нүктесінің әлеуетін нөл деп аламыз

$$\varphi_A = 0;$$

3) Басқа нүктелер әлеуетін анықтаймыз (контурды аралау жолын табамыз АBB'ГД'ДА)

$$\varphi_B = \varphi_A + IR_2 = 1 \cdot 3 = 3 \text{ В}$$

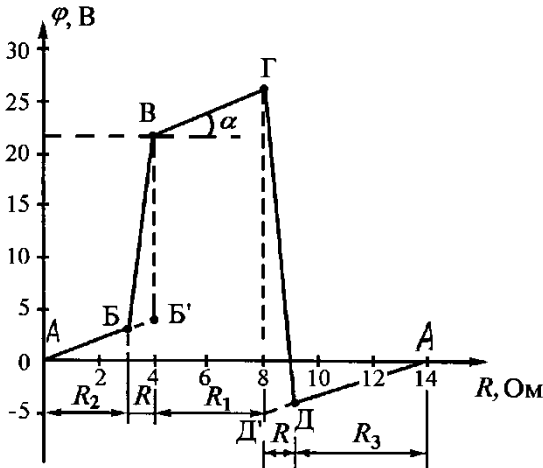
$$\varphi_B = \varphi_B + IR_2 + E_1 = 3 + 1 \cdot 1 + 18 = 22 \text{ В}$$

$$\varphi_\Gamma = \varphi_B + IR_1 = 22 + 1 \cdot 4 = 26 \text{ В}$$

$$\varphi_D = \varphi_\Gamma - E_2 + IR = 26 - 32 + 1 \cdot 1 = -5 \text{ В}$$

$$\text{тексеру: } \varphi_A = \varphi_D + IR_3 = -5 + 5 = 0$$

4) 1.16-суретте ось абсцисіне контур АBB'ГД'ДА-ғы, барлық резисторлар кедергісін саламыз, А нүктеден қозғалғандағы, оның әлеуеті нөлге тең. Бұл нүктені координат басына орнатамыз. Әр нүкте координаты әлеует мағынасы мен резистор кедергісіне сәйкес анықталады



1.16-сурет

Тізбек саласындағы кернеу кедергісінің қатынасы сол саладағы токқа тең және кестеде тангенс бұрышы мағынасымен анықталады, қисаюы тікелей ось абциссіне сәйкес, яғни $tg\alpha \equiv I$. Диаграммада қисаюы бірдей, себебі ток бірдей.

Әлеуетті диаграммдан электр тізбектегі кез келген екі нүкте арасындағы кернеуді табуға болады. Бұл диаграммада қисаюы бірдей, себебі ток бірдей. Әлеуетті диаграммдан электр тізбегінің екі нүкте арасындағы кернеуді табуға болады. Мысалы:

$$U_{BD} = \varphi_B - \varphi_D = 22 - (-5) = 27B$$

$$U_{BG} = \varphi_B - \varphi_G = 3 - 26 = -23B$$

Белгілерге ескерту:

1) Нүкте әлеуеті егер де, ток бағыты салада аралауға қарсы болса, кернеудің құлауына өседі.

2) Нүкте әлеуеті егер де, оның бағыты аралаумен сәйкес болса, ЭҚК мағынасына өседі.

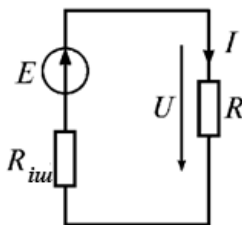
Сонымен, әлеуетті диаграмма салуда келесі деректі ұсынамыз:

- 1) Контур саласында токтың оң бағытын алып, оны анықтау;
- 2) Контурдың аралауын жәй таңдау;
- 3) Кез келген нүкте әлеуетін нөлге тең деп алу;
- 4) Қалған нүктелердің әлеуетін есептеу;
- 5) Нүкте координаттары бойынша әлеуетті диаграмма салу.

1.7. Электр энергиясы және электр қуаты

1.7.1 Электр энергиясы

Жай электр тізбек сұлбасын көрсетейік, ЭҚК қорек көзінен ішкі кедергісі $R_{iш}$ және кедергісі R қабылдағыштан тұратын



1.17-сурет

$I = \frac{E}{R+R_{iiv}}$ - тізбектегі ток ОМ заңымен анықталады

Мұнан $E = IR + IR_{iiv}$

$IR = U$ ескере отырып, табамыз:

$$E = U + IR_{iiv} \quad (1.32)$$

Теңдеудің оң және сол жағын It көбейтеміз

$$EIt = UIt + I^2R_{iiv}t \quad (1.33)$$

$EIt = W_r$ – қорек көзінің энергиясы

$V = \frac{A}{q} = \frac{W}{q}$, $q = It$, $\Delta W I^2 R_{iiv} t$ – болғандықтан

$$W_r = W + \Delta W \quad (1.34)$$

W_r – қорек көзінің ішкі кедергісінің жоғалтатын энергиясы

W – тұтынушының қыздыруына кететін энергия

Жұмыс пен энергия бірдей түсінік. Энергия дегеніміз – заттың жұмыс жасау қабілеті.

Заттың энергиясын өлшеу үшін жұмысты өлшеу қажет, заттың энергия жойып жасайтын. Энергия өлшемі тәжірибеде, 1 шама энергияны $1 \text{кВтч} = 3600000 \text{Дж}$ деп алады.

1.7.2 Электр қуаты

Электр қуаты дегеніміз – электр энергиясының өзгертілуін және берілу жылдамдығын сипаттайтын физикалық шама:

$$P_r = \frac{W_r}{t} = E_r I \quad (1.35)$$

P_r – қорек көзінің шығаратын қуаты.

Қуат өлшем бірлігі – 1 секунда, 1 джоуль жұмысы жасалатын –ватт (Вт), 1ватт-қуат.

Қабылдағышқа (тұтынушыға), энергия қорек көзінен берілетін қуат:

$$P = UI = I^2 R = \frac{I^2}{g} = U^2 g = \frac{U^2}{R}. \quad (1.36)$$

Ішкі кедергідегі қуаттың шығыны

$$\Delta P = I^2 R_{iiv} \quad (1.37)$$

1.7.3 Энергия қорек көзінің пайдалы әрекет коэффициенті (ПӘК)

Қабылдағыш қуатының (P) энергия қорек көзінің қуатына P_{Γ} қатынасы – пайдалы әсерлік коэффициенті деп аталады (ПӘК)

$$\eta = \frac{P}{P_{\Gamma}} = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E} = \frac{IR}{IR+IR_{iuv}} = \frac{R}{R+R_{iuv}} \quad (1.38)$$

Соңғы формуладан көруге болады, ішкі кедергі $R_{вн}$ аз болса, қорек көзінің пайдалы әсерлік коэффициенті (ПӘК) көбейеді. Қандай жағдайда да энергия қорек көзі ең көп пайдалы қуат беретінін анықтаймыз.

1.36 теңдеуді ескеріп, $I = \frac{E}{R+r}$ өзгертеміз :

$$P = \frac{E^2}{R+2r+\frac{r^2}{R}} \quad (1.39)$$

1.39 теңдеуді толық зерттейміз:

$$\frac{d\left(R+2r+\frac{r^2}{R}\right)}{dR} = 1 - \frac{r^2}{R^2} = 0, \quad (1.40)$$

мұнан $R = R_{iuv}$

онда, 1.39 теңдеу түрі:

$$P_{\max} = \frac{E^2}{4r} \quad (1.41)$$

Сонымен, егер де сыртқы кедергі R , қорек көзінің ішкі кедергісіне тең болса, ЭҚК қорек көзі пайдалы қуатты дамытады. Бірақ бұндай режим тиімсіз, себебі 50% қуат қорек көзінің ішкі кедергісінде жоғалады:

$$\eta = \frac{R}{R+R_{iuv}} = \frac{R}{2R} = 0,5. \quad (1.42)$$

Тізбек режимі, қабылдағыш тізбегінің сыртқы кедергісі, энергия қорек көзінің ішкі кедергісіне тең болса, **қиыстырылған жүктеме** режимі деп аталады.

Мұндай режим, телемеханикада, электр байланысында және автоматикамен, аз қуат берілетін жерде колданылады. Қуатты қорек көздері, кедергісі (10.....20) $R_{ин}$ қабылдағыш пен жұмыс жасайды, 95% КПД-мен қамтиды.

1.7.4 Электр тізбектегі энергетикалық баланс

Энергия қорек көзінің қуаты кез келген уақытта, тізбектің барлық саладағы қуатының қосындысына тең екенін энергия сақтау заңынан көруге болады:

$$\sum EI = \sum I^2 R \quad (1.43)$$

Бұл теңдеу энергетикалық теңгерім теңдеуі деп аталады. Қуат $EI > 0$, яғни қорек көзі генератор режимінде жұмыс жасаса, E мен I бағытымен сәйкес келеді.

Қуат $EI < 0$, егер де қорек көзі тұтынушы ретінде жұмыс жасаса, яғни E мен I бағытымен сәйкес келмейді.

1.5-суретте көрсетілген тізбектің энергетикалық теңгерімінің теңдеу түрі:

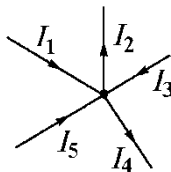
$$E_2 I - E_1 I = I^2 R + I^2 R + I^2 R_1 + I^2 R_2 + I^2 R_3$$

1.8 Кирхгоф заңдары

Кирхгоф заңдары, тармақталған электр тізбектегі тоқ пен кернеудің байланысын орнатады. **Кирхгофтың бірінші заңының** негізі – заряд сақтау заңы: тізбектің кез келген түйініндегі тоқтардың I_i алгебралық қосындысы нөлге тең:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0, \quad (1.44)$$

n - түйіндегі тоқтар саны.



1.18-сурет

Мысалы, 1.18-суреттегі электр тізбегінің түйініне бірінші заң бойынша теңдеуді мына түрде жазуға болады

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 + I_5 = 0$$

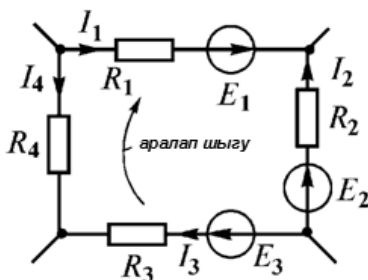
Түйінге бағытталған тоқтарды оң деп аламыз. **Кирхгофтық екінші заңы** былайша тұжырымдалады: күрделі электр тізбектегі кез келген тұйықталған контурда, контур кедергісіндегі барлық кернеу шығындарын алгебралық қосындысы, осы контурдағы қорек көзі ЭҚК-ның алгебралық қосындыларына тең, яғни:

$$\sum_{i=1}^m I_i R_i = \sum_{i=1}^k E_i, \quad (1.45)$$

m - тұйықталған контурдағы тармақтар саны

I_i, R_i - i тармағының тоғы мен кедергісі

k - ЭҚК саны



1.19-сурет

1.19-суреттегі тұйықталған контур сұлбасына:

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

Белгілердегі ескерту:

1) ЭҚК оң, егерде оның бағыты, таңдап алған контурдың аралау бағыты мен сәйкес болса.

2) Резистордағы кернеудің шығыны тоқ бағыты аралау бағытымен сәйкес болса оң болады.

1.9 Кирхгофтың теңдеулер әдісімен электр тізбегін есептеу

Электр тізбегінің контурлары мен түйіндеріне арнап Кирхгофтың бірінші және екінші заңдарымен теңдеулер

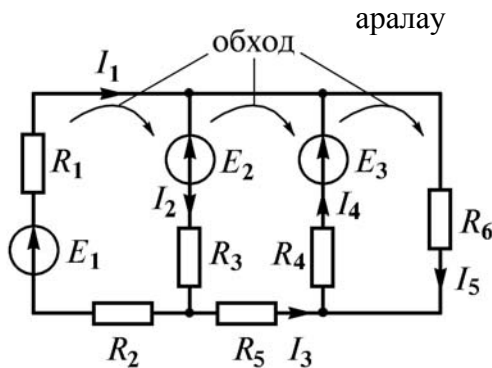
құрастыру, тармақтардағы белгісіз токтарды және олар арқылы элементтердегі кернеуді анықтау. Сондықтан, белгісіздер саны, тармақтар санына $-b$ - тең, демек Кирхгофтың бірінші және екінші заңдарымен осыншама белгісіз теңдеулер құрастыру керек.

Теңдеулер саны, бірінші заң арқылы құрайтын тізбектің түйін саны y болса, тең деп $(y-1)$ болады, теңдеулер бір-біріне байланысты емес. Теңдеулер тәуелсіздігі мынада, түйінді таңдағанда тәртіп енгізуге болады, ал келесі түйін бұрынғыдан бір тармақпен өзгеше. Қалған теңдеулер Кирхгофтың екінші заңымен тәуелсіз контурлардан құралады, яғни теңдеулер саны:

$$b - (y - 1) = b - y + 1 \quad (1.46)$$

Егерде басқа контурларға кірмейтін бір тармақ болса, ондай контур тәуелсіз деп аталады, (1.20-сурет) электр тізбегіне Кирхгофтың теңдеулер жүйесін құрастырамыз. Схемада үш түйін мен бес тармақ бар. Сондықтан Кирхгофтың бірінші заң бойынша екі теңдеу, ал екінші заңмен үш теңдеу құрастырамыз.

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 + I_4 - I_5 &= 0; \quad -I_1 + I_2 - I_3 = 0; \\ E_1 - E_2 &= I_1(R_1 + R_2) + I_2R_3; \\ E_2 - E_3 &= -I_2R_3 - I_4R_4 - I_3R_5; \quad E_3 = I_4R_4 + I_5R_6. \end{aligned}$$



1.20-сурет

Кирхгофтың теңдеулер әдісімен тізбекті есептеу жолдары:

- 1) Барлық тармақта тоқтың оң бағытын таңдаймыз;
- 2) Әр контурдың аралау бағытын белгілейміз;
- 3) Кирхгофтың бірінші және екінші заңымен керекті теңдеулер санын құрастырамыз;

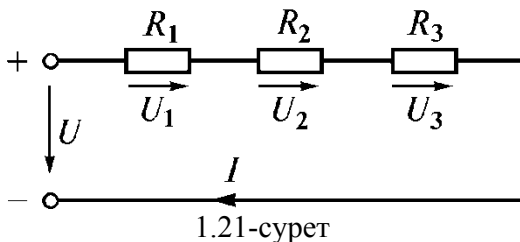
- 4) Тоқтарға қатысты теңдеулер жүйесін есептейміз;
 Егерде, тармақтағы тоқ минусы шықса оның бағыты алынған бағытқа керісінше болады;
- 5) Есептің дұрыстығын Кирхгофтың заңдарымен тексереміз.

1.10 Сызықты электр схемаларын түрлендіру

Күрделі электр схемаларының талдауын көп жағдайда түрлендіріп жеңілдетуге болады. Түрлендіру мәні мынада: күрделі тізбекті басқа бөлігінде кернеу мен тоқтарды өзгертпей, жәй және оған эквивалентті тізбекпен алмастыру.

1.10.1 Резисторларды тізбектеп қосу

Егер де бірнеше резисторлар бірінен соң бірі тармактарсыз қосылған болса және олардан бір тоқ өтсе, ол тізбектілген деп аталады (1.21-сурет) Бөлек резисторлар кедергілерін R_1, R_2, R_3 деп белгілейміз, ал олардың қысқыштағы кернеулерін сәйкес U_1, U_2, U_3 деп белгілейміз.



Кирхгофтың екінші заңы бойынша

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (1.47)$$

Егер де теңдеудің екі жағын тоқ I бөлсек, табамыз:

$$\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \frac{U_3}{I}$$

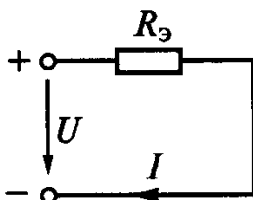
Немесе

$$R_3 = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1.48)$$

Сонымен, тізбектіліп қосылғанда эквивалентті немесе жалпы кедергі тізбектің бөлек саласындағы кедергілер қосындысына тең. (1.22-сурет)

Жалпы түрде

$$R_3 = \sum_{i=1}^n R_i, \quad (1.49)$$



1.22-сурет

n -тізбектіліп қосылған резисторлар саны
Бұл тізбектегі ток

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

Осылайша кедергілердегі кернеулер төмендегі формулалармен анықталады:

$$U_1 = IR_1; \quad U_2 = IR_2; \quad U_3 = IR_3. \quad (1.50)$$

Демек, шамадағы кернеулер кедергілерге пропорционалды:

$$U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3. \quad (1.51)$$

Егерде, (1.47) теңдеу мүшелерін I тоғына көбейтсек, табамыз

$$UI = U_1 I + U_2 I + U_3 I$$

Немесе

$$P = P_1 + P_2 + P_3. \quad (1.52)$$

Сонымен, барлық тізбек қуаты, бөлек участкелер қуаттарының қосындысына тең.

Техниканың түрлі аймағында қабылдағыштардың тізбектіліп қосылуы кеңінен қолданылады. Қабылдағыштың есепті кернеуі, электр энергия қорек көзінің кернеуінен аз болған жағдайда қолданылады.

1.10.2 Резисторларды қатар қосу

Қабылдағыштарды **қатар** қосу дегеніміз – электр тізбегінің екі түйініне кернеулері бірдей бірнеше тармақтарды қосу (1.23-сурет).

Кирхгофтың бірінші заңына сәйкес

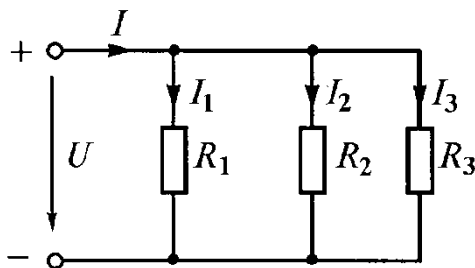
$$I = I_1 + I_2 + I_3,$$
$$I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}; I_3 = \frac{U}{R_3}$$

Немесе $\frac{U}{R_3} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$. (1.53)

Теңдеудің екі жағын U -ға қысқартқанда, табамыз

$$\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Немесе $g_3 = g_1 + g_2 + g_3$. (1.54)



1.23-сурет

Демек, қатар қосылған қабылдағыштардың жалпы (эквивалентті) тармақтар өткізгіштіліктер қосындысына тең. (1.54) формуладан үш тармақтың жалпы кедергісін анықтаймыз:

$$R_3 = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \quad (1.55)$$

Егерде, бірдей кедергісі бар n -қабылдағыштар қатар қосылса, тізбектің эквивалентті кедергісі R_3 , бір тармақтың кедергісінен n -рет аз болады:

$$R_3 = \frac{R_i}{n}. \quad (1.56)$$

Барлық жағдайда, қатар қосылғанда, эквивалентті кедергі ең азғантай қатар қосылғаннан да аз болады.

$$\text{Себебі: } P = U^2 g = U^2 g_1 + U^2 g_2 + U^2 g_3,$$

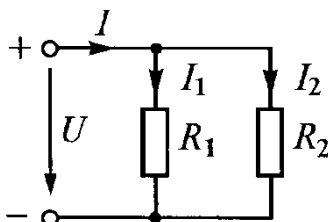
$$\text{Онда } P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (1.57)$$

Сонымен, қатарласқан тізбек қуаты бөлек тармақтар қуатының қосындысына тең.

$$I_1 : I_2 : I_3 = g_1 : g_2 : g_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3}. \quad (1.58)$$

$P = U^2 g$, сондықтан

$$P_1 : P_2 : P_3 = g_1 : g_2 : g_3. \quad (1.59)$$



1.24-сурет

Жиі кездесетін, тізбек екі қатарласқан резистор бар тізбек (1.24-сурет)

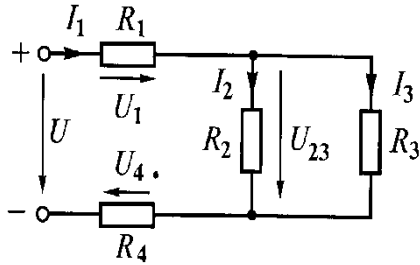
Бұндай тізбектің эквивалентті кедергісі мына формуламен табылады:

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.60)$$

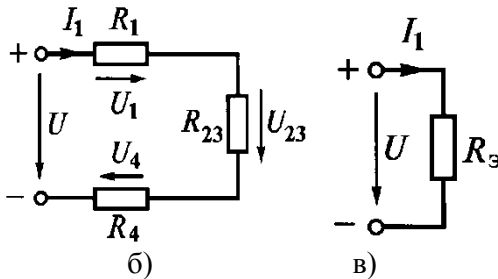
$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{I R_3}{R_1} = \frac{I R_2}{R_1 + R_2}; I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{I R_3}{R_2} = \frac{I R_1}{R_1 + R_2} \quad (1.61)$$

1.10.3 Аралас қосылған резисторлар

Резисторлардың аралас қосылуы дегеніміз – тізбектеліп және параллельді қосылуды байланыстыру. Бұл қосылу көп түрлі болғандықтан, тізбектің эквиваленті кедергісін анықтауда, жалпы формуласын жаза аламыз. Сол себептен әр нақты жағдайда, тізбектеліп және қатар қосылудың есептеу әдісін қолданып, аралас қосылудың эквиваленті кедергісін есептеуге болады. (1.25 а-сурет) нақты мысалда электр тізбегінің есебі көрсетілген.



а)



б)

в)

1.25-сурет

Электр тізбегін жеңілдетіп жәй түрін келтіреді (1.25 б, в-сурет)

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}; \quad R_9 = R_1 + R_4 + R_{23};$$

$$I_1 = \frac{U}{R_9}; \quad I_2 = \frac{U_{23}}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U_{23}}{R_3};$$

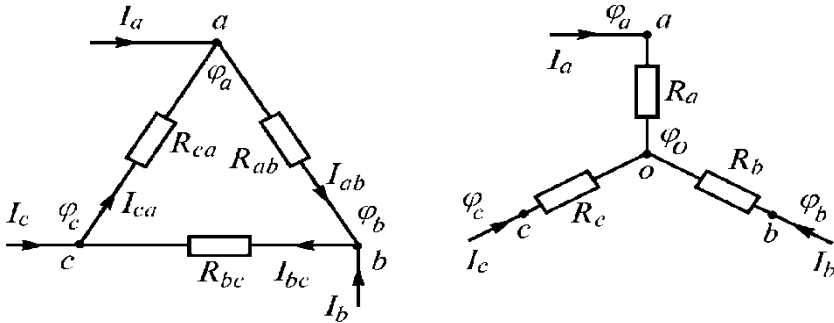
$$U_1 = I_1 R_1; \quad U_4 = I_1 R_4; \quad U_{23} = I_1 R_{23}$$

Тексеру:

$$1) U = U_1 + U_4 + U_{23}; \quad 2) I_1 = I_2 + I_3.$$

1.10.4 Кедергі үшбұрышын эквивалентті жұлдызға және керісінше айналдыру әдісі

Екі электр тізбегін қарастырайық (1.26-сурет) Біріншісі үшбұрыш түрінде, екіншісі – үш сәулелі жұлдыз түрінде. Мұндай қосылуды «үш бұрышты» және «жұлдызды» деп атаймыз.



1.26-сурет

Үш фазалы жүйеде, бұндай қосылулар кеңінен таратылған. Бір қосылу түрінен келесі түріне айналу жиі кездеседі. Үшбұрыш және жұлдыз кедергілер эквиваленттігі мынада: оларды ауыстырғанда (a, b, c) нүктелер әлеуеттері өзгермейді, үшбұрыш пен эквивалентті жұлдыз төбесі болып тұрған. Схеманың өзгерген бөлігінде, I_a, I_b, I_c токтарда өзгермейді.

Үшбұрыш тармақтары R_{ab}, R_{bc}, R_{ca} және жұлдыз сәулелер кедергі формулаларын табамыз.

I_a тоғымен нүктелер әлеуеті мен тармақтар өткізгіштігін және сәулелерді белгілейміз

I_a тоғы үш бұрышты қосылғанда

$$I_a = I_{ab} - I_{ca} = (\varphi_a - \varphi_b)g_{ab} - (\varphi_c - \varphi_a)g_{ca}. \quad (1.62)$$

Жұлдыз түрде қосылғандағы тоқтар:

$$I_a = (\varphi_a - \varphi_0)g_a; \quad I_b = (\varphi_b - \varphi_0)g_b; \\ I_c = (\varphi_c - \varphi_0)g_c \quad (1.63)$$

Жұлдызға:

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (1.64)$$

(1.63) теңдеуді (1.64)-ке қойсақ, табамыз:

$$\varphi_0 = \frac{\varphi_a g_a + \varphi_b g_b + \varphi_c g_c}{g_a + g_b + g_c} \quad (1.65)$$

(1.65) теңдеуді (1.63)-ке қоямыз:

$$I_a = \left(\varphi_a - \frac{\varphi_a g_a + \varphi_b g_b + \varphi_c g_c}{g_a + g_b + g_c} \right) g_a = \frac{(\varphi_a - \varphi_b) g_a g_b}{g_a + g_b + g_c} - \frac{(\varphi_c - \varphi_a) g_c g_a}{g_a + g_b + g_c} \quad (1.66)$$

(1.62) мен (1.66) оң жағын салыстырамыз:

$$g_{ab} = \frac{g_a g_b}{g_a + g_b + g_c} \quad (1.67)$$

Осыған сәйкес:

$$g_{bc} = \frac{g_b g_c}{g_a + g_b + g_c} \quad (1.68)$$

$$g_{ca} = \frac{g_c g_a}{g_a + g_b + g_c} \quad (1.69)$$

(1.67...1.69) теңдеулерден жұлдыздың сәулелер кедергілерін үш бұрыш кедергілері арқылы көрсетеміз:

$$R_a = \frac{1}{g_a}; \quad R_b = \frac{1}{g_b}; \quad R_c = \frac{1}{g_c}.$$

$$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c}; \quad R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a}; \quad R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b} \quad (1.70)$$

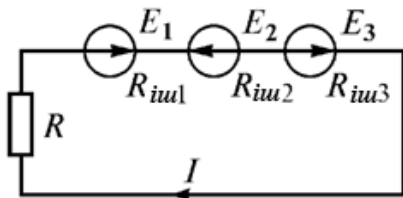
(1.70) теңдеулерді R_a, R_b, R_c қатысты есептеп, үш бұрыштан жұлдызға ауысу формулаларын табамыз:

$$R_a = \frac{R_{ab}R_{ca}}{R_{ac} + R_{bc} + R_{ca}}; R_b = \frac{R_{bc}R_{ab}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}; R_c = \frac{R_{ca}R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}; \quad (1.71)$$

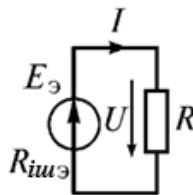
(1.67, 1.68, 1.69) – формула құрылымы
(1.71)- теңдес

1.10.5 Электр энергия қорек көзінің тізбектеліп қосылуы

Тәжірибеде, қорек көзінің тізбектеліп немесе сәйкес қосылуы, кернеуді көбейтуде қолданылады. Екі сәйкес және бір қарсы қосылған қорек көзі бар схеманы қарастырайық (1.27-сурет).



а)



б)

1.27-сурет

Кирхгофтың екінші заңы бойынша жазамыз:

$$E_1 - E_2 + E_3 = IR_{iu2} + IR_{iu3} + IR. \quad (1.72)$$

Бұдан

$$\frac{E_1 - E_2 + E_3}{IR_{iu1} + IR_{iu2} + IR_{iu3} + R} = \frac{E_3}{R_{iu3} + R}, \quad (1.73)$$

Бұл жерде $E_3 = E_1 - E_2 + E_3$. $R_{iu3} = R_{iu1} + R_{iu2} + R_{iu3}$

Қорек көзінің қысқышындағы және қабылдағыштағы

кернеулер:

$$U_1 = E_1 - IR_{iu1}; U_2 = E_2 - IR_{iu2}; U_3 = E_3 - IR_{iu3}; U = IR$$

Энергетикалық баланс теңдеуін жазамыз

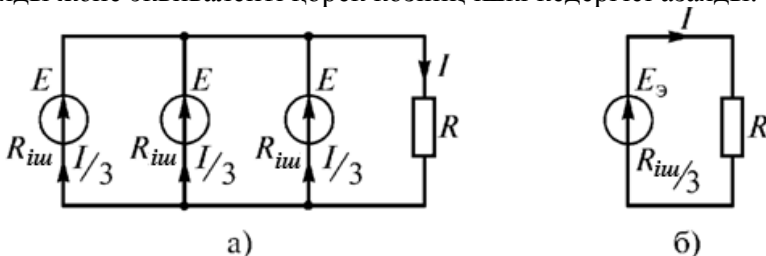
$$E_1 I - E_2 I + E_3 I = I^2 R_{iш1} + I^2 R_{iш2} + I^2 R_{iш3} + I^2 R \quad (1.74)$$

Тізбектеліп қосылған n қорек көздерді бір бағытты ЭҚК және ішкі кедергісі бірдей болса:

$$I = \frac{nE}{nR_{iш} + R} = \frac{E}{R_{iш} + \frac{R}{n}} \quad (1.75)$$

1.10.6 Қатар (қатарластырып) қосылған қорек көздер

Бірдей параметрлі қорек көздері қатар қосылғанда, олардың жалпы ЭҚК-сы өзгермейді, бірақ әр қорек көзден өткен ток азаяды және эквиваленті қорек көзінің ішкі кедергісі азаяды.



1.28-сурет

(1.28 б-суреттегі) эквиваленті қорек көзінің параметрлері:

$$E_э = E; \quad R_{iшэ} = \frac{R_{iш}}{3}$$

Қорек көзі n - болса:

$$E_э = E; \quad R_{iшэ} = \frac{R_{iш}}{n}; \quad I = \frac{E}{R + \frac{R_{iш}}{n}} \quad (1.76)$$

1.11. Пропорционалды шама әдісі

Пропорционалды шама әдісі бір қорек көзі және аралас қосылған тұтынушылары бар тізбекті есептеуде қолданылады.

Есептеу тәртібі:

1) қорек көзінен ең қашықтағы тармақтың тоғын жәй $1A$ деп аламыз;

2) сұлба аяғынан, ЭҚК қорек көзінің қысқыштарына жылжып отырып, тармақтардағы тоқтарды және сұлбаның әр бөлігіндегі және қорек көзінің қысқышындағы кернеулерді табамыз;

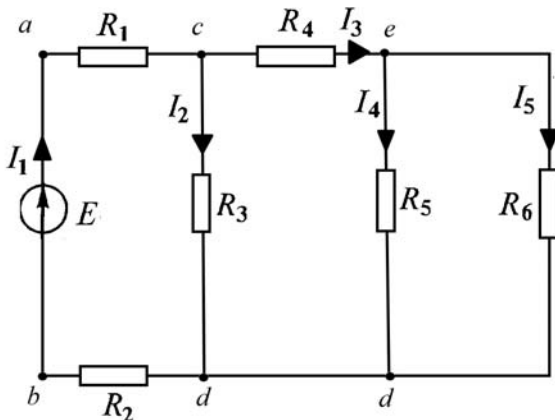
3) қайта есептеу коэффициентін, қорек көзінің ЭҚК-сының қорек көзінің қысқышындағы табылған кернеуге қатынасы арқылы табамыз;

4) тармақтар тоғы және сұлбаның әр бөлігіндегі кернеулерді қайта есептеу коэффициентіне көбейтіп, электр тізбектің нақты тоғы мен кернеуін анықтаймыз.

Бұл әдісті басқа әдістермен бірге қолдануға болады (үшбұрышты жұлдызға ауыстыру, беттестіру қағидаты т.б.).

Мысалы. (1.29-сурет) сұлба тармақтарындағы тоқтарды, пропорционалды шама әдісімен табу.

$R_1 = R_2 = 3 \text{ Ом}$; $R_3 = 26 \text{ Ом}$; $R_4 = 6 \text{ Ом}$; $R_5 = 4 \text{ Ом}$; $R_6 = 8 \text{ Ом}$;
 $E = 200 \text{ В}$.



1.29-сурет

Есептелуі: $I_5=1\text{А}$ дейміз, басқа тармақтардағы тоқ пен кернеуді есептейміз:

$$U_{ed}=I_5 R_6=1 \cdot 8=8\text{В}$$

$$I_4 = \frac{U_{ed}}{R_5} = \frac{8}{4} = 2\text{А}$$

$$I_3 = I_5 + I_4 = 1 + 2 = 3\text{А}$$

$$U_{cd} = U_{ed} + I_3 R_4 = 8 + 3 \cdot 6 = 26\text{В}$$

$$I_2 = \frac{U_{cd}}{R_3} = \frac{26}{26} = 1\text{А}$$

$$I_1 = I_2 + I_3 = 1 + 3 = 4\text{А}$$

$$U_{ab} = U_{cd} + I_1 (R_1 + R_2) = 26 + 4(3 + 3) = 50\text{В}$$

Қайта есептеу коэффициентін және тоқтарды анықтаймыз:

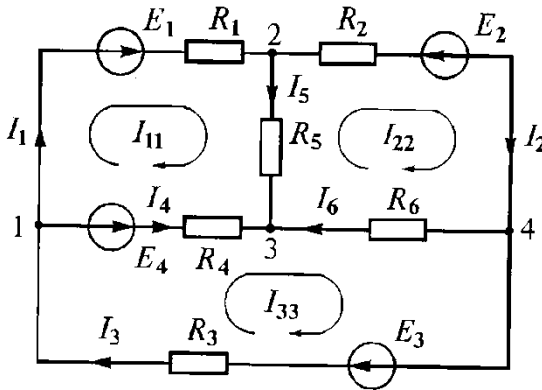
$$K = \frac{E}{U_{ab}} = \frac{200}{50} = 4$$

$$I_1 = 16\text{A}; I_2 = 4\text{A}; I_3 = 12\text{A}; I_4 = 8\text{A}; I_5 = 4\text{A}$$

1.12 Контурлы тоқтар әдісі

Максвелдың бұл әдісі, күрделі электр тізбектерді есептеуде кеңінен қолданылады.

Максвел, кез келген күрделі электр тізбегін есептеуде, $n = v - y + 1$ теңдеу жүйесін есептеуге болатынын дәлелдеген, егерде контурлы тоқтар қолданылса, яғни тоқтар тәуелсіз контурларда тұйықталатынын болатын. Осы әдіске сәйкес, теңдеулер Кирхгофтың екінші заңы бойынша жазылады, тек контурлар санын таңдау керек. Есептегенде, әр контурда, өзінің контурлы тоғы өтеді дейміз. Сондықтан, контурлы тоқтар әдісінің негізін, контурлы тоқтар есебі әдісі түрінде анықтаймыз. Бұл әдістегі белгісіз саны, теңдеулер санына тең Кирхгофтың екінші заңы бойынша құралатын. (1.30-суреттегі) сұлба бойынша есептеп, теңдеулер жазамыз.



1.30-сурет

Бұл тізбектің төрт түйіншегі ($y=4$) және алты тармағы бар ($b=6$) үш теңдеуді құрастырып есептеу керек ($b - y + 1 = 6 - 4 + 1 = 3$). Бұл тізбекті Кирхгоф заңы бойынша есептеу үшін, алты теңдеулері бар жүйе құрастыру керек. Сонымен, контурлы тоқтар әдісі, теңдеу санын мына шамаға ($y-1$) азайтады.

Сондықтан, электр тізбекте түйін көп болса, осы әдісті қолдану тиімді болады. (1.30-суреттегі) сұлбаны есептеу үшін,

бірнеше контурға бөлеміз. Жоғарғы сол жақтағы контурда I_{11} ток, ал жоғарғы оң жақтағы контурда I_{22} , ал төменде I_{33} токтар өтеді дейміз. Ескереміз, аралық тармақтарда, мысалы мына тармақта $R_5 I_5 = I_{11} - I_{22}$ ток өтеді. Аралау бағытын сағат жүрісіндей деп атайды. Кирхгофтың екінші заңын қолданып, теңдеулер жазамыз:

$$\begin{aligned} I_{11} R_1 + (I_{11} - I_{22}) R_5 + (I_{11} - I_{33}) R_4 &= E_1 - E_4; \\ I_{22} R_2 + (I_{22} - I_{11}) R_5 + (I_{22} - I_{33}) R_6 &= -E_2; \\ I_{33} R_3 + (I_{33} - I_{11}) R_4 + (I_{33} - I_{22}) R_6 &= E_3 + E_4; \end{aligned} \quad (1.77)$$

Өзгертуден кейін табамыз:

$$\begin{aligned} I_{11}(R_1 + R_4 + R_5) - I_{22} R_5 - I_{33} R_4 &= E_1 - E_4 \\ - I_{11} R_5 + I_{22} (R_2 + R_5 + R_6) - I_{33} R_6 &= -E_2 \\ - I_{11} R_4 + I_{22} R_6 + I_{33} (R_3 + R_4 + R_6) &= E_3 + E_4 \end{aligned} \quad (1.78)$$

(1.78) теңдеулерді ыңғайлы формада жазамыз:

$$\begin{aligned} R_{11} I_{11} + R_{12} I_{22} + R_{13} I_{33} &= E_{11}; \\ R_{21} I_{11} + R_{22} I_{22} + R_{23} I_{33} &= E_{22}; \\ R_{31} I_{11} + R_{32} I_{22} + R_{33} I_{33} &= E_{33}; \end{aligned} \quad (1.79)$$

Бұл жерде

$$\begin{aligned} R_{11} &= R_1 + R_5 + R_4; R_{22} = R_2 + R_5 + R_6; \\ R_{33} &= R_3 + R_4 + R_6; R_{12} = R_{21} = -R_5; \\ R_{13} &= R_{31} = -R_4; R_{23} = R_{32} = -R_6; \\ E_{11} &= E_1 - E_4; E_{22} = -E_2; E_{33} = E_3 + E_4; \end{aligned}$$

$R_{11} R_{22} R_{33}$ – бірінші, екінші, үшінші контурлардың толық немесе жекеше кедергілері.

$R_{12} R_{13} R_{23}$ – бірінші мен екінші, бірінші мен үшінші, екінші мен үшінші контурлар аралығындағы кедергілер алу белгілері.

$E_{11} E_{22} E_{33}$ - бірінші, екінші, үшінші контурлардың контурлы ЭҚК-сы (ЭҚК бағыты, контурды аралау бағытымен сәйкес болса, ЭҚК белгісі плюс болады).

(1.79) теңдеулер жүйесін анықтауыш немесе тұғырын әдісімен есептеуге болады.

Егер жүйенің басты анықтаушысы:

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{vmatrix} \quad (1.80)$$

$$\text{Контурлы токтар: } I_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta}; I_{22} = \frac{\Delta_{22}}{\Delta}; I_{33} = \frac{\Delta_{33}}{\Delta},$$

2) тармақтағы ток, екі контурға жалпы болса, сәйкесінше контурлы тоқтардың алгебралық жиыны түрінде анықталады. (1.30-суреттегі) сұлба бойынша:

$$I_1 = I_{11}; I_2 = I_{22}; I_3 = I_{33}; \\ I_4 = I_{33} - I_{11}; I_5 = I_{11} - I_{22}; I_6 = I_{22} - I_{33};$$

Контурлы тоқтар әдісімен есептеу тәртібі:

1) Әр бір тәуелсіз контурға, сол контурды оң бағытын таңдайды.

2) әр контурға, Кирхгофтың екінші заңы бойынша теңдеу жазады, контурлы ток бағыты, контурды аралау бағытымен сәйкес болу керек.

3) контурлы тоқтарға қатысты теңдеулер жүйесі есептеледі.

4) контурлы тоқтар арқылы тармақтағы тоқтар анықталады.

5) есептерді Кирхгофтың екінші заңы бойынша тексереді.

1.13 Түйінді әлеуеттер әдісі

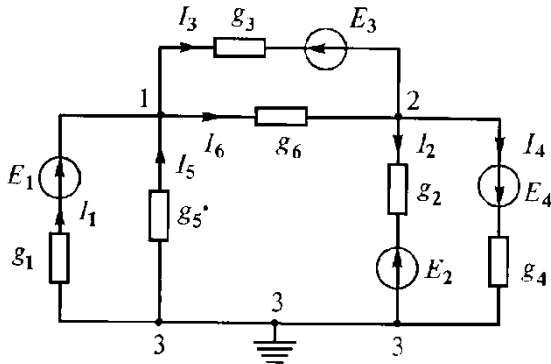
Белгілі электр тізбегінің режимін теңдеулермен беруге болады, Кирхгофтың бірінші және екінші заңы бойынша құрастырылған. Барлық b -тармақтағы тоқты анықтау үшін, b теңдеулері бар жүйені құрап, есептеу керек.

Егерде түйінді әлеуеттер әдісін қолданса, теңдеулер санын түйіндер санына қысқартуға болады. Түйіндер саны бір шамасыз болса, тәуелсіз контурлар санынан аз болады, осы жағдайда түйінді әлеуеттер әдісі қолданылады.

Бұл жағдайда контурлы ток әдісіне қарағанда бұл әдіс тиімділеу. Электр тізбегінің есептеу әдісі, схемадағы түйіндер әлеуетін белгісіз деп алса, түйінді әлеуеттер әдісі деп аталады.

Сұлбадағы түйін әлеуеттерін біліп тармақтардағы тоқтарды анықтауға болады. Әдістің негізі, Кирхгофтың бірінші заңы мен Ом заңын пайдалануда. Бұл әдістің мағынасына түсіну үшін (1.31-суреттегі) нақты электр сұлбасын қарастырайық.

Бір түйін әлеуетін, мысалы 3 түйіне нөлге тең деп аламыз. Бұлай алғанымыздың әсері жоқ, себебі әр тармақтағы ток тармақ қосылған түйін әлеуетінің абсолютті мағынасына бағышты емес, ол тармақтар аяғындағы әлеуеттер алымына бағышты.



1.31-сурет

Кирхгофтың бірінші заңы бойынша 1 және 2 түйіндерге тоқтың оң бағытын алып, табамыз:

$$I_3 + I_6 - I_1 - I_5 = 0; \quad I_2 + I_4 - I_3 - I_6 = 0. \quad (1.84)$$

Ом заңы бойынша тармақтағы тоқтар:

$$\begin{aligned} I_1 &= (\varphi_3 - \varphi_1 + E_1)g_1 = (-\varphi_1 + E_1)g_1; \\ I_2 &= (\varphi_2 - \varphi_3 - E_2)g_2 = (\varphi_2 - E_2)g_2; \\ I_3 &= (\varphi_1 - \varphi_2 - E_3)g_3; \quad I_4 = (\varphi_2 - \varphi_3 + E_4)g_4 = (\varphi_2 + E_4)g_4; \\ I_5 &= (\varphi_3 - \varphi_1)g_5 = -\varphi_1 g_5; \quad I_6 = (\varphi_1 - \varphi_2)g_6. \end{aligned} \quad (1.85)$$

(1.85) теңдеулерді (1.84)-ке қойып және өзгертіп табамыз:

$$\begin{aligned} \varphi_1(g_1 + g_3 + g_5 + g_6) - \varphi_2(g_3 + g_6) &= E_1 g_1 + E_3 g_3; \\ -\varphi_1(g_3 + g_6) + \varphi_2(g_2 + g_3 + g_4 + g_6) &= \\ &= E_2 g_2 - E_3 g_3 - E_4 g_4. \end{aligned} \quad (1.86)$$

(1.86) теңдеулерді келесі түрде жазамыз:

$$\varphi_1 g_{11} - \varphi_2 g_{12} = I_{11}; \quad -\varphi_1 g_{21} + \varphi_2 g_{22} = I_{22}, \quad (1.87)$$

$g_1 + g_3 + g_5 + g_6 = g_{11}$ - бірінші түйінге қосылған тармақтардың өткізгіштілік жиыны, $g_2 + g_3 + g_4 + g_6 = g_{22}$ - екінші түйінге қосылған тармақтардың өткізгіштілік жиыны, $g_3 + g_6 = g_{12} = g_{21}$ - бірінші және екінші түйінге қосатын тармақтың өткізгіштілік жиыны, $E_1 g_1 + E_3 g_3 = I_{11}$ - бірінші түйінің, түйінді тоғы. $E_2 g_2 - E_3 g_3 - E_4 g_4 = I_{22}$ - екінші түйінің түйінді тоғы.

I_{11} мен I_{22} тоқтар – есепті параметрлар, қорек көзінің ЭҚК-сын, әр тармақтың өткізгіштілігіне көбейткендегі алгебралық жиынына тең. Егер де ЭҚК қарастырылатын түйінге бағытталса, онда көбейтінді Eg оң болып жазылады.

Егер де сұлбада n – түйін болса, оған сәйкес жүйе, $n-1$ теңдеулер түрлері:

$$\begin{aligned}
 \Phi_1 g_{11} - \Phi_2 g_{12} - \Phi_3 g_{13} - \dots - \Phi_{n-1} g_{1,n-1} &= I_{11}; \\
 -\Phi_1 g_{21} + \Phi_2 g_{22} - \Phi_3 g_{23} - \dots - \Phi_{n-1} g_{2,n-1} &= I_{22}; \\
 -\Phi_1 g_{31} - \Phi_2 g_{32} + \Phi_3 g_{33} - \dots - \Phi_{n-1} g_{3,n-1} &= I_{33}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 -\Phi_1 g_{n-1,1} - \Phi_2 g_{n-1,2} + \Phi_3 g_{n-1,3} - \dots & \\
 -\Phi_{n-1} g_{n-1,n-1} &= I_{n-1,n-1}
 \end{aligned} \tag{1.88}$$

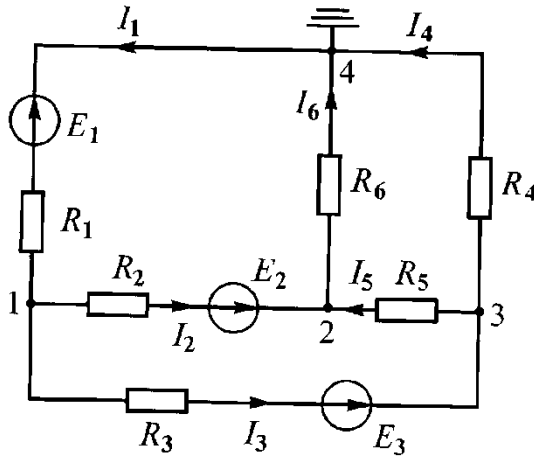
Егер K -түйінге тоқтың қорек көзі қосылса, тоғы I ққ қосу белгісімен, егер түйіннен шықса, алу белгісімен болады.

Түйінді әлеуеттер әдісімен есептеу тәртібі:

- 1) Тармақтарда тоқтың оң бағыттарын таңдаймыз;
- 2) Кез келген түйін әлеуетін нөлге тең деп аламыз;
- 3) Қалған түйіндер әлеуеттер теңдеулер жүйесін жасаймыз;
- 4) Түйінді әлеуеттерге қатысты теңдеулер жүйесін есептейміз;
- 5) Ом заңы бойынша тармақтар тоғын анықтаймыз, ЭҚК әлеуеті және тармақтар өткізгіштілігі арқылы;
- 6) Кирхгоф заңы мен қуаттар балансы арқылы есептердің дұрыстығын тексереміз.

Мысалы: (1.32-суреттегі) сұлба тармақтарындағы тоқты табу керек, түйінді әлеуеттер әдісін қолданып $E_1=6B$; $E_2=12B$; $E_3=18B$;

$R_1=R_2=R_3=2\text{Ом}$; $R_4=R_5=R_6=6\text{Ом}$ аламыз



1.32-сурет

Шешімі: Тоқтың бағытын таңдап 4 түйін әлеуетін нөлге тең дейміз. Қалған түйіндер әлеуеттерін теңдеулер жүйесін жазамыз:

$$\begin{aligned} \varphi_1 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - \varphi_2 \frac{1}{R_2} - \varphi_3 \frac{1}{R_3} &= \\ &= -E_1 \frac{1}{R_1} - E_2 \frac{1}{R_2} - E_3 \frac{1}{R_3}; \\ -\varphi_1 \frac{1}{R_2} + \varphi_2 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \right) - \varphi_3 \frac{1}{R_5} &= E_2 \frac{1}{R_2}; \\ -\varphi_1 \frac{1}{R_3} - \varphi_2 \frac{1}{R_5} + \varphi_3 \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right) &= E_3 \frac{1}{R_3} \end{aligned}$$

Тармақтар кедергілерінің мағынасын, табылған теңдеулер жүйесіне қойып, табамыз.

$$\begin{aligned} \varphi_1\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\right) - \varphi_2\frac{1}{2} - \varphi_3\frac{1}{2} &= -18; \\ -\varphi_1\frac{1}{2} + \varphi_2\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6}\right) - \varphi_3\frac{1}{6} &= 6; \\ -\varphi_1\frac{1}{2} - \varphi_2\frac{1}{6} + \varphi_3\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6}\right) &= 9 \end{aligned}$$

Табылған теңдеулер жүйесін есептеп, түйіндер әлеуетін анықтаймыз: $\varphi_1 = -9B$, $\varphi_2 = 3B$, $\varphi_3 = 6B$.

Тармақтардағы токтарды анықтаймыз:

$$I_1 = (\varphi_4 - \varphi_1 - E_1)g_1 = (-\varphi_1 - E_1)\frac{1}{R} = (9 - 6)\frac{1}{2} = 1,5 A;$$

$$I_2 = (\varphi_1 - \varphi_2 + E_2)g_2 = (-9 - 3 + 12)\frac{1}{2} = 0;$$

$$I_3 = (\varphi_1 - \varphi_3 + E_3)g_3 = (-9 - 6 + 18)\frac{1}{2} = 1,5 A;$$

$$I_4 = (\varphi_3 - \varphi_4)\frac{1}{R_4} = (6 - 0)\frac{1}{6} = 1 A;$$

$$I_5 = (\varphi_3 - \varphi_2)\frac{1}{R_5} = (6 - 3)\frac{1}{6} = 0,5 A;$$

$$I_6 = (\varphi_2 - \varphi_4)\frac{1}{R_6} = (3 - 0)\frac{1}{6} = 0,5 A.$$

1.14 Түйінді кернеу (екі түйін) әдісі

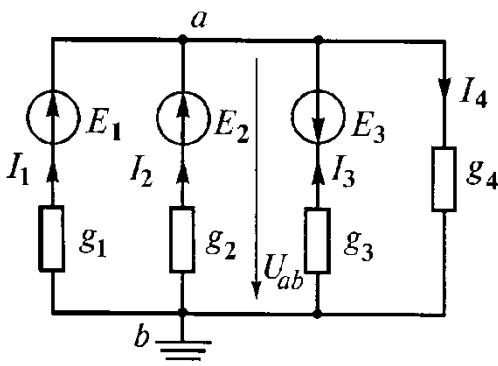
Екі түйін арасындағы кернеу түйінді кернеу деп аталады. Екі түйін әдісі дегеніміз – электр тізбегін есептеу әдісі, негізіне түйінді кернеу алынады.

Түйінді кернеу арқылы тармақтағы токтарды анықтайды. Түйінді кернеу әдісі, түйінді әлеуеттер әдісінің жеке жағдайы болады.

Егер де (1.33-суреттегі) сұлбада екі түйін бар, $\varphi_0 = 0$ десек,

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \varphi_a$$

$$\text{немесе } \varphi_a (g_1 + g_2 + g_3 + g_4) = E_1 g_1 + E_2 g_2 - E_3 g_3.$$



1.33-сурет

$$\text{Бұл жерден } \varphi_a = U_{ab} = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2 - E_3 g_3}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4} \quad (1.89)$$

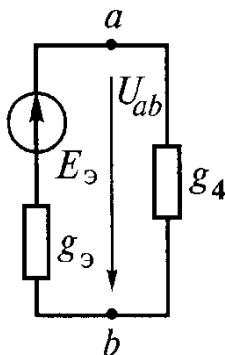
Жалпы түрде түйінді кернеуді мына формуламен анықтайды:

$$U_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^m E_i g_i}{\sum_{i=1}^n g_i}. \quad (1.90)$$

U_{ab} түйін арасындағы кернеуді біліп, Ом заңы бойынша тоқтарды анықтаймыз:

$$\begin{aligned} I_1 &= (-\varphi_a + E_1)g_1 = (E_1 - U_{ab})g_1; \\ I_2 &= (-\varphi_a + E_2)g_2 = (E_2 - U_{ab})g_2; \\ I_3 &= (-\varphi_a - E_3)g_3 = (-E_3 - U_{ab})g_3; \\ I_4 &= \varphi_a g_4 = U_{ab} g_4. \end{aligned}$$

Екі түйін әдісін, ЭҚК қатар қосылған үш қорек көзін қолданып, бір эквиваленті мен ауыстыруға болады (1.34-сурет)



1.34-сурет

$$E_{\text{э}} = U_{ab.бж} = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2 - E_3 g_3}{g_1 + g_2 + g_3} \quad (1.91)$$

Жалпы түрде:

$$E_{\text{э}} = U_{ab.бж} = \frac{\sum_{i=1}^m E_i g_i}{\sum_{i=1}^m g_i} \quad (1.92)$$

(1.92) формула асты мен үстінің қосынды саны тармақтар санымен анықталады, ЭҚК-сы бар. $g_{\text{э}} = g_1 + g_2 + g_3 + \dots + g_m$ алып (1.92) формуласын мына түрде жазамыз:

$$E_{\text{э}} = U_{ab.бж} = \frac{\sum_{i=1}^m E_i g_i}{g_{\text{э}}} \quad (1.93)$$

1.15 Теңестіру қағидаты.

Теңестіру қағидатының негізі физикадан белгілі, тәуелсіз күш әсерінің принципі болады.

Теңестіру қағидатының мәні, тізбектегі тоқ кез келген тармақта өзгермейтін кедергісімен, тоқтың алгебралық қосындысына тең. Оны талдау арқылы дәлелдеуге болады (1.83).

Тәуелсіз контурда барлық уақытта тармақ болады, тоғы контурлы токқа тең, яғни (1.83) теңдеудің оң бөлігінің қосындысы тоқты көрсетеді. k -тармақтағы контурлы ЭҚК-ға

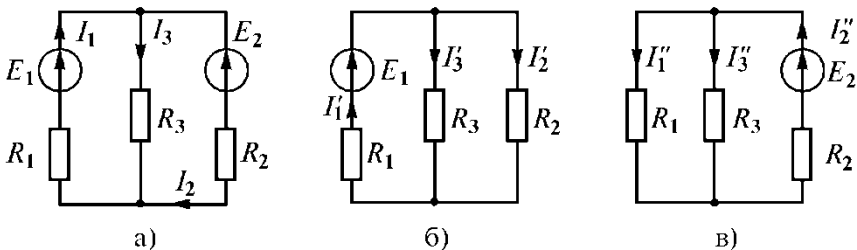
сәйкес. Мысалы, $E_{11} \frac{\Delta_{k1}}{\Delta}$ к - тармақтағы тоқ болады, контурлы

ЭҚК E_{11} пайда болған. Әр контурлы ЭҚК-ны, тармақтар ЭҚК-сы $E_1, E_2, E_3 \dots E_k \dots E_n$ көрсетуге болады, өткізгіштілік коэффициенттерін топтастырып қосындысын мына түрде табу:

$$I_k = E_1 g_{k1} + E_2 g_{k2} + E_3 g_{k3} + \dots + E_k g_{kk} + \dots + E_n g_{kn} \quad (1.94)$$

(1.94) теңдеу теңестіру қағидатын көрсетеді осыған сәйкес, тармақтардағы тоқтарды анықтағанда, кезектестіріп сұлбада бір ЭҚК-дан қалдыруға болады, қалған ЭҚК-ны нөлге тең деп есептеп, ішкі кедергісін есепке алу керек (1.35). Жалғас және қатар қосылған резисторлары бар тізбек пайда болады. Бұл тізбекте бөлікті тоқтар анықталады, ЭҚК-ның бірінші қорек көзі арқылы пайда болған. Оларды I'_1, I'_2, I'_3 белгілейді. Сонымен бөлікті тоқтар (I''_1, I''_2, I''_3 т.б) есептеледі, екінші ЭҚК арқылы пайда болған. Бұл тоқтарды алгебралық қосып, күрделі тізбектің әр бөлігіндегі тоқтардың нақты мағынасы анықталады, барлық ЭҚК бір уақытта әсер етеді. (1.35-сурет) тармақтардағы тоқтар:

$$I_1 = I'_1 - I''_1; \quad I_2 = I'_2 - I''_2; \quad I_3 = I'_3 - I''_3$$



1.35-сурет

Теңестіру қағидатын қолданғандағы есептеу тәртібі:

1) Кезекпе-кезек бөлікті тоқтарды есептейміз, әр қорек көзінің әсерінен пайда болатын, қалғандарын сұлбадан алып тастаймыз, бірақ ішкі кедергісін қалдырамыз;

2) Тармақтар тоғын бөлікті тоқтардың алгебралық қосындысы түрінде анықтаймыз.

Теңестіру әдісін қуаттарды есептеуде қолдануға болмайды, себебі қуат-тоқ пен кернеудің квадратталған функциясы.

Мысалы: $P = I^2 R = (I' + I'')^2 R \neq (I')^2 R + (I'')^2 R$

Мысалы - (1.36 а-суреттегі) сұлбадан теңестіру әдісін қолданып, егерде $E = 5 \text{ В}$; $J_k = 1 \text{ А}$; $R_1 = R_3 = 2 \text{ Ом}$; $R_2 = R_4 = 3 \text{ Ом}$ болса, тізбек тармағындағы тоқты анықтау.

Есептелуі. Тармақтар тоғын анықтау үшін екі сұлбадағы тоқтарды есептеу керек (1.36 б)

$$I'_1 = I'_4 = \frac{E}{R_1 + R_4} = \frac{5}{2 + 3} = 1 \text{ А};$$

$$I''_2 = I''_3 = \frac{E}{R_2 + R_3} = \frac{5}{3 + 2} = 1 \text{ А}.$$

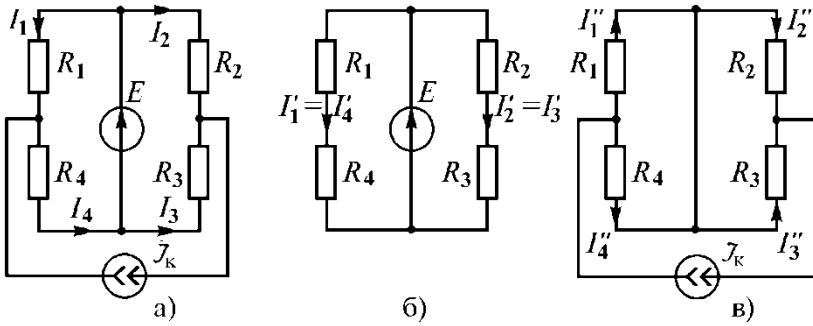
Резисторлар R_1 мен R_4 , R_2 мен R_3 , қатар қосылған J_k тоғы R_1 мен R_4 , немесе R_2 мен R_3 , тармақталады. (1.36 б-сурет):

$$I''_1 = J_k \frac{R_4}{R_1 + R_4} = 1 \frac{3}{3 + 2} = 0,6 \text{ А};$$

$$I''_4 = J_k \frac{R_1}{R_1 + R_4} = 1 \frac{2}{5} = 0,4 \text{ А};$$

$$I''_2 = J_k \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 1 \frac{2}{2 + 3} = 0,4 \text{ А};$$

$$I''_3 = J_k \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 1 \frac{3}{2 + 3} = 0,6 \text{ А}.$$



1.36-сурет

Берілген сұлбада тармақтардағы токтар бөлікті токтардың алгебралық қосындысына тең.

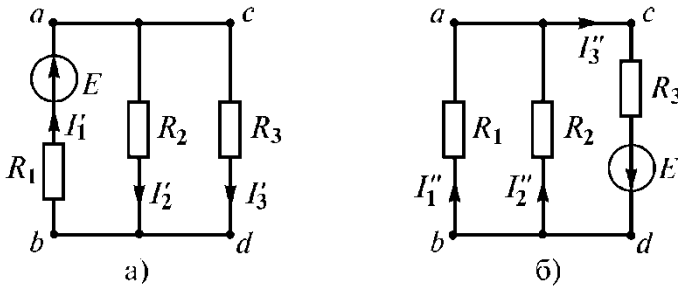
$$I_1 = I_1' - I_1'' = 1 - 0,6 = 0,4 \text{ A}; \quad I_4 = I_4' + I_4'' = 1 + 0,4 = 1,4 \text{ A};$$

$$I_2 = I_2' + I_2'' = 1 + 0,4 = 1,4 \text{ A}; \quad I_3 = I_3' - I_3'' = 0,6 - 1 = -0,4 \text{ A}.$$

1.16 Өзара қасиеті

Өзара қасиеті мағынасы мынада: егер ЭҚК ab тармаққа қосылған, пассивті cd тармақта I тоғын пайда қылса, сол ЭҚК cd тармаққа әсер етіп, ab тармақта сондай I тоғы пайда болғызады.

(1.37 а-суреттегі) жәй сұлбада осы қасиетті дәлелдейміз.



1.37-сурет

cd тармақтағы ток:

$$I_3'' = \frac{U_{cd}}{R_3} = I_1' \frac{R_2 R_3}{(R_2 + R_3) R_3} = \frac{E}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} \frac{R_2}{R_2 + R_3} = \frac{ER_2}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}.$$

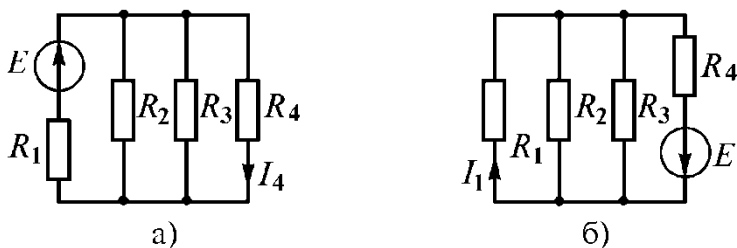
ab тармақтағы тоқ (1.37 б-сурет)

$$I_1'' = \frac{U_{ab}}{R_1} = I_3' \frac{R_1 R_3}{(R_1 + R_2) R_1} = \frac{E}{R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{ER_2}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

Сондықтан : $I_1'' = I_3'$

Өзара қасиетін тәжірибеде қолдануда тоқтар бағытының өзара сәйкестігін және сұлбадағы ЭҚК-сын есепке алу керек. Егерде, *ab* тармақтағы ЭҚК бағытты тармақ тоғына сәйкес болса, *ca* тармақтағы тоқтың оң бағыты ЭҚК бағытымен сәйкес болу керек.

Мысалы 1.38 а-суреттегі сұлбадан өзара қағидатын қолданып, егер де $R_1=R_2=R_3=180\text{М}; R_4=20\text{М}; E=48\text{в}$ болса, I_4 тоғын анықтау керек,



1.38-сурет

Есептелуі. Өзара қағидаты бойынша, R_1 кедергісі бар тармақтағы ЭҚК E -ны, R_4 кедергісі бар тармаққа көшірсе (1.38 б-сурет) $I_1=I_4$ болады. Есепті соңғы сұлбаға жүргізген дұрыс

болады, себебі резисторлар $R_1=R_2=R_3$ қатар қосылған. Сондықтан:

$$R_{123} = \frac{R_1}{3} = \frac{18}{3} = 6 \text{ Ом}$$

Эквиваленті кедергі: $R_3 = R_4 + R_{123} = 2 + 6 = 8 \text{ Ом}$

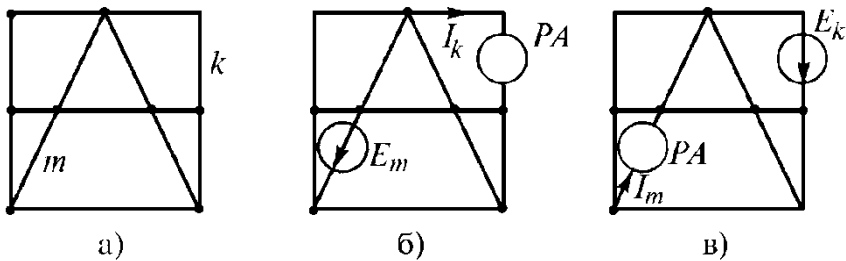
$$cd \text{ тармақтағы тоқты табамыз: } I = \frac{E}{R_3} = \frac{48}{8} = 6 \text{ А.}$$

Бұл ток үш бірдей бөлікке бөлінеді, резисторлар $R_1; R_2; R_3$ – ден.

$$\text{Сондықтан: } I_1 = I_4 = \frac{I}{3} = \frac{6}{3} = 2 \text{ А.}$$

1.17 Кірме және өзара өткізгіш тармақтары. Кірме кедергілері

Кірме және өзара өткізгіш тармақтары сызықты электр тізбегінің жалпы қасиетін талдауда және салу қағидаты бойынша оның тізбегін есептеуде қолданылады. Пассивті тізбегінің қанқалы үлгісі (1.39-суретте) берілген. Бұл үлгінің ерекшелігі онда тек тармақтар мен түйіндер көрсетілген. Әр тармақта резистор қосылған.



1.39-сурет

Мысалы: m тармағына ЭҚК E_m қосамыз. Үлгідегі контурын былай таңдаймыз, m тармағы тек m контурына кіруі, ал k тармағы тек k контурына кіру керек.

ЭҚК E_m әсерінен қорытындысында m және k тармағында ток пайда болады.

$$I_k = E_m g_{km}; I_m = E_m g_{mm}, \quad (1.95)$$

Кірме және өзара өткізгіштер есептеу және тәжірибелі жолдармен анықталады.

Кірме және өзара өткізгіштер есебінің тәртібі:

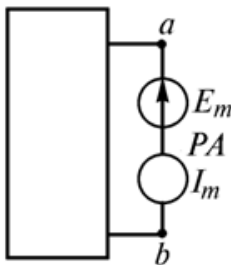
1) Контурлы ток әдісі бойынша теңдеу жүйесін жасаймыз, онда анықталатын кірме және өзара өткізгіштер тармақтар тек өз контурларына кіруі керек.

2) Δ анықтау жүйесін құрастырып, ол арқылы керекті алгебралық толықтырулар есептеледі.

Сонда

$$g_{mm} = \frac{\Delta_{mm}}{\Delta}; g_{km} = \frac{\Delta_{km}}{\Delta}. \quad (1.96)$$

Тәжірибеде g_{mm} мен g_{km} анықтау үшін, ЭҚК-ны және амперметрді (1.39 б, в-сурет) сұлба бойынша қосады. I_k тоғының (амперметр бойынша көрсеткішін) ЭҚК E_m бөлінуі, g_{km} мағынасын береді. Егерде I_m тоғын (m -тармағы ЭҚК E_m бөлсек, g_{mm} кірме өткізгішін табамыз. m -тармағын бөлек шығарамыз, сұлба қалған бөлігін (ЭҚК кірмейтін), (1.40-сурет бойынша) тік бұрышпен белгілейміз.



1.40-сурет

ab қысқышына қатынасы бойынша барлық сұлба біршама кедергіні иемденеді. Оны кірме деп атайды. Бұнда m - тармағындағы кірме кедергісі анықтау болып табылады. Оны $R_{вх.m}$ -ден белгілейміз, яғни

$$R_{\text{кпр. } m} = \frac{E_m}{I_m} = \frac{1}{g_{mm}} \quad (1.97)$$

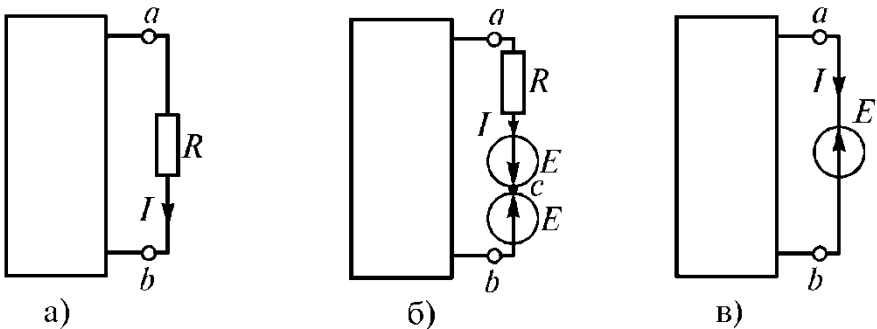
Демек, m -тармағындағы кірме кедергі осы тармақтың кірме өткізгішін кері пропорционалды.

1.18 Өтем теоремасы

Электр тізбегінің кез-келген учаскесінде тоқтың таратылуын өзгертпей, резисторды ЭҚК-не ауыстыруға болады, ол осы резистордың кернеуінің құлауы мен одан өткен қарсы тоқ саны тең болады. Өтем қағидатының мағынасы осында.

Өтем теоремасын дәлелдеу үшін (1.41 а-сурет) сұлбасынан I тоғы өтетін резисторлары бар бір тармағын бөліп шығарамыз.

Сұлбаның барлық қалған бөлігін шартты түрде тік бұрышпен белгілейміз. Тоқ берілген тармақта өзгермейді, егерде оған екі бірдей немесе қарама-қарсы бағытталған ЭҚК E қосылса, сан түрінде резистор R кернеуінің құлауына тең.



1.41-сурет

Көз жеткізейік (1.41 б-сурет) сұлбасында a және c нүкте әлеуетінің айырмашылығы нөлге тең болады.

Шынында да:

$$\varphi_c = \varphi_a - IR + E = \varphi_a - IR + IR = \varphi_a$$

Егерде $\varphi_c = \varphi_a$ болса, a нүктесін C нүктесімен біріктіруге болады. Қорытындысында (1.41 в-сурет) үлгісі пайда болады, ол (1.41 а-сурет) үлгісіне эквивалентті.

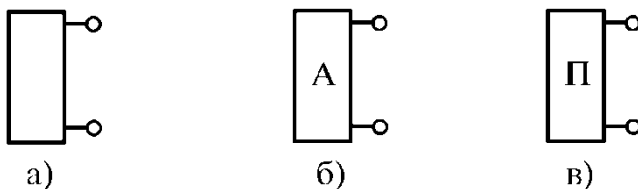
1.19 Активті екіұштық теоремасы. Эквивалентті генератор әдісі

Күрделі электр тізбегінің үдерісін зерттеуде, бір тармақтағы тоқты, кернеуді және қуатты анықтау қажет болады.

Бұл жағдайда, күрделі тізбектің 2 нүктесіне қосылған, зерттейтін тармақты бөліп алады. Электр сұлбасының қалған бөлігі активті екіұшты болып көрсетіледі.

1.19.1. Активті және пассивті екіұштық

(1.42 а-суретте) екі қысқышымен берілген электр сұлбасы екіұштық деп аталады.



1.42-сурет

Электр энергиясының қорек көзі бар екіұштық, активті деп аталады. Егер де екіұшты энергия көзі жоқ болса, пассивті деп аталады. Активті екіұштықты тік бұрышты A әріппен белгілейміз. (1.42 б-сурет), ал пассивті екіұштықты тік бұрышты Π әріппен белгілейміз (1.42 в-сурет). Барлық пассивті екіұшты электр энергия тұтынушысы болады және $R_{к\text{ір}}$ кірме кедергісімен сипатталады.

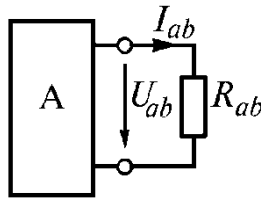
1.19.2 Активті екіұшты теоремасы

Бөлінген тармақтарға байланысты активті екіұштықты баламалы генератормен ауыстыруға болады, ЭҚК бөлінген тармақтың кернеуінің бос жүрісіне тең, ал ішкі кедергі пассивтік екіұшты кірме кедергісіне тең.

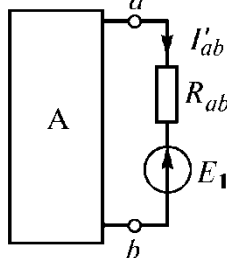
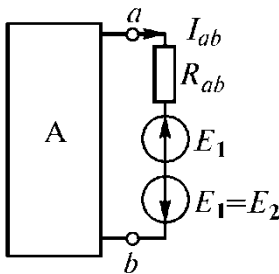
Электр тізбегінде кедергісі R_{ab} бір тармақты, активті екіұштық a және b нүктесіне қосылған (1.43 сурет), бөліп қарайық.

I_{ab} тоғын есептеу үшін активті екіұштықты ЭҚК қорек көзімен және пассивті екіұштықпен ауыстыруға болатынын көрсетейік.

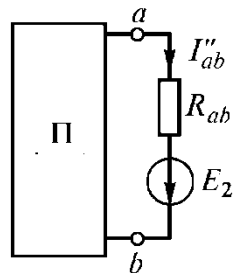
Шынында да ab тармағына екі түрлі немесе қарама қарсы жүргізілген ЭҚК E_1 және E_2 қосса I_{ab} тоғы өзгермейді. (1.44 а-сурет)



1.43-сурет



1.44-сурет



(1.44 б, в-сурет) салу қағидатын пайдалана отырып ab тармағындағы токты анықтаймыз.

$$I_{ab} = I'_{ab} + I''_{ab} \quad (1.98)$$

I'_{ab} -тоқ ЭҚК E_1 және активті екіұшты электр энергиясынан пайда болған.

I''_{ab} -тоқ, тек ЭҚК E_2 мен пайда болған.

(1.44 в-сурет) үлгісінде пассивті екіұшты онда ЭҚК жоқ, тек ішкі кедергі көздері қалған.

ЭҚК E , кедергі U_{ab} қарсы бағытталған.

Ом заңы бойынша, ЭҚК бар тізбек бөлімінде:

$$I'_{ab} = \frac{U_{ab} - E_1}{R_{ab}}. \quad (1.99)$$

ЭҚК E , сұрыптау керек, тек $I_{ae}=0$. Ол, ab тармағының айрылған жағдайын көрсетеді (бос жүріс). Тармақтың бос жүріс кезіндегі ab қысқыш кернеуін $U_{ab\ xx}$ деп белгілейміз.

Демек, $E_1 = U_{ab\ бж}$, $I'_{ab} = 0$, $I_{ab} = I'_{ab} + I''_{ab} = I''_{ab}$ тең болады.

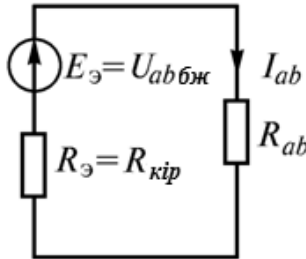
1.44 в-сурет үлгісі бойынша, ток:

$$I''_{ab} = \frac{E_2}{R_{ab} + R_{к\pi p}} \quad (1.100)$$

Демек

$$I_{ab} = \frac{U_{ab\ бж}}{R_{ab} + R_{к\pi p}} \quad (1.101)$$

$R_{к\pi p}$ дегеніміз - ab қысқышқа қарағандағы екіұштын кірме кедергісі. Бұл теңдеуге баламалы сұлбаға сәйкес (1.45-суретте) көрсетілген, онда екіұштың орнында ЭҚК $E_2 = U_{ab\ xx}$ және $R_{к\pi p}$ кедергі резисторы көрсетілген



1.45-сурет

Демек, барлық қалған үлгі бөліктерін, бөлінген тармаққа қатысты, параметры бар баламалы генератормен ауыстыруға болады.

$$R_{э} = R_{к\pi p}; E_{э} = U_{ab\ бж}$$

1.19.3 Баламалы генератор әдісі

Баламалы генератор әдісі арқылы активті екіұштық әдісімен, бос жүріспен және қысқа тұйықталу әдісімен бір тармақтағы тоқты анықтауға болады. Тұжырым мәні мынада: барлық тізбекті, зерттелетін тармақ кедергісінен басқаларын бір қорек көзімен – ЭҚК E_3 баламалы генератормен және R_3 ішкі кедергімен ауыстырады.

Баламалы генератор әдісінің есебі келесі жолдармен бағытталады:

1) ab тұйықталмаған тармақтар қысқышында кернеу табылады;

2) Барлық сұлбада R_{ex} кірме кедергісі анықталады, av қысқышқа байланысты ЭҚК көздерін нөлге тең деп қабылдау;

3) Тоқ мына формула бойынша анықталады:

$$I = \frac{U_{ab \text{ бж}}}{R_{ab} + R_{kip}} \quad (1.102)$$

Егерде тізбекте $R_{av}=0$ қысқа тұйықталу режімі болады. (1.102) формула бойынша

$$I_{кт} = \frac{U_{ab \text{ бж}}}{R_{kip}} \quad (1.103)$$

Осыдан кірме кедергісін анықтаймыз

$$R_{kip} = \frac{U_{ab \text{ бж}}}{I_{кт}} \quad (1.104)$$

(1.104) формуласын пайдаланып кірме кедергісін анықтау оңай.

Ол үшін $U_{ab \text{ бж}}$ тұйықталмаған тармақтар қысқышында бос жүріс кернеуін және тармақтағы $I_{кт}$ қысқа тұйықталу тоғын өлшеу керек. Одан кейін Ом заңы бойынша R_{kip} табу керек.

Мысалы: (1.46-сурет) баламалы генератор әдісі бойынша егер де $E_1 = 50 \text{ В}$; $E_2 = 80 \text{ В}$; $E_3 = 100 \text{ В}$; $R_4 = 20 \text{ Ом}$; $R_1 = 10 \text{ Ом}$; $R_2 = 20 \text{ Ом}$; $R_3 = 40 \text{ Ом}$; $R_5 = 20 \text{ Ом}$ болса, I_5 тоғын анықтау.

Шешімі: Тоқ анықтайтын тармақты айырамыз және ab айрылым нүктелер арасындағы кернеуін есептейміз (U_{ab} б.ж.с бос жүріс кернеуі) Табылған сұлба (1.47-суретте) көрсетілген.

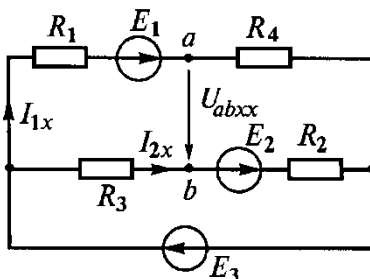
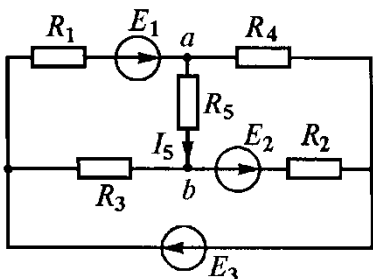
Кирхгофтың екінші заңы бойынша:

$$E_3 + E_1 = I_{1x}(R_4 + R_1); \quad E_3 + E_2 = I_{2x}(R_3 + R_2).$$

Осыдан тоқтарды табамыз:

$$I_{1x} = \frac{E_3 + E_1}{R_4 + R_1} = \frac{100 + 50}{10 + 20} = 5A;$$

$$I_{2x} = \frac{E_3 + E_2}{R_3 + R_2} = \frac{100 + 80}{20 + 40} = 3A.$$



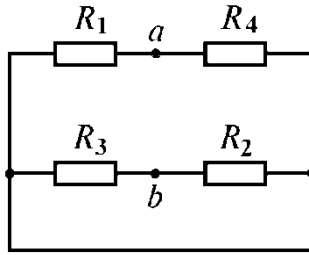
1.46-сурет 1.47-сурет

Бос жүріс кернеуі:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = E_1 - I_{1x}R_1 + I_2R_2 = 50 - 5 \cdot 10 + 3 \cdot 40 = 120 \text{ В}$$

1. $R_{кпр}$ кірме кедергісін анықтаймыз (1.48-сурет) бойынша барлық ЭҚК тұйықтаймыз:

$$R_{кпр} = \frac{R_1 R_4}{R_1 + R_4} + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{10 \cdot 20}{10 + 20} + \frac{20 \cdot 40}{20 + 40} = 20 \text{ Ом}.$$



1.48-сурет

3. Ток есептейміз:

$$I_5 = \frac{U_{ab}}{R_{\text{вх}} + R_5} = \frac{120}{20 + 20} = 3 \text{ A.}$$

Бақылау сұрақтары

1. Электр тізбегін мінездемейтін оның негізгі шамаларына анықтама беріңіз.
2. Вольт амперлік сипаттамасын (ВАС) түсіндіріңіз.
3. Мінсіз көздің, Э.Қ.К көзінің, ток қорегі көзінің ВАС-ың сызыңыз.
4. Электр тоғы, ток тығыздығы, электр әлеуетіне және кернеуге анықтамалар беріңіз.
5. Электр тізбегі дегеніміз не және ол қандай элементерден тұрады?
6. Электр энергиясы, электр қуатына анықтама беріңіз, электр тізбектегі электр балансы дегеніміз не?
7. Ом заңын, Кирхоф заңдарын түсіндіріңіз.
8. Жалғастырып, қатар және аралас қосылған резисторлар тізбектеріне Ом заңын жазыңыз.
9. Кедергі үшбұрышын эквивалентті жұлдызшаға және керісінше айналыстыру әдістерін түсіндіріңіз.
10. Кирхофтың теңдеулер әдісімен электр тізбегін есептеуді түсіндіріңіз.
11. Электр энергиясы қорек көздерінің тізбектеліп және параллель қосылған түрлерін түсіндіріңіз.
12. Пропорционалды шама әдісі дегеніміз не?
13. Контурлы тоқтар әдісін түсіндіріңіз.
14. Түйінді әдісінің ерекшелігін түсіндіріңіз.

15. Түйінді кернеу (екі түйін) әдісі дегеніміз не?
16. Эквиваленті генератор әдісін түсіндіріңіз.
17. Активті және пассивті екіұштықтар дегеніміз не?
18. Өтем теоремасын айтыңыз.
19. Синусойдалды ЭҚК-ны қалай алады? (пайда болады)
20. Синхронды генератордың қандай элементтерден тұратынын айтыңыз және ол қалай жұмыс істейді?
21. Тоқтың, кернеудің ЭҚК-тің лездік, әсерлік және амплитуда мәндері деп нені түсінеді?
22. R , L және R , C тізбектердің лездік, векторлар және энергиялар диаграммаларын сызыңыз?
23. Синусойдалды тоқтың тармақталмаған R , L , C тізбегіне Ом заңың лездік түрде жазыңыз және вектор диаграммасын сызыңыз.
24. Синусойдалды ток, тізбегін есептеудің кешенді әдісін түсіндіріңіз.
25. Кешенді түрдегі Ом және Кирхоф заңдарын жазыңыз.
26. Кешенді түрдегі қуаттар және оларды өлшеу.
27. Кешенді әдіспен синусойдалды ток тізбектерін қалай есептейді?
28. Активті, реактивті кедергілердің аралас қосылған тізбектеріне жалпы кедергінің формуласын жазыңыз.
29. Айналмалы ток электр тізбегіндегі кернеу резонансы дегеніміз не, оның ерекшеліктеріне тоқталыңыз.
30. Айнымалы ток электр тізбегіндегі ток резонансы дегеніміз не?
31. Синусойдалды электр ток тізбегінде қуат коэффициентін қалай жоғарлатады?
32. Өзара индуктивті электр тізбегін қалай есептейді?
33. Ауа трансформатырын түсіндіріңіз.
34. T және Π тәрізді төрт-ұшты алмастыру сұлбалары; олардың теңдеулері.
35. T тәрізді төрт ұшты алмастыру сұлбасындағы A , B , C , D -коэффициенттерін аналитикалық түрде табу керек.
36. T тәрізді төртұшты алмастыру сұлбасындағы A , B , C , D -коэффициенттерін эксперименталды түрде табу керек.

II ТАРАУ

2. СЫЗЫҚТЫ ЭЛЕКТР ТІЗБЕГІНДЕГІ СИНУСОИДАЛДЫ ТОҚ

2.1 Жалпы мәлімет

Іс жүзінде электротехника негізгі мәніне айнымалы ток жатады. Қазіргі кезде барлық электр энергия айнымалы ток түрінде өндіріледі. Ол оның өндіру және тарату артықшылығымен түсіндіріледі.

Айнымалы тоқты тұрақты токпен салыстырғанда негізгі артықшылығы – оңай және энергияны таратқанда кернеуді аз шығынмен өзгертеді. Айнымалы ток генераторы және қозғалтқышы, тұрақты ток машиналарымен салыстырғанда құрылысы жағынан қарапайым және сенімді.

2.1.1. Синусоидалды ток пен кернеудің амплитудасы және фазасы

Қазіргі техникаларда айнымалы токтың неше түрлі формалары кеңінен пайдаланылады: синусоидалды, тікбұрышты, үш бұрышты т.б. (2.1-сурет). Токтың кез келген уақыттағы мәні **лездік** мәні деп аталады. Токтың, ЭҚК-ның кернеудің, лездік мәндері **i**, **u**, **e** әріптерімен белгіленеді. Токтың лездік мәні теңаралық уақытта қайталанса, **периодты** деп аталады, ал толық бір тербеліс жасауға кететін уақыты- уақыт периоды деп аталады.

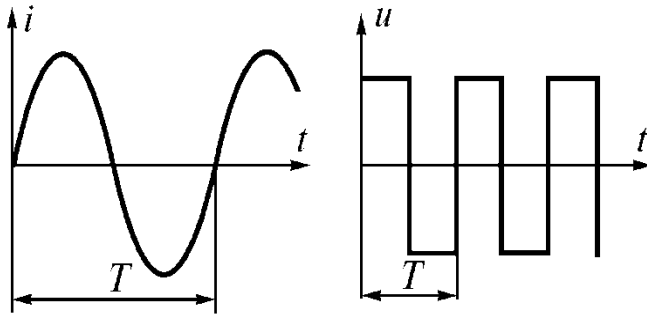
Егерде лездік токтың қисығы синусоида түрінде болса, ток **синусоидалды** деп аталады.

Егерде қисық синусоидтан өзгеше болса, ток синусоидалды емес деп аталады.

Айнымалы токтың электр тізбегіндегі синусоидалды формасы жиі қолданылады, себебі, тоқтардың барлық кернеулігі мен жиілігін синусоидалды уақыты – уақыт функциясы болады. Айнымалы ток генераторларынан уақыты синус заңымен өзгертін ЭҚК алуға тырысады. Тек осылай электр қондырғылардың тиімді жұмыс жасауын қамтамасыз етуге болады.

Барлық синусоидалды уақыт функциясы (мысалы ток) бір түрде жазылады:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi) \quad (2.1)$$



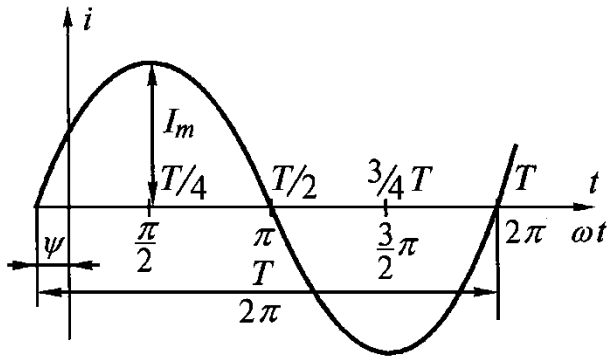
(2.1-сурет)

i – тоқтың лездік мәні;

I_m – тоқтың жоғарғы (амплитудалық) мәні (2.2-сурет);

ω – бұрыштық жиілік мәні;

ψ – бастапқы фаза;



2.2-сурет

$(\omega t + \psi)$ синус аргументі фаза деп аталады. ψ бұрыш фазаға тең, бастапқы уақытта $t=0$ сондықтан оны бастапқы фаза деп атайды.

Фаза уақыт өткен сайын өседі (2.2-сурет) 2π -дейін өскесін, тоқтың барлық өзгеру циклі қайталанады. Ағым мезгілі

T болғанда, фаза 2π -ға дейін өседі. Сондықтан $2\pi/T$ фазаның өзгеру жылдамдығын көрсеткендіктен, ол бұрыштық жиілік деп аталады.

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f; \quad [\omega] = \frac{\text{рад}}{\text{с}} = \text{с}^{-1} \quad (2.2)$$

$$f = \frac{1}{T} \text{ - жиілік, Гц}$$

Стандартты жиілік $f = 50 \text{ Гц}$ тең болса, бұрышты жиілік

$$\omega = 2\pi \cdot 50 = 314, \text{ с}^{-1}$$

Синусоидалды функция аргументіден-уақыт t немесе ωt бұрышы айтады.

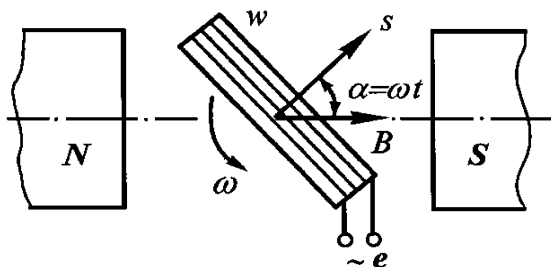
Сондықтан, u және i лездік мәндерін табу үшін олардың параметрларын табу керек, олар: амплитуда, бұрыштық жиілік және бастапқы фаза. Қазіргі техникаларда айнымалы тоқ жиілігі, жиіліктің мыңдаған бөлігінен миллиард Герцке дейін кең қолданылады. Біздің елдің электроэнергетикасында және Еуропада стандартты жиілік 50 Гц, АҚШ-та-60 Гц.

2.1.2. Синусоидалды ЭҚК алу

Қазіргі заман техникасында синусоидалды ЭҚК-ны түрлі әдістермен алады, электр машиналарда немесе электронды генераторларда, тағыда басқа құрылғыларда. Көрнекті үлгі, айналатын магнит өрісінде жақтаудың электромагниттік индукциясы арқылы ЭҚК әсер ету (2.3-сурет).

Жақтаудың ағымдық ілінісуі мынадай формуламен аңықталады:

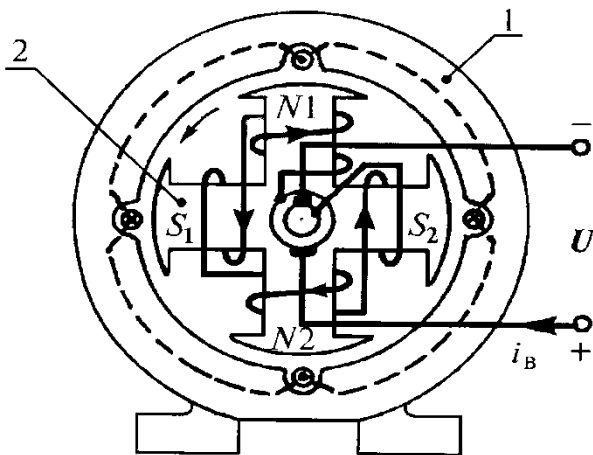
$$\Psi = w\Phi = wBs \cos a = wBs \cos \omega t \quad (2.3)$$



2.3-сурет

Электромагнит индукция заңы бойынша жақтауда ЭҚК пайда болады.

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = wBs\omega \sin \omega t = E_m \sin \omega t \quad (2.4)$$



2.4-сурет

Яғни, ЭҚК синусоида заңымен өзгереді. Қаралған ЭҚК алу әдісі техникада қолданылмайтын көрнекті ескі құрал болып келеді, сондықтан үлкен ауа аралығында күшті біркелкі магнитті өріс алу экономика жағынан тиімсіз.

Өндірісте синусоидалды ЭҚК алу үшін электр машиналар - синхронды генераторлар қолданылады. Айнымалы ток генераторы екі бөліктен тұрады: қозғалмайтын статор 1 және айнымалы ротор 2 (2.4-сурет).

Роторда полюстер орналасқан, яғни электр магниттер, олардың орамалары тұрақты тоқ көзімен қоректенеді және уақытында тұрақты магнитті үздіксіз қоздырғыш жасайды, статор арқылы тұйықталады статорда негізгі орамалар орналасқан онда айнымалы ЭҚК туады. Роторда бір немесе бір неше полюстер болуы мүмкін (2.4-сурет. $2p=4$) Ротор орамаларына тоқ арнайы қоздырғыштың щетка және сақинасы арқылы беріледі. Статор фазасындағы әр орамалар шиыршығында ротор айналғанда

электромагнит заңы, оң қол ережесі бойынша статор орамдарында ЭҚК бағытталады:

$$e = Blv, \quad (2.5)$$

мұнда: B - сым астындағы магнитті индукция өрісі

l – өткізгіштің активті ұзындығы;

v – ротордың магнитті өрісінің өзгеруінің сызықты жылдамдығы.

l және v тұрақты болса ЭҚК өзгеруі ауадағы магнитті индукцияның таралуына байланысты.

Полюсті соңы формасын таңдауда, ротор мен статор арасында бүкіл шеңбер магнитті индукциясы синуссоидалдыға жақын өзгеруін алады.

Магнитті индукция ортасына қарсы ең үлкен және полюсті соңы шетіне қарай бірте-бірте азаяды. Ротордың бір айналымында ЭҚК-ның p толық циклі өзгереді, p -полюс жұбы саны. Егерде ротордың айналым жиілігі минутына n -айналымы болса, ЭҚК жиілігі :

$$f = \frac{pn}{60} \quad (2.6)$$

Егерде жиілік $f=50$ Гц болса, бір жұпты полюсті генератор роторы 3000 айналым/мин жиілікпен айналуы керек, а екі жұпты полюспен -1500 айналым/мин.

(2.4-сурет) Үлкен айналым жылдамдығында ($v>50$ м/с) полюсті бекіту қиындайды, механикалық мықтылығын қамтамасыздандыру үшін полюстері анықталмаған электр машиналары қолданылады, онда орамалар цилиндрлі ротор фазасына біркелкі емес орналасады, алаң формасы синуссоидалды болу керек.

2.1.3. Синуссоидалды тоқтың әрекетілігі және орташа мәні

Айнымалы тоқтың лездік мәні нөлден ең үлкен мағынаға дейін әруақытта өзгеріп тұрады. Айнымалы тоқтың өлшем бөлігі тұрақты ток сияқты ампер. Бұл бекітудің мағынасы неде? «Айнымалы ток» термині нені білдіреді?

Айнымалы тоқты амплитудасымен сипаттауға болар еді. Негізінде олай істеуге болады, іс жүзінде өте ыңғайсыз, себебі айнымалы ток амплитудасын өлшейтін құрал жасау қиын.

Айнымалы тоқты сипаттау үшін тоқтың бағытына байланысты емес қасиеттерін пайдаланған ыңғайлы, ондай қасиетке тоқтың өткізгішті өту барысындағы қыздыратын қабілеттілігі жатады. Біршама өткізгіштен өтетін айнымалы тоқты елестететін, кедергісі R -ден. Біршама уақытта ток өткізгіште белгілі мөлшер шамасында жылу энергиясын шығарады:

$$W = \int_0^T i^2 R dt. \quad (2.7)$$

Сол өткізгіштен тұрақты ток жібереміз, оны солай сұрыптаймыз, дәл сондай уақытта өткізгіште сондай мөлшер шамасында жылу энергиясын шығару керек:

$$W = I^2 RT. \quad (2.8)$$

Жылу әсерінен екі токта бірдей, сондықтан тұрақты тоқты, жылу санын өткізгіште айнымалы токпен бірдей шығарса, ол айнымалы тоқтың әсерлік мәні деп аталады.

(2.7) мен (2.8) теңестіріп синусоидалды ток әсерлік мәнін табамыз:

$$I^2 RT = \int_0^T i^2 R dt; \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (2.9)$$

Сонымен, синусоидалды тоқтың әсерлік мәні кезеңдегі орташа квадратталған болып табылады. Әсерлі I ток пен синусоидалды ток I_m амплитудасы араларында мынадай байланыс орынатылады:

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{I_m^2}{T} \int_0^T \sin^2(\omega t + \psi) dt =$$

$$\frac{I_m^2}{2T} \int_0^T [1 - \cos(2\omega t + 2\psi)] dt = \frac{I_m^2}{2T} (T - 0) = \frac{I_m^2}{2}$$

$$\text{Демек } I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m \quad (2.10)$$

Синусоидалды токтың әсерлік мәні амплитудасынан $\sqrt{2}$ рет аз. Осыған ұқсас синусоидалды кернеудің әсерлік мәні анықталады:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (2.11)$$

Электротехникалық құрылғылардың номиналды тоғы мен кернеуі, әсерлік мәні арқылы анықталады. Электромагнитті, электро-динамикалық, басқа да жүйелер құралдары, тоқ пен кернеудің әсерлік мәнін көрсетеді.

Синусоидалды шаманың орташа мәнін кезеңнің жартысында есептейді, осы уақытта ол белгісін өзгертпейді. Функция кезеңіндегі орташа мәні уақыттың осіне қатысты симметриялы нөлге тең.

Сондықтан:

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = -\frac{2I_m}{T\omega} \left| \cos \omega t \right|_0^{T/2} = \\ -\frac{I_m}{\pi} (-1-1) = \frac{2I_m}{\pi} \approx 0,637 I_m. \quad (2.12)$$

$$\text{Ұқсас: } U_{cp} = \frac{2U_m}{\pi}; \quad E_{cp} = \frac{2E_m}{\pi}.$$

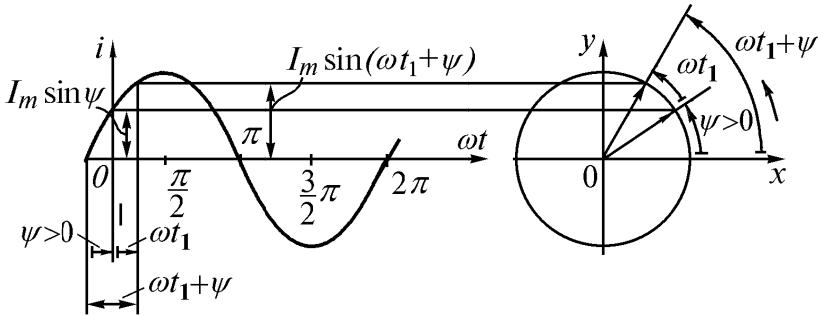
Магнитті электр жүйесінің өлшем құралдары кезеңдегі орташа мәнін көрсетеді.

2.1.4 Синусоидалды шаманың векторлы көрінісі. Вектор диаграммасы

Математикада белгілі, ωt аргумент синусоидалды функциясы, егер ол радиусы ωt радианға сағат жүрісіне қарсы

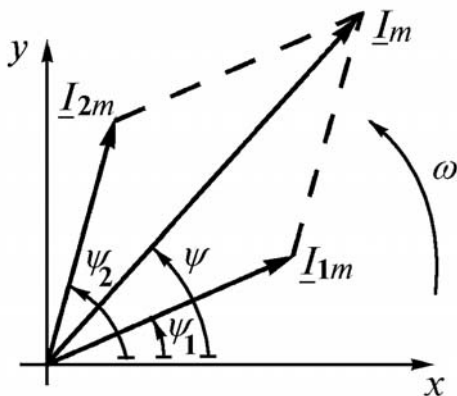
айналса ординат осіне түскен бірлік шама ұзындығының проекциясы ретінде анықталады.

I синусоидалды тоғына, I_m радиус ұзындығы мен үздіксіз айналым сәйкес келеді, бұрышты жылдамдығы $\omega = const$ сағат тілінің жүрісіне қарсы. Координаты жазықтықтағы $(i, \omega t)$ синусоид декарт жүйесінде (x, y) айналып тұрған вектор түрінде көрсетіледі (2.5-сурет)



2.5-сурет

\underline{I}_m векторын жасау үшін, x абсцисс осінің дұрыс бағытынан бұрыш ретінде алынады. Дұрыс бастапқы фаза x осінен сағат тілінің айналымына қарсы жасалынады, ал теріс бастапқы фаза – сағат тілінің жүрісіне сәйкес көрсетіледі. \underline{I}_m вектордың y осіне проекциясы токтың демдегі мәніне тең \underline{I}_m , уақыты $t=0$. Мейлі, $t=0$ тең мезгілінен, вектор \underline{I}_m координат 0-ден бастап тұрақты бұрышты жылдамдығын дұрыс бағытта (сағат тілінің жүрісіне қарсы) айналады. t_1 уақыт шамасында вектор x осінде $(\omega t_1 + \psi)$ бұрышқа бұрылады, y осіндегі оның проекциясы функцияның демдегі мәніне тең болады $i(t_1) = I_m \sin(\omega t_1 + \psi)$ Сондықтан, ω бұрышты жылдамдықпен айналып жатқан \underline{I}_m вектордың координат осіндегі проекциясы кез келген уақытта синусоидалды функцияның демдегі мәніне тең $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi)$.



2.6-сурет

Синусоидалды функцияны айналып тұрған вектор түрінде көрсету үшін, бастапқы уақыт шамасында x , y жазықтығында көрсетуге болады (2.6-сурет) Бұл жағдайда, айналып тұрған вектор синусоидты көрсетеді, яғни оның екі айрықша параметрлері туралы мәлімет береді, олар - I_m амплитудасы және ψ бастапқы фазасы.

Синусоидтың қосу (алу) есебі қысқарады, егер де вектор түрінде жазықтықта көрсетілсе, функцияны көрсететін векторларды қосады. Мысал ретінде екі тоқты қосайық:

$$i_1 = I_m \sin(\omega t_1 + \psi_1) \text{ мен } i_2 = I_{2m} \sin(\omega t_2 + \psi_2)$$

(2.6 суретте) i_1 мен i_2 жазықтықта вектор түрінде көрсетілген. I_m модульді вектор x өсіне ψ бұрышымен орналасқан, векторлар қосындысы болады және қосынды синусоидты көрсетеді:

$$i = i_1 + i_2 = I_m \sin(\omega t + \psi).$$

Қолданбалы электротехникада тоқ пен ЭҚК-ның әсерлі мәнін білген жөн.

2.2. Синусоидалды тоқ тізбегітегі резистор, индуктивті катушка және конденсатор

Тұрақты тоқ тізбегінен синусоидалық тоқ тізбегінің айырмашылығы элементіне тек қана резистор емес, индуктивті катушка және конденсатор да жатады. Нақты электр тізбегіндегі айнымалы тоқтың зерттеу үдерісін оңайлату үшін бұл тізбек, тұрақты тоқ тізбегі сияқты, осы элементтерден тұратын алмастыру сұлбасы түрінде көрсетіледі. Айнымалы тоқ тізбегінің элементтері жылу түрінде энергия беретін, активті кедергі деп аталады.

Тізбек элементтері, электр және магнит жазықтығында мезгіл-мезгіл энергия сақталса, реактивті деп аталады, ал айнымалы тоқ кедергісі – реактивті кедергі деп аталады.

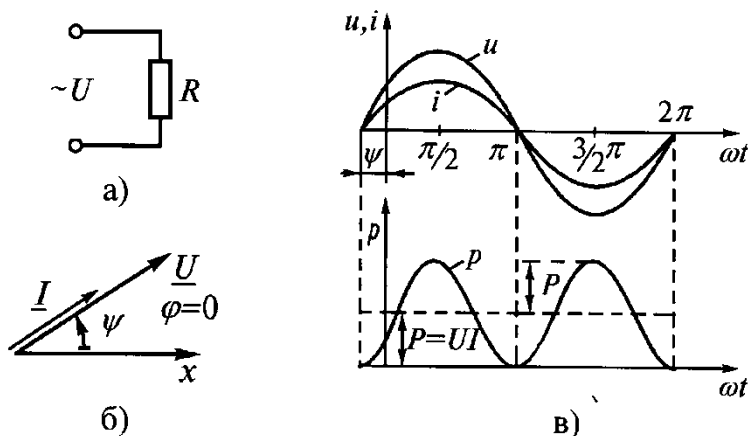
Реактивті кедергімен катушка және конденсатор иемденген. Синусоидалды тоқ тізбегі есебінің негізін білу үшін, жәй тізбектегі тоқ пен кернеудің ара – қатынасын қарастырайық.

2.2.1. Синусоидалды тоқ тізбегіндегі резистор

Егер де синусоидалды кернеуді $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$ (2.7 а-сурет) кедергі R резисторға қоссақ, одан синусоидалды тоқ жүреді:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t + \psi) = I_m \sin(\omega t + \psi). \quad (2.13)$$

Демек, қысқыштағы кернеу мен резистордағы токтың бастапқы фазасы бірдей, басқаша айтқанда, фазасы беттеседі: олар бір уақытта амплитуда мәндеріне жетеді және сәйкес бір уақыта нөлден өтеді (2.7-сурет)



2.7-сурет

Жиіліктері бірдей екі синусоиданың бастапқы фазаларының айырымы фазалық ығысу бұрышы деп аталады.

Дәл осы жағдайда, тоқ пен кернеу арасындағы фазалық ығысу бұрышы нөлге тең:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 0. \quad (2.14)$$

Тоқ пен кернеудің амплитудалық және әсерлік мәндері Ом заңымен байланысты:

$$I_m = \frac{U_m}{R}; I = \frac{U}{R}. \quad (2.15)$$

Резистордан тоқтың өтуі, оның қорек көзінен энергия алумен жалғасады. Тоқтың түсу жылдамдығы қуатымен сипатталады.

Резистордың пайдаланатын лездік қуаты:

$$p = ui = U_m I_m \sin^2(\omega t + \psi) = UI[1 - \cos(2\omega t + 2\psi)], \quad (2.16)$$

Кернеу мен тоқ жиілігімен салыстырғанда, екі есе бұрыштық жиілікпен өзгереді.

Лездік қуатта тұрақты құраушы UI болады және құраушы $UI \cos(2\omega t + 2\psi)$ екі есе 2ω бұрыштық жиілікпен өзгереді. (2.7-сурет). Егер де u мен i фазасы беттессе, оларда бірдей белгі болады, олардың көбейтінділері әр уақытта он, яғни $p > 0$.

Кезеңдегі лездік қуаттың орташа мәні:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \quad (2.17)$$

Бұл активті қуат деп аталады, ватпен өлшенеді. Активті қуат:

$$P = UI = I^2 R, \text{ Вт}. \quad (2.18)$$

Осыдан активті кедергі табылады:

$$R = \frac{P}{I^2}. \quad (2.19)$$

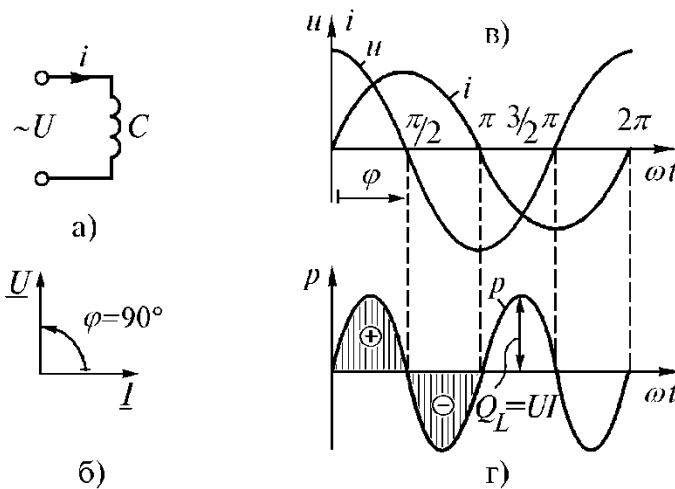
Белгілі, айнымалы тоқ өткізгішінің кедергісі, сыртқы құбылыс әсерінен, құйынды тоқ пен кеңістіктегі электр магнит энергиясының пайда болуынан тұрақты тоққа қарағанда артық.

2.2.2. Синусоидалды тоқ тізбегіндегі индуктивті катушка

Индуктивті катушка, нақты тізбектегі синусоидалды тоқ алмастыру сұлбасының элементі түрінде, магниті жазықтықта

индукция құбылысы мен жиналу құбылысын есепке алуға жағдай жасайды.

Айнымалы ток тізбегіне (2.8 а-сурет), аз кедергісі бар $R=0$ индуктивті катушка қосылған токтың үздіксіз өзгеріп тұруы ЭҚК катушка иірімінде өз индукциясының пайда болуына әсер етеді. Ленц ережесі бойынша ЭҚК токтың өзгеруіне қарсыласады.



2.8-сурет

Мысалы, катушкадағы ток синус заңы бойынша өзгереді

$$i = I_m \sin \omega t. \quad (2.20)$$

Бұл жағдайда өз индукциясының ЭҚК-сы

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -\omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (2.21)$$

Сондықтан, катушкадағы кернеу

$$u_L = -e_L = \omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = U_m \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (2.22)$$

(2.20) және (2.22) формулаларды салыстыра отырып, маңызды қорытынды шығарамыз: **Кернеу токтан $\pi/2$ бұрышқа озады**, немесе ток фазасы кернеуден $\pi/2$ бұрышқа қалады деуге болады (2.8 б-сурет). Дәл осы жағдайда **фазаның қозғалу бұрышы** он(озады) (2.8 в-сурет)

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 90^\circ = \pi/2. \quad (2.23)$$

$X_L = \omega L$ индуктивті кедергі, өлшем бірлігі – Ом. Ол жиілікке байланысты және есеп шамасын көрсетеді, ол арқылы өзара индукция құбылысы анықталады.

Кернеу мен тоқ амплитудасы Ом заңымен байланысты екенін (2.22) формула талдауынан көруге болады.

$$U_m = \omega L I_m = X_L I_m. \quad (2.24)$$

Оның әсерлі мәніде оған ұқсас

$$U = \omega L I = X_L I. \quad (2.25)$$

Катушкасы бар тізбектің лездік қуаты

$$p = ui = U_m I_m \sin(\omega t) \sin(\omega t + 90^\circ) = 2UI \sin \omega t \cos \omega t = UI \sin 2\omega t. \quad (2.26)$$

(2.28 г-сурет) кестесі (2.26) теңдеу арқылы салынған, бұл кезеңнің бірінші ширегінде $u > 0$ және $i > 0$ болғанда, p қисығы мен абсцис осімен шектелген алаңды, магнит өрісін жасау үшін катушканың алатын энергиясын көрсетеді. Кезеңнің екінші ширегінде тоқ ең көп саннан нөлге дейін азаяды, магнитті өріс энергиясы қоректену көзіне беріледі. Бұл кезде лездік қуаты теріс үдеріс қайталанады. Сонымен, катушка мен қорек көзі арасында энергия ауытқуы пайда болады, катушкаға кіретін активті қуат нөлге тең. Тізбектегі лездік қуат амплитудасының ауытқуын реактивті (индуктивті) қуат деп атайды:

$$Q_L = UI = I^2 X_L. \quad (2.27)$$

Реактивті қуаттың активтіден өзгеше өлшем бірлігі – *Var* (вольт-ампер реактивті)

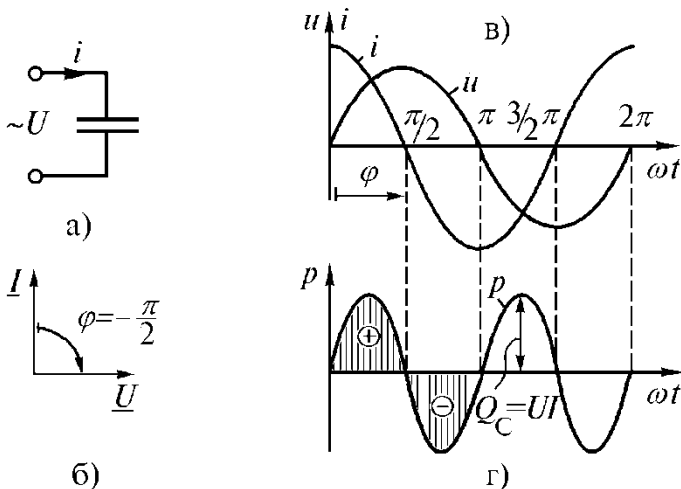
2.2.3. Синусоидальды тоқ тізбегіндегі конденсатор

Конденсатордың айнымалы тоқ тізбегіне қосылуы тізбектің үзілуіне әсер етпейді, конденсатордың қуат алуы мен ағын алуы арқылы тоқ тізбекте қуаттанып тұрады, (2.9 а-сурет) бойынша кернеу синус заңымен өзгереді:

$$u = U_m \sin \omega t. \quad (2.28)$$

Онда

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} = \omega CU_m \cos \omega t = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (2.29)$$



2.9-сурет

(2.29) формула $\pi/2$ бұрышқа салынған кернеуден тоқтың озатынын көрсетеді. (2.9 б, в-сурет) Тоқтың нөл шамасы кернеудің ең үлкен шамасына сәйкес келеді. Физикалық тұрғыдан айтқанда, электр заряды мен кернеу ең үлкен шамасына жеткенде, тоқ нөлге тең болады.

Тоқтың фазалық ығысуы, кернеу мен тоқтың бастапқы фазаларының айырмашылығын көрсетеді:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = -\pi/2. \quad (2.30)$$

Сонымен катушкасы бар тізбектен ерекшелігі $\varphi = \pi/2$ км, **конденсаторы бар тізбектің фазасының жылжу бұрышы теріс.**

(2.29) формулада, тоқ пен кернеу амплитудалары Ом заңымен байланысты:

$$I_m = \omega C U_m = \frac{U_m}{X_C}; X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (2.31)$$

Бұнда X_C -**сыйымдылық кедергі**, Оммен өлшенеді.

Конденсаторға түсетін лездік қуат

$$p = ui = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t + \pi / 2) = UI \sin 2\omega t, \quad (2.32)$$

Бұрышты жиілігі 2ω синусоидалды ауытқиды, амплитудасы UI (2.29 г-сурет). Қорек көзінен түскен энергия конденсатордың электр өрісінде уақытша қамданады, содан кейін, электр өрісі жоқ болғанда, қайтадан қайнар көзіне қайтып келеді. Бұнда да катушкалы тізбектегідей, қайнар көзі мен конденсатор арасында энергия ауытқиды, активті қуат $P = 0$.

Конденсаторы бар тізбек қуаты амплитудасының ауытқуын **реактивті (сыйымдылық) қуат** деп аталады.

$$Q_C = UI = X_C I^2, \text{Var}. \quad (2.33)$$

2.3. Синусоидалды тоқ тізбегін векторлы диаграмма арқылы талдау

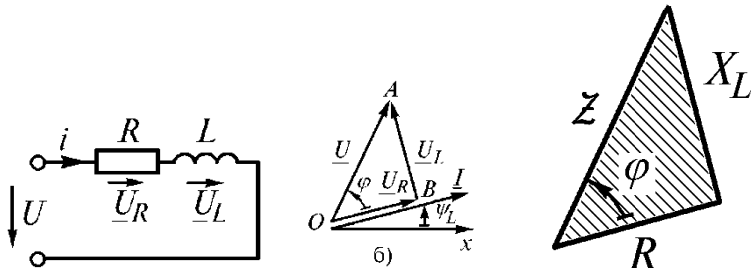
Синусоидалды ЭҚК көрсететін біріктірілген, бір жиіліктегі кернеу мен тоқ, бір-біріне қарасты бағдарын сақтап жазықтықта көрсетілген векторлар, векторлы диаграмма деп аталады. Векторлы диаграмма, синусоидалды тоқ тізбегінің жұмыс режимін талдауда кеңінен қолданылады, тізбек есебін жеңіл және көрнекті жасайды.

2.3.1. Резистор және индуктивті катушкасы бар тізбек

Айнымалы тоқ тізбегіндегі нақты катушка активті жіне индуктивті кедергілерінің өзара байланыстарын көрсетеді. (2.10 а-суретте) индуктивті катушканың алмастыру сұлбасы берілген.

Мысалы, катушкадан синусоидалды тоқ жүреді

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \quad (2.34)$$



2.10-сурет

Кирхгофтың екінші заңына сәйкес кернеулердің лездік мәндері

$$u = u_R + u_L = iR + L \frac{di}{dt}, \quad (2.35)$$

u_R - активті кедергідегі кернеу

u_L - индуктивті кедергідегі кернеу.

(2.35) теңдеуді әрекеттегі мәндер бойынша былай жазуға болады:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L. \quad (2.36)$$

(2.36) теңдеуге қарап векторлы диаграмма салынады. (x, y) координат жүйесіне тоқ векторы \underline{I} (негізгі вектор) көрсетіледі. (2.10 б-сурет) Бұдан кейін кернеу векторы \underline{U}_R кедергісінің активті құрамасын жүргіземіз.

Ол тоқ фазасымен сәйкес болады. \underline{U}_L -кернеу векторы ток векторынан 90° озады. Екі вектор қосындысы қайнар қорек көзінің кернеу векторын береді, ол ток векторынан φ бұрышқа озады.

Вектор диаграммасынан

$$U^2 = U_R^2 + U_L^2 = I^2 R^2 + I^2 X_L^2,$$

$$\text{Бұдан } I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{U}{Z} \quad (2.37)$$

Z – тізбектің толық кедергісі, ол берілген кернеуді токқа бөлу арқылы табылады $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \frac{U}{I}$.

2.10 б-суреттегі ОАВ үшбұрышы, кернеу үшбұрышы деп аталады. Ток пен бір фазадағы кернеу құрамасы активті кернеу құрамасы деп аталады U_a :

$$U_a = U_R = U \cos \varphi = IR. \quad (2.38)$$

Ток векторына тігінен түсетін кернеу құрамасы реактивті кернеу құрамасы деп аталады:

$$U_p = U_L = U \sin \varphi = IX_L. \quad (2.39)$$

Егер де, (2.10 б-сурет)кернеу үшбұрышының қабырғасын әрекеттегі ток мәніне бөлсек, кедергі бұрышын табамыз (2.10 в-сурет). Кедергі үшбұрышынан арақатынасы, фазаның жылжу бұрышы мен тізбек параметрлерінің байланысы табылады.

$$R = Z \cos \varphi; \quad X_L = Z \sin \varphi; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R};$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X_L}{Z}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{X_L}{R}. \quad (2.40)$$

Егер де, $0 < \varphi < \pi/2$ Тізбек индуктивті болады. $\varphi = 0$ және $\varphi = \pi/2$ болса таза активті және таза индуктивті күшке сәйкес келеді. Тізбектегі токтың заң бойынша өзгеретіндігіне орай, кернеудің лездік мәнін жазайық (2.34)

$$u_R = I_m R \sin(\omega t + \psi_i) = U_{mR} \sin(\omega t + \psi_i);$$

$$u_L = I_m X_L \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ) = U_{mL} \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ);$$

$$u = I_m Z \sin(\omega t + \psi_i + \varphi) = U_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi). \quad (2.41)$$

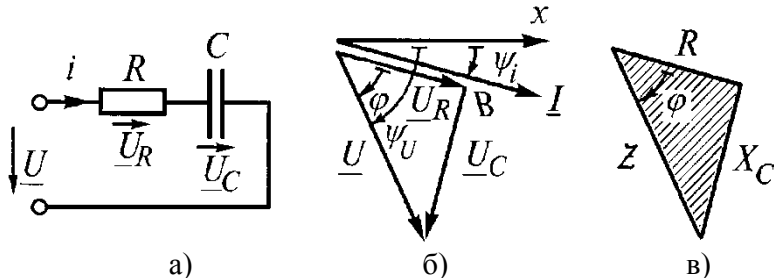
2.3.2. Резистор мен конденсаторы бар электр тізбегі

Кирхгофтың екінші заңы бойынша, 2.11 а-суреттегі тізбектің кірісіндегі кернеу, әсерлі мәні келесі теңдеумен табылады.

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_C. \quad (2.42)$$

Тізбекте мынадай ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ жүреді және $\psi_i < 0$ деп, векторлы диаграмма сызамыз.

Тоқ векторын x осіне ψ_i бұрышымен теріс бағытта сағат жүрісіне сай жүргіземіз (2.11 б-сурет).



2.11-сурет

Резистор \underline{U}_R кернеу векторы фазасы мен тоқ векторына дәл келеді, ал конденсатор \underline{U}_C кернеу векторы, тоқ векторынан 90° қалады. Екі векторды қосқанда (2.42) теңдеу бойынша \underline{U}_C қорек көзінің кернеу векторын табамыз (2.11 б-сурет).

Векторлы диаграммадан:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{U}{Z}; \quad Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad (2.43)$$

Z - R , C тізбегінің толық кедергісі.

Қорек көзінің кернеу векторы, тоқ векторынан φ бұрышына қалады, сондықтан тізбек сыйымдылық түрде болады: $-90^\circ < \varphi < 0$

(2.11 б-сурет) кернеу үшбұрышы мен (2.11 в-сурет) кедергі үшбұрышының арақатынасын (2.38), (2.39) (2.40) формулалар бойынша жазуға болады.

Тізбек элементіндегі кернеулердің лездік мәндері былай жазылады:

$$\begin{aligned} u_R &= I_m R \sin(\omega t + \psi_i) = U_{mR} \sin(\omega t + \psi_i); \\ u_C &= I_m X_C \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ) = U_{mC} \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ); \\ u &= I_m Z \sin(\omega t + \psi_i + \varphi) = U_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi). \end{aligned} \quad (2.44)$$

2.3.3. Резисторды катушка мен конденсаторды тізбектеп қосу

Синусоидалды токтың $i = I_m \sin \omega t$ R, L, C элементтерінің тізбектеліп жалғасқан электр тізбегінен өткенде, (2.12 а-сурет) оның қысқышында синусоидалды кернеу пайда болады және ол элементтердің синусоидалды кернеулерінің алгебралық қосындысына тең. (Кирхгоф екінші заңы):

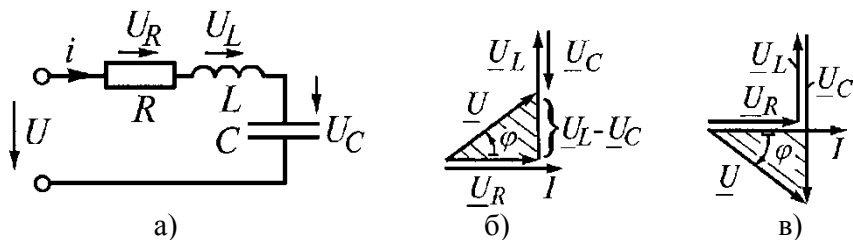
$$u = u_R + u_L + u_C. \quad (2.45)$$

Осы теңдеуді векторлы түрде жазамыз:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C. \quad (2.46)$$

Фазалар ара-қатынастарын ескере отырып векторлы диаграмма сызамыз (2.12 б-сурет)

Резистор кернеу векторы фаза бойынша ток векторымен бір бағытта, конденсатор кернеуі ток векторынан 90° қалады, ал индуктивтегі ток кернеу векторы 90° озады. Тізбек элементтеріндегі үш кернеу векторын қоссақ, қорек көзінің кернеу векторын табамыз.



2.12-сурет

Векторлы диаграммдан кіріс кернеуін табамыз:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{I^2 R^2 + (IX_L - IX_C)^2},$$

Бұдан, ток пен толық кедергі:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{Z};$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.47)$$

$X = X_L - X_C$ – индуктивті және сыйымдылық кедергі айырмашылығы реактивті кедергі деп аталады.

Кернеу үшбұрышынан фаза жылжуын табамыз:

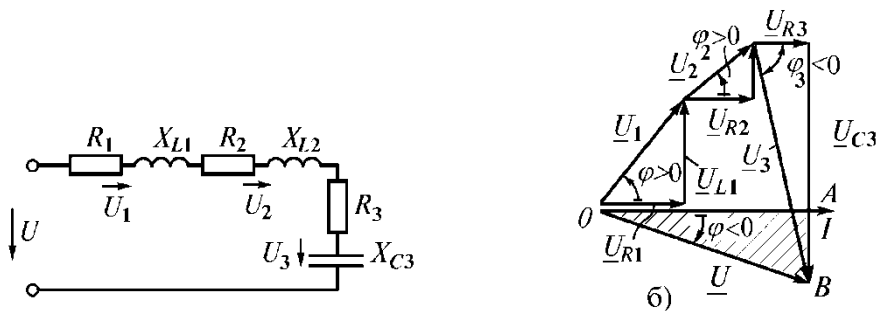
$$\varphi = \arctg \frac{U_L - U_C}{U_R} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{X}{R}. \quad (2.48)$$

Егер де, $X_L > X_C$ көп болса, $X > 0$, онда тізбек индуктивті түрде болады. Бұл жағдайда $U_L > U_C$ (2.12 б-сурет), Ал фаза жылжуы $\varphi > 0$. Егер де $X_L < X_C$ аз болса, $X < 0$, онда тізбек сыйымдылық түрде болады, ал фаза жылжуы $\varphi < 0$ (2.12 в-сурет). Сонымен, реактивті кедергі X , оң ($\varphi > 0$) және теріс ($\varphi < 0$) болуы мүмкін.

Егерде, $X_L = X_C$ болса, реактивті кедергі $X = X_L - X_C = 0$. Бұл жағдайда тізбек активті түрде болады, ал фаза жылжуы $\varphi = 0$. Бұл режим **кернеу резонансы** деп аталады.

2.3.4. Синусоидалды тоқтың тармақталмаған тізбегі

Тізбектеліп қосылған үш тоқ қабылдағыш электр тізбегін қарастырайық (2.13 а-сурет) алдыңғы екеуі активті-индуктивті түрде, үшіншісі тізбектеліп қосылған резистор мен конденсатор. Векторлы диаграмма бойынша тізбек талдауын жасайық.



2.13-сурет

Барлық векторлар диаграммаларының базасы болатын еркін тоқ векторын құрастырамыз. Кирхгоф заңы бойынша теңдеу құрамыз:

$$\underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3,$$

Мұнда $\underline{U}_1 = \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{L1}$; $\underline{U}_2 = \underline{I}R_2 + \underline{I}X_{L2}$; $\underline{U}_3 = \underline{I}R_3 + \underline{I}X_{C3}$. Векторлар құрамасын жасаймыз, модулдері Ом заңы бойынша табылады. Вектор қосындысын көп бұрыш ережесі бойынша жасаймыз.

Тізбектің активті кедергісіндегі кернеу векторы фазасымен тоқ векторына дәл келеді, \underline{U}_L векторы тоқ векторынан 90° озады, ал \underline{U}_C векторы одан 90° қалады (2.13 б-сурет). Көрек көзінің әрекеттегі кернеу мәні (\underline{U} вектор модулі) диаграмма бойынша ОАВ кернеу үшбұрышынан былай табылады.

$$U = \sqrt{I^2(R_1 + R_2 + R_3)^2 + I^2(X_{L1} + X_{L2} - X_{C3})^2} = I\sqrt{R^2 + X^2} = IZ. \quad (2.49)$$

(2.49) формула бойынша $R = R_1 + R_2 + R_3$ тізбектің активті кедергісі тізбектеп жалғасқан резисторлардың кедергілері олардың арифметикалық қосындысына тең.

Тізбектеген n қабылдағыштың жалпы жағдайы мынадай:

$$R = \sum_{K=1}^n R_K. \quad (2.50)$$

$X = X_{L1} + X_{L2} - X_{C3}$ тізбектің реактивті кедергісі болады, тізбектеліп қосылған элементтер кедергілерінің арифметикалық қосындысына тең.

Жалпы келгенде:

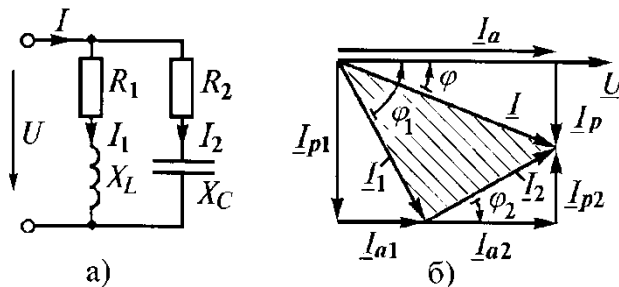
$$X = \sum_{K=1}^n (X_{LK} - X_{CK}) = \sum_{K=1}^n X_K. \quad (2.51)$$

Біздің сұлбада индуктивті кернеу векторлары конденсатордағы кернеу векторынан аз, сондықтан $X < 0$, бұндай жағдайда реактивті кедергі сыйымдылық түрінде болады. (2.49) формула Ом заңы бойынша U мен I әрекеттегі мәнінің арасындағы байланысты көрсетеді.

2.3.5. Резисторды, катушка мен конденсаторды қатар қосу

Қатар қосылған екі тармағы бар тізбекті қарастырайық. Мысалы, кернеу көзі мен сұлба параметрлері белгілі. Қорек көзінен алатын I тоқ пен тізбек кірісіндегі φ жылжу бұрышын табу керек. Есепті қатынасын табу үшін тоқтың векторлы диаграммасын жасаймыз. Қатар тармақтағы тоқты және берілген кернеуге қатысты бұрыштың ығусуын есептейміз. Бірінші тармақ үшін жүктемелеу сипаттамасы индуктивті тоқ I дан $0 < \varphi < \pi/2$ бұрышқа қалады:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2}; I_1 = \frac{U}{Z_1}; \varphi_1 = \arctg \frac{X_L}{R_1} > 0.$$



2.14-сурет

Екінші тармақ жүктеме сыйымдылық сипаттамада:

I_2 вектор U дан- $\pi/2 < \varphi < 0$ бұрышына озады.

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_C^2}; I_2 = \frac{U}{Z_2}; \varphi_2 = -\arctg \frac{X_C}{R_2} < 0.$$

Қатар тармақтардың негізі болатын, негізгі вектор ретінде \underline{U} қорек көзі кернеудің векторы алынады. (2.14 б-сурет) Осыған байланысты \underline{I}_1 , \underline{I}_2 тоқ векторларын бағыттау қиын емес.

Тоқтың екінші тармағын бағыттағанда φ_2 бұрышын вектор \underline{I}_2 , \underline{U} векторына қатар жүргіземіз, себебі векторлар басының бір біріне қатысы жоқ. Кирхгофтың бірінші заңына сәйкес $\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2$ кіріс тоғын табамыз. Әрі қарай векторлы диаграммадан барлық есеп қатынасын табамыз. Ол үшін, әр вектор проекциясы оске өзара тігінен (взаимоперпендикулярны)

түсті дейік. Вектор проекциясынан кернеу векторына бағытталған тоқты \underline{I}_p тоқтың активті құрамасы деп атаймыз, ал өзара тігінен бағытталған проекция - \underline{I}_p тоқтың реактивті құрамасы болады (2.14 б-сурет), бұл құрамалар барлық векторларда көрсетілген. \underline{I}_a және \underline{I}_p тоқ құрамасы физикалық түрде жоқ, тек есепті түрінде қаралуы керек. Диаграмма бойынша кірме тоқтың активті құрамасы, қатар жүрген тармақтағы тоқтардың активті құрамасының қосындысы түрінде анықталады:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2 = \frac{U R_1}{Z_1 Z_1} + \frac{U R_2}{Z_2 Z_2} = U \left(\frac{R_1}{Z_1^2} + \frac{R_2}{Z_2^2} \right) = U(g_1 + g_2) = Ug \quad (2.52)$$

g - тізбектің активті өткізгіштілігі, жеке тармақтар активті өткізгіштіліктің арифметикалық қосындысына тең.

$$g = g_1 + g_2; \quad g = \sum_{K=1}^n g_k \quad (2.53)$$

$$g_k = \frac{R_K}{Z_k^2} - k \text{ тармақтың активті өткізгіштілігі.}$$

Тек кейбір жағдайда, егер де тармақ таза активті кедергісі $Z_K = R_K$ түрінде көрсетілсе, оның активті өткізгіштілігі, активті кедергіге керісінше болады.

Кірме тоқтың реактивті құрамасы, қатар жүрген тармақтар тоғының реактивті құрамасының алгебралық қосындысы ретінде анықталады. Индуктивті тармақтағы реактивті құраманы оң деп санайды, ал сыйымдықтағыны – теріс дейді. Белгілері, сәйкес мәндері қойылғанда есептеледі:

$$I_p = I_{p1} + I_{p2} = I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2 = \frac{U X_1}{Z_1 Z_1} + \frac{U X_2}{Z_2 Z_2} = U \left(\frac{X_{L1}}{Z_1^2} - \frac{X_{C2}}{Z_2^2} \right) = U(b_{L1} - b_{C2}) = Ub, \quad (2.54)$$

$b = b_{L1} - b_{C2}$ – тізбек өткізгіштігінің реактивті құрамасы кейбір тармақтардың реактивті өткізгіштілігінің алгебралық қосындысына тең.

Жалпы жағдайда

$$b = \sum_{k=1}^n b_k$$

b_k - кейбір K тармақтардың реактивті өткізгіштігі;

$$b_k = \frac{X_k}{z_k^2}, \quad (2.55)$$

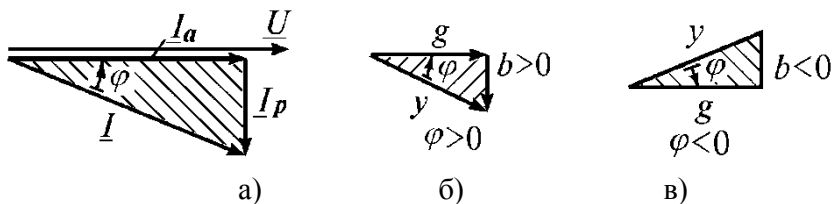
Егер де, қарастырылатын тармақ таза реактивті болса: $Z_k = X_k$ өткізгіштілік реактивті кернеуге керісінше болады. Тізбек кірмесіндегі ток (2.14 б-сурет)

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{U^2 g^2 + U^2 b^2} = U \sqrt{g^2 + b^2} = Uy, \quad (2.56)$$

$y = \sqrt{g^2 + b^2}$ тізбектің толық өткізгіштілігі активті және реактивті өткізгіштілік геометриялық қосындысына тең.

φ фаза бұрышының ығысуы векторлы диаграммадан анықталады.

(2.15 а-суретте) \underline{I} кірме тоғының векторлы диаграммасы көрсетілген, оның құрамасы \underline{I}_a мен \underline{I}_p және \underline{U} қорек көзінің кернеуі үшбұрыш, ток векторымен және оның \underline{I} , \underline{I}_a мен \underline{I}_p проекциясымен жасалған **тоқ үшбұрышы** деп аталады (2.15 а-сурет). Егерде, үшбұрыш векторын U кернеуге бөлсек, үшбұрыш болады, ток үшбұрышына ұқсас, **сондықтан өткізгіштік үшбұрышы** болады. Ол b, g, y өткізгіштілік пен жасалған, модулдері сәйкес өткізгіштілікке тең, ал қабырғалары ток үшбұрышының $\underline{I}, \underline{I}_a, \underline{I}_p$ -мен тура келеді (2.15 б-сурет)



2.15-сурет

2.15-суретте $\varphi < 0$ кезіндегі өткізгіштілік үшбұрышы көрсетілген. Бұл суреттен параметрлер ара қатынасын және фаза бұрышының ығысу формуласын табамыз.

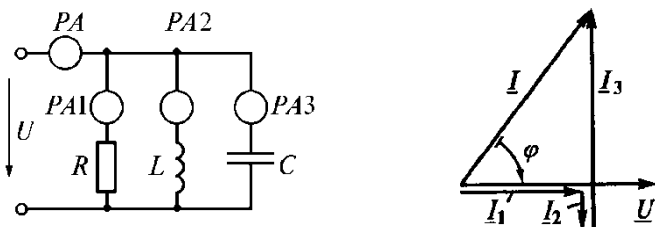
$$g = y \cos \varphi; \quad b = y \sin \varphi; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g}; \quad \sin \varphi = \frac{b}{y};$$

$$\cos \varphi = \frac{g}{y}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{b}{g}. \quad (2.57)$$

Белгісін есепке алып φ табу үшін, tg және \sin формуласын қолдану керек.

Мысалы. Әсерлік кірме тоғының мәнін табуымыз керек, қатар жүрген тармақтағы тоқтар белгісі (2.16 а-сурет):

$$I_1 = 3 \text{ A}; \quad I_2 = 1 \text{ A}; \quad I_3 = 5 \text{ A}.$$



2.16-сурет

Есебін Кирхгофтың бірінші заңы бойынша табамыз:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3$$

Осыған сәйкес векторлы диаграмма жасаймыз.

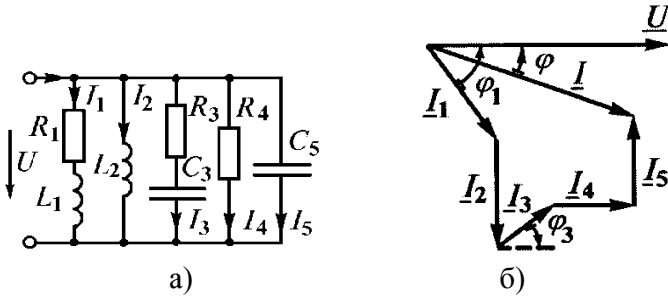
Үш тоқ қосындысы \underline{I} вектор \underline{U} -ға қатысты алынған (2.16 б-сурет) диаграммасынан берілген мәні бойынша тоқты табамыз:

$$I = \sqrt{I_1^2 + (I_2 - I_3)^2} = \sqrt{3^2 + (1-5)^2} = 5A.$$

Мысалы: (2.17 а-суреттегі) сұлбада берілген:

$I = 10 A$, $R_1 = 6 \text{ Ом}$, $X_{L1} = 8 \text{ Ом}$, $X_{L2} = 10 \text{ Ом}$, $R_3 = 16 \text{ Ом}$,
 $X_{C3} = 12 \text{ Ом}$, $R_4 = 20 \text{ Ом}$, $X_{C5} = 20 \text{ Ом}$.

Қорек көзінің кернеуін тауып, векторлы диаграмма жасау керек.



2.17-сурет

Есебі. (2.53) және (2.55) формулалар бойынша схемадағы бастапқы өткізгіштілікті табамыз.

$$g_1 = \frac{R_1}{R_1^2 + X_{L1}^2} = \frac{6}{6^2 + 8^2} = 0,06 \text{ См};$$

$$b_1 = \frac{X_{L1}}{R_1^2 + X_{L1}^2} = \frac{8}{6^2 + 8^2} = 0,08 \text{ См};$$

$$g_2 = 0; \quad b_2 = \frac{1}{X_{L2}} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ См};$$

$$b_3 = -\frac{X_{C3}}{R_3^2 + X_{C3}^2} = -\frac{12}{12^2 + 16^2} = -0,03 \text{ См};$$

$$g_4 = \frac{1}{R_4} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ См}; \quad b_4 = 0; \quad g_5 = 0;$$

$$b_5 = -\frac{1}{X_{C5}} = -\frac{1}{20} = -0,05 \text{ См}$$

Барлық тізбектің активті және реактивті өткізгіштілігі:

$$g = g_1 + g_2 + g_3 = 0,06 + 0,04 + 0,05 = 0,15 \quad \text{См};$$

$$b = b_1 + b_2 + b_3 + b_5 = 0,08 + 0,1 - 0,03 - 0,05 = 0,1 \quad \text{См}$$

Қорек көзінің кернеуі:

$$U = \frac{I}{y} = \frac{I}{\sqrt{g^2 + b^2}} = \frac{10}{\sqrt{0,15^2 + 0,1^2}} = 61 \text{ В}$$

Кирхгофтың бірінші заңы бойынша векторлы диаграмма жасаймыз

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 + \underline{I}_4 + \underline{I}_5$$

Бірінші тармақтағы тоқ векторы, кернеу векторынан φ_1 бұрышына қалады

$$\varphi_1 = \arctg \frac{X_{L1}}{R_1}.$$

екінші тармақтағы тоқ векторы кернеу векторынан 90° бұрышқа қалады, себебі тармаққа тек катушка қосылған.

Үшінші тармақтағы тоқ векторы кернеу векторынан φ_3 бұрышқа озады:

$$\varphi_3 = -\arctg \frac{X_{C3}}{R_3}$$

Төртінші тармақтағы тоқ векторы фаза бойынша кернеу векторына тура келеді, ал бесінші тармақтағы тоқ векторы кернеу векторынан 90° бұрышқа озады.

2.3.6. Синусоидалды тоқ тізбегінің қуаты

Кейбір элементтердің R , L , C энергетикалық арақатынасы өткен тақырыпта қаралды. Электр тізбегінің бір бөлігін қарайық, бұл жерде кернеу $u = U_m \sin \omega t$, ал ток $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$

Лездік қуатты табамыз:

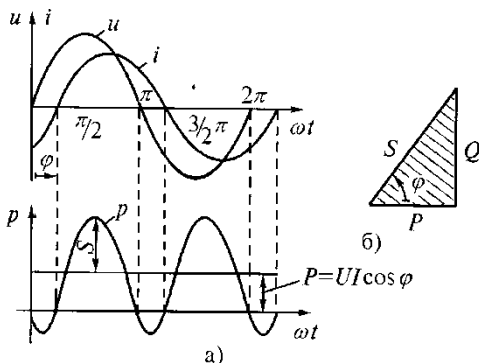
$$p = ui = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) = UI [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)]$$

Шығарылған теңдеудің екі құрамасы бар, тұрақты және синусоидалды, ток және кедергі жиілігімен салыстырғанда, екі есе жиілігі бар. Ток, кернеу және қуаттың лездік мәндері, тізбектің индуктивті түрінде ($\varphi > 0$) 2.18 а-суретте көрсетілген.

U мен i бірдей белгісі бар аралық уақытында лездік қуат оң болса, энергия қорек көзінен қабылдағышқа түседі, резистор пайдаланады және катушканың магнит қрісінде қорланады.

U мен i түрлі белгісі бар аралық уақытында, лездік қуат теріс болса, энергия қабылдағыштан жартылай қорек көзіне оралады. Қабылдағышқа түсетін активті қуат, сол кезеңдегі лездік қуаттың орташа мәніне тең.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi \quad (2.58)$$



2.18-сурет

$\cos \varphi$ көбейтіндісі қуат коэффициенті деп аталады. (2.58) формуласынан көруге болады, активті қуат кедергі мен ток әсерлік мәнін қуат коэффициентіне көбейтумен тең. φ бұрышы неғұрлым нөлге жақын болса, $\cos \varphi$ бірге жақын болады, сондықтан кернеу мен токтың берілген мәнінен көп активті қуат қорек көзінен жүктемеге беріледі.

Активті қуат формуласын бұрынғы арақатынастарды есепке ала отырып, былай жазуға болады:

$$P = UI \cos \varphi = UI_a = U_a I = I^2 R = g U^2, \text{ Вт.} \quad (2.59)$$

Тізбек кірмесіндегі тоқ пен кернеудің әсерлік мәнінің көбейтіндісі **толық қуат** деп аталады вольт-ампер мен (ВА) өлшенеді:

$$S = UI \quad (2.60)$$

Кестеа түрінде, толық қуат лездік қуаттың орташа қуатқа қатысты амплитудасының тербелісін сипаттайды. (2.18-сурет). Толық қуат, электр қондырғылардың (трансформатор, генератор, т.б.) есепті қуаты болады, оларға номиналды түрде көрсетіледі, мысалы, генератордың номиналды (толық) қуаты ең көп активті қуатына тең, $\cos\varphi=1$ болғанда табуға болады. Бірақ көп тұтынушыларға $\cos\varphi < 1$ қажет. Сондықтан кернеу мен тоқтың номиналды мәнінде, қорек көзінің энергетикалық мүмкіндігі толық пайдаланылмайды, себебі $P < S_{\text{ном}}$. Электр тізбегі есебінде және электр жабдықтарын пайдалануда **реактивті қуат** түсінігі қолданылады, ол мына формуламен есептеледі:

$$Q = UI \sin \varphi, \text{ Вар.} \quad (2.61)$$

Реактивті қуат генератор мен қабылдағыш аралығында ауысатын энергияны сипаттайды. Ол қуаттың ең үлкен мәнімен анықталады, реактивті элементтері бар тізбек бөлігінде:

$$Q = U_p I = I^2 X = U^2 b = I_p U$$

Тізбектегі реактивті қуат оң немесе теріс болуы мүмкін φ бұрыш белгісіне байланысты. Кірме кедергінің ($\varphi > 0$) индуктивті түрінде реактивті қуат оң болады, ал сыйымдылық түрінде ($\varphi < 0$) теріс болады.

(2.59...2.61) формулаларды салыстыра отырып, активті, реактивті және толық қуаттардың арақатынасын көрсетуге болады:

$$S^2 = U^2 I^2 = (UI \cos \varphi)^2 + (UI \sin \varphi)^2 = P^2 + Q^2;$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (2.62)$$

(2.62) формуласы арақатынасын, қуаттың тікбұрышты үшбұрыш түрінде көрсетейік (2.18 б-сурет), ол кернеу үшбұрышын тоқ қабырғаларына көбейту арқылы табылады. Қуат

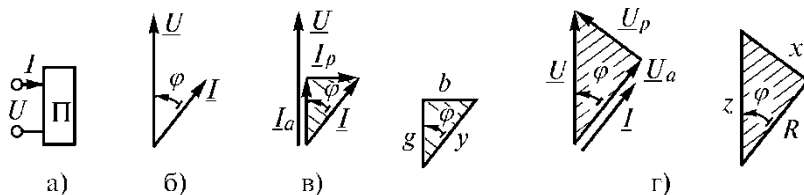
үшбұрышынан есептегенде кеңінен қолданылатын арақатынас бар:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}; \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{P}; \quad \cos\varphi = \frac{P}{S}. \quad (2.63)$$

Қабылдағыштың пайдаланатын активті қуаты теріс болмайды, себебі барлық уақыт $\cos\varphi > 0$ яғни тізбек шығысында $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$. Активті қуат жасалған жұмысты немесе бір уақытта берілетін энергияны көрсетеді.

2.3.7. Синусоидалды тоқты сызықты электр тізбегіндегі түрлендіру

Кірме кедергісі мен пассивті екіұшты өткізгіштілік аралығындағы байланысты қарастырайық (2.19 а-сурет) Екіұшты кірме кедергісі дегеніміз – кірме кернеудің кірістегі тоққа арақатынасы, кірме өткізгіштілік – кері арақатынасы.



2.19-сурет

$\varphi > 0$ деп, векторлы диаграмма тұрғызамыз (2.19 б-сурет). Тоқ векторы мен проекциясы арқылы тоқ үшбұрышын тұрғызамыз (2.19 в-сурет) ал кернеу векторы мен оның активті және реактивті құрамасы бойынша кернеу үшбұрышын (2.19 г-сурет) және осыларға сәйкес кедергі мен өткізгіштілік үшбұрышын тұрғызамыз.

Тізбек кірмесіндегі тоқ пен кернеудің әсерліктегі мәнін Ом заңы бойынша екі түрде жазуға болады:

$$I = Uy \quad \text{немесе} \quad I = \frac{U}{Z}$$

Сондықтан, толық кедергі мен толық өткізгіштілік арасында байланыс бар:

$$y = \frac{1}{Z} \quad (2.64)$$

Өткізгіштілік үшбұрыш пен кедергі үшбұрышынан, бір режимге сәйкес мынаны көреміз:

$$\cos \varphi = \frac{g}{y}; \quad \cos \varphi = \frac{R}{z}$$

Бұдан $gZ = Ry$, (2.64) теңдеуін есепке ала отырып, табамыз:

$$g = \frac{R}{Z^2} = \frac{R}{R^2 + X^2}; \quad R = \frac{g}{g^2 + b^2} \quad (2.65)$$

Реактивті параметр аралығындағы байланысты $\sin \varphi$ арқылы табамыз:

$$\sin \varphi = \frac{b}{y}; \quad \sin \varphi = \frac{X}{z}$$

Сонда $bZ = Xy$ (2.64) формуласын есепке ала отырып табамыз:

$$b = \frac{X}{Z^2} = \frac{X}{R^2 + X^2}; \quad R = \frac{b}{y^2} = \frac{b}{g^2 + b^2} \quad (2.66)$$

(2.65, 2.66) формулалар арақатынасы бойынша энергияның бір қорек көзімен, тізбектеліп және қатар қосылған элементті тізбекті табуға болады.

2.3.8. Түрлендіру әдісінен тармақталған айнымалы тоқ тізбегін есептеу

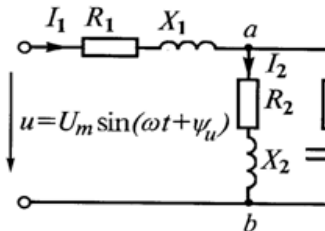
Әдісті (2.20 а-суреттегі) схема бойынша қарстырайық, мұнда барлық тармақтағы тоқты табуымыз керек, егер де кернеудің қорек көзі мен тізбек параметрлары белгілі болса, тоқ пен кернеудің векторлы диаграммасын салу.

Екінші және үшінші тармақтағы қатар жалғасқан қажет өткізгіштіктерді (2.65, 2.66) формулалар бойынша түрлендіреміз (2.20-б-сурет)

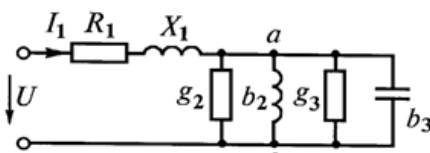
$$g_2 = \frac{R_2}{R_2^2 + X_2^2}; \quad g_3 = \frac{R_3}{R_3^2 + X_3^2};$$

$$b_2 = \frac{X_2}{R_2^2 + X_2^2}; \quad b_3 = \frac{X_3}{R_3^2 + X_3^2}.$$

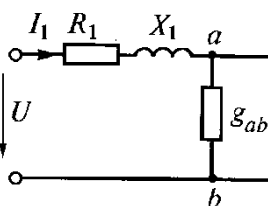
Біртекті қатар жалғанған өткізгіштерді қосамыз (2.20 в-сурет)



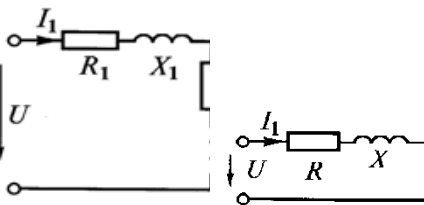
а)



б)



в)



г)

д)

2.20-сурет

Реактивті өткізгіштіліктің белгісі индуктивтілерге оң болады, ал сыйымдылықтарға – теріс болады. Қаралатын мысалда $b_{ab} > 0$ дейміз. b_{ab} , g_{ab} параметрлы қатар сұлбаны, эквиваленті бірізді R_{ab} , X_{ab} сұлбаға түрлендіреміз (2.20 г-сурет) формула бойынша:

$$R_{ab} = \frac{g_{ab}}{g_{ab}^2 + b_{ab}^2}; \quad X_{ab} = \frac{b_{ab}}{g_{ab}^2 + b_{ab}^2};$$

$$Z_{ab} = \sqrt{R_{ab}^2 + X_{ab}^2}.$$

Біртектес кедергілерді қоссақ 2.20 д-суреттегі сұлба шығады:

$$R = R_1 + R_{ab}; \quad X = X_1 + X_{ab}; \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Тоқтың әсерлік мәнін табамыз:

$$I_1 = \frac{U}{z}; I_2 = \frac{U_{ab}}{z_2}; I_3 = \frac{U_{ab}}{z_3},$$

мұнда $U_{ab} = I_1 Z_{ab}$.

Тоқ пен кернеу векторлары арасындағы сәйкес фазалардың ығысуы:

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R}; \varphi_2 = \arctg \frac{X_2}{R_2}; \varphi_3 = \arctg \frac{X_3}{R_3};$$

$$\varphi_{ab} = \arctg \frac{X_{ab}}{R_{ab}}.$$

Лездік тоқ мәні:

$$u_{ab} = U_{ab} \sqrt{2} \sin(\omega t + \psi_{u_{ab}}) = U_{ab} \sqrt{2} \sin(\omega t + \psi_{i_1} + \varphi_{ab});$$

$$i_1 = I_1 \sqrt{2} \sin(\omega t + \psi_{i_1}) = I_1 \sqrt{2} \sin(\omega t + \psi_u - \varphi);$$

$$i_2 = I_2 \sqrt{2} \sin(\omega t + \psi_{u_{ab}} - \varphi_2);$$

$$i_3 = I_3 \sqrt{2} \sin(\omega t + \psi_{u_{ab}} - \varphi_3).$$

Берілген тізбек векторлы диаграммасын салу үшін, кернеу мен тоқ векторларының әсерлік мәніне Кирхгофтың заңы бойынша теңдеу жүйесін жазамыз:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3; \underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_{ab}; \underline{U}_1 = \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{X1};$$

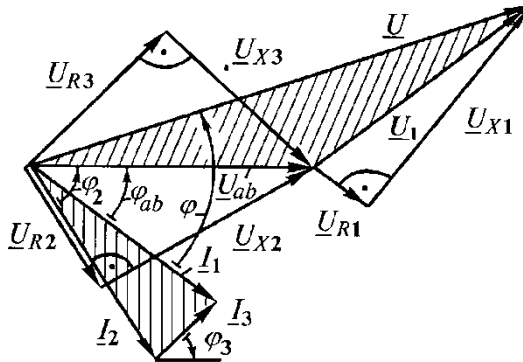
$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{R2} + \underline{U}_{X2}; \underline{U}_{ab} = \underline{U}_{R3} + \underline{U}_{X3}. \quad (2.67)$$

Диаграмма тұрғызғанда \underline{U}_{ab} вектордан бастаймыз, ол екі қатар тармаққа ортақ. Бұл векторды өз еркімізбен, координаты жүйеден тыс бағыттаймыз.

Екінші тармақ активті-индуктивті, сондықтан \underline{I}_2 тоқ векторы фаза бойынша \underline{U}_{ab} -дан $\varphi_2 > 0$ бұрышына қалады. Үшінші тармақ активті-сыйымдылықты, вектор \underline{I}_3 фаза бойынша \underline{U}_{ab} кернеу векторынан $\varphi_3 < 0$ бұрышына озады. \underline{I}_2 соңынан шығатын \underline{I}_3

тұрғызу үшін φ_3 бұрышын вектор \underline{I}_3 пен \underline{U}_{ab} кернеу векторына қатар түзу сызық арасынан есептейді. Вектор \underline{I}_1 токтың қатар жүрген векторлардың геометриялық қосындысы болады.

$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3$. Табылған токтың көпбұрыш, көрнекті болу үшін штрихталған (2.21-сурет)



2.21-сурет

Табылған \underline{I}_1 кернеу векторы \underline{U}_1 саламыз, екі қосындыдан тұратын:

\underline{U}_{R1} және \underline{U}_{X1} векторы фаза бойынша ток векторы \underline{I}_1 бірдей, ал катушкадағы кернеу векторы \underline{U}_{X1} ток векторынан 90° озады.

Кернеу көпбұрышы (2.67), теңдеу жүйесімен сәйкес салынған, көрнекті болу үшін (2.21-суретте) штрихталған. Енді \underline{U}_{ab} кернеу құрамасын көрсетейік. Екінші тармақ жағынан, активті R_2 кернеу мен индуктивті X_2 кедергі қосындысы болады. Осы векторларды салу үшін \underline{U}_{ab} векторды \underline{I}_2 ток векторы бағыттап жобалаймыз (табамыз \underline{U}_{R2}), ал оны перпендикулярлы бағытында \underline{U}_{X2} табамыз. Үшінші тармаққа \underline{U}_{R3} және \underline{U}_{X3} векторларын саламыз. Тұрғызылған диаграмма электр тізбегінің жұмыс режимі туралы толық мәлімет береді.

Қорытындысына кейбір кепілдеме келтірейік, олардың атқарылуы, диаграмма тұрғызудың системалық әдісінің орындалуын тудырады:

1) Берілген тізбектің векторлы диаграммасы Кирхгоф теңдеуінің кестеаралық суреті болады.

2) Векторлардың қосуын паралелограм ережесімен емес, векторлы көпбұрыш ережесімен жасау керек, бұл векторлардың қайталануын талап ететін қосымша салуды жояды.

3) Диаграмма салуды, схеманың бірнеше элементіне ортақ болатын U немесе I вектордан бастау керек. Бастапқы векторға қатысты сәйкес бұрыштың ығысуын білсе, бірнеше жалғас векторларды салуға болады.

Векторлы диаграмма салу үдерісі токқа байланысты, бастапқы вектордың сәтті алынғанына байланысты. Векторлы диаграмманы дербес салу үдерісінде қате жібермеу үшін анық айқындау керек. Бұл ток пен кернеудің әртүрлі элементе және электр тізбегінің бөлігінде қалай болатынынан туындайды.

2.4. Синусоидалды ток тізбегін есептеудің кешенді әдісі

Синусоидалды ток тізбегін есептеудің кешенді әдісі практика жүзінде кеңінен таралған. Әдіс маңызы мынада, синусоидалды ток, кернеу және ЭҚК ЭҚК кешенді сандармен бейнеленген, ал векторларды геометриялық операциясы алгебралық операциясымен кешенді сандармен алмастырылады.

Бұл әдіс синусоидалды ток тізбегін алгебралық есептеуіге жағдай туғызады, тұрақты ток тізбегіне ұқсас.

2.4.1. Кешенді жазықтықтағы синусоидалды шамаларды векторлы суреттеу

Айналып тұрған векторды, синусоидалды функцияны көрсететін перпендикулярлы ось жүйесінде кешенді жазықтықта орнатуға болады:

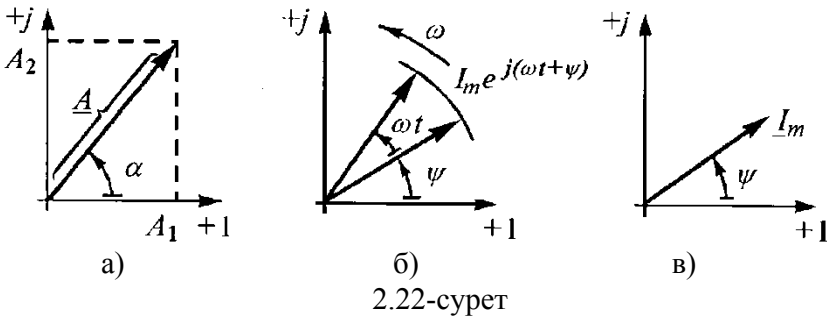
x -нақты бөлік,

y -нақты сандар осі

Кешенді жазықтықтағы остің оң бағыты индекспен белгіленеді:

+1-нақты сандар осі,

$+j$ жорамал сандар осі, мұнда $j = \sqrt{-1}$ -жорамал (мнимая) шамасы (2.22-сурет)



Кешенді жазықтағы координат нүктесі сол нүктедегі радиус векторымен анықталады, яғни вектор бастамасы координат бастамасымен тура келеді, ал аяғындағы нүкте берілген кешенді санға сәйкес келеді (2.22 а-сурет). Жазу формасы былай көрсетіледі:

$$\underline{A} = A e^{j\alpha}, \quad (2.68)$$

A - модуль

α - аргумент немесе фаза, ось+1 ден сағат тіліне қарсы есептеледі.

Эйлер формуласын қолдана отырып, кешенді сандардың тригонометриялық және сәйкес алгебралық жазу формасын табуға болады:

$$\underline{A} = A \cos \alpha + jA \sin \alpha = A_1 + jA_2$$

мұнда $A_1 = A \cos \alpha$; $A_2 = A \sin \alpha$.

Сонымен $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$; $\alpha = \arctg \frac{A_2}{A_1}$.

(2.68) теңдеуде A -ны I_m -ге ауыстырсақ, α -ны $(\omega t + \psi)$ -ге ауыстырсақ, кешенді ток табамыз:

$$\underline{i} = I_m e^{j(\omega t + \psi)} \quad (2.69)$$

Бұл теңдеу i функциясының кешенді бейнеленуі, **тоқтың лездегі мәнінің кешені** деп аталады. Кешендер өз әріптермен олардың анық түрнұсқасы сияқты, тек сызығы төмен қарай белгіленеді. Кешеннің лездік мәні i модулі, синусоидалды ток I_m амплитудасына тең, ал айнымалы аргументі $(\omega t + \psi)$ суреттегі синусоида аргументі болады (2.22 б-сурет). (2.69) теңдеу тригонометриялық формада:

$$\underline{i} = I_m e^{j(\omega t + \psi)} = I_m \cos(\omega t + \psi) + j I_m \sin(\omega t + \psi)$$

Түрнұсқа функциясын табуға болады:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi) = \text{Im}[\underline{i}] = \text{Im}\left[I_m e^{j(\omega t + \psi)} \right] \quad (2.70)$$

Тоқтың лездік мәні, кешен тоғының лездік мәнінің кілтиме (мнимай) бөлігіне тең. (2.69) формуласын былай көрсетуге болады:

$$\underline{i} = I_m e^{j(\omega t + \psi)} = I_m e^{j\psi} e^{j\omega t} = \underline{I}_m e^{j\omega t}$$

Бұл жерде $\underline{I}_m = I_m e^{j\psi}$ басқа символ, амплитуда мәнінің кешені деп аталады. Ал вектор бағыты мен Кешенді жазығы +1 осінің арасындағы бұрыш бастапқы фазасы ψ -ге тең (2.22 в-сурет).

(2.22 в-суреттегі) көрініс **әрекеттегі мәнінің кешені** деп аталады.

$$\underline{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi} = I e^{j\psi}$$

1-мысалы: Егерде ток пен кернеудің лездік мәндері мына теңдеулермен берілсе, олардың кешендік әсерлік мәндері былай жазылады:

$$u = 282 \sin(314t - 120^\circ), B; i = 20 \sin(314t - 60^\circ), A.$$

Есептелуі: Кернеудің әсерлік мәні $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 200 B$, бастапқы фазасы $\psi_u = -120^\circ$. Берілген мәндері бойынша, кернеудің әсерлік мәнінің кешені:

$$\underline{U} = U e^{j\psi_u} = 200 e^{-j120^\circ}$$

Ток $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 14,1 \text{ A}$, бастапқы фазасы $\psi_i = -60^\circ$, ток кешені

$$\underline{I} = Ie^{j\psi_i} = 14,1e^{-j60^\circ}$$

2-мысалы: Кернеудің әсерлік мәнінің кешенді $\underline{U} = -120 + j160 \text{ В}$, оның лездік мәнін жазу керек.

Есептелуі: алгебралық формадан көрсеткіш түріне өтеміз:

$$\underline{U} = Ue^{j\psi} = 200e^{j127^\circ}, \text{ В},$$

Бұнда $U = \sqrt{120^2 + 160^2} = 200 \text{ В}$; $\psi = 180^\circ - \arctg \frac{160}{120} = 127^\circ$.

Кешен, кешенді жазықтықтың екінші ширегінде болады.

Онда кернеудің лездік мәні $u = 200\sqrt{2} \sin(\omega t + 127^\circ)$, В.

Корытынды қаралып жатқан сұрақтың келесі теңдеулерін меңгеру керек:

$$j = \sqrt{-1}; \quad j^2 = -1; \quad j^3 = -j \dots$$

$$e^{j90^\circ} = \cos 90^\circ + j \sin 90^\circ = j;$$

$$e^{-j90^\circ} = \cos 90^\circ - j \sin 90^\circ = -j.$$

Ескерейік, оператор j көбейткенде, вектордың 90° сағат тіліне қарсы бұрылғанын, ал $-j$ -ге көбейткенде, вектордың 90° сағат тілімен тура бұрылғанын көрсетеді.

2.4.2. Кешенді түрдегі Ом және Кирхгоф заңдары

Синусоидалды ток тізбегінің кешенді әдіс есебінің негізі, лездік дифференциалды мәнінің теңдеуінен алгебралық теңдеуге көшу, ток пен кернеу кешендерінен құралған. Мысалы, (2.23) суреттен лездік мәндерінің теңдеуі, Кирхгофтың екінші заңы бойынша былай болады:

$$u_R + u_L + u_C = e$$

немесе

$$iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = e, \quad (2.71)$$

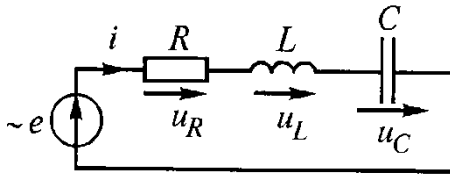
Мұнда

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad (2.72)$$

$$u_R = RI_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad (2.73)$$

$$u_L = \omega LI_m \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ); \quad (2.74)$$

$$u_C = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ). \quad (2.75)$$



2.23-сурет

Кернеудің лездік мәнін жазғанда, U_R кернеуі фаза бойынша токпен тура бір бағытта болады, U_L кернеуі токтан 90° озады, ал U_C токқа 90° қалады (2.71...2.75) тендеулерді кешенді түрде жазайық:

$$\underline{I}_m = I_m e^{j\psi_i}; \quad (2.76)$$

$$\underline{U}_{Rm} = I_m R e^{j\psi_i} = R \underline{I}_m; \quad (2.77)$$

$$\underline{U}_{Lm} = \omega L I_m e^{j(\psi_i + 90^\circ)} = \omega L I_m e^{j\psi_i} e^{j90^\circ} = j\omega L \underline{I}_m; \quad (2.78)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{Cm} &= \frac{1}{\omega C} I_m e^{j(\psi_i - 90^\circ)} = \frac{1}{\omega C} I_m e^{j\psi_i} e^{-j90^\circ} = \\ &= -j \frac{1}{\omega C} I_m = \frac{1}{j\omega C} \underline{I}_m. \end{aligned} \quad (2.79)$$

u_L және u_C лездегі мәндері тендеулермен \underline{U}_{Lm} , \underline{U}_{Cm} кешенді амплитудаларымен салыстыра отырып, синусоидалды туынды мен интегралды функциялардан олардың кешенді бейне шамаларына көшу ережелерін жасауға болады. Дифференциалдау $j\omega$ көбейтумен алмасады, ал интегралдау осы функцияның $j\omega$ кешеніне бөлінеді.

(2.71) арақатынасы

$$\underline{U}_{Rm} + \underline{U}_{Lm} + \underline{U}_{Cm} = \underline{E}_m \quad (2.80)$$

Кирхгофтың екінші заңы бойынша, кешенді формадағы тендеуді көрсетеді. Әсерлік мәндері үшін:

$\underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = \underline{E}$ (2.77.....2.79) теңдеулерді (2,80) теңдеуге қоямыз:

$$RI_m + j\omega LI_m - j\frac{1}{\omega C}I_m = \underline{U}_m$$

Осы теңдеуден
$$\underline{I}_m = \frac{\underline{U}_m}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{\underline{U}_m}{\underline{Z}}. \quad (2.81)$$

Табылған арақатынас **кешенді формадағы Ом заңы** деп аталады. Кернеу кешенінің тоқ кешеніне қатынасы, тізбектің толық кедергі кешені деп аталады:

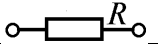
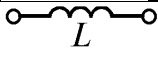
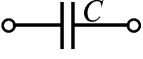
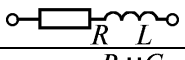
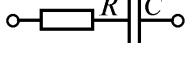
$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}_m}{\underline{I}} = \frac{U}{I} = \frac{Ue^{j\psi_u}}{Ie^{j\psi_i}} = Ze^{j\varphi} \quad (2.82)$$

Кешенді кедергі модулі, толық кедергі $Z = \frac{U}{I}$ тең, оның аргументі бұрышының ығыстыру - φ фазасына тең.

Кешенді кедергі алгебралық формада, мынадай болады:

$$\underline{Z} = Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi = R + jX \quad (2.83)$$

Сондықтан активті кедергі нақты бөлігі болады, ал реактивті кедергі тізбектің жорамал бөлігі болады. Дербес жағдайдағы (2,83) формулалар 2.1-кестеде берілген:

Электр тізбегінің бөлімі	Кешенді кедергі
	$\underline{Z} = R$
	$\underline{Z} = j\omega L = jX_L = X_L e^{j90^\circ}$
	$\underline{Z} = -j\frac{1}{\omega C} = -jX_C = X_C e^{-j90^\circ}$
	$\underline{Z} = R + jX_L = R + j\omega L$
	$\underline{Z} = R - jX_C = R - j\frac{1}{\omega C}$

Толық кедергінің кешеніне кері берілген шама толық өткізгіштілік кешені деп аталады:

$$Y = 1/Z. \quad (2,84)$$

Y -толық, q -активті; b -реактивті тізбек өткізгіштіліктері. Синусондалды тоқ тізбегіне Кирхгоф заңы осылайша тұжырымдалады, тұрақты тоқ тізбегіндегідей, тек тоқ пен кернеу ғана кешенді мәніне. Кирхгофтың бірінші заңы: түйіндегі Кешендік тоқтардың алгебралық қосындысы нөлге тең.

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (2,85)$$

Кирхгоф екінші заңы: Электр тізбегінің тұйықты контурындағы кешенді ЭҚК алгебралық қосындысы сол контурдың барлық пассивті элементіндегі Кешенді кернеудің алгебралық қосындысына тең.

$$\sum_{k=1}^n \underline{E}_k = \sum_{k=1}^n \underline{I}_k \underline{Z}_k \quad (2,86)$$

2.24-суреттегі сұлбаға Кирхгоф теңдеу жүйесін жасайық, тоқ тармақтары мен контур айналысын оң бағытта деп аламыз:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_3 - \underline{I}_4 = 0; \quad \underline{I}_2 + \underline{I}_4 - \underline{I}_5 = 0; \quad \underline{I}_6 - \underline{I}_1 - \underline{I}_2 = 0;$$

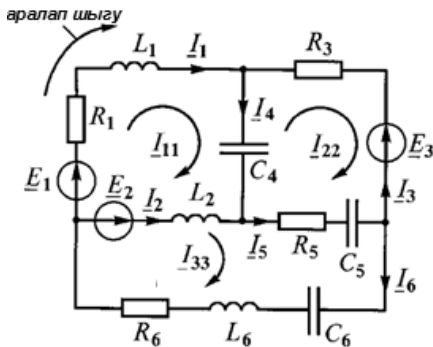
$$\underline{I}_1 R_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 - j \frac{\underline{I}_4}{\omega C_4} - j\omega L_2 \underline{I}_2 = \underline{E}_1 - \underline{E}_2;$$

$$j \frac{1}{\omega C_4} \underline{I}_4 - \underline{I}_3 R_3 + j \frac{1}{\omega C_5} \underline{I}_5 - \underline{I}_5 R_5 = -\underline{E}_3;$$

$$j\omega L_2 \underline{I}_2 + \underline{I}_5 R_5 - j \frac{1}{\omega C_5} \underline{I}_5 - j \frac{1}{\omega C_6} \underline{I}_6 + j\omega L_6 \underline{I}_6 + \underline{I}_6 R_6 = \underline{E}_2.$$

Сонымен, тұрақты тоқ күрделі тізбегі есебі әдісінің барлық параметрлерін кешенді түрде елестетсек, Ом және Кирхгоф заңдарымен негізделген (контурлы тоқтар, түйіндік әлеуеттер,

эквивалентті генератор, өзгерісі, т.б), синусоидалды ток тізбектерін есептеуге қолдануға болады.



2.24-сурет

2.4.3 Кешенді түрдегі қуаттар

Жоғарыда толық, активті және реактивті қуаттарды анықтайтын формулаларды көрсеттік:

$$S = UI; P = UI \cos \varphi; Q = UI \sin \varphi.$$

Кешенді кернеу мен токтан, реактивті және активті қуаттарды табатын оңай әдісті қарастырайық. Ол үшін кешенді кернеуді қарсы ток кешеніне көбейтеміз:

$$\underline{S} = \underline{UI}^* = Ue^{j\psi_u} Ie^{-j\psi_i} = UIe^{j(\psi_u - \psi_i)} = UIe^{j\varphi} = Se^{j\varphi} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ \quad (2.87)$$

(Қарсы I дегеніміз Ψ_i -дің орнына Ψ_u -ты аламыз) оны I деп белгілейді.

\underline{S} теңдеуін кешендік толық қуат деп атайды. (2.87) теңдеуден көруге болады: кешен қуатының затты бөлігі активті қуатқа, ал кілтіме бөлігі реактивті қуатқа тен:

$$P = \operatorname{Re} \left\{ \underline{UI}^* \right\} = \operatorname{Re} \left\{ \underline{S} \right\}; Q = \operatorname{Im} \left\{ \underline{UI}^* \right\} = \operatorname{Im} \left\{ \underline{S} \right\}. \quad (2.88)$$

Мысалы: егер де ток пен кернеу лездегі мәндері тендеулермен мына түрде берілсе, активті, реактивті және толық қуатты табу керек:

$$u = 141 \sin (314 t + 60^\circ), \text{ В}; \quad i = 7,07 \sin (314 t + 30^\circ), \text{ А}.$$

Есептелуі: ток пен кернеудің әсерлік мәнінің кешенін жазайық

$$\underline{U} = \frac{141}{\sqrt{2}} e^{j60^\circ} = 100 e^{j60^\circ}, \text{ В}; \quad \underline{I} = \frac{7,07}{\sqrt{2}} e^{j30^\circ} = 5 e^{j30^\circ}, \text{ А}.$$

Толық қуат кешені

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = 100 e^{j60^\circ} \cdot 5 e^{-j30^\circ} = 500 e^{j30^\circ} = 500 \cos 30^\circ + j500 \sin 30^\circ = 433 + j250, \text{ ВА}.$$

Сонымен, $S = 500 \text{ ВА}$, $P = 433 \text{ Вт}$, $Q = 250 \text{ Вар}$.

2.4.4 Қуат теңгерімі. Қуаттың ваттметрмен өлшенуі

Энергияның сақталу заңынан активті қуат теңгерімі барлық тізбекте сақталынуы керек; активті қуат қорек көзінен берілетін, барлық қабылдағыштардың активті қуаттарына тең:

$$\sum_{k=1}^m P_{ки} = \sum_{k=1}^n I_k^2 R_k = \sum_{k=1}^n P_k, \quad (2.89)$$

m -қорек көздерінің сандары;

n -энергия қабылдағыштар саны;

Берілетін реактивті қуат жиыны, катушка мен конденсатордың қабылдайтын реактивті қуат жиынына тең:

$$\sum_{k=1}^m Q_{ки} = \sum_{k=1}^n I_k^2 X_k.$$

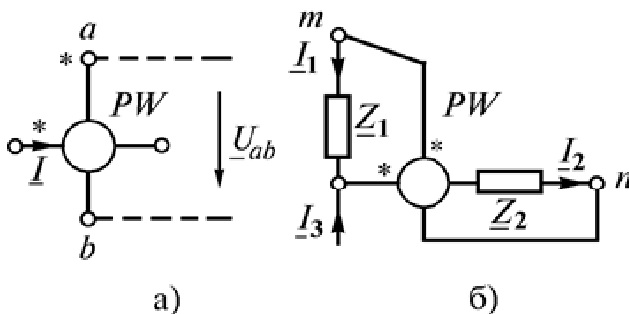
Кешенді қуат теңгерімі:

$$\sum_{k=1}^m \underline{S}_{ки} = \sum_{k=1}^n \underline{S}_k. \quad (2.90)$$

Кешенді параметрлер қосындылары тепе-тең болғанмен, модульдер қосындысы тең болмауға тиіс. Сондықтан толық теңгерімі S сақталмауы мүмкін:

$$\sum_{k=1}^m S_{ki} \neq \sum_{k=1}^n S_k.$$

Активті қуат ваттметрмен өлшенеді, оның 2-орамасы бар 1 ток және кернеу орамалары. 2.25 б-суреттегі сұлбада ваттметр төрт қысқышы бар шеңбер түрінде көрсетілген. Қысқыштың бір жұбы тізбектей катушкаға жалғанады, (тоқтың) ал екінші жұбы қатар катушкаға жалғанады (кернеу).



2.25-сурет

Бір жұпты қысқыш (мысалы, катушка басында) жұлдыз нүктесімен белгіленеді. Ваттметр солай орналасқан, оның көрсеткіші пропорционалды

$$P = U_{ab} I \cos(\widehat{U_{ab}; I}),$$

\underline{U}_{ab} , \underline{I} - әсерлік кернеу мен ток, ваттметрге қосылған, ал аргументі, векторлар арасындағы фаза бұрышының ығысуының косинусына тең. Қатарланған катушка кернеуі, қысқыш аралық әлеуеттің айырымына тең, (а) жұлдызымен және жұлдыз белгісі жоқ (в) қысқышпен белгіленген. I тоғы жалғасқан орама қысқышқа кіреді, жұлдызбен белгіленген. Ваттметр көрсеткішін формула бойынша есептеуге болады:

$$P = \operatorname{Re} \left[\underline{U}_{ab} \underline{I}^* \right].$$

Ваттметр бөлігінің бағасы: $\Pi = \frac{U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}}}{N}$, *Вт/дел*,

N-шәкіл бөлігінің саны.

Мысалы: 2.25 б-суреттегі сұлбаның ваттметр көрсеткішін анықтайық, егерде:

$$\underline{I}_1 = 10 e^{j37^\circ}, A; \underline{I}_3 = 8 e^{-j15^\circ}, A; \underline{Z}_1 = 2 \text{ Ом}; \underline{Z}_2 = 1,8 e^{-j44^\circ} \text{ Ом}.$$

Есебі: Ваттметрден өтетін ток:

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_1 + \underline{I}_3 = 8 e^{-j15^\circ} + 10 e^{j37^\circ} = 16,2 e^{j14^\circ}, A.$$

Ваттметрдің қатарласқан катушка кернеуі:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{mn} &= \underline{I}_1 \underline{Z}_1 + \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = 10 e^{j37^\circ} \cdot 2 + 16,2 e^{j14^\circ} \cdot 1,8 e^{-j44^\circ} = \\ &= 41 - j2,5 = 41 e^{-j3,5^\circ}, B. \end{aligned}$$

Ваттметр көрсеткіші:

$$\begin{aligned} P &= \operatorname{Re} \left| \underline{U}_{mn} \underline{I}_2^* \right| = \operatorname{Re} \left| 41 e^{-j3,5^\circ} \cdot 16,2 e^{-j14^\circ} \right| = \operatorname{Re} \left| 665 e^{-j17,5^\circ} \right| = \\ &= 665 \cos 17,5^\circ = 634 \text{ Вт} . \end{aligned}$$

2.4.5 Кешенді әдіспен синусоидалды ток тізбегін есептеу

Тұрақты және синусоидалды ток тізбектер есебінің ортақтық әдісіне қарамай, синусоидалды ток тізбегінің есебі қыйындау және өз ерекшеліктері бар. Тізбек есебінің ерекшелігін кешенді әдіс бойынша нақты мысалда көрсетейік.

Тармақталмаған тізбек есебі. Кернеудің топографиялық векторлы диаграммасы. 2.26 а-сурет бойынша, тізбек есебін жасаймыз, кешенді кедергілері $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ бірізді жалғасып қосылған. Қорек көзінің кернеуі мен қабылдағыш параметрлері берілген деп есептейміз.

Тізбектегі толық кедергі кешені:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 = R_1 - jX_{C1} + R_2 + jX_{L2} + R_3 + jX_{L3} = R + jX = Ze^{j\varphi},$$

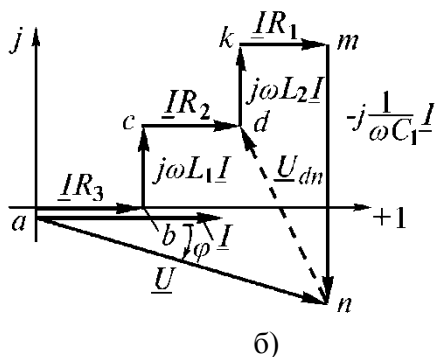
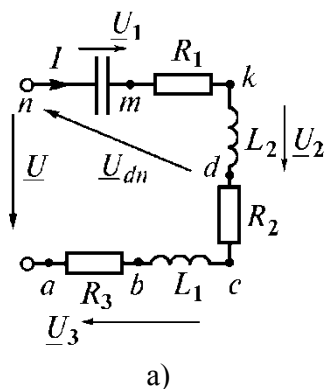
бұнда: $R = R_1 + R_2 + R_3; X = -X_{C1} + X_{L2} + X_{L3};$

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R}.$$

Тізбек саласында Ом заңы бойынша тоқ пен кернеу кешені:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}; \underline{U}_1 = \underline{I}Z_1 = \underline{I}(R_1 - jX_{C1});$$

$$\underline{U}_2 = \underline{I}Z_2 = \underline{I}(R_2 + jX_{L2}); \underline{U}_3 = \underline{I}Z_3 = \underline{I}(R_3 + jX_{L3}).$$



2.26-сурет

Қуаттар: $\underline{S} = \underline{U}\underline{I}^* = P + jQ = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3 = \underline{U}_1\underline{I}^* + \underline{U}_2\underline{I}^* + \underline{U}_3\underline{I}^*;$

$$P = \text{Re}|\underline{S}| = \sum_{k=1}^n I^2 R_k = \sum_{k=1}^n P_k = P_1 + P_2 + P_3;$$

$$Q = \text{Im}|\underline{S}| = \sum_{k=1}^n I^2 X_k = \sum_{k=1}^n Q_k = Q_2 + Q_3 - Q_1.$$

2.26 б-суретті кесте түрінде көрсету үшін тізбекте кернеудің векторлы диаграммасы берілген. Бұл векторлы диаграммада, кез-келген векторды жазықтықтың кез-келген жеріне өзіне қатарластырып жылжытуға болады. Кирхгофтың екінші заңын векторлы түрде қарасақ, векторларды бір нүктеден шығарып

немесе біріне бірін жалғастырып салуға болады. Кернеудің топографиялық векторлы диаграммасы деп кернеу векторларының бір-біріне қосылуы тізбек элементтерінің қосылуына тең векторлы диаграмманы айтады. Бұл жағдайда, кернеу векторлы диаграммасы топологиясы, тізбек топологиясымен бірдей, векторлы диаграммадағы векторлар қосылған нүктесі тізбектегі теңдескен элементтердің бір бірімен қосылған нүктесіне сәйкес болады.

Кернеудің векторлы диаграмма қағидатын кешенді жазықтықтағы векторлы диаграммасының әлеуетті өрісімен сәйкес келген кезде қарастыруға болады. Тізбектегі әр нүкте қосылған жерінде, кешенді электр әлеуетімен сипатталады. Мысалы: (2.26 а-сурет) сұлбасында а нүктесі полюс дейік: $\underline{\varphi}_a = 0$

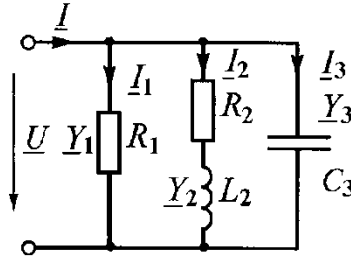
(2.26 б-суретте) кешенді жазықтықта a, b, c, d, k, m, n нүктелерді белгілейік, координаттары сұлбадағы сәйкес нүктелер әлеуетімен анықталады:

$$\begin{aligned} \underline{\varphi}_b &= \underline{\varphi}_a + \underline{I}R_3; & \underline{\varphi}_c &= \underline{\varphi}_b + j\omega L_3 \underline{I}; & \underline{\varphi}_d &= \underline{\varphi}_c + \underline{I}R_2; \\ \underline{\varphi}_k &= \underline{\varphi}_d + j\omega L_2 \underline{I}; & \underline{\varphi}_m &= \underline{\varphi}_k + \underline{I}R_1; & \underline{\varphi}_n &= \underline{\varphi}_m - j \frac{1}{\omega C} \underline{I}. \end{aligned}$$

(2.26 б-сурет) нақты саны бар осіне тоқ векторын жүргіземіз. Диаграммадағы кернеу векторларын салу тәртібі, сұлбадағы тізбек элементтерінің қосылу тәртібіне сәйкес болу керек. Кернеу векторының соңы кейінгі элементтегі, алдағы элементтегі кернеу векторының басына қосылады.

Топографиялық диаграммдан тізбектің кез келген нүкте арасындағы кернеуді оңай табуға болады. Ол үшін топографиялық диаграммадағы сәйкес нүктелерді тіке сызықпен қосу бағытын көрсету керек. Мысалы, (2.26 б-суретте) \underline{U}_{dn} кернеу векторы, d және n нүкте арасында тік сызықпен берілген, бағыты n нен d -ға қарай. Егерде, схемада \underline{U}_{dn} кернеуі d нүктеден, электр тізбегінің n нүктесіне бағытталса, топографиялық диаграммада сол кернеуді n нүктесінен d нүктесіне бағытталған вектор ретінде көрсетеді.

Қатар қосылған қабылдағыштар тізбегін есептеу.



2.27-сурет

Бірнеше тармақтар қатар қосылса, мысалы, үшеуі $\underline{Y}_1, \underline{Y}_2, \underline{Y}_3$ өткізгіштілігімен (2.27-сурет) тізбек кірмесіндегі барлық ток, бөлек тармақтар тоғының жиынына тең. Кернеуді барлық учаскеде бірдей деп санаса, жазуға болады:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{Y}_1 \underline{U} + \underline{Y}_2 \underline{U} + \underline{Y}_3 \underline{U} = \underline{U}(\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3) = \underline{U} \underline{Y}.$$

Сондықтан, барлық тізбектің қатар қосылғандағы кешенді өткізгіштігі, тізбектің әр учаскесінің кешенді өткізгіштілігінің алгебралық жиынына тең:

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + j\omega L_2} + j\omega C_3.$$

Барлық тізбектің кешенді өткізгіштілігін тауып, берілген \underline{U} кернеу болса кешенді \underline{I} тоғын есептеу оңай.

Тізбектің эквивалентті немесе толық кедергісі мына формуламен табылады:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3}.$$

Екі қатар тармақтарда $\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$.

Қатар тармақтардағы тоқтар:

$$\underline{I}_1 = \underline{I} \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}; \quad \underline{I}_2 = \underline{I} \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2},$$

Екі қатар тармақтың біреуінің тоғы тоқ қосындысына тең, келесі тармақ кедергісіне көбейтілген және екі тармақтар кедергілерінің қосындысына бөлінген.

Тізбектің кешенді қуаты барлық тармақтың кешенді қуаттарының қосындыларына тең:

$$\underline{S} = \underline{UI} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3 = \underline{UI}_1 + \underline{UI}_2 + \underline{UI}_3 = P + jQ,$$

Бұнда активті және реактивті қуаттар:

$$P = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2; \quad Q = I_2^2 X_{L1} - I_3^2 X_{C3}.$$

Қабылдағыштардың аралас қосылған тізбегін есептеу.

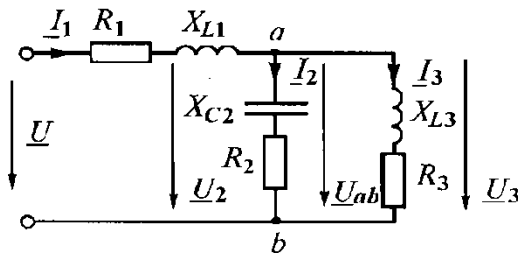
Синусоидалды тоқ тізбегінің аралас қосылуында толық кедергінің есептелуі, тұрақты тоқ тізбегіндегімен бірдей: алдымен – қатар қосылған тармақтар эквиваленті кедергісі есептеледі, одан кейін, қатар тармақтарды эквиваленті кедергі элементімен ауыстырғасын, тізбектеліп қосылған кедергісін табамыз. Мысал ретінде (2.28-суреттегі) сұлбаны қарастырайық. Екі қатар тармақтың кешенді эквиваленті кедергісін табамыз, **a** және **b** түйіндер арасына қосылған:

$$\underline{Z}_{ab} = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = Z_{ab} e^{j\varphi_{ab}} = R_{ab} + jX_{ab},$$

$\underline{Z}_2 = R_2 - jX_{C2}$; $\underline{Z}_3 = R_3 + jX_{L2}$ - қатарласқан тармақтардың кешенді кедергілері.

Барлық тізбектердің толық кедергі кешені: $\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ab}$,

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{L1}$$



2.28-сурет

Тізбектің ажырамаған бөлігіндегі кешенді ток пен **ab** бөліміндегі кешенді кернеу:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}; \underline{U}_{ab} = \underline{U}_2 = \underline{U}_3 = \underline{I}_1 \underline{Z}_{ab}; \underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1.$$

Ом заңын пайдаланып, қатарлас тармақтардың кешенді тоқтар табамыз:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_2}; \underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_3}.$$

Барлық тізбектердің кешенді толық қуаты барлық тармақтардың кешенді қуаттарының қосындыларына тең:

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}_1^* = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3 = \underline{U}_1 \underline{I}_1^* + \underline{U}_{ab} \underline{I}_2^* + \underline{U}_{ab} \underline{I}_3^*,$$

Бұнда активті және реактивті қуаттар

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3;$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = I_1^2 X_{L1} - I_2^2 X_{C2} + I_3^2 X_{L3}.$$

Тізбекті түйінді кернеу әдісімен есептеу.

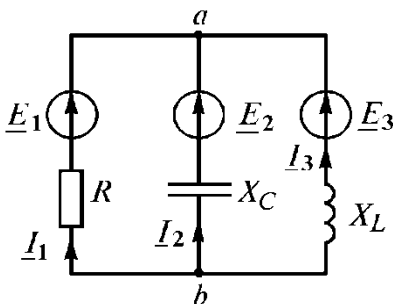
Түйінді кернеу әдісі, екі түйіні бар сұлбаны есептеуге қолданылады, тұрақты ток тізбегіне пайдаланғандай, тек есебі кешенді түрде жасалады:

Мысалы: (2.29-сурет) Электр тізбегінде тармақтар тоғын табу керек, егер де $\underline{E}_1 = 120 \text{ В}$; $\underline{E}_2 = 120e^{j120^\circ} \text{ В}$; $\underline{E}_3 = 120e^{-j240^\circ} \text{ В}$;

$$R = X_L = X_C = 10 \text{ Ом}.$$

Есебі: тармақтардың кешенді өткізгіштілігін табамыз:

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{R} = 0,1 \text{ См}; \underline{Y}_2 = \frac{1}{-jX_C} = j \cdot 0,1 \text{ См}; \underline{Y}_3 = \frac{1}{jX_L} = -j \cdot 0,1 \text{ См}.$$



2.29-сурет

Сосын, екі түйінше арасындағы кешенді кернеуді табамыз:

$$\underline{U}_{ab} = \frac{\underline{E}_1 \underline{Y}_1 + \underline{E}_2 \underline{Y}_2 + \underline{E}_3 \underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3} =$$

$$= \frac{120 \cdot 0,1 + 120 e^{-j120^\circ} j \cdot 0,1 + 120 e^{-j240^\circ} (-j \cdot 0,1)}{0,1 + j \cdot 0,1 - j \cdot 0,1} = 328 \text{ B.}$$

Ом заңы бойынша тармақтар тоғы:

$$\underline{I}_1 = (\underline{E}_1 - \underline{U}_{ab}) \underline{Y}_1 = (120 - 328) \cdot 0,1 = -20,8 \text{ A;}$$

$$\underline{I}_2 = (-\underline{E}_2 + \underline{U}_{ab}) \underline{Y}_2 = \left(-120 e^{-j120^\circ} + 328 \right) \cdot j \cdot 0,1 = 40 e^{j105^\circ} \text{ A;}$$

$$\underline{I}_3 = (\underline{E}_3 - \underline{U}_{ab}) \underline{Y}_3 = \left(120 e^{-j240^\circ} - 328 \right) \cdot (-j \cdot 0,1) = 40 e^{j75^\circ} \text{ A.}$$

Тізбекті контурлы тоқ әдісімен есептеу.

2.24-суреттегі тізбекті мысалға алайық. Теңдеу құрмастан бұрын контурлы тоқтарды \underline{I}_{11} , \underline{I}_{22} , \underline{I}_{33} көрсетейік және тармақтар кедергілерін кешенді түрде берейік:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1; \underline{Z}_2 = j\omega L_2; \underline{Z}_3 = R_3; \underline{Z}_4 = -j \frac{1}{\omega C_4};$$

$$\underline{Z}_5 = R_5 - j \frac{1}{\omega C_5}; \underline{Z}_6 = R_6 + j\omega L_6 - j \frac{1}{\omega C_6}.$$

Тізбекте, үш тәуелсіз контурлар бар, контурлы тоқтар әдісімен олардың теңдеу жүйелерінің түрлері былай:

$$\underline{I}_{11}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_4) - \underline{I}_{22} \underline{Z}_4 - \underline{I}_{33} \underline{Z}_2 = \underline{E}_1 - \underline{E}_2;$$

$$- \underline{I}_{11} \underline{Z}_4 + \underline{I}_{22}(\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 + \underline{Z}_5) - \underline{I}_{33} \underline{Z}_5 = -\underline{E}_3;$$

$$- \underline{I}_{11} \underline{Z}_2 - \underline{I}_{22} \underline{Z}_5 + \underline{I}_{33}(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6) = \underline{E}_2.$$

Тармақтардағы әсерлік тоғы, контурлы тоқтардың алгебралық қосындысы арқылы табылады:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{11}; \underline{I}_2 = \underline{I}_{33} - \underline{I}_{11}; \underline{I}_3 = -\underline{I}_{22};$$

$$\underline{I}_4 = \underline{I}_{11} - \underline{I}_{22}; \underline{I}_5 = \underline{I}_{33} - \underline{I}_{22}; \underline{I}_6 = \underline{I}_{33}.$$

Кирхгоф теңдеу және қуат теңгерімі арқылы, есептің дәлме-дәлдігін тексереді. Еске сақтау керек, өткізгіштік пен қуат

кешенді кедергілерінің әрекеттегі саласы бойынша теріс болмайды. (R, g, P - әр уақытта оң болады). Сондықтан кешенді шамасы $\underline{Z}, \underline{Y}, \underline{S}$ $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$ болады.

Күрделі тармақталған тізбектің тиімді есептеу әдісін таңдау, сұлба ерекшелігі мен қойылған мақсатқа байланысты. Тұрақты ток тізбегіне қолданылған есептеу әдістері синусоидалды ток тізбегіне де жарайды.

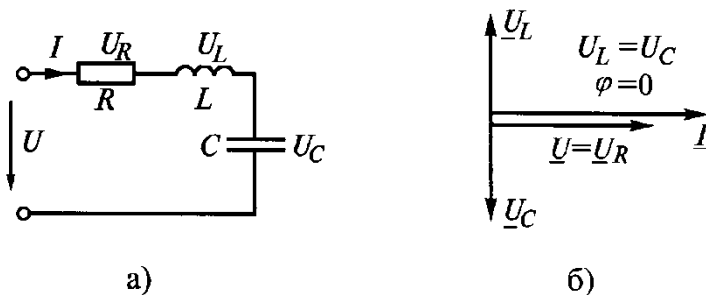
2.5 Электр тізбегіндегі резонанс

Резонанс дегеніміз пассивті электр тізбегінің режимі, индуктивті катушка мен конденсаторы бар тізбектің кірме реактивті кедергісі немесе кірме реактивті өткізгіштігі нөлге тең. Резонанста тізбектегі кірме ток фаза бойынша кернеумен бір бағытта келеді. Резонансты құбылыстар, электр және радиотехника автоматталған құрылғыларда телемеханика, байланыс, өлшем техникаларында кеңінен қолданылады.

2.5.1 Кернеу резонансы

Тізбектеліп жалғасқан резистор, катушка және конденсаторды қарастырайық (2.30 а-сурет). Резонанс кезінде кедергінің индуктивтілік құраушысы, сыйымдылық құраушы кедергісіне өтем жасайды. Реактивті кедергі мен реактивті қуат, тізбек кірмесінде нөлге тең:

$$X = X_L - X_C = 0; X_L = X_C; \omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (2.91)$$



2.30-сурет

$X_L = X_C$ болғанда, катушка мен конденсатор кернеулері фаза бойынша қарама-қарсы болса да, тең болады, сондықтан, қаралатын тізбекте **кернеу резонансы** пайда болады. (2.91) тендеуде кернеу резонансы, оны қорек көзінің кернеу жиілігін немесе катушка индуктивтігін және конденсатор сыйымдығын өзгертіп табуға болатынын көрсетеді. Тізбекте резонанс болатын кездегі, бұрыштың жиілігі, резонансты бұрыштық жиілігі деп аталады.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.92)$$

Тізбек толық кедергісі, резонанс кезінде активті кедергіге тең және ең аз мәнді болады:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R.$$

Бірақ тізбектегі ток мәні ең үлкен болады

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R}.$$

Резистордағы кернеу қорек көзінің кернеуіне тең.
 $U_R = IR = U$

Резонанс кезіндегі индуктивті немесе сыйымдылық кедергілер, резонанс контурының **сипаттамалық (толқынды) кедергісі** деп аталады:

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.93)$$

$\rho \gg R$ реактивті элементтегі кернеу кірмедегі кернеуден неғұрлым көп болады. Резонанс кезіндегі, катушка мен конденсатор кернеуінің, қор көзінің кернеуіне қатынасы контур сапалығы деп аталады:

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{\rho}{R}. \quad (2.94)$$

Бұл өлшемсіз параметр. Ол резонанс кезіндегі реактивті элементтер кернеуінің кірмедегіден неше есе көп екенін көрсетеді.

Параметр d , контур сапалығына керісінше, контур сөнген деп аталады.

$$d = \frac{1}{Q} = \frac{R}{\omega_0 L} = \frac{R}{\rho}. \quad (2.95)$$

Резонанс кезіндегі энергетикалық қарым-қатынастың да өз ерекшеліктері бар. Контурдағы ток $i = I_m \sin \omega_0 t$ болсын, онда конденсатордағы кернеу $u_C = U_{cm} \sin(\omega_0 t - 90^\circ) = -U_{cm} \cos \omega_0 t$ болады.

Электр және магнит өрісітері қосындысы энергиясы:

$$W = \frac{Li^2}{2} + \frac{Cu_C^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2} \sin^2 \omega_0 t + \frac{CU_{cm}^2}{2} \cos^2 \omega_0 t =$$

$$\frac{LI_m^2}{2} + \frac{CU_{cm}^2}{2} = \text{const};$$

Ал: $\frac{CU_{cm}^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}. \quad (2.96)$

Сондықтан магнит және электр өрістерінің барлық энергиясы уақыт өткен сайын өзгермейді. Электр өрісінің энергиясы азайса, магнитті өріс энергиясы өседі және керісінше. Конденсатор мен катушка арасында толығымен энергия ауысады. Қорек көзінің энергиясы, тізбекті қоректендіретін, катушка мен конденсатордың активті кедергісінің жоғалтуын жабады. Қорек көзінен тізбекке түсетін энергия, көрінген уақытта толығымен жылуға айналады. Сондықтан қорек көзіндегі барлық тізбек активті кедергіге эквивалентті.

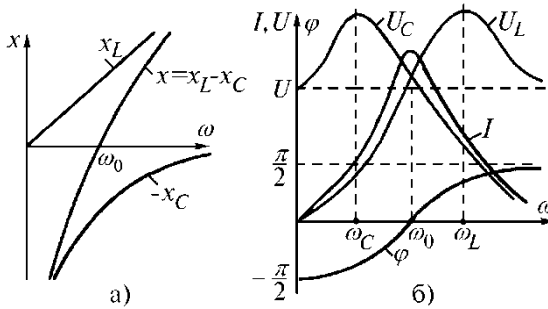
2.5.2 Тізбектелген контурдың жиілік сипаттамалары

2.30 а-суреттегі тізбекке синусоидалды кернеу берілген, амплитудасы өзгермейді, ал жиілігі ω $0 \dots \infty$ шамаға өзгереді. Жиіліктің өзгеруі тізбек параметрлерін өзгертеді:

$$X_L = \omega L; \quad X_C = \frac{1}{\omega C}; \quad X = X_L - X_C; \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Бұл жағдайда, индуктивті және сыйымдылық кедергілері өзгереді, онымен бірге, реактивті мен толық кедергілер және фаза φ ығысу бұрышы да өзгереді. (2.31 а-суретте) X_L , X_C , X жиілікке байланысты кестелері көрсетілген, ол тізбектің жиілік

сипаттамасы деп аталады. Егер, $\omega = 0$ болса, тізбектегі кернеу өзгермейді, сондықтан ток жоқ болады.



2.31-сурет

Жиілік 0 ден ω_0 -ге дейін өзгерсе реактивті кедергіде сыйымдылық сипаттама болады және ол $-\infty$ ден 0-ге дейін өзгереді. Сол себептен, ток нөлден ең көп U/R max мәніне өседі, ал кернеу мен ток векторлары аралығындағы фазаның ығысу бұрышы -90° тан 0-ге дейін өзгереді.

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}; U_L = \omega LI; U_C = \frac{I}{\omega C}.$$

Жиілік ω_0 -ден ∞ -ке дейін өзгерсе, қорытынды реактивті кедергі нөлден шексізге дейін өседі де, индуктивті сипаттамада болады. Осы себептен, ток ең үлкен мәнінен нөлге дейін азаяды, ал бұрыш φ нөлден 90° дейін өседі. $\omega=0$ болғанда, катушка кернеуі нөлге тең, ток тез азайғанша ω өсуіне қарай өседі көбейеді. Бұдан кейін U_L қорек көзінің кернеуі U дейін тез азаяды. Конденсатор кернеуі U_C , $\omega=0$ болса, қорек көзінің кернеуі U -ға тең, ток көбейгенше өседі, содан кейін U_C нөлге дейін азаяды.

(2.31 б-суретте) ток пен кернеудің әсерлік мәндері жиілікке байланысты, резонансты қисық деп аталады. Қисықтардан, U_C пен U_L кернеулігінің ең үлкен мәндері, жиілік резонансқа тең болмаған кезінде U_L үлкен мәнінің жиілік $\omega_L > \omega_0$ болатыны, U_C үлкен мәні $\omega_C < \omega_0$ болатыны көрініп тұр.

$\frac{dU_L}{d\omega} = 0$; $\frac{dU_C}{d\omega} = 0$; теңдеулерден, U_C пен U_L кернеулердің ең үлкен мәндері болатын жиіліктерді табуға болады:

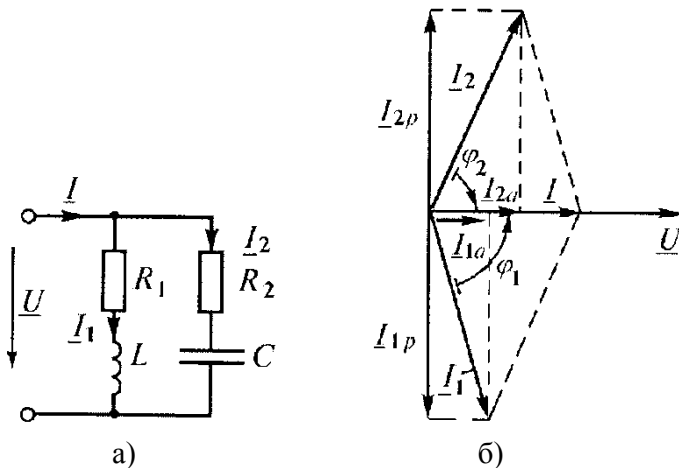
$$\omega_L = \omega_0 \sqrt{\frac{2}{2-d^2}}; \quad \omega_C = \omega_0 \sqrt{\frac{2-d^2}{2}}. \quad (2.97)$$

Тоқтың жиілікке қатысты кестесінен көруге болады, қаралып жатқан тізбектің таңдаулы қасиеттері бар. Тізбек тоққа ең аз кедергімен иемделген, жиілігі резонансқа жақын. Тізбектің таңдаулы қасиеттері электрбайланысы мен радиотехникада кеңінен қолданылады. Тізбекті резонанс режимінде пайдаланады. Кейбір жағдайда, электр тізбегінде резонанс құбылысы ескерілмесе, қолайсыз жағдайларға әкеліп соғады, оның ішінде оқшауламаға қауіпті асқын кернеу әкеліп соғуы мүмкін.

2.5.3 Тоқ резонансы

2.32.а-суреттен екі қатарлас тармағы бар сұлбаны қарастырайық, біріншісінде – резистор мен конденсаторы бар, екіншісінде - резистор мен катушкасы бар. Егер де жалпы тоқ I , фаза бойынша кернеуге сәйкес болса, ал кірме реактивті өткізгіштілік тізбекте резонанс құбылысы болуы мүмкін

$$b = b_C - b_L = 0 \text{ тең болса, немесе } b_L = b_C. \quad (2.98)$$



2.32-сурет

Егер $b_L = b_C$ болса, тоқтардың фаза бойынша қарама-қарсы реактивті құрамалары тең болса (2.32 б-сурет), оны тізбек резонансы, тоқ резонансы деп атайды.

Векторлы диаграммадан, резонанс кезінде тоқ I фаза бойынша кернеумен сәйкес келетіні, тармақтағы тоқтан аз болатыны көрініп тұр.

(2.98) теңдеуге b_L мен b_C мәнін қойып, тізбек пен жиілік параметрлері арқылы мынаны табамыз:

$$\frac{\omega L}{R_1^2 + \omega^2 L^2} = \frac{1}{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}. \quad (2.99)$$

Тоқ резонансын тоқ тармақтарын R_1 , R_2 , L, C немесе ω жиілігін өзгертіп табуға болады. Төрт берілген параметрлер мен бесіншісін (2.99) теңдеуден тапқанда, жиілік кешенді немесе жорамал болуы мүмкін. Мұндай параметрлер сәйкестігінде, тоқ резонансы болмайтынын дәлелдейді.

(2.99) теңдеуді есептеп, ω жиілікке қатысты резонанстық жиілікті табамыз:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{R_1^2 - \frac{L}{C}}{R_2^2 - \frac{L}{C}}}. \quad (2.100)$$

Егер де түбір астындағы бөлшек (2.100) теңдеуде, оң белгі болса, резонанс құбылысы пайда болады себебі жиілік жорамал санмен көрсетілмейді. Резонансты жиілік, бірізді жалғас контурының резонансты жиілігімен тең болады, егер де:

$$R_1 = R_2; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

$$R_1 = R_2 = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ резонансты жиілік түсініксіз түрде } \omega_0 = \frac{0}{0}.$$

болса, бұл кез-келген жиілікте тізбекте резонанс болатынын көрсетеді. Бұл кезде тізбектің кірме кедергісі активті жиілікке бағынышты емес.

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{(R + j\omega L) \left(R - j \frac{1}{\omega C} \right)}{R + j\omega L + R - j \frac{1}{\omega C}} = R$$

Мінсіз жағдайда $R_1 = R_2 = 0$, тізбек кірме кедергісі резонанс кезінде үлкен, ал ток нөлге тең, яғни энергия қорек көзінен контурға түспейді.

Ал катушка мен конденсатор арасында энергиялары ауысады.

Электржабдықтау жүйесінің құрылғыларының ток резонансы $\cos \varphi$ мәнін жоғарылату үшін қолданылады, ол үшін индуктивті жүктемеге қатарлас конденсаторлар батареясын қосу керек.

2.5.4. Синусоидалды ток тізбегінде қуат коэффициентін жоғарылату

Қазіргі электр энергиясының тұтынушыларының көбі индуктивті кедергілер, тоғы, фаза бойынша қорек көзінің кернеуінен қалады. Бұндай тұтынушылардың активті қуаты, ток пен кернеудің берілген мәндері $\cos \varphi$ -ке бағынышты:

$$P = UI \cos \varphi; \quad I = \frac{P}{U \cos \varphi}.$$

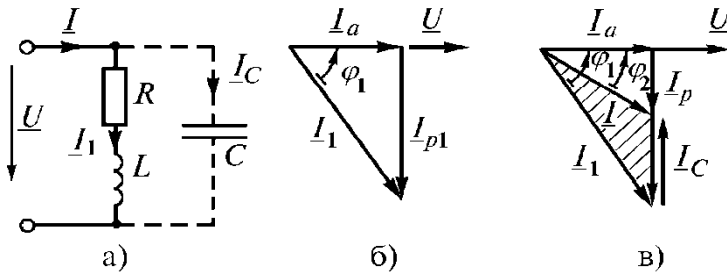
Сондықтан қуат коэффициентің $\cos \varphi$ көбейтсе ток азаяды.

Осылайша, тұтынушы $\cos \varphi$ көп болса, қуат жойылуы азаяды, электр энергиясы арзандайды. Қуат коэффициенті, қорек көзінің номиналды қуатының қалай пайдаланылатынын көрсетеді. 1000 кВт қабылдағышты, $\cos \varphi = 0,5$ тең қоректендіру үшін, генератор қуаты осындай болу керек:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{1000}{0,5} = 2000 \text{ кВА},$$

Ал $\cos \varphi = 1$ $S = 1000 \text{ кВА}$.

Демек, $\cos \varphi$ өсуі, генератор қуатының пайдалануын өсіреді. Энергетика қондырғыларының тиімділігін өсіру үшін, $\cos \varphi$ -ті өсіру керек; индуктивті жүктемеге параллель қосылған конденсатор батареясы қолданылады. (2.33 а-сурет)



2.33-сурет

Конденсатор сыйымдылығы, $\cos \varphi$ -ті берілген $\cos \varphi_1$ мәнінен, керекті $\cos \varphi_2$ өсіруге қажет. (2.33 б, в-суреттегі) диаграммдан табуға болады. Векторлы диаграмма жасағанда, бастапқы вектор ретінде берілген кернеу векторы алынады. Егерде, жүктеме индуктивті болса, ток вектор \underline{I}_1 кернеу векторынан φ_1 бұрышқа қалады. \underline{I}_a тоғының активті құрамасы, бағыты бойынша кернеумен теңеседі, \underline{I}_{p1} тоғының реактивті құрамасы 90° қалады. (2.33 б-суреті.). Тұтынушыға конденсатор батареясы C қоссақ, \underline{I} тоғы векторлар \underline{I}_1 мен \underline{I}_c геометриялық сомасы ретінде табылады. Сыйымдылық ток \underline{I}_c векторы, кернеу векторынан 90° озады (2.33 в-сурет). Векторлы диаграммдан көрінеді. $\varphi_2 < \varphi_1$, яғни конденсаторды қосқаннан кейін, қуат коэффициенті $\cos \varphi_1$ -ден $\cos \varphi_2$ дейін өседі. Конденсатордың керекті сыйымдылығын тоқтық векторлы диаграммасы арқылы табуға болады (2.33 в-сурет):

$$I_c = I_{p1} - I_p = I_a \operatorname{tg} \varphi_1 - I_a \operatorname{tg} \varphi_2 = \omega C U$$

$P = U I_a$ деп, конденсатор сыйымдылығын табамыз:

$$C = \frac{I_a}{\omega U} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) = \frac{P}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

Көп жағдайда, қуат коэффициентін 1,0 дейін емес, 0,9...0,95 өсіреді, толық өтем үшін қосымша конденсатор қою керек, бұл тиімсіз.

2.6. Өзара индуктивті электр тізбегі

2.6.1. Жалпы мәлімет

Синусоидалы тоқ тізбегін қарастырғанда өзіндукция құбылысы есептеледі, яғни ЭҚК-ны электр тізбекке бағыттау өзіндукциясы өзгергенде, осы тізбектегі токпен себептенген. ЭҚК-ның контурдың бірінде пайда болуын екіншісінде токтың өзгеруін қарастырайық. ЭҚК өзара индукциясымен бағытталған тізбек, индуктивті байланысты тізбек деп аталады. Екі контурды қарастырайық бір-бірінен алыстаған (2.34-сурет) контурлар, тегіс жіңішке катушка ω_1 мен ω_2 иірім саны түрінде көрсетілген. Өзіндік индукция ағымды Φ_{1L} ток I , пайда болған, ыдырау ағымы Φ_{ip} екінші контурдан өтетін түрде көрсетілуі мүмкін:

$$\Phi_{1L} = \Phi_{1p} + \Phi_{1p}. \quad (2.102)$$

Осыған сәйкес екінші контурдың өзіндукция ағымын табамыз:

$$\Phi_{2L} = \Phi_{2p} + \Phi_{12}. \quad (2.103)$$

Φ_{21} мен Φ_{12} ағымдарды, өзара индукция ағымы деп аталады. Оларды екі индексмен белгілейміз: бірінші индекс ағымның қай контурға ілінетінін көрсетеді, екіншісі – осы ағымды пайда қылған тоқ номерін көрсетеді. Мысалы: Φ_{12} ағымы i_1 тоғымен пайда болған бірінші контурға ілінеді. Егеде, өзара индукция ағымының бағыты осы контурдың өзіндукция ағымының бағыты мен сәйкес келсе, онда контурлар магнитті ағымы мен ток бағыттарын келісті дейді. Бағыттары керісінше болса, ағымдардың қарама-қарсы бағыты дейді. Бірінші мен екінші контурдан өтетін ағым қосындысы:

$$\Phi_1 = \Phi_{1L} \pm \Phi_{12}; \quad \Phi_2 = \Phi_{2L} \pm \Phi_{21}, \quad (2.104)$$

+ ағымның келісті бағытына сәйкес;

- қарама-қарсы бағытта;

Бірінші мен екінші контурдың толық ағым жалғасы.

$$\psi_1 = w_1 \Phi_1 = w_1 (\Phi_{1L} \pm \Phi_{12}) = w_1 \Phi_{1L} \pm w_1 \Phi_{12} = L_{11} i_1 \pm M_{12} i_2; \quad (2.105)$$

$$\psi_2 = w_2 \Phi_2 = w_2 (\Phi_{2L} \pm \Phi_{21}) = w_2 \Phi_{2L} \pm w_2 \Phi_{21} = L_{22} i_2 \pm M_{21} i_1. \quad (2.106)$$

Бір тізбектің өзара индукция ағым жалғасының басқа тізбектегі токқа қатынасы, өзара индуктивтігі деп аталады:

$$M_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_2} = \frac{w_1 \Phi_{12}}{i_2}; \quad M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_1} = \frac{w_2 \Phi_{21}}{i_1}. \quad (2.107)$$

Сызықты электр тізбегінде әр уақытта теңдік болады:

$$M_{12} = M_{21} = M, \quad (2.108)$$

Сондықтан өзара индуктивтік индексін қалдырып кетуге болады. Осы теңдеу әділдігін (2.35-суреттегі) сақиналық ферромагнитті емес магнит өткізгіш мысалында көруге болады, көлденең кесінді ауданы S екі катушкасы бар.

Ток $i_1 = 0$

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_2} = \frac{w_1 \Phi_{12}}{i_2} = \frac{w_1 B S w_2}{H l} = \frac{w_1 w_2 \mu S}{l}, \quad (2.109)$$

B, H – магнитті индукция мен магнит өрісінің кернеуі, ток i_2 – мен пайда болған.

($i_1 = 0$)

l - орташа магнитті сызық ұзындығы;

$\mu_a = B/H$ - ортаның абсолютті магнитті өтімділігі;

Ток $i_2 = 0$ болса, бірінші мен екінші катушка өзара индуктивтігі

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_1} = \frac{w_2 \Phi_{21}}{i_1} = \frac{w_2 B S w_1}{H l} = \frac{w_1 w_2 \mu_a S}{l} \quad (2.110)$$

(2.109) бен (2.110) теңдеулерін салыстырғанда, $M_{12} = M_{21}$ тең екенін көрсетеді. Сонымен (2.108) теңдеу дәлелденеді. Бұдан басқа, екі катушканың өзара индуктивтігі, иірім санына, магнитөткізгіштің геометриялық шамасына және катушкалардың өзара қатынасы мен ортаның абсолютті магнитті өтімділігіне бағынышты. Екі катушканың индуктивті байланысын байланыс коэффициенті деп аталады.

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2.111)$$

Бұл коэффициент бірден аз, себебі, өзара индукция магнитті ағым өзіндік индукция ағымынан аз, оны екі сымды катушканың ажыратқан ағымын азайтса немесе жоғары абсолютті магнитті өтімділігі бар магнит өткізгішті пайдаланса көбейтуге болады.

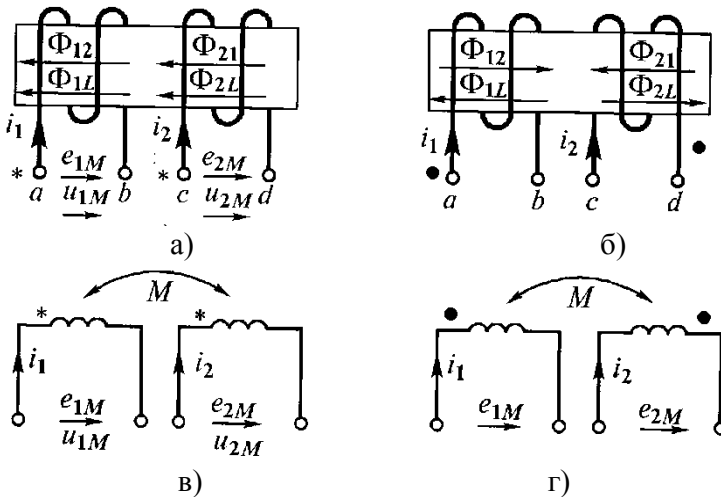
2.6.2. Өзара индукция ЭҚК

Бірінші мен екінші контурдағы индуктірленген ЭҚК (2.105, 2.106)-ны есепке алып, мына түрде жазуға болады:

$$e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = -L_1 \frac{di_1}{dt} \mp M \frac{di_2}{dt} = e_{1L} \mp e_{1M}; \quad (2.112)$$

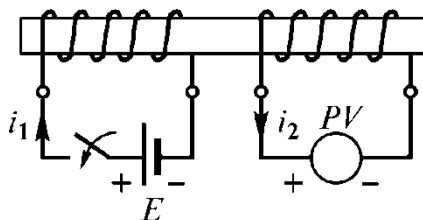
$$e_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = -L_2 \frac{di_2}{dt} \mp M \frac{di_1}{dt} = e_{2L} \mp e_{2M}. \quad (2.113)$$

Осылайша, әр катушка ЭҚК, өзіндік индукция мен өзара индукция ЭҚК алгебралық жиынымен табылады. Өзара индукция ЭҚК белгісін табу үшін тізбектегі индуктивті қосылған элементтер қысқышын белгілейді. Екі қысқышты егер де ток бағыты қысқышқа қатысты, бірдей болса, өзіндік индукция магнитті ағымы мен өзара индукциясы қосылса, аттас деп атайды. Бұндай тұжырымды сұлбада бірдей шартты белгімен белгілейді, мысалы: нүктемен немесе жұлдызбен (2,36 а, б-сурет). Бір бағыттағы ток i_1 мен i_2 (2.36 а-сурет) А мен С қысқышқа қатысты, өзіндік индукция ағымдары Φ_{1L} (Φ_{2L}) мен өзара индукция Φ_{12} (Φ_{21}) бағыттарын беттестіреді. Сонымен, А мен С қысқыштары аттас. b мен d қысқыштары да аттас, бірақ шартты белгімен біратты бір жұп тұжырымын белгілейді, мысалы a мен c (2,36 а-сурет).



2.36-сурет

Егерде i_1 мен i_2 тоғы аттас қысқышқа қатысты бір бағытта болмаса (2,23 б-сурет), онда өзіндік индукция мен өзара индукция ағымдарын қарама-қарсы бағыттауға душар етеді. Сұлбада, магнит өткізгіші көрсетілмейді, тек аттас қысқыштар белгіленеді (2.36 в-сурет).



2.37-сурет

Аттас қысқыштарды тәжірибе жолымен табуға болады. Ол үшін, бір катушка тұрақты ток қайнар көзінің тізбегіне қосылған, екіншісіне тұрақты ток вольтметрі қосылған. (2.37-сурет). Егер де, қайнар көзінің тізбегі тұйықталғанда өлшем құралының тілі қисайса, индуктивті қосылған катушка қысқышы қайнар көзінің оң полюсіне қосылса және өлшем құралдың оң қысқышына қосылса, аттас болады.

ЭҚК мен өзара индукция кернеуінің белгілерін анықтайық. Мысалы, (2.36 а-сурет) бірінші катушка ажыраған, екіншісінен i_2 тоғы өтеді. e_{1M} , $u_{1M} < i_2$ оң бағыттарын таңдайық, аттас қысқыштарға қатысты. ЭҚК мен өзара индукция кернеуі тең, белгісі бойынша қайшы келеді. $e_{1M} > 0$ болса i_2 қысқыш әлеуеті а қысқыш әлеуетінен көп, сондықтан $u_{1M} < 0$.

Ленц ережесі бойынша e_{1M} мен $\frac{di_2}{dt}$ белгілер әруақытта қарама-қарсы, сондықтан: $u_{1M} = -e_{1M} = M \frac{di_2}{dt}$

Кешенді түрінде, мынадай:

$$\underline{U}_{1M} = -\underline{E}_{1M} = j\omega M I_2 = \underline{Z}_M I_2. \quad (2.114)$$

Катушкаларды қарама-қарсы қосқанда (2,37 б-сурет).

$$\underline{U}_{1M} = -\underline{E}_{1M} = -j\omega M I_2 = -\underline{Z}_M I_2. \quad (2.115)$$

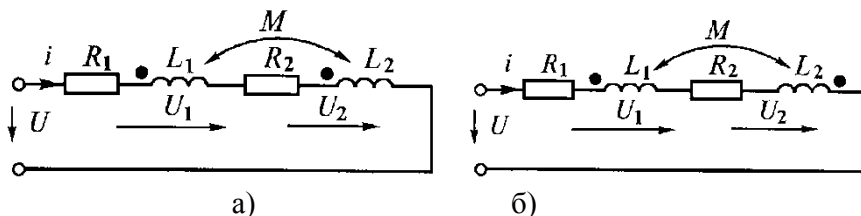
(2,114) пен (2,115) көруге болады, өзара индуктивтік кернеу векторы \underline{U}_{1M} , ток векторына \underline{I}_2 фаза бойынша қатысты $\pm 90^\circ$ бұрышқа жылжыған.

$X_M = \omega M$ кедергісі өзара индуктивті кедергі, ал $\underline{Z}_M = j\omega M$ – кешенді кедергі деп аталады. Сонымен, ток бағыты келісті болса, өзара индуктивтік кернеу құлауы «плюс» белгісімен, қарама-қарсы бағытта болса, «минус» белгісімен көрсетіледі.

2.6.3. Индуктивті байланысты екі катушканың тізбектеліп қосылуы

Тізбектеліп қосылған екі катушканы қарайық, активті кедергілері

R_1, R_2 , индуктивтілігі L_1, L_2 , өзара индуктивтігі M екі түрде қосылды дейік, (2,38 а-сурет) келісті және (2.38 б-сурет) қарама-қарсы.



2.38-сурет

Келісті қосылғанда, ток екі катушкада бір бағытта атас қысқышқа қатысты, сондықтан өзара индуктивтілік кернеу құлауын Кирхгоф теңдеуінің лездік мәнінде «плюс» белгісімен жазамыз:

$$u_1 = iR_1 + L_1 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt}; \quad u_2 = iR_2 + L_2 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt};$$

$$u = u_1 + u_2 = i(R_1 + R_2) + (L_1 + L_2 + 2M) \frac{di}{dt}.$$

Осы теңдеулер кешенді түрде:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}R_1 + j\omega L_1 \underline{I} + j\omega M \underline{I}; \quad \underline{U}_2 = \underline{I}R_2 + j\omega L_2 \underline{I} + j\omega M \underline{I};$$

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_1 + \underline{U}_2 = \underline{I}(R_1 + R_2) + \\ j\omega \underline{I}(L_1 + L_2 + 2M) &= \underline{I}Z_{\text{согл}}. \end{aligned} \quad (2.116)$$

Келісті (соласком) қосылғандағы тізбектің толық кедергісі:

$$\underline{Z}_{\text{согл}} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 + 2M). \quad (2.117)$$

Қарсы қосылғанда (2.38 б-сурет) екі катушкадағы тоқ аттас қысқышқа қатысты қарама-қарсы бағытта, сондықтан өзара индуктивтілік кернеуін «минус» белгісімен жазамыз. Бұл жағдайда, Кирхгоф теңдеуінің комплексті түрі, мынадай:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}R_1 + j\omega L_1 \underline{I} - j\omega M \underline{I}; \quad \underline{U}_2 = \underline{I}R_2 + j\omega L_2 \underline{I} - j\omega M \underline{I};$$

$$\underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 = \underline{I}(R_1 + R_2) +$$

$$j\omega \underline{I}(L_1 + L_2 - 2M) = \underline{I}Z_{\text{қарама қарсы}} \quad (2.118)$$

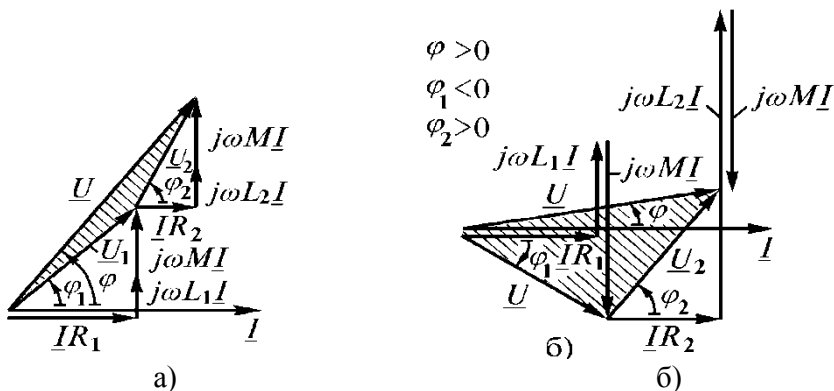
Қарсы қосылған тізбек толық кедергісі:

$$\underline{Z}_{\text{қарама қарсы}} = R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 - 2M). \quad (2.119)$$

Тізбектің толық кедергісі келісті қосылғанда қарсыға қарағанда көп. Бұны индуктивті байланысты катушканың аттас қысқышын тәжірибе жолымен табуда пайдалануға болады.

(2,39 суретте) келісті және қарсы қосылған катушканың векторлы диаграммасы көрсетілген. Тоқ векторының бастапқы фазасы тізбектің барлық элементінің біріккен түрінде, нөлге тең деп алынады. Тоқ векторына қарай \underline{U}_1 мен \underline{U}_2 кернеу қосындысы жазылған. (2.116, 2.118)

Векторлар бағытын таңдауды жеңілдетеді, кешеннің $\pm j$ көбейтіндісі $\pm 90^\circ$ бұрылысына сәйкес. Вектор көп бұрыштары \underline{U}_1 , \underline{U}_2 , \underline{U} , диаграммада салынған Кирхгоф заңына сәйкес, керекті болу үшін штрихталған:



2.39-сурет

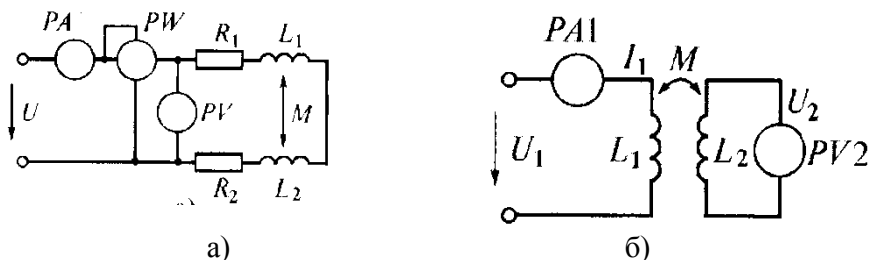
2.39 б-суреттегі қарсы қосылған катушка векторлы диаграммасы $L_1 < M < L_2$ кезінде салынған. Бұндай параметрлер қатынасында бірінші катушкадағы сыйымдылық тиімдірек көрінеді, кернеу \underline{U}_1 ток \underline{I}_1 қалады. Тізбекке конденсатор жоқ, бірінші катушка индуктивтілігі $L'_1 = L_1 - M$ теріс, конденсатор қосылуына эквивалентті болады. Бірақ тізбек барлық уақытта индуктивті сипатта, тоқ векторы кірмеде кернеу векторынан қалады, $(L_1 + L_2 - 2M) > 0$

Катушканың келісті қосылуында сыйымдылық тиімділігі болмайды.

2.6.4. Өзара индуктивтікті эксперименталды жолымен анықтау

Индуктивті байланысты катушкалардың тізбектеліп қосылуы өзара M индуктивтілікті тәжірибе мен анықтауда қолданылады. 2.40 а-сурет. Ол үшін екі тәжірибе өткіземіз. Бірінші тәжірибеде катушкалар бірізді жалғас және келісті қосамыз. Тоқ $I_{\text{согл}}$, U кедергісін және активті қуатты $P_{\text{согл}}$ өлшейміз. Тәжірибе қорытындысында, тізбектің активті, толық және реактивті кедергісін табамыз.

$$R_{\text{сәйкес}} = \frac{P_{\text{сәйкес}}}{I_{\text{сәйкес}}^2}; \quad Z_{\text{сәйкес}} = \frac{U}{I_{\text{сәйкес}}}; \quad X_{\text{сәйкес}} = \sqrt{Z_{\text{сәйкес}}^2 - R_{\text{сәйкес}}^2}.$$



2.40-сурет

Бір катушканың қысқыш орындарын ауыстырып сол кернеудің өлшеуін қайталаймыз. Тәжірибе қорытындысында тізбектегі қарсы қосылған катушка кедергісін анықтаймыз:

$$M = \frac{X_{\text{сәйкес}} - X_{\text{қарама қарсы}}}{4\omega}. \quad (2.120)$$

Өзара индуктивтілікті жай тәсілмен табуға болады. Бірінші катушканы амперметр арқылы көрек көзіне қосамыз 2.40 б-сурет, екінші катушка қысқышына үлкен ішкі кедергісі бар вольтметр қосамыз.

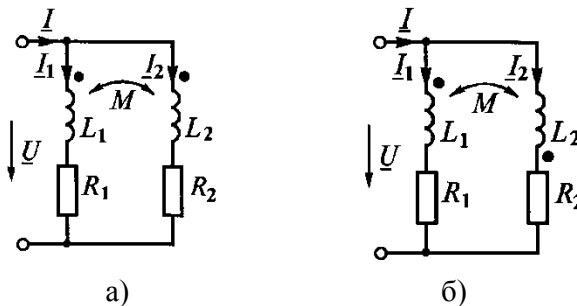
Тоқ I_1 мен U_2 кернеуін өлшейміз. $u_2 = M \frac{di_1}{dt}$ болғанда әсерлі мәні $U_2 = \omega MI_1$, сондықтан:

$$M = \frac{U_2}{\omega I_1}. \quad (2.121)$$

2.6.5. Индуктивті байланысты катушкалардың жапсарлас қосылуы

Екі катушка кедергілері R_1, R_2 , индуктивтілігі L_1, L_2 және өзара индуктивтілігі M жапсарлас қосылған. Екі түрлі қосылуы

мүмкін – аттас қысқышты бір түйіншікке қосу (2.41 б-сурет) және әртүрлі түйіншікке қосу (2.41. а сурет)



(2.41-сурет)

Тоқты оң бағытта алғанда, бірінші сұлба келісті қосуға сәйкес, екіншісі – қарсы қосылғанда сәйкес. Кирхгофтың екінші заңы бойынша теңдеулер құрамыз, әр қатарлы тармақтарға кешенді түрде:

$$\left. \begin{aligned} R_1 \underline{I}_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 \pm j\omega M \underline{I}_2 &= \underline{U} \\ R_2 \underline{I}_2 + j\omega L_2 \underline{I}_2 \pm j\omega M \underline{I}_1 &= \underline{U} \end{aligned} \right\}. \quad (2.122)$$

$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1$; $\underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2$; $\underline{Z}_m = j\omega M$ белгілеп, теңдеулер жүйесін табамыз:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_1 \underline{I}_1 \pm \underline{Z}_M \underline{I}_2 &= \underline{U} \\ \pm \underline{Z}_M \underline{I}_1 + \underline{Z}_2 \underline{I}_2 &= \underline{U} \end{aligned} \right\}, \quad (2.123)$$

Мұндағы «плюс» белгісі катушканың келісті қосылуына сәйкес (2.41 а сурет), «минус» белгісі – қарсыға сәйкес (2.41 б-сурет)

Тоқтарға қатысты теңдеу жүйесін шешеміз:

$$\underline{I}_1 = \frac{A_1}{\Delta} = \frac{\underline{Z}_2 \mp \underline{Z}_M}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2} \underline{U}; \quad \underline{I}_2 = \frac{A_2}{\Delta} = \frac{\underline{Z}_1 \mp \underline{Z}_M}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2} \underline{U}.$$

Кирхгофтың бірінші заңы бойынша ток тізбектің тармақталмаған бөлігінде:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \mp 2\underline{Z}_M}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2} \underline{U}, \quad (2.124)$$

Тізбек кірме кедергісі

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \mp 2\underline{Z}_M}, \quad (2.125)$$

«алу» - келісті қосуға жатады.

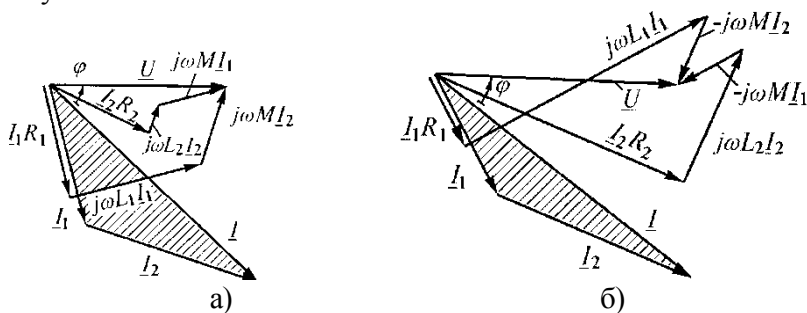
«қосу» - қарсы қосуға жатады.

$\underline{Z}_M = 0$, яғни тармақтар аралығында индуктивті байланыс жоқ болғанда, (2.125) формуланы белгілі түрде жазамыз.

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}.$$

2.42 суретте тізбектің векторлы диаграммалар көрсетілген (2.41-суретте) катушкалар (2.122) мен (2.123) теңдеулеріне сәйкес келісті және қарсы қосылған. Көрек көзінің кернеуі \underline{U} векторының бастапқы фазасы нөлге тең.

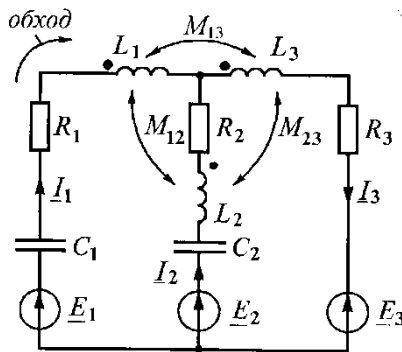
Кирхгофтың бірінші заңы бойынша тоқтың көпбұрышын салып (2.124) жазықтықта кернеудің барлық векторларын салуға болады. (2.122) бірінші теңдеу жүйесімен \underline{U} векторлар құрамаларын салуды қарастырайық, катушкаларды келісті қосқандағы (2.42 а-сурет) $\underline{I}_1 R_1$ векторларды \underline{I}_1 ток векторларына, жапсарлас жүргіземіз. Вектор $\underline{I}_1 R_1$ аяғынан, индуктивтілікте $j\omega L_1 \underline{I}_1$ кернеу векторын жүргіземіз, ток, 90° -қа озады. Үшінші векторды $j\omega M \underline{I}_2$ екіншісінің аяғынан саламыз. Ол ток \underline{I}_2 90° бұрышына озады, \underline{I}_2 көбейтумен j табамыз, оның 90° оң бағытқа бұрылатынын көрсетеді. Екінші теңдеу жүйесі (2.122) мен вектор \underline{U} құрамасын қарсы қосылған катушкаға саламыз.



2.42-сурет

2.6.6 Күрделі индуктивті байланысқан тізбегін есептеу

Тармақталған тізбек есебін Кирхгоф теңдеуі мен контурлы тоқ әдісімен жүргізуге болады. Кирхгофтың екінші заңымен теңдеу құрағанда, өзара индуктивтілік кернеу белгісін табу үшін келесі ережелерді ескеру керек: егер де бір контурда айналым бағыты мен тоқтың оң бағыты басқа контурда аттас қысымдыққа қатысты, тең келсе, өзара индуктивтілік кернеуі «плюс» белгімен алынады. Егер де, осы бағыттар аттас тұжырыммен сәйкес келмесе, «минус» белгісімен жазылады. Кирхгоф заңымен сұлбаға теңдеу жазамыз.



2.43-сурет.

Тармақтағы тоқ бағытын және контурдың айналу бағытын оң деп аламыз:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0;$$

$$-jI_1 \frac{1}{\omega C_1} + I_1 R_1 + j\omega L_1 I_1 - j\omega M_{12} I_2 + j\omega M_{13} I_3 - I_2 R_2 -$$

$$-j\omega L_2 I_2 + j \frac{1}{\omega C_2} I_2 + j\omega M_{12} I_1 + j\omega M_{23} I_3 = \underline{E}_1 - \underline{E}_2;$$

$$-jI_2 \frac{1}{\omega C_2} + j\omega L_2 I_2 + I_2 R_2 - j\omega M_{12} I_1 - j\omega M_{23} I_3 +$$

$$+ j\omega L_3 I_3 + I_3 R_3 + j\omega M_{13} I_1 - j\omega M_{23} I_2 = \underline{E}_2 - \underline{E}_3.$$

Белгілі тоқ параметр теңдеу жүйесін шығарып, тармақтағы тоқты табамыз. Бұндай теңдеуді табу үшін, эквивалентті

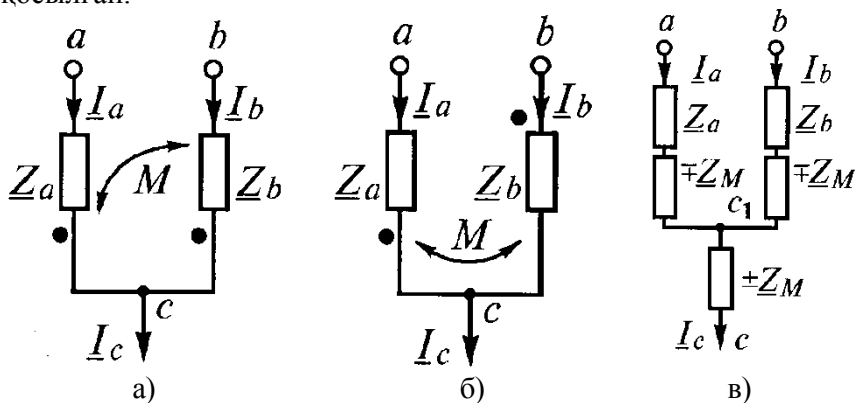
генератор әдісі қолданылады, егер де қаралатын тармақтың сол тізбек бөлігінде индуктивті байланысы болмаса, активті екішты құрамына кіреді. Кедергі үшбұрышын эквивалентті жұлдызға немесе керісінше өзгертуді пайдалануға болмайды. Түйіннің әлеует әдісін бұл жағдайда пайдалануға болмайды, себебі тармақтағы тоқтар түйіншек арасындағы кернеуге бағышты, бұнда осы тармақтар қосылған, басқа тармақтар да тоқпен қосылған.

Олармен өзара индуктивтілік арқылы қосылған. Есептеу әдісін таңдауда, тізбектің есептелетін сұлбасында индуктивті байланысты алып тастау керек.

2.6.7. Индуктивті байланысты эквивалентті ауыстыру

Электр тізбегінің есебін электр байланысы бар сұлба бөлігін, индуктивті байланысы жоқ эквивалентті сұлбамен алмастырсақ жеңілдетуге болады. Бұл тәсілді эквивалентті алмастыру немесе индуктивті байланыс шешімі дейді.

Индуктивті байланысы жоқ сұлбаны қарастырайық, Z_a мен Z_b тізбектің екі индуктивті байланысты элементтеріне эквивалентті, ортақ түйіншікке c қосылған (2.44 а, б-сурет). Екі жағдайды қарастырайық, түйіншек C тізбек элементтері аттас (2.44 а-сурет) және түрлі атты қысқыштармен (2.44 б-сурет) қосылған.



2.44-сурет

Тізбектің индуктивті элементінің кернеуі:

$$\underline{U}_{ac} = \underline{I}_a \underline{Z}_a \pm \underline{I}_b \underline{Z}_M; \quad \underline{U}_{bc} = \underline{I}_b \underline{Z}_b \pm \underline{I}_a \underline{Z}_M.$$

Кирхгоф теңдеуін $\underline{I}_a + \underline{I}_b - \underline{I}_c = 0$ пайдалана отырып, бірінші теңдеуден \underline{I}_b тоғын, ал екінші теңдеуден \underline{I}_a тоғын алып тастаймыз:

$$\underline{U}_{ac} = (\underline{Z}_a \mp \underline{Z}_M) \underline{I}_a \pm \underline{Z}_M \underline{I}_c; \quad \underline{U}_{bc} = (\underline{Z}_b \mp \underline{Z}_M) \underline{I}_b \pm \underline{I}_c \underline{Z}_M.$$

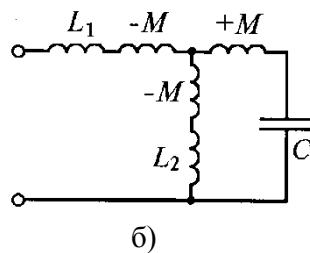
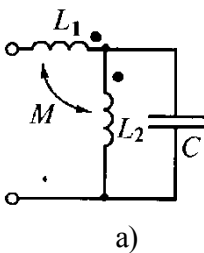
Бұл теңдеу, эквивалентті сұлбаның индуктивті байланысы жоғын ауыстыруын қанағаттандырады (2.44 в-сурет).

«Минус» белгісі \underline{Z}_M кедергінің біратты қысқышы бар тармақтармен қосылғанына сәйкес (2.44 в-сурет) c түйіншек нүктесі c_1 нүктеге ауысты дейік. Екі нүкте арасында қосымша кедергі $\pm \underline{Z}_M$ бар.

Мысал: (2.45 а-суретте) тізбектің кірме кедергісін табу керек, $X_{L1} = 10 \text{ Ом}$, $X_{L2} = 5 \text{ Ом}$, $X_M = 5 \text{ Ом}$, $X_C = 10 \text{ Ом}$.

Есептелуі: (2.45 б-сурет) Атлас қысқыштардың бір түйіншеке қосылғанын ескере отыра индуктивті байланыстан босаймыз. Тізбектің кірме кедергісі кешенін анықтаймыз (2.45 б-сурет):

$$\underline{Z}_{ex} = jX_{L1} - jX_M + \frac{(jX_M - jX_C)(jX_{L2} - jX_M)}{jX_M - jX_C - jX_{L2} - jX_M} = j5 = 5e^{j90^\circ}$$



2.45-сурет

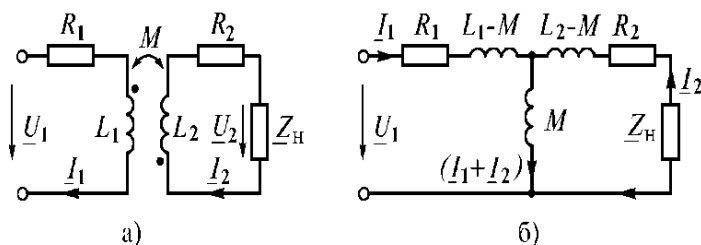
2.6.8. Ауа трансформаторы.

Трансформатор дегеніміз – электромагнитті статистикалық құрылғы, екі немесе одан да көп индуктивті байланысты

орамалары бар, электромагнит индукциясы арқылы бір немесе бірнеше басқа айнымалы ток тізбегінде түрлендіріледі. Екі орамды ферромагнитті өзекшесі жоқ трансформаторды қарастырайық. Мұндай трансформаторды ауалы немесе сызықты деп атайды. Олар жоғарғы сапалы қондырғыларда, төменгі жиілікпен жұмыс жасайтын және өлшейтін құрылғыларда қолданылады.

Токтың көрек көзіне қосылған трансформатор орамасын, бірінші реттік аталады немесе жоғарғы кернеу орамы, ал жүктемеге қосылған орамасы екінші реттік немесе төменгі кернеу орамасы немесе жоғарғы кернеу орамы деп аталады, ол жүктемеге қосылған.

Немесе төменгі кернеу орамасы, деп аталады (2.46 а-сурет). Кернеу мен ток осы орама қысқышындағы бірінші реттік немесе екінші реттік деп аталады.



2.46-сурет

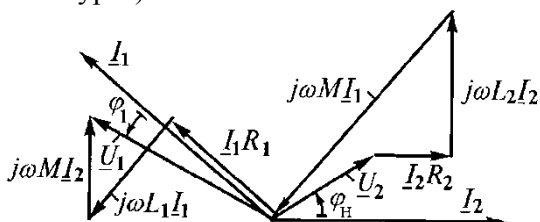
Трансформатордың жұмыс жасау қағидаты өзара индукция құбылысына негізделген. Егер де бірінші орамаға R_1, L_1 параметрлері бар, синусоидалды кернеу u_1 салынса, орамадан өтетін i_1 тоғы айнымалы магнитті ағым пайда болуына әсер етті, екінші орамға R_2, L_2 параметрлері өзара индукция ЭҚК (келтіреді) бағытталады. Осы ЭҚК әсерімен жүктемеден i_2 қарсы тоғы өтеді. Осылайша, энергия бірінші контурдан екіншісіне контурлар арасындағы электрлік байланыссыз беріледі.

II Кирхгоф заңы бойынша трансформатордың бірінші және екінші тізбектеріне теңдеулер құрамыз

$$R_1 \underline{I}_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_2 = \underline{U}_1; \quad (2.126)$$

$$\underline{U}_2 + R_2 \underline{I}_2 + j\omega L_2 \underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_1 = 0. \quad (2.127)$$

Осы теңдеулерді және $\underline{U}_2 = \underline{I}_2 Z_H$ теңдеуін \underline{U}_1 , \underline{I}_1 және \underline{I}_2 токтарын есептеуге болады. Жүктеме $Z_i = R_i + jX_i = Z_i e^{j\varphi_i}$; $\varphi_i > 0$ индуктивті мінездемеден вектор динамикасы тұрғызылған. \underline{I}_2 -трансформатордың екінші орамының тоғын, \underline{I}_2 бастапқы деп алып оны оның осімен бағыттаймыз (2.47-сурет)



2.47-сурет

Жүктеме кернеуі \underline{U}_2 векторы \underline{I}_2 ток күші векторын φ_H бұрышына озады. Векторлы диаграмманы әрі қарай салу үшін (2.127) теңдеуге сәйкестендіреді. \underline{U}_2 вектор аяғынан, вектор $\underline{I}_2 R_2$ жүргіземіз \underline{I}_2 ток векторына қатар. Кернеу векторы $j\omega L_2 \underline{I}_2$ екінші реттік орамадағы, \underline{I}_2 ток векторы 90° озады. (2.127) теңдеумен вектор $j\omega M \underline{I}_1$ солай жүргізу керек, екінші тізбектің кернеуінің геометриялық сомасының құлауы нөлге тең болуы тиіс. Ток векторы \underline{I}_1 вектор $j\omega M \underline{I}_1$ 90° озады. $j\omega M \underline{I}_2$ кернеуі, \underline{I}_2 тоғынан 90° озады, (2.126) теңдеудің сол жағының қосындысы кірме кернеу векторын көрсетеді.

Трансформатор жұмысының талдауын эквивалентті сұлбада жүргізеді, онда индуктивті байланыс жоқ болу керек.

(2.126, 2.127) теңдеулерді өзгертеміз. (2.126) теңдеу сол жағына қосамыз және аламыз $j\omega M \underline{I}_1$ комплексін, ал (2.127)

теңдеу сол жағына қосамыз және аламыз $j\omega M I_2$ кешенін қосындыларынан табамыз

$$R_1 I_1 + j\omega (L_1 - M) I_1 + j\omega M (I_1 + I_2) = \underline{U}_1;$$

$$\underline{U}_2 + R_2 I_2 + j\omega (L_2 - M) I_2 + j\omega M (I_1 + I_2) = 0.$$

Бұл теңдеулерге 2.46 б-суреттегі сұлба тең. 2.46 а-суреттегі сұлбадан айырмашылығы, бірінші мен екінші реттік тізбек токпен байланысты. Трансформаторды орнату сұлбасы (2.46 б-сурет) тәжірибелік есепте қолданылады, бұған бұрынғы тізбекті талдау әдістері мен есептеуін қолдануға болады. (2.127) теңдеуге $\underline{U}_2 = I_2 \underline{Z}_H = I_2 (R_H + jX_H)$ қоямыз, I_1 бағытты (2.126, 2.127) теңдеулерді шығарамыз.

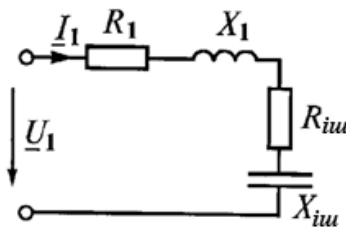
$$I_{-1} = \frac{\underline{U}_1}{(R_1 + R_{iu}) + j(X_1 - X_{iu})}, \quad (2.128)$$

Бұнда

$$R_{iu} = \frac{\omega^2 M^2 (R_2 + R_H)}{(R_2 + R_H)^2 + (\omega L_2 + X_H)^2};$$

$$X_{iu} = \frac{\omega^2 M^2 (\omega L_2 + X_H)}{(R_2 + R_H)^2 + (\omega L_2 + X_H)^2}.$$

Кедергі R_{iu} мен X_{iu} кіргізілген деп аталады (екінші контурдан біріншіге) активті және реактивті кедергі болады. (2.128) теңдеуден бірінші реттік орама жағынан сұлбаны екіұштық $R_1 + R_{iu}$ мен $X_1 + X_{iu}$ кедергісі бар түрінде қаралады (2.48 а-сурет).



2.48-сурет

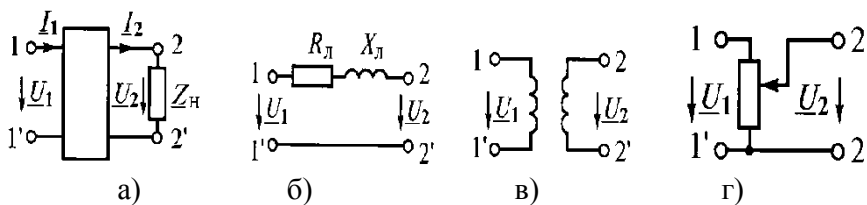
Кіргізілген активті кедергі әр уақытта нөлден көп. Бұндағы энергия бірінші тізбектен екінші тізбекке беріледі. Кіргізілген реактивті кедергі X_1 белгісіне қарсы болады. Сондықтан, екінші тізбектің индуктивті кедергісі бірінші тізбекке сыйымдылық түрінде беріледі (2.48-сурет). Сондықтан, кіргізілген кедергі, бірінші реттік орамаға тізбекті қосылған $R_1 X_1$ көрсетеді, жүктеменің трансформатордың екінші тізбегіне әсерін көрсетеді.

2.7 Төртұшты

2.7.1. Төртұшты түсінігі. Негізгі теңдеулер

Электр энергия генераторы мен қабылдағышы аралық тізбегімен қосылады, ол күрделі болуы мүмкін. Тұрақты және бір фазалы тоқтың аралық тізбегінде екі кірмелік және екі шықпа қысқыштары болады. Екі кірме және екі шықпа қысқышы бар, электр тізбегін төртұшты деп атайды. Электр энергиясының қорек көзі қосылған төртұшты қысқышты кірме деп атайды. Жүктеме қосылған қысқышты шықпа деп атайды.

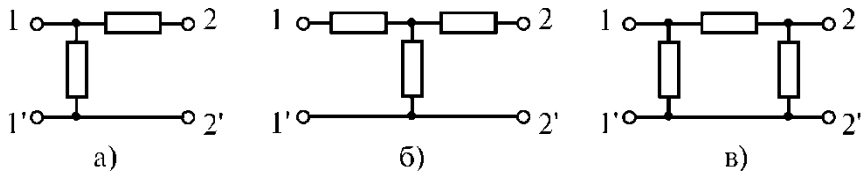
Графикалық түрде төртұшты, тік бұрыш ретінде көрсетіледі (2.49 а-сурет), екі кірме 1-1' және екі шықпа 2-2' қысқыштары бар. Төртұшты мен берілген энергия бағыты көрсетіледі. (2.49 б-сурет) трансформатор, (2.49 в-сурет) реттеуші резистор (2.49 г-сурет) түзеткіш құрылғы, электр сүзгі, күшейту және де басқа құрылғылар екі жұп қысқышы бар.



2.49-сурет

Төртұшты активті және пассивті болады. Егер де ішінде электр энергия қорек көзі болса төртұшты активті болады, егер де жоқ болса пассивті болады. Егер де төртұшты да сызықты элементтері болса, сызықты деп аталады, сызықты емес элементтері болса, сызықты емес төртұшты дейді.

Сызықты пассивті төртұштыны қарастырайық. Төртұштының ішкі элементтерінің қосылуына қарай Г-тәрізді (2.50 а-сурет) және Т-тәрізді (2.50 б-сурет), П-тәрізді (2.50 в-сурет) болады.



2.50-сурет

Төртұштыны, егер де энергия қорек көзін және қабылдағыштың орындарын ауыстырғанда симметриялы деп атайды, қорек көзі мен қабылдағыш тоқтары өзгермейді. Ал басқа жағдайда төртұшты симметриялы емес. Төртұшты теориясының мағынасы мынада: жинақты параметрларды қолдана отырып кірме және шықпадағы тоқ пен кернеуді табуға болады. Пассивті төртұшты кернеуі \underline{U}_1 мен тоғы \underline{I}_1 кірмеде кернеу \underline{U}_2 мен \underline{I}_2 тоғымен байланысты, ал шығысында (2.49 а-сурет) екі теңдеумен байланысты, төртұштының негізгі теңдеулері болады:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}\underline{I}_2; \quad (2.129)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2, \quad (2.130)$$

\underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} - төртұштының кешенді коэффициенттері. Олар сұлбаның ішкі байланысы мен төртұшты элементтерінің мінездемесіне бағынышты. Тұрақты төртұшты келесі байланысты көрсетеді:

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1. \quad (2.131)$$

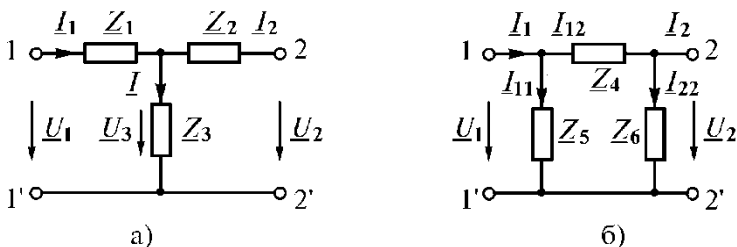
Төртұшты теңдеуі арқылы, оның жалпы қасиеттерін зерттеу жолын оңайлататын, әр түрлі алмастыру сұлбаларын салуға болады. Тәжірибеде Т және П тәрізді сұлбалар қолданылады.

2.7.2 Төртұштының Т-тәрізді алмастыру схемасы

Т-тәрізді алмастыру сұлбасында төртұшты тұрақтылығын анықтаймыз. (2.51 а-сурет) Кирхгофтың бірінші және екінші заңы бойынша:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 \underline{Z}_1 + \underline{U}_3 = \underline{I}_1 \underline{Z}_1 + \underline{I}_2 \underline{Z}_2 + \underline{U}_2; \quad (2.132)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{I}_2 + \frac{\underline{U}_3}{\underline{Z}_3} = \underline{I}_2 + \frac{\underline{I}_2 \underline{Z}_2 + \underline{U}_2}{\underline{Z}_3}. \quad (2.133)$$



2.51-сурет

(2.133), (2.132) ге салып, келесі теңдеуді табамыз:

$$\underline{U}_1 = \left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3}\right) \underline{U}_2 + \underline{I}_2 \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}\right) = \underline{A} \underline{U}_2 + \underline{B} \underline{I}_2,$$

Мұнда

$$\underline{A} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3}; \quad \underline{B} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}.$$

Қосындыларды 2.133 теңдеуге саламыз:

$$\underline{I}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_3} \underline{U}_2 + \underline{I}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}\right) = \underline{C} \underline{U}_2 + \underline{D} \underline{I}_2,$$

Мұнда $\underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_3}$; $\underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}$.

Сондықтан \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} коэффициенттер – төртұшты кешенді параметрлері. Коэффициент В-кедергі шамасы, С-өткізгіштілік шамасы, А мен Д мөлшерсіз. Егер де $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$ болса, $\underline{A} = \underline{D}$ бұл жағдайда, төртұшты симметриялы. Төртұшты белгілі коэффициентер арқылы, Т-тәрізді сұлба параметрлерін табуға болады:

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{A}-1}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_2 = \frac{\underline{D}-1}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_3 = \frac{1}{\underline{C}}$$

Осы теңдеулерден қорытынды шығаруға болады, егер де қоректендіруді кірме қысқыштан, шықпа қысқышқа ауыстырсақ, \underline{B} мен \underline{C} тұрақтылығы өзгермейді.

Ал \underline{A} мен \underline{D} тұрақтылығы теңдеуде орындарымен ауысады:

$$\underline{U}_2 = \underline{D}\underline{U}_1 + \underline{B}\underline{I}_1; \quad \underline{I}_2 = \underline{C}\underline{U}_1 + \underline{A}\underline{I}_1. \quad (2.134)$$

2.7.3. Төртұштының II-тәрізді алмастыру схемасы

II-тәрізді алмастыру сұлбасында төртұшты тұрақтылығын анықтаймыз. (2.51 б-сурет) сұлба параметрлері $\underline{Z}_4, \underline{Z}_5, \underline{Z}_6$ - белгілі дейміз. Кирхгофтың бірінші заңы бойынша

$$\underline{I}_{12} = \underline{I}_{22} + \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_6} + \underline{I}_2. \quad (2.135)$$

Кирхгофтың екінші заңы бойынша (2.135) ті есепке ала отырып, табамыз:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 = \underline{I}_{12}\underline{Z}_4 + \underline{U}_2 &= \left(\frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_6} + \underline{I}_2 \right) \underline{Z}_4 + \underline{U}_2 = \\ \underline{U}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_6} \right) + \underline{I}_2 \underline{Z}_4 &= \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}\underline{I}_2. \end{aligned} \quad (2.136)$$

$$\underline{A} = 1 + \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_6}; \quad \underline{B} = \underline{Z}_4$$

Төртұшты кірмесіндегі ток, Кирхгофтың бірінші заңы бойынша (2.136) теңдеуге қойғанда, мынадай:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 = \underline{I}_{11} + \underline{I}_{12} &= \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_5} + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_6} + \underline{I}_2 = \\ \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_5} \left(1 + \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_6} \right) + \underline{I}_2 \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_5} + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_6} + \underline{I}_2 &= \end{aligned}$$

$$= \underline{U} \left(\underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 + \frac{\underline{Z}_6}{\underline{Z}_5 \underline{Z}_6} \right) + \underline{I}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_5} \right) = \underline{C} \underline{U}_2 + \underline{D} \underline{I}_2.$$

$$\text{бұдан } \underline{C} = \frac{\underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6}{\underline{Z}_5 \underline{Z}_6}; \quad \underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_5}.$$

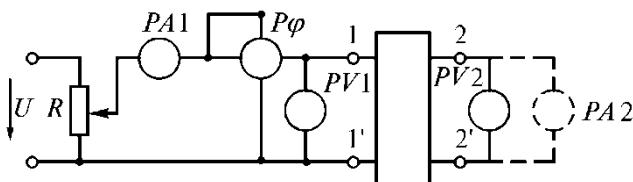
Егер де \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} – белгілі болса, П-тәрізді алмастыру сұлбасының параметрлерін табуға болады:

$$\underline{Z}_4 = \underline{B}; \quad \underline{Z}_5 = \frac{\underline{B}}{\underline{D} - 1}; \quad \underline{Z}_6 = \frac{\underline{B}}{\underline{A} - 1}. \quad \text{Егер де } \underline{Z}_5 = \underline{Z}_6$$

болса, төртұшты симметриялы $\underline{A} = \underline{D}$.

2.7.4. Төртұшты коэффициенттерін тәжірибелі түрде анықтау

Пассивті төртұшты кешенді коэффициенттерін тәжірибелі түрде анықтауға болады. Ол үшін төртұшты параметрлерін және элементтерінің қосылу сұлбасын білу керек емес. \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} коэффициенттерінің ең оңай формуласын, бос жүріс пен қысқа тұйықтану тәжірибесі арқылы табылады. Ол үшін (2.52-суреттегі) сұлбаны жасаймыз, әр тәжірибеде ток, кернеу және фаза бұрышының соғысуын анықтаймыз.



2.52-сурет

2.7.4.1 Бос жүріс тәжірибесі. Алдыңғы қысқыш жағынан коректенгенде

Төртұшты кірмесіндегі кернеуді, айнымалы резистор R арқылы реттеп, оның шықпасыдағы номиналды кернеуін $U_{2\text{ном}}$

аламыз. Құралдар көрсеткіші $U_{10}, I_{10}, \Phi_{10}$.. Бос жүріс режимінде қайталанған тоқ $\underline{I}_{20} = 0$, (2.129, 2.130) теңдеулері мынадай болады:

$$\underline{U}_{10} = \underline{AU}_{2'}; \quad \underline{I}_{10} = \underline{CU}_{2'},$$

бұдан кірме кедергісі:

$$\underline{Z}_{10} = \frac{\underline{U}_{10}}{\underline{I}_{10}} = \frac{U_{10}}{I_{10}} e^{j\varphi_{10}} = \frac{\underline{AU}_{2'}}{\underline{CU}_{2'}} = \frac{A}{C}. \quad (2.137)$$

2.7.4.2 Алдыңғы қысқыш жағынан қоректенгендегі қысқа тұйықталу тәжірибесі

Тәжірибені өткізу үшін екінші қысқышқа амперметр қосамыз, кірмеге шықпада номиналды $I_{1н}$ тоқ болатындай кернеу береміз. Құралдар көрсеткіші $U_{1k}, I_{1k}, \Phi_{1k}$. Қысқа тұйықталу режимінде $\underline{U}_{2k} = 0$, (2.129, 2.130) теңдеулер мынадай болады:

$$\underline{U}_{1k} = \underline{BI}_{1'}; \quad \underline{I}_{1k} = \underline{DI}_{2'},$$

Бұдан кірмедегі кедергі кешенді:

$$\underline{Z}_{1k} = \frac{\underline{U}_{1k}}{\underline{I}_{1k}} = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} e^{j\varphi_{1k}} = \frac{\underline{BI}_{2н}}{\underline{DI}_{2н}} = \frac{B}{D}. \quad (2.138)$$

2.7.4.3 Екінші қысқыштан қоректенгендегі бос жүріс тәжірибесі

2-2' қысқышты қорек көзіне қосамыз және кернеуін U_{20} жасаймыз, бірінші қысқыш кернеуі номиналды $U_{1н}$ болуы керек. Бұл кезде құрал көрсеткіші $U_{20}, I_{20}, \Phi_{20}$ болады. Бос жүріс режимінде $\underline{I}_{10} = 0$ негізгі теңдеу (2.134) екінші қосқыштан қоректенгенде мынадай болады:

$$\underline{U}_{20} = \underline{DU}_{1н}; \quad \underline{I}_{20} = \underline{CU}_{1н}.$$

Кіріс кедергі кешенді:

$$\underline{Z}_{20} = \frac{U_{20}}{I_{20}} = \frac{U_{20}}{I_{20}} e^{j\varphi_{20}} = \frac{DU_{1H}}{CU_{1H}} = \frac{D}{C}. \quad (2.139)$$

2.7.4.4 Екінші қысқыштан қоректенгендегі қысқа тұйықталу тәжірибесі

Теңдеу (2.134) егер де $\underline{U}_{1k} = 0$

$$\underline{U}_{2k} = \underline{B}I_{1k}; \quad \underline{I}_{2k} = \underline{A}I_{1k} \text{ -болса}$$

Кіріс кедергі:

$$\underline{Z}_{2k} = \frac{U_{2k}}{I_{2k}} = \frac{U_{2k}}{I_{2k}} e^{j\varphi_{2k}} = \frac{BI_{1H}}{AI_{1H}} = \frac{B}{A}. \quad (2.140)$$

(2.137.,2.140) теңдеулер бір-бірімен қатынасты байланысы бар

$$\frac{\underline{Z}_{1k}}{\underline{Z}_{10}} = \frac{\underline{Z}_{2k}}{\underline{Z}_{20}},$$

бұдан коэффициенттер \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} табылады. Сондықтан коэффициент арасындағы байланысы бар теңдеуді пайдаланамыз (2.131.). (2.131., 2.137...,1.140) теңдеулерді есептеп табамыз:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{10}}{\underline{Z}_{20} - \underline{Z}_{2k}}}; \quad \underline{B} = \underline{A}\underline{Z}_{2k}; \quad \underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{10}}; \quad \underline{D} = \underline{C}\underline{Z}_{20}. \quad (2.141)$$

\underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} коэффициенттерін табу үшін үш тәжірибе өткізу керек, егер де төртұшты симметриялы болса ($\underline{A} = \underline{D}$), екі тәжірибе өткізсе болады.

2.7.5. Төртұшты бос жүрісі мен қысқа тұйықталуы

(2.129, 2.130) теңдеулер мыналарды көрсетеді: \underline{U}_1 кернеуі мен \underline{I}_1 тоғы төртұшты кірмесінде екі қосындыдан тұрады, біреуі \underline{U}_2 кернеуге пропорционалды, екіншісі \underline{I}_2 токқа пропорционалды.

Төртұштының екі шамадағы жұмыс режимін қарастырайық: бос жүріс режимі және қысқа тұйықталу режимі. Бұл режимді

былай аламыз, бос жүрісте екінші қысқыштағы кернеу \underline{U}_2 жүктеме кернеуіне тең болу керек, ал қысқа тұйықталу кезінде қайталанған тоқ жүктеме \underline{I}_2 тоғына тең болу керек. Бос жүрісте ($\underline{I}_2=0$) және қысқа тұйықталуда ($\underline{U}_2=0$) негізгі тендеулер (2.129, 2.130) түрлері:

$$\underline{U}_{10} = \underline{A}\underline{U}_2; \quad \underline{U}_{1k} = \underline{B}\underline{I}_2; \quad \underline{I}_{10} = \underline{C}\underline{U}_2; \quad \underline{I}_{1k} = \underline{D}\underline{I}_2. \quad (2.142)$$

(2.142) және (2.129, 2.130) тендеулерді салыстырып қорытынды шығарамыз, Кернеу \underline{U}_1 мен тоқ \underline{I}_1 жүктеме кезінде, төртұштының бос жүріс пен қысқа тұйықталу режимінде, кернеу мен тоқ жиынына сәйкес тең болады:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}\underline{I}_2 = \underline{U}_{10} + \underline{U}_{1k}; \\ \underline{I}_1 &= \underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2 = \underline{I}_{10} + \underline{I}_{1k}. \end{aligned} \quad (2.143)$$

Осылайша, төртұшты кірмесіндегі кернеу мен тоқ бос жүріс және қысқа тұйықталу қорытындысы қосынды ретінде табуға болады.

Салу қағидатын пайдаланудың ерекше мәні бар, қуатты электротехникалық құрылғыларды сынауда, реттеуіші жүктеме тәжірибесін көп қуатты қорек көзін қажет ететін, бос жүріс және қысқа тұйықталу тәжірибесімен (аз қуатты) алмастыруға болады. Бұл тәсіл сынауда электр энергиясын үнемдеуге байланысты болатынын көрсетеді.

2.7.6. Кез келген жүктемедегі төртұшты кірме кедергісі

Төртұшты жұмыс режимін сипаттау үшін кірме кедергісі түсінігі қолданылады. Кірме кедергісі дегеніміз – кернеу \underline{U}_1 тоқ \underline{I}_1 қатынасы, шығар бетінде қорек көзінің қосылатын жері. Бірінші қысқыштан қоректенгендегі кірме кедергі:

$$\underline{Z}_{kip1} \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \frac{\underline{AU}_2 + \underline{BI}_2}{\underline{CU}_2 + \underline{DI}_2} = \frac{\underline{AZ}_H + \underline{B}}{\underline{CZ}_H + \underline{D}}, \quad (2.144)$$

$\underline{U}_2 = \underline{I}_2 \underline{Z}_H$ деп алынады.

Екінші қысқыштан қоректенгенде :

$$\underline{Z}_{kip2} \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} = \frac{\underline{DU}_1 + \underline{BI}_1}{\underline{CU}_1 + \underline{AI}_1} = \frac{\underline{DZ}_H + \underline{B}}{\underline{CZ}_H + \underline{A}}, \quad (2.145)$$

Төртұшты коэффициентін (2.144, 2.145) формулаға саламыз, бос жүріс кедергісі және қысқа тұйықталу (2.137...2.140) теңдеулер арқылы тәжірибеде жиі қолданатын формуланы табамыз:

$$\underline{Z}_{kip1} \frac{\underline{AZ}_H + \underline{B}}{\underline{CZ}_H + \underline{D}} = \frac{\underline{A} \left(\underline{Z}_H + \frac{\underline{B}}{\underline{A}} \right)}{\underline{C} \left(\underline{Z}_H + \frac{\underline{D}}{\underline{C}} \right)} = \underline{Z}_{10} \frac{\underline{Z}_H + \underline{Z}_{2k}}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_{20}},$$

$$\underline{Z}_{kip2} \frac{\underline{DZ}_H + \underline{B}}{\underline{CZ}_H + \underline{A}} = \frac{\underline{D} \left(\underline{Z}_H + \frac{\underline{B}}{\underline{D}} \right)}{\underline{C} \left(\underline{Z}_H + \frac{\underline{A}}{\underline{C}} \right)} = \underline{Z}_{20} \frac{\underline{Z}_H + \underline{Z}_{1k}}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_{10}},$$

Осылайша, теңдеулер төртұшты арқылы кедергіні өзгертуге болатынын көрсетеді. Төртұшты теориясы электроэнергетиканың негізгі проблемасын, төртұшты арқылы қорек көзінен қабылдағышқа энергияның берілуін қарастырады.

Бақылау сұрақтары

1. Қандай айнымалы токтарды және кернеулерді синусоидалық емес деп атайды?
2. Электр тізбектерінде синусоидалық токтар мен кернеулердің пайда болу себебі неден?

3. Синусоидалық емес тоқтар мен кернеулер электр тізбектерінің әртүрлі режимдерде пайда болуына тоқталыңыз?
4. Фурье қатарын жазыңыз, оған түсініктеме беріңіз.
5. Синусоидалық емес ток пен кернеудің тұрақты құраушысы деген не?
6. Бірінші және т.с.с. жоғары гармоника дегеніміз не?
7. A_0, B_{km} және C_{km} коэффициенттерін қалай есептейді?
8. Симметриялылығы бар периодтық қисықтардың қасиеттеріне тоқтаңыз.
9. Абсцисса өсінен салыстырғанда симметриялы болатын функцияға талдау жасап, соның негізінде, бұл функцияның тұрақты құраушысы және жұп гармоникасы болмайтынын дәлелденіз.
10. Координаттың өсуімен және координат бас нүктесімен салыстырғанда симметриялы болатын синусоидалық емес функцияларды қатарлардың өрнегі түрінде жазыңыз.
11. Тригонометриялық қатарлардың коэффициенттерін графоаналитикалық әдіспен анықтауға тоқталыңыз.
12. Синусоидалық емес керектендіру көздерінің тоқтары мен кернеулерін қалай есептеуге болады?
13. Синусоидалық емес э.к.к.-дегі және тоқтардағы резонанстық құбылыс қалай байқалады?
14. Айнымалы синусоидалық токтың әсерлік мәні деп нені айтады?
15. Синусоидалық токтың әсерлік мәнінің анықтамасына сүйеніп синусоидалық емес токтың әсерлік мәнінің анықтамасын тұжырымдаңыз.
16. Синусоидалық емес токтың және кернеудің әсерлік мәндерінің өрнегін жазып, оларға түсініктеме беріңіз.
17. Синусоидалық емес функцияның модулінің орташа мәні деген не?
18. Синусоидалық емес токтың орташа қуаты дегеніміз не?
19. Активтік қуат ұғымын қалай түсінесіз?
20. Қандай жүйенің құралдарының көмегімен синусоидалық емес токтың:
 - а) әсерлік мәнін; ә) модулі бойынша орташа мәнін; б) амплитудалық мәнін өлшеуге болады?

21. Неліктен кернеулернің реті үшеселі болатын гармоникалар фазалары бойынша үш фазалық көздің орамдарының барлық фазаларына сәйкес келеді?

22. Қандай гармоникалар нөлдік, тікелей және кері бірізділіктерді түзеді?

23. $U_{жс}/U_{ф} < 3$ қатыстың орындалу себебін түсіндіріңіз.

24. Неліктен синусоидалық емес кернеулері бар үш фазалық тізбектің фазаларындағы жүктеме симметриялық болған күннің өзінде бейтарап сымдағы тоқ неліктен нөлге тең болмайды?

25. Бейтарап сымсыз және симметриялық жүктемесі бар үш фазалық синусоидалық емес кернеулердің тізбегінің қабылдағышының бейтарап (нөлдік) нүктесінің көздің нөлдік нүктесімен салыстырғанда ығысуын түсіндіріңіз.

III ТАРАУ

3. Үш фазалы тізбектер

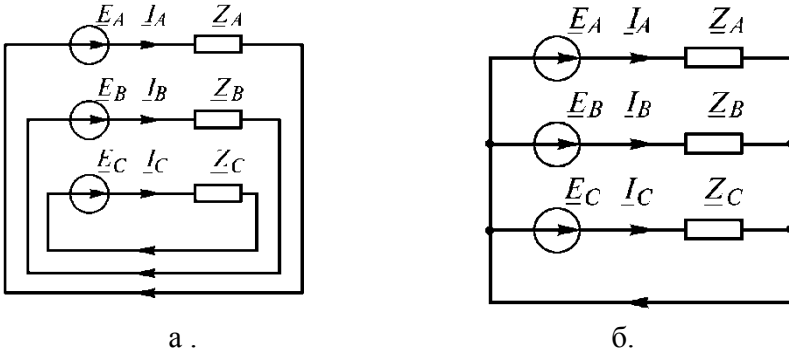
3.1. Жалпы мәлімет

Негізінде электр энергияның өндірілуі, жеткізілуі және пайдаланылуы, үш фазалы қорек көздері, тоқ жүретін жүйелер және **тоқ қабылдағыштар** арқылы болады. Бұл үш фазалы жүйенің бір фазалы жүйемен салыстырғандағы артықшылықтарына байланысты.

Айнымалы синусоидалды тоқ теориясы мен ортақтық болғанмен бір фазалы тоққа қарағанда, үш фазалы тоқтың есептеуі мен талдауы күрделі, себебі оларда бірнеше ЭҚК мен тоқтар бар. Сондықтан ЭҚК мен қабылдағыштардың схемаға қосу әдістерін еске алу қажет.

3.1.1. Үш фазалы жүйелер. Үш фазалы синхронды генератор

Үш фазалы электр тізбекті бір-бірінен $\frac{2\pi}{3}$ бұрышқа ығысқан, бірдей жиіліктері бар ЭҚК әрекет істейтін үш бір фазалы жиынтылғы деп білуге болады (3.1-сурет)



3.1-сурет

Үш қорек көздері бірдей жиілігі мен амплитудасы бар ЭҚК шығарады, олардың айырмашылығы бастапқы фазада. Сондықтан үш фазалы тізбектің құрама бөліктері фаза деп аталады. Демек, фаза терминдерінде екі мағына бар. Біріншіден,

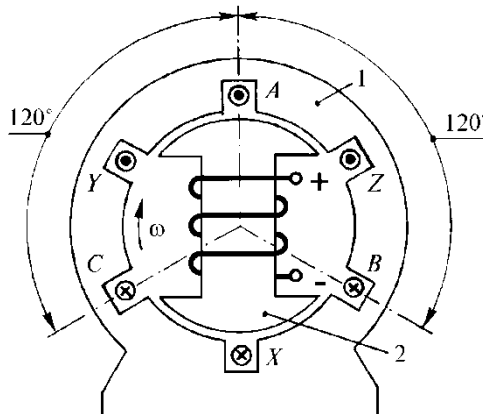
фаза деп синусоидалды тоқ, кернеу және ЭҚК аргументін атайды, екіншіден, үш фазалы тізбекте фаза деп үш фазалы жүйе бөлігін атайды, мысалы, А фазасында, E_A бұлақ ЭҚК-і және оған қосылған Z_A жүктемесі бар (3.1 а-сурет).

Егер де, үш фазалы жүйе жасайтын тізбек (3.1 а-сурет) тоқпен қосылмаса, оны байланыссыз деп атайды.

Тәжірибеде, үш фазалы байланысты тізбек қолданылады. (3.1 а-суреттегі) сулбада әр фазаның сымы бір функцияны атқарады ЭҚК мен жүктеме фазасының соңын қосады. Осылай, үш кері сымды біріктіруге жағдай туады.

Үш фазалы тізбекті байланысты жасайды (3.1 б-сурет). Байланысты үш фазалы тізбек, бір тармақталған тізбек болады. Үш фазалы тізбекті жасап шығарған, үздік орыс инженері, ғалым М. О. Доливо-Добровольский (1862-1919). 1891 жылы ол үш фазалы жүйенің барлық буынын жасап шығарды: генератор, трансформатор және қозғалтқыш.

Үш фазалы тізбектегі алғашқы электрэнергия қорек көзі үш фазалы синхронды генератор болады. Ол екі бөліктен тұрады: қозғалмайтын статор 1 және айналмалы ротор 2 (3.2-сурет). Ротор орамасы тұрақты тоқ бұлағынан көректенеді де, уақытына қарай өзгермейтін магнитті ағым жасайды, статор арқылы тұйықталатын. Статорда үш орама бар, бір-біріне қатысты 120° жылжыған (3.2-суретте) олар екі сым түрінде көрсетілген, қарама-қарсы фазада орналасқан. Орама басы мен аяғын А, В, С және X, Y, Z деп белгілейміз, ал ораманың өзін фаза деп атаймыз.



3.2-сурет

Электромагнитті индукция заңы бойынша осы орамаларда ЭҚК пайда болса, уақытына қарай үштен бірге жылжыған, яғни фаза бойынша 120° . Осы ЭҚК-ның лездік мағыналары $\frac{T}{3}$ периодқа:

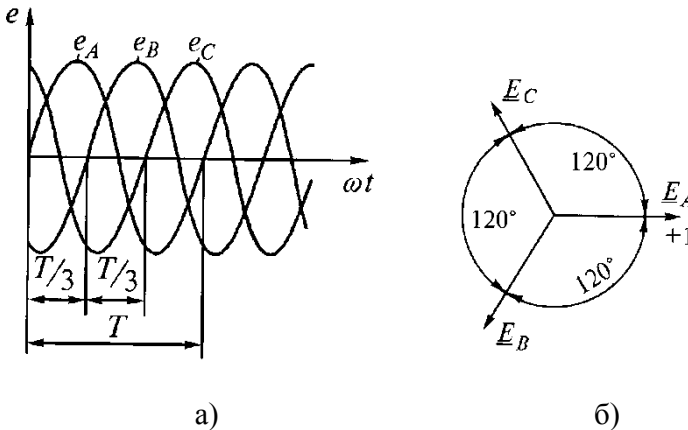
$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; & e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ). \end{aligned} \quad (3.1)$$

Негізінде, ЭҚК-ның бастапқы фазасы А-ны нөлге тең деп алады. ЭҚК уақытына байланысты графика және кешенді жазықтық түрінде көрсетуге болады (3.3 а, б-сурет).

ЭҚК кешендері:

$$\underline{E}_A = E; \quad \underline{E}_B = Ee^{-j120^\circ}; \quad \underline{E}_C = Ee^{-j240^\circ}. \quad (3.2)$$

Бір жиілікті синусоидалды ЭҚК жүйесі амплитудасы тең және фаза бойынша бір-біріне 120° бұрышқа жылжыған, ЭҚК үш фазалы симметриялы жүйесі деп аталады. ЭҚК-ның симметриялы болмау себебі: амплитуда мен фаза бұрышының 120° тең болмауы.



3.3-сурет

ЭҚК симметриялы үш фазалы жүйесінің негізгі қасиеті (3.1-сурет), қай уақытта болмасын, лездік мағнасының қосындысы нөлге тең:

$$e_A + e_B + e_C = 0. \quad (3.3)$$

(3.3 а-сурет) кестесінен лездік мағынасын көруге болады және оның теңдеуін көруге болады:

$$\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0 \quad (3.4)$$

(3.3 б-суреттегі) векторлы диаграммада берілген. (3.2) теңдеуді пайдаланып, оңай дәлелдеуге болады:

$$E_A + E_A e^{-j120^\circ} + E_A e^{-j240^\circ} = E_A \left(1 - 0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} - 0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 0$$

Пайда болған ЭҚК генератор фазасынан бірдей мағнада өтсе, **тізбектегі фаза** деп аталады. (3.2-суретте) көрсетілген ротор айналымының бағытынан, тізбектелген фаза А, В, С, табамыз. Ротор айналымының бағытын керісінше өзгертсе, тізбектелген фазалар да керісінше болады - С, В, А. Генератор роторы әр уақытта бір бағытта айналады, сондықтан тізбектелген фаза өзгермейді.

ЭҚК жиілігі, генератор полюсінің саны мен ротор айналымының жиілігіне байланысты:

$$f = \frac{pn}{60},$$

p - полюс саны

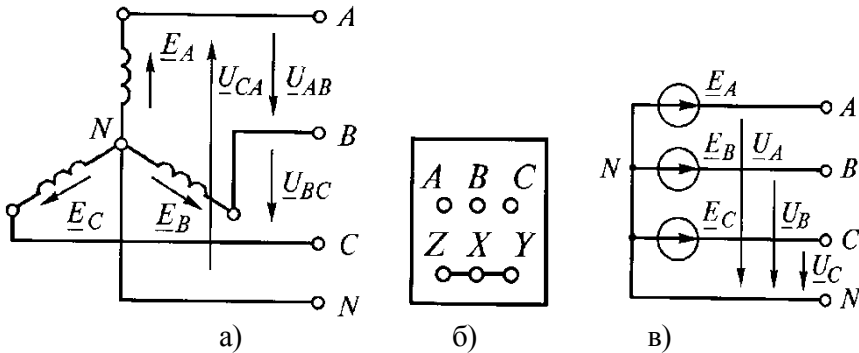
n - айналым жиілігі.

Ротордың конструктивті шешіміне қарай генератор айқын полюсті және айқын емес полюстіге бөлінеді.

3.1.2. Үш фазалы тізбекті қосу сұлбасы

Генератор, трансформатор, козғалтқыш пен қабылдағыш орамасының үш фазалы жүйеде, негізгі қосу сұлбасының екі түрі бар: жұлдызша және үшбұрышты. Егерде генератор орамасының соңын біріктіріп қоссақ, жұлдызша қосылады (3.4 а-сурет). Электр машинасының орама сандарын біріктіріп (3.4 б-сурет)

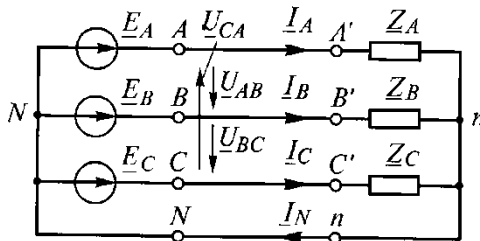
жалғастырып қосу керек. Орама фазасының негізгі нүктесі генератордың бейтарап нүктесі деп аталады және N деп белгіленеді. Генератор фазасын сұлбада 120° бұрышпен көрсетпей, жапсарлас түрде көрсетіледі (3.4 в-сурет).



3.4-сурет

Үш фазалы тізбекте жүктеме де жұлдызды түрде қосылады (3.5-сурет).

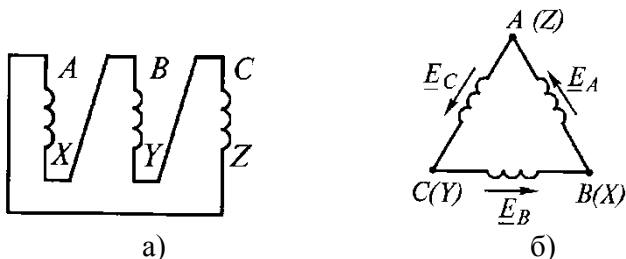
Қабылдағыш фазасы қосылуының негізгі нүктесі, қабылдағыш n бейтарап нүктесі болады. Генератор мен қабылдағыштың бейтарап нүктесін қосқан Nn сымы, бейтарап сым деп аталады.



3.5-сурет

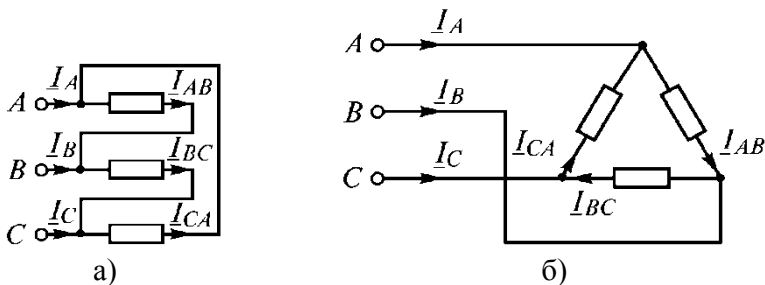
Генератормен қабылдағыш фаза басын қосқан AA' , BB' , CC' сымдары, сызықты деп аталады, ал басындағы тоқтар I_A , I_B , I_C сызықты тоқтар деп аталады. Сызықты сымдар U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} арасындағы кернеулер сызықты деп аталады (3.4 а-сурет).

Сызықты сымдағы тоқтың дұрыс бағыты, қорек көзінен жүктемеге жүрген бағыты, ал бейтарап сымда, керісінше жүктеме деп қорек көзіне жүрген бағыты болады (3.5-сурет). Фазаның басынан аяғына бағытталған тоқ фазалы тоқ деп аталады. Жұлдызды түрде қосылса – сызықты және фазалы тоқтар бірдей болады. Үш бұрышты қосу үшін, қорек көзінің фазалы орамасын тізбекті қосу керек (3.6 а, б-суретте).



3.6-сурет

Орама жабық тізбекті болса да, тоқ нөлге тең, себебі үш ЭҚК геометриялық қосындысы нөлге тең (3.4-сурет). Егерде бір фазаны керісінше қоссақ, жабық үшбұрышта тоқ тез өседі. Жүктеменің үшбұрышты қосылуы да теңдес. Пассивті жүктемеде басы мен аяғының қайталауының мәні болмайды (3.7-сурет). Фазаларды үшбұрышты қоссақ, фазалы кернеу сызықты кернеуге тең: $U_{\phi} = U_{\text{л}}$



3.7-сурет

Жүктеме фазасындағы \underline{I}_{AB} , \underline{I}_{BC} , \underline{I}_{CA} тоқтар фазалы тоқтар деп аталады (3.7-сурет). Фазалы және сызықты тоқтың бағыты (3.7-суретке) сәйкес алынады. Тәжірибеде генератор мен жүктеме орамасының түрлі қосылу комбинациясына кездесеміз.

Жұлдыз – үшбұрыш, үшбұрыш – жұлдыз, жұлдыз – жұлдыз, үшбұрыш-үш бұрыш. Сызықты және фазалы кернеу мен токтар ара қатынасы жұлдыз немесе үшбұрыш түрінде қосылған, үш фазалы тізбек жұмыс режимін қарастырып анықтауға болады. Үш фазалы тізбек жұмыс режимі симметриялы және симметриялы емес болады.

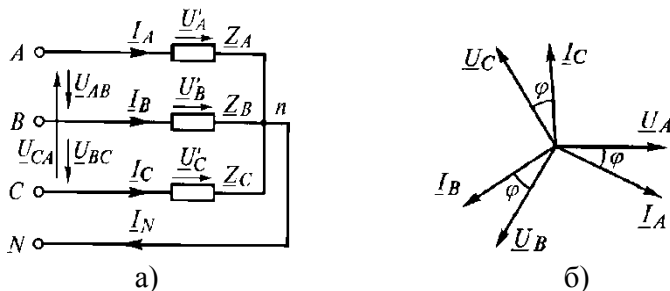
3.2. Үш фазалы тізбектің симметриялы жұмыс режимі

Үш фазалы тізбекті, егерде кешенді кедергі әр фазада болса симметриялы дейді. Үш фазалы тізбекті, егер де симметриялы тізбекке симметриялы кернеу жүйесі берілсе симметриялы дейді. Бұндай тізбекте симметриялы ток жүйесі жүреді.

3.2.1. Жүктемені жұлдыз түрінде қосқандағы симметриялық режимі

Симметриялық жүктеме жұлдыз түрінде қосылған (3.8 а-сурет).

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = Z e^{j\varphi}.$$



3.8-сурет

Жүктеме кедергісін индуктивті дейміз ($\varphi > 0$). Кернеу мен тоқтың векторлы диаграммасын жасаймыз. Фазалы кернеулер \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C симметриялы векторлар жүйесін құрастырады:

$$\underline{U}_A = \underline{U}'_A = U_\phi e^{-j240^\circ}; \quad \underline{U}_B = \underline{U}'_B = U_\phi e^{-j120^\circ};$$

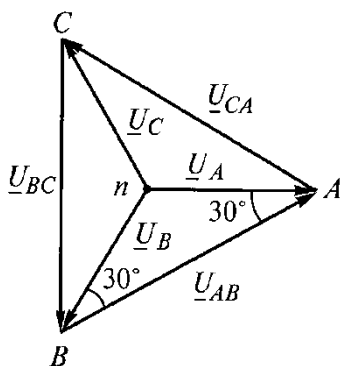
$$\underline{U}_C = \underline{U}'_C = U_\phi e^{-j240^\circ}.$$

Фазалы тоқтар фазалы кернеуден φ бұрышына қалық және симметриялы тоқ жүйесін құрайды. Кирхгофтың бірінші заңы бойынша (3.8-сурет) бейтарап сымдағы қосынды тоққа тең.

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$$

Модулі бірдей үш векторлар қосындысы бір-біріне қатысты 120° жылжыған нөлге тең, сондықтан $\underline{I}_N = 0$, яғни үш фазалы симметриялы жүйеде бейтарап сым керек емес. Кернеудің топографиялық диаграммасын саламыз. Нөлді әлеует нүктесіне N нүктесін аламыз. nA, nB, nC векторлары (3.9-сурет) фазалы кернеулер $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ сәйкес.

A, B, C, нүктелерді өз ара қосып, сызықты кернеу векторларын $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$ табамыз.



3.9-сурет

(3.9-сурет) диаграммасынан көруге болады, сызықты кернеулер өзара тең және бір-біріне қатысты 120° жылжыған. \underline{U}_{AB} векторы, B-нүктеде басталып A-нүктесінде аяқталады, яғни индекстің бірінші әрпі вектор санының нүктесін, екіншісі – бас нүктені көрсетеді. Векторлар \underline{U}_{BC} пен \underline{U}_{CA} сәйкес. Сызықты және фазалы кернеулер арасында қатынас жасаймыз. (3.9-суреттегі) топографиялық диаграммдан табамыз:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A,\end{aligned}\quad (3.5)$$

Яғни, сызықты кернеу векторлары фазалы кернеу векторлар айырмашылығына тең:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B = U_{\phi} - U_{\phi} e^{-j120^{\circ}} = U_{\phi} \left(1 - e^{-j120^{\circ}}\right) = \\ &= U_{\phi} \left(1 + 0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = U_{\phi} \left(1,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \sqrt{3} U_{\phi} e^{j30^{\circ}}.\end{aligned}\quad (3.6)$$

Ұқсасты:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{BC} &= \sqrt{3} \underline{U}_B e^{j30^{\circ}} = \sqrt{3} U_{\phi} e^{-j90^{\circ}}; \\ \underline{U}_{CA} &= \sqrt{3} \underline{U}_C e^{j30^{\circ}} = \sqrt{3} U_{\phi} e^{-j210^{\circ}}.\end{aligned}$$

Сонымен, сызықты кернеулер симметриялы режімдегі $\sqrt{3}$ есе фазалыдан көп. (3.6 теңдеуден)

\underline{U}_{AB} кернеу \underline{U}_A кернеуден 30° бұрышқа озады.

(3.9-суреттегі) векторлы диаграммадан да көруге болады.

Сызықты кернеудің векторлар қосындысы нөлге тең:

$$\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA} = 0 \quad (3.7)$$

Әр уақытта тұйықталған үшбұрыш жасайды (3.9-сурет). Есте сақтау керек, Жұлдыз түрде қосылғанда: $I_{\phi} = I_L; U_L = \sqrt{3} U_{\phi}$

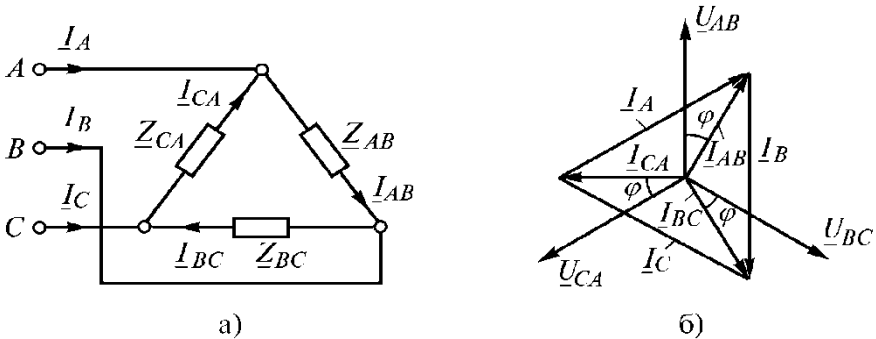
Біздің елде төменгі кернеу тізбегі (1000В дейін), келесі номиналды кернеуге есептелген: $U_L = 220 \text{ В}; U_{\phi} = 127 \text{ В};$

$$U_L = 380 \text{ В}; U_{\phi} = 220 \text{ В};$$

3.2.2. Жүктемені үш бұрышты қосқандағы симметриялық режімі

Жүктемені үш бұрышты қосқанда (3.10-сурет) симметриялық режім $\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA} = \underline{Z} e^{j\varphi}$ мына жағдайда болады.

Сызықты кернеулер \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} , \underline{U}_{CA} симметриялы, симметриялы жұлдыз жасайды. Кернеулер векторы диаграммасы (3.10 а-сурет)



3.10-сурет

Фазалы тоқ жүйесінде симметриялы болады:

$$\underline{I}_{AB} + \underline{I}_{BC} + \underline{I}_{CA} = 0$$

Кирхгофтың бірінші заңы бойынша үшбұрыш төбесіне сызықты тоқ жазамыз.

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA}$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}$$

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$$

Сонымен, сызықты тоқтар симметриялы векторлар жүйесін жасайды (3.10 б-сурет) векторлар диаграммасында фазалы тоқтар, фазалы кернеуден φ бұрышына қалық, жүктеме индуктивті десек ($\varphi > 0$) болады. Үш векторлар тұйықталған жүйесі сызықты тоқ береді. \underline{I}_A -сызықты тоқ векторы, \underline{I}_{CA} векторының аяғынан басталады, \underline{I}_{AB} векторының аяғында бітеді.

\underline{I}_A сызықты тоқ векторын фазалы тоқтар арқылы көрсетеміз:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA} = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{AB} e^{-j240^\circ} = \\ \underline{I}_{AB} \left(1 - e^{-j240^\circ} \right) = \sqrt{3} \underline{I}_{AB} e^{-j30^\circ}.$$

Сонымен, сызықты тоқ симметриялы жүктеме үшін $\sqrt{3}$ есе фазалы тоқтан көп. Үш бұрышты қосқанда

$$U_\phi = U_{\text{л}}; \quad I_\phi = \sqrt{3} I_{\text{л}}.$$

3.2.3. Симметриялы үш фазалы жүйе қуаты

Бұрын көрсетілген, синусоидалды тоқ тізбегінің лездік қуаты уақытына қарай айнаымалы. Уақытқа байланысты нақты теңдеуі:

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \sin(\omega t - \varphi) = \\ UI (\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)) \quad (3.8)$$

Бұнда, екі есе жиілікпен өзгереді. Симметриялы режимдегі үш фазалы тізбектің лездік қуатының қосындысын анықтаймыз. Ол үшін фазалы тізбектің лездік қуаттарын жазамыз.

$$p_A = u_A i_A = U_\phi \sqrt{2} \sin \omega t I_\phi \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) = \\ U_\phi I_\phi (\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)); \quad (3.9)$$

$$p_B = u_B i_B = U_\phi \sqrt{2} \sin(\omega t - 120^\circ) I_\phi \sqrt{2} \sin(\omega t - 120^\circ - \varphi) = \\ = U_\phi I_\phi (\cos \varphi - \cos(2\omega t - 240^\circ - \varphi)); \quad (3.10)$$

$$p_C = u_C i_C = U_\phi \sqrt{2} \sin(\omega t - 240^\circ) I_\phi \sqrt{2} \sin(\omega t - 240^\circ - \varphi) = \\ = U_\phi I_\phi (\cos \varphi - \cos(2\omega t - 480^\circ - \varphi)). \quad (3.11)$$

Лездік қуат қосындысы:

$$p = p_A + p_B + p_C = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi \quad (3.12)$$

Симметриялы үш фазалы жүйе құралғандықтан (3.9....3.11) формулалардағы екінші қосындысы нөлге тең.

Сонымен, симметриялы үш фазалы тізбектің лездік қуаты (3.12) уақытқа байланысты емес, ол тізбектің активті қуатына тең. Үш фазалы тізбектің бұл ерекшелігі, кез келген уақытта генератор жүктемесі өзгермейді және қозғалтқыш, т.б. кез келген уақытта бірдей жүктеледі.

Үш фазалы тізбек барлық кезеңде лездік қуаты өзгермесе бір қалыпты деп аталады. Симметриялы емес үш фазалы тізбек бір қалыпты болмайды, себебі лездік қуаттың ауыспалы құрамасы бар. Екі есе жиілікпен өзгертетін (3.9....3.11) теңдеулердің екінші қосындысының сомасы нөлге тең емес.

Сонымен, үш фазалы тізбектің активті қуаты, қабылдағыштардың активті қуатының қосындысына тең, яғни фазалар активті қуатының сомасына:

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos\varphi \quad (3.13)$$

Үш фазалы тізбекті есептегенде, сызықты кернеу мен тоқты пайдаланған дұрыс. Жұлдыз түрінде қосылса:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}; \quad I_{\phi} = I_{\text{л}}$$

$$\text{Үш бұрышты қосқанда: } U_{\phi} = U_{\text{л}}; \quad I_{\phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}},$$

Симметриялы үш фазалы тізбектің активті қуаты

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos\varphi. \quad (3.14)$$

Симметриялы үш фазалы тізбектің реактивті және толық қуаттар анықталады:

$$Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin\varphi; \quad S = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}}. \quad (3.15)$$

φ - фазалы кернеу мен тоқ арасындағы фаза бұрышының ығысуы.

3.2.4 Күрделі үш фазалы тізбектің симметриялы режимін есептеу

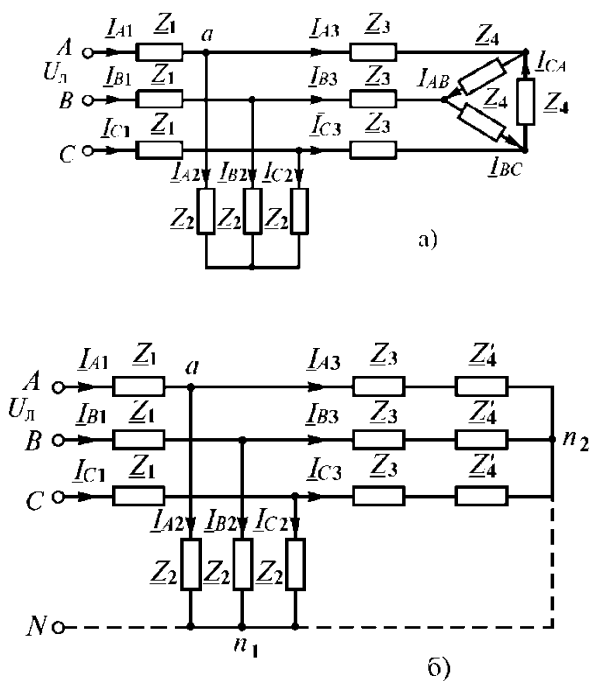
Симметриялы үш фазалы тізбекте тоқтар модуліне қарай бірдей және 120° жылжыған, бір фазадағы тоқты анықтауға болды, соған қарап басқа фазалар тоқтары табылады. Есептеу тәртібін сұлбада 3.11 а-суреттен қарайық.

Тізбек кернеуі және \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , \underline{Z}_3 , \underline{Z}_4 параметрлер белгілі. Тоқтарды табу керек.

1. Берілген сұлбада сызықты және фазалы тоқтардың дұрыс бағыттарын көрсетеміз.

2. \underline{Z}_4 кедергі үшбұрышты эквивалентті жұлдызшаға ауыстырамыз: $\underline{Z}'_4 = \frac{\underline{Z}_4}{3}$. Жаңа сұлба пайда болады

(3.11 б-сурет)



3.11-сурет

3. Сұлбаға бейтарап сым қосамыз. Бейтарап нүктелердің n_1 , n_2 , N әлеуеттері бірдей болғандықтан, бейтарап сым тізбектегі токтың таралуын өзгертпейді.

4. Бір фазаны қарастырайық, мысалы А (3.11 а-сурет) ток бұнда, үш фазалы сұлбадағыдай себебі, элементтегі кернеулер өзгермейді.

5. Фаза А-дағы токты түрлендіру әдісімен есептейміз.

$$\text{Жалпы кедергі } \underline{Z} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2(\underline{Z}_3 + \underline{Z}'_4)}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}'_4}$$

Қорек көзі А фазасының кернеуі

$$U_A = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$$

А фазасының кешенді сызықты тоқтары

$$\underline{I}_{A1} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}}; \quad \underline{I}_{A2} = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_2}; \quad \underline{I}_{A3} = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}'_4},$$

$$\text{Мұнда } \underline{U}_a = \underline{I}_{A1} \frac{\underline{Z}_2(\underline{Z}_3 + \underline{Z}'_4)}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}'_4};$$

6. Басқа фазадағы тоқтар 120° өзгереді.

Мысалы: $\underline{I}_{B1} = \underline{I}_{A1}e^{-j120^\circ}$; $\underline{I}_{C1} = \underline{I}_{A1}e^{-j240^\circ}$ т.б.

үш бұрышты қосылған \underline{Z}_4 жүктеме тоқтары (3.11 а-сурет):

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{I}_{A3}}{\sqrt{3}}e^{-j30^\circ}; \quad \underline{I}_{BC} = \underline{I}_{AB}e^{-j120^\circ}; \quad \underline{I}_{CA} = \underline{I}_{AB}e^{-j240^\circ}.$$

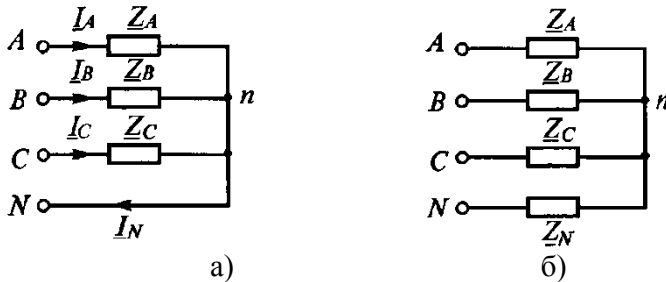
3.3 Үш фазалы тізбектің симметриялы емес режимін есептеу

Үш фазалы тізбектің симметриясы болмауының әртүрлі себептері бар: фазалар кедергісінің бірдей болмауы (симметриялы емес жүктеме) фазалы ЭҚК-ның тең болмауы, симметриялы емес қысқа тұйықталу (мысалы, екі фаза арасында) фазалардың үзілуінен, т.б.

Үш фазалы тізбектегі тоқ пен кернеу есебі симметриялы емес режимде, бір фазалы тізбек есебінің әдісімен жасауға болады. Симметриялы емес режимінің жүктеме өзгермейтін нақты мысалын қарастырайық.

3.3.1. Жұлдыз түрінде бейтарап сыммен қосу

(3.12 а-суретте) симметриялы емес жүктеме, бейтарап сыммен жұлдыз түрінде қосылған ($Z_N=0$), симметриялы фазалы кернеу жүйесінен қоректенеді.



3.12-сурет

Бейтарап сым кедергісіз болса, әр фазаны бөлек есептеуге болады. Бейтарап сым бар жүйенің ерекшелігі әр жүктеме фазаларын кедергісіз бір-біріне тәуелсіз есептелінуі. Бастапқы фазаны А-дейміз:

$$\underline{U}_A = U_\phi; \quad \underline{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ}; \quad \underline{U}_C = U_\phi e^{-j240^\circ}.$$

Қабылдағыш фазасындағы тоқтар:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_A}; \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_B}; \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_C}. \quad (3.16)$$

Бейтарап сымдағы тоқ,

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C. \quad (3.17)$$

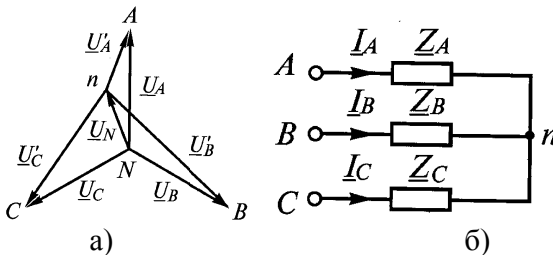
Сонымен, бейтарап сым фазасы кернеулерін симметриясын лездік қамтамасыздандырады. Сондықтан, бір фазалы

тұтынушыларды (жарықтың, тұрмыстың жүктеме, т.б.) төртсымды тізбекке қосады. Бейтарап сым кедергісін есепке алғанда (3.12 б-сурет) бейтарап ортақ нүктедегі кернеуде ығысу пайда болады $\underline{U}_N = \underline{I}_N \underline{Z}_N$, ол екі түйін әдісімен анықталады:

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}, \quad (3.18)$$

Мұнда $\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}$; $\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}$; $\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}$; $\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}$ фазалар мен бейтарап сымның кешенді өткізгіштіктері.

(3.13 а-суреттегі) векторлы диаграммада, бейтарап сым ортақ нүктесінің ығысуы, яғни бейтарап нүктелер N мен n арасындағы кернеу қабылдағыш бейтарап нүктесінің әлеуетінің генератор бейтарап нүктесіне қатысты жылжуын көрсетеді. Неғұрлым ортақ бейтарап нүкте (нейтралі) көп жылжыса, соғұрлым фазалы кернеу асимметриясы көбейеді.



3.13-сурет

Қабылдағыш фазаларындағы кернеу:

$$\underline{U}'_A = \underline{U}_A - \underline{U}_N; \quad \underline{U}'_B = \underline{U}_B - \underline{U}_N; \quad \underline{U}'_C = \underline{U}_C - \underline{U}_N. \quad (3.19)$$

Ом заңы бойынша тараудағы тоқтар:

$$\underline{I}_A = \underline{U}'_A \underline{Y}_A; \quad \underline{I}_B = \underline{U}'_B \underline{Y}_B; \quad \underline{I}_C = \underline{U}'_C \underline{Y}_C; \\ \underline{I}_N = \underline{U}'_N \underline{Y}_N. \quad (3.20)$$

Симметриялы жүктемеде

$$\underline{U}_N = 0; \quad \underline{I}_N = 0.$$

3.3.2. Бейтарап сымсыз жұлдыз түрінде қосу

(3.13 б-сурет) сұлба есебін (3.12 б-сурет) сұлбасы түрінде жасауға болады, өткізгіштігін $\underline{Y}_N = 0$ -ге деп алу керек. Бұл кезде бейтарап ортақ нүкте

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}. \quad (3.21)$$

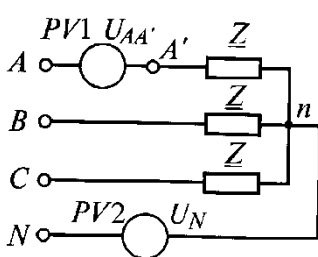
Басқалардың есептеу тәртібі (3.19, 3.20) теңдеулерге тектес.

Егер де, берілген сызықты кернеулер \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} мен \underline{U}_{CA} және жүктеме қысқышында жұлдыз түрінде қосылса (3.13 б-сурет), жүктеме фазасындағы кернеу келесі формуламен анықталады:

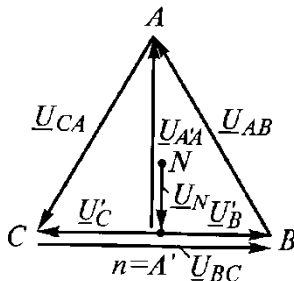
$$\begin{aligned} \underline{U}'_A = \underline{U}_A - \underline{U}_N = \underline{U}_A - \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = \\ \frac{\underline{Y}_B \underline{U}_{AB} - \underline{Y}_C \underline{U}_{CA}}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Басқа фазалар кернеуі де осылайша табылады:

$$\begin{aligned} \underline{U}'_B &= \frac{\underline{Y}_C \underline{U}_{BC} - \underline{Y}_A \underline{U}_{AB}}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; \\ \underline{U}'_C &= \frac{\underline{Y}_A \underline{U}_{CA} - \underline{Y}_B \underline{U}_{BC}}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}. \end{aligned} \quad (3.23)$$



а)



б)

3.14-сурет

(3.20) фазалы кернеу арқылы тоқты табу қиын емес. Негізінде, сызықты кернеудің нақты мағынасы беріледі, есептеу үшін комплекстері керек. Бұл жағдайда, сызықты кернеу үш бұрышын, кешенді жазықтықта (3.14-сурет), \underline{U}_{AB} кернеудің затты санды осіне бағыттап салу керек. Бұл кезде, сызықты кернеудің кешенді формасының түрі мынадай:

$$\underline{U}_{AB} = U_{AB}; \quad \underline{U}_{BC} = U_{BC}e^{-j\alpha_1}; \quad \underline{U}_{CA} = U_{CA}e^{j\alpha_2}$$

3.3.3 Жүктемені үшбұрышты қосу

Симметриялы емес жүктемедегі үшбұрышты қосылған фазалы токтар ($\underline{Z}_{AB} \neq \underline{Z}_{BC} \neq \underline{Z}_{CA}$) (3.10-суретте), Ом заңы бойынша анықтайды:

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}; \quad \underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}; \quad \underline{I}_{CA} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}. \quad (3.24)$$

Бұл сұлбада, үш бұрыштағы фазалы токтардың дұрыс бағыттары А дан В-ға, В дан С-қа және С дан А-ға, әріптердің индекстегі тәртібін көруге болады: \underline{I}_{AB} , \underline{I}_{BC} , \underline{I}_{CA} .

Сызықты токтар, Кирхгофтың бірінші заңы арқылы табылады:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}. \quad (3.25)$$

Есепті тексеру: $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$.

Фазалардың біркелкі жүктемесінде сызықты токтар модулі $\sqrt{3}$ есе фазалыдан көп. Симметриялы емес жүктемеде бұл қатынас орындалмайды.

3.3.4 Симметриялы емес үш фазалы жүйелер қуаты

Симметриялы емес жүктемеде фазалар қуаты бірдей болмайды, сондықтан симметриялы емес төртсымды тізбектің

кешенді қуаты фазалар кешенді қуатының қосындысы ретінде анықталады:

$$\underline{S} = \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C = \underline{U}_A \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \underline{I}_C^*. \quad (3.26)$$

Бұнда активті қуат

$$P = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C = P_A + P_B + P_C. \quad (3.27)$$

Активті қуат фазалар активті қуатының қосындысына тең.

Реактивті қуат осыған сәйкес фазалардың реактивті қуатының қосындысына тең:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C. \quad (3.28)$$

Егерде жүктеме үшбұрышты қосылса:

$$\underline{S} = \underline{S}_{AB} + \underline{S}_{BC} + \underline{S}_{CA} = \underline{U}_{AB} \underline{I}_{AB}^* + \underline{U}_{BC} \underline{I}_{BC}^* + \underline{U}_{CA} \underline{I}_{CA}^* \quad (3.29)$$

$$P = U_{AB} I_{AB} \cos \varphi_{AB} + U_{BC} I_{BC} \cos \varphi_{BC} + U_{CA} I_{CA} \cos \varphi_{CA} = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}; \quad (3.30)$$

$$Q = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA} = U_{AB} I_{AB} \sin \varphi_{AB} + U_{BC} I_{BC} \sin \varphi_{BC} + U_{CA} I_{CA} \sin \varphi_{CA}; \quad (3.31)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.32)$$

3.4 Тармақталған үш фазалы тізбек. Өзгерту және есептеу

Әр түрлі сұлбамен қосылған, бірнеше қабылдағышы бар күрделі тізбекті және үшбұрышты қосылған қабылдағышы бар тізбекті есептеуде кернеу сызығын есепке алып, өзгерту сұлбасын қолдануға мәжбүр боламыз, яғни, үшбұрышты эквивалентті жұлдызбен немесе керісінше:

$$\underline{Z}_A = \frac{\underline{Z}_{AB} \cdot \underline{Z}_{CA}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}}; \quad \underline{Z}_B = \frac{\underline{Z}_{AB} \cdot \underline{Z}_{BC}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}}; \\ \underline{Z}_C = \frac{\underline{Z}_{BC} \cdot \underline{Z}_{CA}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}}. \quad (3.33)$$

Симметриялы жүктемеде:

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA} = \underline{Z}_{\Delta}; \quad \underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}_Y; \quad \underline{Z}_Y = \frac{\underline{Z}_{\Delta}}{3}.$$

Жұлдызды эквивалентті үшбұрышқа келесі формула бойынша өзгертеміз:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{AB} &= \underline{Z}_A + \underline{Z}_B + \frac{\underline{Z}_A \cdot \underline{Z}_B}{\underline{Z}_C}; \quad \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_B + \underline{Z}_C + \frac{\underline{Z}_B \cdot \underline{Z}_C}{\underline{Z}_A}; \\ \underline{Z}_{CA} &= \underline{Z}_C + \underline{Z}_A + \frac{\underline{Z}_C \cdot \underline{Z}_A}{\underline{Z}_B}. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Симметриялы жүктемеде $\underline{Z}_{\Delta} = 3\underline{Z}_Y$ бірнеше нақты сұлбада тармақталған тізбек есебін қарастырайық.

3.4.1. Бірнеше қабылдағышы бар жұлдызша түрінде қосылған үш фазалы тізбек

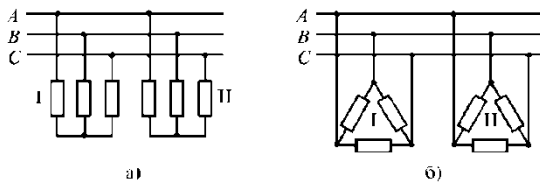
Егерде екі немесе бірнеше қабылдағыш жұлдызша түрінде қосылса, симметриялы сызықты кернеу жүйесінде, қабылдағыштардың фазалы кернеуі симметриялы болмайды, сондықтан қабылдағыштардың бір атты фазаларын қатар жалғасты деуге және фазалар өткізгіштілігін қосуға болмайды.

Өзгерту тәртібі.

1. (3.15 а-суреттегі) жұлдызша эквивалентті, (3.34) формуласын қолданып үш бұрышқа өзгерту (3.15 б-сурет).

2. Эквивалентті үшбұрыштардың аттас фазалары бірдей кернеуге қосылғандықтан, оларды қатар қосылған дейміз, олардың өткізгіштілігін қосып, бір эквивалентті үшбұрыш табамыз.

3. Эквивалентті үшбұрышты эквивалентті жұлдызға өзгерту. Қорытындысында, бірнеше симметриялы емес жұлдыз сұлбасы, бір симметриялы емес жұлдыз сұлбасына өзгереді, есебі жоғарыда берілген.



3.15-сурет

3.4.2 Симметриялы емес жұлдызша және үшбұрышты қосылған қабылдағышы бар үш фазалы тізбек

Бұрынғы қаралған симметриялы үш фазалы тізбектен берілген сұлбада (3.16 а-сурет) симметриялы емес жүктемелер бар:

$$\underline{Z}_{A2} \neq \underline{Z}_{B2} \neq \underline{Z}_{C2}; \underline{Z}_{AB} \neq \underline{Z}_{BC} \neq \underline{Z}_{CA}.$$

Өзгертуді және есептеуді келесі түрде істеуге болады:

1. Үшбұрышты кедергілерді эквивалентті жұлдызға және жұлдыздың кедергі сәулесін \underline{Z}_3 желі кедергісіне өзгерту.

A_1, B_1, C_1 , нүктелеріне қосылған (3.16 б-сурет) екі жұлдызша пайда болады ,

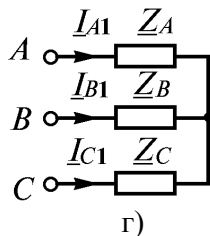
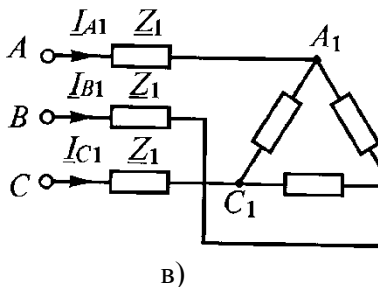
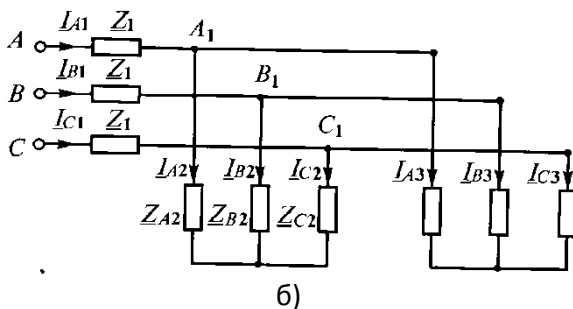
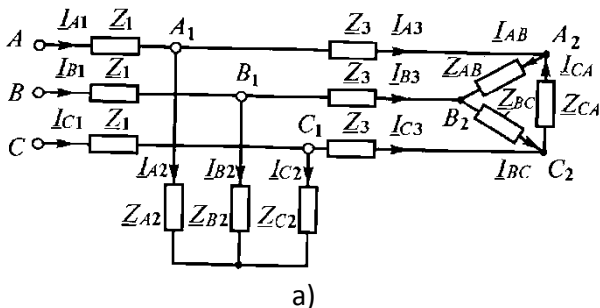
2. Әр жұлдызды эквивалентті үшбұрышқа өзгерту және аттас тараулар өткізгіштерін қосу. Бір эквивалентті үш бұрыш табамыз (3.16 а-сурет) .

3. Эквивалентті үшбұрышты эквивалентті жұлдызшаға өзгерту және жұлдызша кедергілернің сәулесін \underline{Z}_1 , бағытының кедергісімен қосу (3.16 г-суреті)

4. A_1, B_1, C_1 қысқыштардағы, фазалы және сызықты кернеулерді анықтау: $\underline{U}_{A1} = \underline{U}_A - \underline{I}_{A1} \underline{Z}_1$; $\underline{U}_{B1} = \underline{U}_B - \underline{I}_{B1} \underline{Z}_1$; $\underline{U}_{C1} = \underline{U}_C - \underline{I}_{C1} \underline{Z}_1$; $\underline{U}_{A1B1} = \underline{U}_{A1} - \underline{U}_{B1}$; $\underline{U}_{B1C1} = \underline{U}_{B1} - \underline{U}_{C1}$; $\underline{U}_{C1A1} = \underline{U}_{C1} - \underline{U}_{A1}$.

5. Екі жұлдыздағы (3.16 б-сурет) 3-нші пунктке сәйкес тоқтарды анықтау. Қорытындысында бастапқы жұлдыздың \underline{I}_{A2} , \underline{I}_{B2} , \underline{I}_{C2} тоқтарды табамыз және \underline{I}_{A3} , \underline{I}_{B3} , \underline{I}_{C3} , тоқтардағы берілген үшбұрыштың сызықты тоғына тең. Үшбұрыштың сызықты тоқтарын Кирхгофтың бірінші заңымен де табуға болады:

$$\underline{I}_{A3} = \underline{I}_{A1} - \underline{I}_{A2}; \underline{I}_{B3} = \underline{I}_{B1} - \underline{I}_{B2}; \underline{I}_{C3} = \underline{I}_{C1} - \underline{I}_{C2}.$$



3.16-сурет

Бейтарап сымсыз симметриялы емес жұлдыз болды. Жұлдыз фазасындағы кернеулер:

$$\underline{U}'_A = \underline{U}_A - \underline{U}_N; \quad \underline{U}'_B = \underline{U}_B - \underline{U}_N; \quad \underline{U}'_C = \underline{U}_C - \underline{U}_N$$

$$\text{Бұл жерде } \underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}$$

Жүйе басындағы тоқтар:

$$\underline{I}_{A1} = (\underline{U}'_A - \underline{U}_N) \underline{Y}_A; \quad \underline{I}_{B1} = (\underline{U}'_B - \underline{U}_N) \underline{Y}_B;$$

$$\underline{I}_{C1} = (\underline{U}'_C - \underline{U}_N) \underline{Y}_C$$

Егерде қабылдағыш тоқтарын табу керек болса, есеп жалғасады.

6. A_2, B_2, C_2 -қысқыштағы, фазалы және сызықты кернеуді анықтау (3.16 а-сурет):

$$\underline{U}_{A2} = \underline{U}_{A1} - \underline{I}_{A3} \underline{Z}_3; \quad \underline{U}_{B2} = \underline{U}_{B1} - \underline{I}_{B3} \underline{Z}_3;$$

$$\underline{U}_{C2} = \underline{U}_{C1} - \underline{I}_{C3} \underline{Z}_3;$$

$$\underline{U}_{A2B2} = \underline{U}_{A2} - \underline{U}_{B2}; \quad \underline{U}_{B2C2} = \underline{U}_{B2} - \underline{U}_{C2};$$

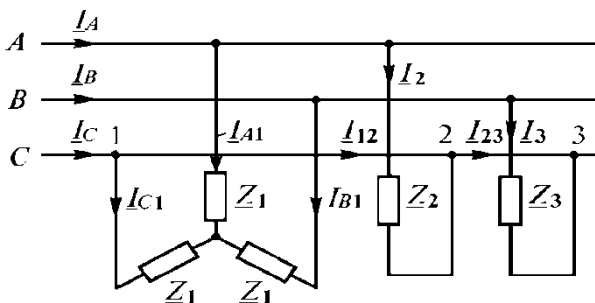
$$\underline{U}_{C2A2} = \underline{U}_{C2} - \underline{U}_{A2}.$$

7. Үшбұрыштағы тоқты анықтау:

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{A2B2}}{\underline{Z}_{AB}}; \quad \underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{B2C2}}{\underline{Z}_{BC}}; \quad \underline{I}_{CA} = \frac{\underline{U}_{C2A2}}{\underline{Z}_{CA}}.$$

3.4.3. Бір фазалы және үш фазалы қабылдағыштары бар үш фазалы тізбек

(3.17) суреттегі үш фазалы үш сымды тізбекте симметриялы қабылдағыш бар, мысалы, ол Z_1 фаза кедергісі және екі бір фазалы қабылдағыш кернеулері Z_2 мен Z_3 бар электроқозғалтқыш.



3.17-сурет

Осы тізбектің есептеу тәртібі:

1. Тоқтардың бағытын таңдау.
2. Бастапқы фазаны А-деп, фазалы және сызықты кернеуді кешенді түрінде жазу керек.

$$\underline{U}_A = U_\phi; \quad \underline{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ}; \quad \underline{U}_C = U_\phi e^{j120^\circ}.$$

$$\underline{U}_{AB} = \sqrt{3} U_\phi e^{j30^\circ}; \quad \underline{U}_{BC} = \sqrt{3} U_\phi e^{-j90^\circ}; \quad \underline{U}_{CA} = \sqrt{3} U_\phi e^{j150^\circ}$$

; ;

3. Үш фазалы қабылдағыш тоқтардың кешенді мағынасын анықтау:

$$\underline{I}_{A1} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_1}; \quad \underline{I}_{B1} = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_1}; \quad \underline{I}_{C1} = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_1}.$$

Бір фазалы қабылдағыштардың тоқтарын анықтау:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{AC}}{\underline{Z}_2}; \quad \underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_3},$$

\underline{U}_{AC} тандап алған I_2 тоқ бағытындағы сызықты кернеу:

$$\underline{U}_{AC} = -\underline{U}_{CA} = \sqrt{3} U_\phi e^{-j30^\circ}$$

4. Сызықты тоқтарды табу:

Бірінші фазаның бастапқы саласында: $\underline{I}_A = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_2$;

Екінші фазаның бастапқы саласында: $\underline{I}_B = \underline{I}_{B1} + \underline{I}_3$;

үшінші фазаның бастапқы саласында: $\underline{I}_C = \underline{I}_{C1} - \underline{I}_2 - \underline{I}_3$;

1 және 2 нүкте арасындағы салада: $\underline{I}_{12} = -\underline{I}_2 - \underline{I}_3$ немесе
 $\underline{I}_{12} = \underline{I}_C - \underline{I}_{C1}$;

2 және 3 нүкте арасындағы салада: $\underline{I}_{23} = -\underline{I}_3$

3.5 Үш фазалы тізбектегі активті қуатты өлшеу

Ваттметр көрсеткішін мына формуламен табуға болады

$$P = U_{AB} I \cos(\widehat{U_{AB} I}) \quad P = \operatorname{Re}[\underline{U_{AB}} \underline{I}^*],$$

Бұл жерде $\underline{U_{AB}}$ мен \underline{I} кернеу мен тоқтың кешенді әсерлік мәндері олар ваттметрге қосылған φ $\underline{U_{AB}}$ мен \underline{I} векторлары дұрыс бағыттары арасындағы ығысу бұрышы.

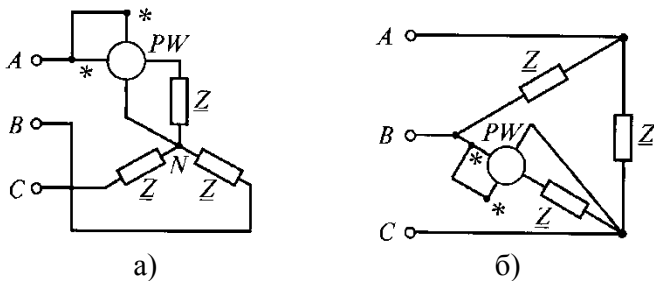
3.5.1. Симметриялы жүктемедегі активті қуатты өлшеу

Симметриялы үш фазалы қабылдағыштың барлық фаза қуаты бірдей, сондықтан бір фаза P_ϕ активті қуатын өлшесе жетеді.

Қабылдағыштың активті қуаты $P=3P_\phi$

3.18 а-суретте қабылдағыш А фазасы қуатын өлшеуге арналған ваттметр бейтарап нүктемен жұлдызша түрінде қосылған.

Симметриялы қабылдағышты үш бұрыш ретінде қосса 3.18 б-сурет, онда бір фаза қуатын сұлба бойынша өлшеуге болады (3.18 б-сурет)

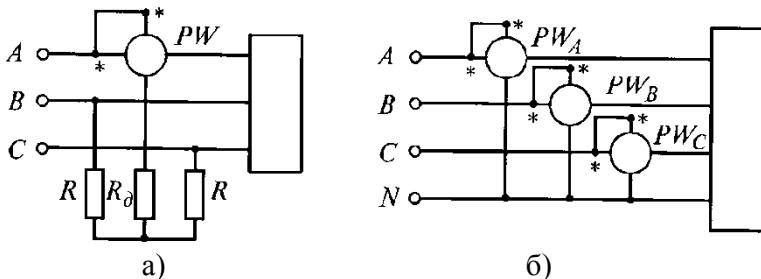


3.18-сурет

Егер де қабылдағыштың бейтарап нүктесі жеткіліксіз болса, жасанды бейтарап нүкте керек. Жасанды бейтарап нүкте үш резистордан жасалады, оның біреуі қосымша ретінде, оның кедергісі R_w ваттметр, кернеуі орамасының кедергісімен бірге басқа екі фаза кедергілеріне тең болады:

$$R_D + R_W = R \quad 3.19 \text{ а-суреті.}$$

Бұл жағдайда, активті қуат жиыны, бір ваттметр көрсеткішінің үш есе қуатына тең.



3.19-сурет

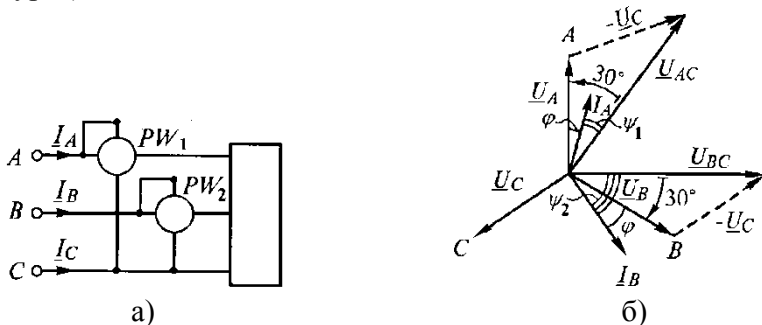
3.5.2 Симметриялы емес жүктемедегі активті қуатты өлшеу

Симметриялы емес жүктемеде фаза қуаты бірдей болмайды. Сондықтан, бейтарап сыммен жұлдыз түрінде қосса (төрт сымды жүйе), онда үш фазаға ваттметрлер қосу керек 3.19 б-сурет.

Қандай жүктеме болсада, жүйенің активті қуаты үш ваттметр көрсеткішінің қосындысы ретінде табылады:

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C$$

Үш фазалы үш сымды жүйеде симметриялы емес қабылдағыш қуатын көп жағдайда екі ваттметрмен өлшейді. (3.20 а-сурет).



3.20-сурет

Қорытындылау үшін, жүйенің лездік қуатын кернеу мен тоқтың лездік мағыналары арқылы көрсетеміз.

Көрінген фазаның лездік қуаты фазалы тоқ пен кернеудің лездік мағынасының көбейтіндісіне тең, ал үш фазалы жүйенің лездік қуаты фазалар лездік қуатының қосындысына тең:

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C \quad (3.36)$$

Қабылдағыш фазасын бейтарап сымсыз қосса:

$$i_A + i_B + i_C = 0 \text{ немесе } i_C = -(i_A + i_B).$$

i_C тоқтың мағынасын (3.36) теңдеуге қойып, табамыз:

$$p = (u_A - u_C) i_A + (u_B - u_C) i_B = u_{AC} i_A + u_{BC} i_B \quad (3.37)$$

Демек үш фазалы жүйенің лездік қуаты, сызықты кернеу мен тоқтың лездік мағынасының екі көбейтіндісінің қосындысына тең болады.

Екі көбейтіндінің қосындысының орташа мағынасы яғни жүйенің активті қуаты екі ваттметрмен өлшенеді

$$P = P_1 + P_2 = U_{AC} I_A \cos \psi_1 + U_{BC} I_B \cos \psi_2 \quad (3.38)$$

ψ_1 - \underline{U}_{AC} кернеуі мен \underline{I}_A тоқ арасындағы фазалар бұрышының жылжуы.

ψ_2 - \underline{U}_{BC} пен \underline{I}_B векторлар аралығындағы фаза бұрышының жылжуы.

Сонымен (3.20 а-суретте) көрсетілген екі ваттметр көрсеткішін қосып, үш фазалы тізбектің қуатын табамыз.

P_1 және P_2 қуаттар бөлек-бөлек нақты қуатты көрсетпейді. Үш фазалы жүйенің өлшеп жатқан қуатының таралуы, екі ваттметр көрсеткіш арасындағы негізінен сызықты тоқ пен кернеу арасындағы фазалар жылжуына байланысты.

Бұл жағдайды симметриялы қабылдағышта қараймыз. Кернеу мен тоқ векторлары диаграммасын саламыз (3.38) теңдеудегі, $\phi > 0$ деп аламыз.

Диаграммадан симметриялы қабылдағышта \underline{U}_{AC} , \underline{I}_A және \underline{U}_{BC} , \underline{I}_B векторлар аралығындағы фазалар бұрышының жылжуын 3.20 б-суретте көруге болады:

$$\psi_1 = 30^\circ - \varphi; \psi_2 = 30^\circ + \varphi.$$

Осы мағынаны (3.38)ге қойып ваттметрлері

$$P_1 = U_L I_L \cos(30^\circ - \varphi); P_2 = U_L I_L \cos(30^\circ + \varphi) \quad (3.39)$$

(3.39) теңдеуді талдау арқылы анықталады:

1. активті және симметриялы жүктеме де $\varphi = 0$ ваттметр көрсеткіші бірдей $P_1 = P_2$

2. егерде $\varphi = 60^\circ$ болса $P_2 = 0$ тең;

3. егерде $\varphi = 60^\circ$ болса $P_1 = 0$ тең;

4. Егер де $\varphi = 60^\circ$ $P_2 < 0$ болса және ваттметр теріс қуат көрсетсе, аспапта (приборда) бір бағытты мәні болса, оның көрсеткішін білу үшін тоқ пен кернеу бағытын керісінше өзгерту қажет. Бұл кездегі қуатты теріс деу керек. Бұл жағдайда жүйе қуатты $P = P_1 - P_2$

5. Егер де $\varphi = \pm 90^\circ$ болса (реактивті жүктеме) $P_1 = -P_2$, ал олардың қосындысы нөлге тең.

Екі ваттметр көрсеткіші бойынша біркелкі жүктемеде реактивті қуат пен фаза бұрышының жылжуын анықтауға болады.

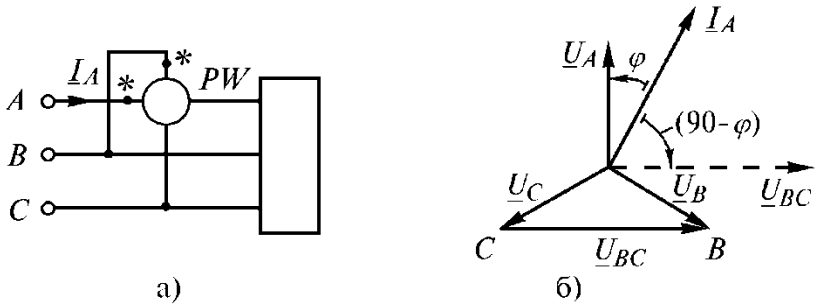
$$P_1 - P_2 = U_L I_L (\cos(30^\circ - \varphi) - \cos(30^\circ + \varphi)) = U_L I_L \sin \varphi;$$

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi = \sqrt{3} (P_1 - P_2); \operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \sqrt{3} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}$$

3.5.3. Қосылған жүктеме реактивті қуатын өлшеу

3.21-суретте, симметриялы үш фазалы тізбектің реактивті қуатын өлшеу үшін ваттметрдің қосылған сұлбасы көрсетілген. Ваттметр көрсеткіші векторлар \underline{U}_{BC} мен \underline{I}_A көбейтіндісі түрінде анықталады:

$$P_1 = U_{BC} I_A \cos(\underline{U}_{BC}; \underline{I}_A)$$



3.21-сурет

\underline{U}_{BC} пен \underline{I}_A векторлар арасындағы бұрышты табу үшін (3.21 б) векторлы диаграмма саламыз, онда бұрыш $(90^\circ - \varphi)$ тең.

$$P_1 = U_{BC} I_A \cos(90^\circ - \varphi) = U_{BC} I_A \sin \varphi$$

Реактивті қуат: $Q = \sqrt{3} U_{BC} I_A \sin \varphi = \sqrt{3} P_1$

Демек реактивті қуат ваттметр көрсеткішін $\sqrt{3}$ көбейту арқылы анықталады. Берілген сұлбада, ваттметр көрсеткіші фазасының синус бұрышына жылжуына сәйкес берілген қосу тәсілі ваттметрдің синусты қосылуы аталады.

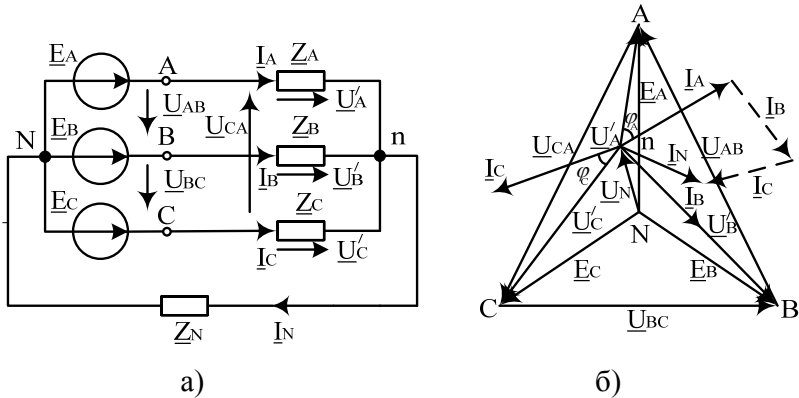
3.6 Үш фазалы тізбектің топографиялық диаграммасы

Кернеудің топографиялық диаграммасын салу үшін жазықтықтағы сәйкес нүктелерді анықтаған жөн.

Тоқ векторлары кернеуге қатысты салынады. Өткен тақырыптарда, үш фазалы жүйеде векторлы диаграммалар қолданылады. Мысалдардың салынуын және пайдаланылуын қарастырамыз.

3.6.1 Жұлдыз түрде қосылған және жұлдыз бейтарап сыммен қосылған үш фазалы тізбек векторлы диаграммасы

(3.22 а-сурет) векторлы диаграмма есебі мен салу тәртібі.



3.22-сурет

1. Комплексті жазықтықта \underline{E}_A , \underline{E}_B , \underline{E}_C көрек көздерінің ЭҚК векторлы диаграммасын салады (3.22 б-сурет)
2. Бейтарап U_N жылжудың кернеуін анықтайды және векторлы диаграммаға салады.
3. Қабылдағыштың фазалы кернеу векторын сәйкесін ЭҚК және кернеу жылжуының векторлы айырмасы ретінде салып, табу керек:

$$\underline{U}_A = \underline{E}_A - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_B = \underline{E}_B - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_C = \underline{E}_C - \underline{U}_N;$$

4. Фазалы тоқтар есептеледі:

$$\underline{I}_A = \underline{U}'_A \underline{Y}_A; \quad \underline{I}_B = \underline{U}'_B \underline{Y}_B; \quad \underline{I}_C = \underline{U}'_C \underline{Y}_C;$$

5. Фазалы тоқ векторларын фазалы кернеу векторларына сәйкес бағыттайды және фазалар φ_A , φ_B , φ_C бұрыш жылжуына байланысты.

6. Ом заңы бойынша бейтарап сымдағы тоқ анықталады:

$$\underline{I}_N = -\underline{U}_N \underline{Y}_N$$

немесе Кирхгофтың екінші заңы бойынша:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$$

Осыны векторлы диаграммаға саламыз.

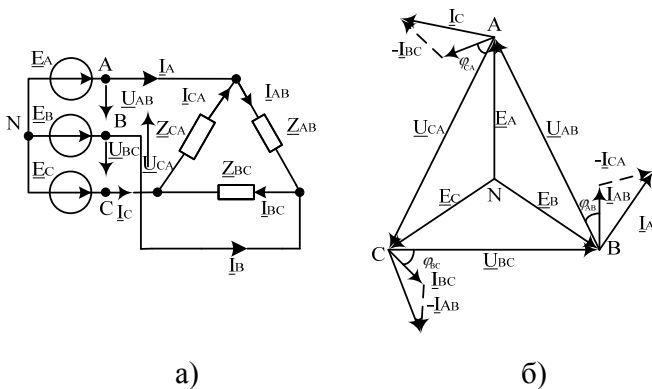
7. Сызықты кернеу векторлары сәйкесінше фазалы кернеу айырмасы ретінде салынады:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}'_A - \underline{U}'_B; \underline{U}_{BC} = \underline{U}'_B - \underline{U}'_C; \underline{U}_{CA} = \underline{U}'_C - \underline{U}'_A;$$

3.6.2 Жұлдызша және үшбұрыш түрінде қосылған векторлы диаграммалар

3.23 а-суретте, кернеудің топографиялық диаграммасын және тоқтың векторлы диаграммасын есептеу және салу тәртібін көрсетеміз.

1. Комплексті жазықтықта \underline{E}_A , \underline{E}_B , \underline{E}_C бұлақтардың ЭҚК векторлы диаграммасы салынады 3.23 б-сурет



3.23-сурет

2. Сызықты кернеу векторлары, ЭҚК-ның векторларына сәйкес айырмашылығы түрінде салынады.

3. Фазалы токтар есептеледі:

$$\underline{I}_{AB} = \underline{U}_{AB} \underline{Y}_{AB}; \underline{I}_{BC} = \underline{U}_{BC} \underline{Y}_{BC}; \underline{I}_{CA} = \underline{U}_{CA} \underline{Y}_{CA};$$

4. Векторлы диаграммада векторлар \underline{I}_{AB} , \underline{I}_{CA} орналасуы анықталады. Фазалы кернеу \underline{I}_{BC} векторларға қатысты салу керек.

5. Кирхгофтың бірінші заңы бойынша, сызықты ток есептеледі:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA}; \underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}; \underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}$$

Осы формулалар арқылы диаграммада сызықты ток векторларын салады.

3.6.3. Сызықты сым үзілгендегі жұлдызша түрде қосылған үш фазалы симметриялы тізбектің векторлы диаграммасы

Сызықты сым үзілсе, мысалы, A фазасы (3.24 а-сурет) екі басқа фазалар кедергісі бір ізді қосылған және \underline{U}_{BC} сызықты кернеу жүктелген. $\underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}$ болса, әрқайсысында кернеу сызықты кернеудің жартысына тең және n нүкте топографиялық диаграммада (3.24 б-сурет) \underline{U}_{BC} вектордың ортасында.

Бейтарап кернеу жылжуы:

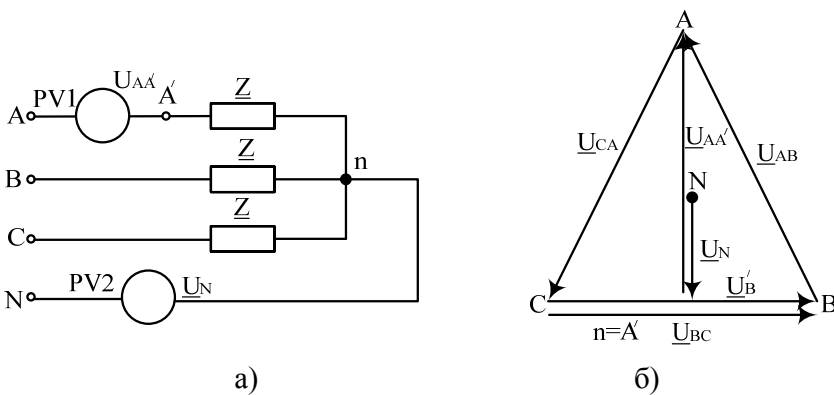
$$U_N = U_{nN} = \frac{E_A}{2}$$

Үзілген нүкте арасындағы кернеу:

$$\underline{U}_{AA'} = \underline{U}_{AN'} = \underline{E}_A - \underline{U}_N = \frac{3}{2} \underline{E}_A$$

Бұндай нәтижені түйінді кернеу әдісін қолданып есеппен табуға болады:

$$\underline{U}_N = \frac{\sum EY}{\sum Y} = \frac{E_A \cdot 0 + E_B Y_B + E_C Y_C}{0 + Y_B + Y_C} = \frac{Y_B (E_B + E_C)}{2 Y_B} = \frac{E_A}{2}$$



3.24-сурет

Сонымен, симметриялы үш сымды тізбекте энергия қабылдағыш жұлдыз түрінде қосылса, бір сымның үзілуі қабылдағыш фазасының кернеуін нөлге дейін азайтады және қабылдағыштың басқа екі фазасының кернеуін де азайтады

$$\frac{U_{\Phi}}{U_{\Delta}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \text{ , есе, яғни 16\%}$$

3.6.4. Бір фазалы қысқа тұйықталғандағы бейтарап сымсыз жұлдыз түрінде қосылған векторлы диаграмма

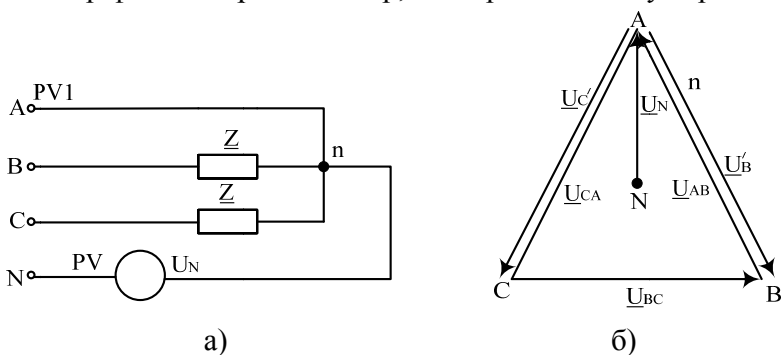
A -фазасы қысқа тұйықталғанда (3.25 а-сурет) A мен n нүкте мағынасы бірдей, топография жазықтағы диаграмма нүктелері беттеседі, үш бұрыштың жоғарына орналасқан.

Бұнда n нүктесі A нүктеге жылжиды, мағынасы генератормен беріледі.

Жүктеменің B және C фазасындағы кернеу генератордың сызықты кернеуіне дейін өседі (3.25 б)

$$\underline{U}'_B = -\underline{U}_{AB}; \underline{U}'_C = -\underline{U}_{CA}; \underline{U}_N = \underline{U}_A;$$

Қабылдағыштың фазасының біреуі қысқа тұйықталғанда, басқа екі фазадағы кернеу $\sqrt{3}$ есе өседі. Сондықтан, үш фазалы жүйеде бір фазалы жүктемесі бар, бейтарап сым болу керек.



3.25-сурет

3.7 Айналмалы магнитті өріс

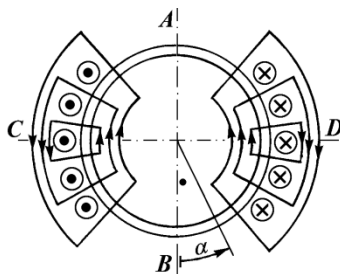
Үш фазалы тоқтың күрделі ерекшелігі айналмалы магнитті өріс жасауы, ауыспалы ток қозғалтқышының қызмет істеуі болып табылады.

Бірінші айнамалы магнитті өріс 1884 ж Италия физигі Г. Феррариспен дәлелденген. Бірақ оның моделі жетілмегендіктен іс жүзінде қолданылмады. Себебі, Г. Феррарис, асинхронды қозғалтқыштың КПД-сі 50% көп болмайды деп математикалық қате жіберді, оның тұжырымы бойынша, айналмалы өрісті электр қозғалтқышты пайдалану тиімді емес. 1887-1888 ж.ж. Франфурте на-Майне дегі халықаралық көрмеде Доливо-Добровольскидің ауыспалы тоқтың үш фазалы жүйесі көрсетіледі. 200кВт-ты электр станциясы, ток беру бағытының ұзындығы-175км, асинхронды қозғалтқыш пен қосалқы станциясы қуаты-75кВт. Үш фазалы ток артықшылығы куәландырылады, тез арада жалпы мойындалды.

3.7.1. Дірілдегіш магнитті өріс

Бір катушкадан өтетін ток арқылы магнитті өріс жасауды қарастырайық.

Электр машинасы статор пазында орама орналасқан, онымен ток жүреді



3.26-сурет

Оң жақта-бізден, сол жақта-бізге қарсы. Орамадан өтетін ток магнитті өріс жасайды. Бұл өріс бағытын өндірісті винт ережесі бойынша анықтаймыз. Неғұрлым иірім көп болса, магнитті

индукция B көп болады. Көп индукция AB сызықта, аз индукция CD сызықта болады. Магнитті индукция α бұрышына байланысты таралады. Ойша, статордың AB сызықты бөлеміз және оны бұрамыз. Магнитті индукцияның сатылы түрде таралуын табамыз (3.27 в-сурет). Негізгі индукция B формуласы:

$$B = B_0 \cos \alpha$$

Магнитті индукцияның бұл көрінісі тек тұрақты тоқта. Ток өзгерсе, магнитті индукция өзгереді.

Егер де, орамаға синусоидалды ток жіберсек, магнитті индукция уақытымен синусоидалды заң бойынша өзгереді.

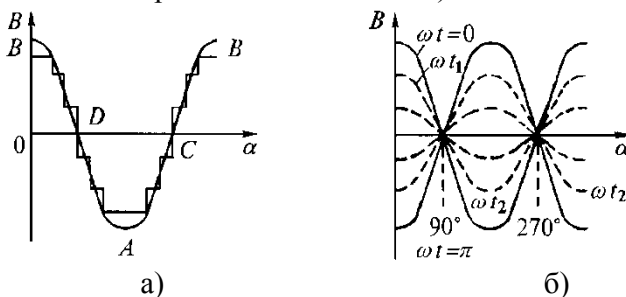
$B_0 = B_m \cos \omega t$ дейміз. Сонда индукция кез келген нүктеде

$$B = B_m \cos \omega t \cdot \cos \alpha \quad (3.40)$$

(3.40) теңдеуден мынаны көруге болады: индукция уақытта да, кеңістіктер де синусоидалды заңға байланысты өзгереді (3.27 б-сурет).

Кез-келген уақытта нүктеде $\alpha = 0, 180^\circ, 360^\circ$, магнитті индукция $B = B_m$, ал нүктеде $\alpha = 90^\circ, 270^\circ$ $B = 0$.

Индукцияның негізгі толқының көп мағынасы бар бағыт магнитті өріс осі деп аталады. Бұл ось катушка осімен беттеседі (3.26-суретте магнитті өріс осі AB бағытында).



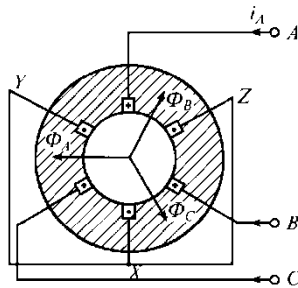
3.27-сурет

Уақытына байланысты өзгертін, кеңістікте өз осін өзгертпейтін ең жоғарғы индукциясы әр уақытта бір нүктеде болатын өріс, дірілдегіш деп аталады.

Сонымен, бір орама дірілдегіш магнитті өріс жасайды. Егер де машина статорында үш орама орыналастырып, симметриялы жүйедегі синусоидалды ток жіберсек, үш дірілдегіш өрістер қосындысынан айналмалы магнитті өріс пайда болады.

3.7.2. Айналмалы магнитті өрісін жасау

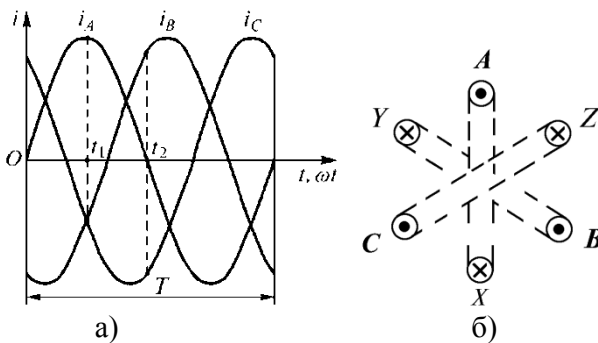
Электр машина статорында, жұлдызды түрде қосылған (3.28-сурет), остері бір-біріне қатысты 120^0 үш орама AX, BY, CZ бар дейік.



3.28-сурет

Орамаға симметриялы кернеу жүйесі берілген, онымен ток жүреді, бір-біріне қатысты 120^0 жылжыған (3.29 а-сурет):

$$i_A = I_m \sin \omega t; i_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ); i_C = I_m \sin(\omega t + 240^\circ).$$

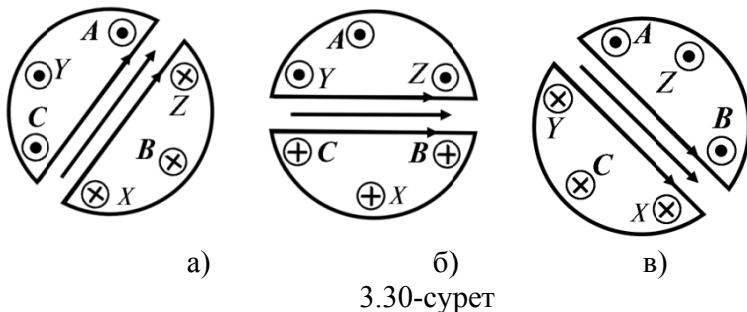


3.29-сурет

Қорытындылауда магнит өрісінің әртүрлі уақыттағы көрінісін қарастырайық. Тоқтың дұрыс бағытына, фазаның аяғынан басына қараған бағытты аламыз.(3.29 б-сурет).

$t = t_1$, уақытқа (3.29 а-сурет) $i_A > 0, i_B < 0, i_C > 0$.

1. Бұл уақыт кезеңі (3.30 а-сурет) магнитті өріске сәйкес



3.30-сурет

2. Егер де $t=t_2$ ($i_A > 0, i_B < 0, i_C < 0$.) қорытындылау магнитті өріс (ағымы) осі біршама бұрышқа бұрылды (3.30 б-сурет)

3. Егер де $t=t_2$ ($i_A > 0, i_B > 0, i_C < 0$.) магнит ағымы бұрылады (3.30 в-сурет)

Сонымен, уақытына қарай тоқ өзгергенде магнитті өріс сағат тілі бойынша айналады. Ауыспалы тоқты бір кезеңінде, ол бір айналым жасайды (екіұшты машинаға). Оның айналымының бағыты катушкадаға тоқтың фазасының өзгеруіне бағынышты. Айналым бағытын өзгерту үшін, фазаларды өзгертуге, яғни фазаның орындарын ауыстыруға болады. Кеңістіктегі және уақыттағы қортындылау векторының магнитті индукциясының өзгеруін қарастырамыз.

М-нүктесіндегі индукцияны анықтаймыз,

А фаза осіне қатысты α бұрышқа жылжыған (3.28-сурет).

В фаза осіне қатысты, нүкте ($\alpha + 120^\circ$) бұрышқа жылжиды, ал

С фаза осіне қатысты ($\alpha + 240^\circ$) бұрышқа жылжиды.

М-нүкте де магнит индукциясын табамыз:

$$B = B_A + B_B + B_C$$

Бұнда:

$$B_A = B_m \cos \omega t \cdot \cos \alpha,$$

$$B_B = B_m \cos(\omega t - 120^\circ) \cdot \cos(\alpha + 120^\circ);$$

$$B_C = B_m \cos(\omega t - 240^\circ) \cdot \cos(\alpha + 240^\circ).$$

Косинус көбейуін ескеріп,
 $\cos \omega t \cdot \cos \alpha = 1/2 \cos (\omega t + \alpha) + \cos (\omega t - \alpha)$

Табамыз:

$$B_A = \frac{1}{2} B_m (\cos(\omega t + \alpha) + \cos(\omega t - \alpha));$$

$$B_B = \frac{1}{2} B_m (\cos(\omega t - 120^\circ + \alpha + 120^\circ) + \cos(\omega t - 120^\circ - \alpha - 120^\circ)) = \\ = \frac{1}{2} B_m (\cos(\omega t + \alpha) + \cos(\omega t - \alpha - 240^\circ));$$

$$B_C = 1/2 B_m (\cos (\omega t + \alpha) + \cos (\omega t - \alpha - 240^\circ))$$

Бұдан,

$$B_C = B_A + B_B + B_C = \frac{3}{2} B_m \cos(\omega t + \alpha). \quad (3.41)$$

Демек, магнитті индукция уақыт пен нүктенің кеністікте орналасуына байланысты. Мысалы: қарап жатқан нүкте М статор шеңберінде ω бұрыш жылдамдық пен керісінше бағытта, яғни сағат жүрісіне сәйкес жылжиды. Онда

$$\alpha = -\omega t; B = \frac{3}{2} B_m \cos(\omega t + \alpha) = \frac{3}{2} B_m$$

Қорытындылау өрісінің айналым осі керісінше бағытта, бұрыштың жылдамдығы ω , бұл осьтегі индукция өзгермейді және $\frac{3}{2} B_m$ тең.

Айналым жылдамдығын математика түрінде анықтауға болады. $\alpha + \omega t = const$ табамыз:

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\omega$$

Қорытынды

1. Кеңістікте жылжыған катушкада тоқ жүргенде, магнитті өріс теріс бағытта айналады бұрышты жылдамдығы ω , электр тоғының бұрышты жиілігіне тең.

2. Статор индукциясы синусоидалды заң бойынша бөлінген, оның мағынасы өрістің өсіне өзгермейді- $1,5 B_m$ тең.

3. Пульсті магнитті өрісті, екі керісінше бағытта айналып тұрған өріске бөлуге болады, амплитудасы оның амплитудасының жартысына тең.

Тендеу бойынша табамыз:

$$B_A = B_m \cos \omega t \cdot \cos \alpha = \frac{B_m}{2} (\cos(\omega t + \alpha) + \cos(\omega t - \alpha)).$$

4. Симметриялы тоқ жүйесінде айналып тұрған өріс айналмалы, себебі индукция $B=1,5B_m$ айналғанда өзгермейді, индукция векторының соңы шеңбер сызады.

Егер орамаға симметриялы емес тоқ жүйесі жүргізсе, өріс айналмалы емес эллиптикалы болады.

3.7.3. Үш фазалы асинхронды қозғалтқыштың іс-әрекет қағидаты

Қозғалтқыш статоры цилиндр тектес өзекшеден тұрады, үш фазалы орама пазасына салынған. Бұл орама үш фазалы бұлақтан көректенсе, айналмалы магнитті өріс пайда болады. Қозғалтқыш роторында қысқа тұйықталу және фазалы орама болады. Айналмалы магнитті өріс, ротор орамасымен қиылсады да ЭҚК жібереді, сол себептен ротор орамасынан тоқ жүреді, магнит ағымы мен ротор тоғының өзара әрекеті айналмалы кезең жасайды.

Егер бұл кезеңде тежеуіш көбейсе, ротор магнитті өріс бағытына айналады. Берілген режимде, ротордың айналым жылдамдығы магнитті өріс айналым жылдамдығынан аз, себебі бірдей жылдамдықта, ротор орамасы өріспен қиылыспайды, сондықтан тоқ пен айналмалы кезең жоқ. Сондықтан, мұндай қозғалтқыш асинхронды деп аталады. Айналым жылдамдығының, өріс жылдамдығынан қалуы S жылжуымен мінезделеді:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (3.42)$$

n_1 – магнитті өріс айналымының жылдамдығы.

n_2 – ротор айналымының жылдамдығы.

Берілген режимде аз қуатты қозғалтқыштың нақты жылжуы 10-15%, ал көп қуатты қозғалтқышта 2-5%.

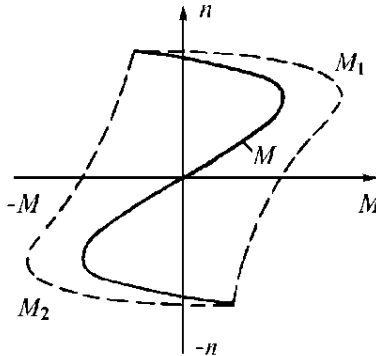
Асинхронды электр машинасының мінездемесі, қасиеті және жұмыс режимі электр машина курсына жете қарастырылады.

3.7.4. Бір фазалы асинхронды қозғалтқыштың іс-әрекет қағидаты

Бір фазалы асинхронды қозғалтқыш статорында бір фазалы орама бар, роторында-қысқа тұйықталу, үш фазалы қозғалтқыш дегідей.

Статордың бір фазалы тоғы магнитті өрісін пайда болдырады. Соғып тұрған тоқты ажыратып, айналмалы кезеңнен қарама-қарсы белгісі бар екі құрама түрінде елестетуге болады: $M = M_1 - M_2$

Өр құраманың механикалық және қорытындылаушы мінездемесі 3.31-суретте көрсетілген.



3.31-сурет

Ротордың тұрақты кезінде айналмалы өрісі бірдей, белгісі түрлі кезең пайда болады. Сондықтан, қозғалтқышты қосқанда қорытынды кезең нөлге тең және ротор айналмайды. Егер де ротор айналса, кезеңнің бірі (M_1 немесе M_2) екіншісінен көп

болады. Егер де, қорытынды кезең кедергі кезеңінен көп болса, ротор белгілі бір айналым жылдамдығына жетеді. Жіберетін кезең жасау үшін в бір фазалы, қозғалтқышта қосымша жіберетін орама пайдаланады және сол тізбекке фазаны жылжытатын элементті конденсаторды қосады. Екі фазалы жүйе болады, ол айналмалы магнитті өрісін және сәйкес жіберетін кезеңді жасайды. Қозғалтқышты қосқасын жіберетін орама ажырайды.

3.8. Симметриялы құрамалар әдісі

Үш фазалы тізбек есеп әдісі, кез-келген тоқ пен кернеуді симметриялы құрама саласы, яғни симметриялы құрама әдісі деуге болады.

Әдістің мағынасы:

1. Симметриялы емес үш фазалы кернеу жүйесін үш симметриялы: тікелей, керісінше және нөлді тізбек фазалы жүйесі түрінде көрсетуге болады.

2. Әр құраманың сұлбасын бөлек есептейді: тікелей, керісінше және нөлді тізбек фазалар тоғын табады.

3. Қосу қағидатын пайдалана отырып құрамадан тоқ табады.

3.8.1. Үш фазалы векторлар жүйесіндегі симметриялы құрамалар

Тікелей, керісінше және нөлді тізбектегі фаза жүйесін және берілген симметриялы емес үш фазалы векторлар жүйесінде олардың анықтау мүмкіндігін қарастырамыз. Фазалы ЭҚК, кернеу және тоқ, симметриялы жүйеде бір-біріне қатысты 120° жылжыған қысқаша жазу үшін үш фазалы оператор қолданамыз:

$$a = e^{j120^\circ} = e^{-j240^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ} = \cos 120^\circ - j \sin 120^\circ = -0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$a^3 = e^{j360^\circ} = 1.$$

Үш вектор $-1, a, a^2$ – симметриялы жүйені жасайды.

$$1+a+a^2=0$$

Оператор a -арқылы үш фазалы ЭҚК симметриялы жүйесін жазамыз:

$$\underline{E}_A = E; \quad \underline{E}_B = Ee^{-j120^\circ} = Ee^{j240^\circ} = a^2 E;$$

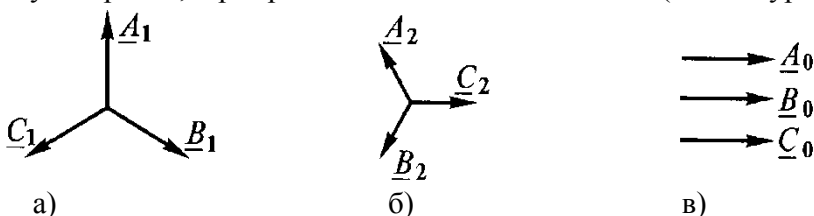
$$\underline{E}_C = Ee^{-j240^\circ} = aE;$$

$$\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = E(1 + a + a^2) = 0.$$

Вектордың a -ға көбейтілуі, 120° бұрылғанын, ал a^2 -көбейтілгені- 240° бұрылғанын көрсетеді.

Симметриялы құраманы жасау үшін оператор a -ны пайдаланамыз.

Тікелей тізбек жүйесі үш вектор A , B , C -дан тұрады, модульдері тең, бір-біріне қатысты 120° жылжыған (3.32 а-сурет).



3.32-сурет

a -ны пайдаланып B , C векторын A вектор арқылы жазамыз:

$$\underline{B}_1 = a^2 \underline{A}_1; \quad \underline{C}_1 = a \underline{A}_1. \quad (3.43)$$

Керісінше тізбек жүйесі үш вектор A_2 , B_2 , C_2 тұрады, модуль бойынша тең, бір-біріне қатысты 120° бұрылған (3.32 б-сурет)

$$\underline{B}_2 = a \underline{A}_2; \quad \underline{C}_2 = a^2 \underline{A}_2; \quad (3.44)$$

Нөл жүйедегі \underline{A}_0 , \underline{B}_0 , \underline{C}_0 үш бірдей векторлар арқылы жасалған фазасымен тең келеді (3.32в) сурет.

$$\underline{A}_0 = \underline{B}_0 = \underline{C}_0 \quad (3.45)$$

Симметриялы емес үш вектордың \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} жүйесін үш симметриялы құраманың жиыны түрінде қарастырамыз:

$$\underline{A} = \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \quad \underline{B} = \underline{B}_1 + \underline{B}_2 + \underline{B}_0; \quad \underline{C} = \underline{C}_1 + \underline{C}_2 + \underline{C}_0. \quad (3.46)$$

$$\underline{A} = \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \quad (3.47)$$

$$\underline{B} = a^2 \underline{A}_1 + a \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \quad (3.48)$$

$$\underline{C} = a \underline{A}_1 + a^2 \underline{A}_2 + \underline{A}_0. \quad (3.49)$$

Есептелген теңдеу жүйелері, белгілі симметриялы құрамалар $\underline{A}_1, \underline{A}_2, \underline{A}_0$ арқылы векторлар $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}$ анықтаймыз.

Егер де, бұл жүйені $\underline{A}_1, \underline{A}_2, \underline{A}_0$ арқылы тапсақ, берілген векторлар $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}$, арқылы симметриялы құрамасын табамыз.

\underline{A}_0 нөлді жүйесін табу үшін (3.47.....3.49) теңдеулерді қосамыз:

$$\underline{A} + \underline{B} + \underline{C} = \underline{A}_1(1 + a + a^2) + \underline{A}_2(1 + a + a^2) + 3\underline{A}_0$$

$1+a+a^2=0$ десек:

$$\underline{A}_0 = \frac{\underline{A} + \underline{B} + \underline{C}}{3} \quad (3.50)$$

Тікелей жүйелі құрамасын анықтау үшін (3.48) теңдеуді a -ға көбейтеміз, ал (3.49) теңдеуді- a^2 көбейтеміз:

$$\underline{A} = \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0;$$

$$a\underline{B} = a^3 \underline{A}_1 + a^2 \underline{A}_2 + a \underline{A}_0; \quad a^2 \underline{C} = a^3 \underline{A}_1 + a^4 \underline{A}_2 + a^2 \underline{A}_0;$$

$$\underline{A} + a\underline{B} + a^2 \underline{C} = \underline{A}_1(1 + a^2 + a^3) + \underline{A}_2(1 + a^2 + a^4) + \underline{A}_0(1 + a + a^2).$$

$a^3=1, a^4=a$ тең деп ескере отырып, табамыз:

$$\underline{A}_1 = \frac{\underline{A} + a\underline{B} + a^2 \underline{C}}{3} \quad (3.51)$$

\underline{A}_2 табу үшін, (3.48) теңдеуді a^2 көбейтеміз, (3.49) теңдеуді a -ға көбейтеміз де, мынаны табамыз:

$$\underline{A}_2 = \frac{\underline{A} + a^2 \underline{B} + a \underline{C}}{3} \quad (3.52)$$

(3.50....3.52) теңдеулер симметриялы емес вектор жүйесінің симметриялы құрамасын анықтауға жағдай туғызады.

Үш фазалы тізбекке, нөлді жалғас жүйеге қатысты (3.50) үш күрделі қорытынды шығаруға болады.

1. Сызықты кернеу жиыны үш фазалы тізбекте нөлгетен болғандықтан, нөлді жүйедегі сызықты кернеу симметриялы құрамасы болмайды:

$$U_0 = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3} = 0$$

2. Үш фазалы үш сымды тізбектегі сызықты тоқ векторлы жиыны нөлге тең. Сондықтан, сызықты тоқ жүйесінің нөлдегі құрамасы нөлге тең.

$$I_0 = \frac{I_A + I_B + I_C}{0} = 0$$

3. Бейтарап сымды үш фазалы тізбектегі тоқ нөлді жүйедегі құраманың үш есе мағынасына тең:

$$I_N = I_A + I_B + I_C = 3I_0$$

(3.50,....3.52) теңдеулерді пайдалана отырып, берілген векторлар бойынша графика түрінде симметриялы құрамасын анықтауға болады:

Мысалы, симметриялы емес фазалы кернеу жүйесі берілген $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ (3.33 а-сурет)

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C}{3}; \quad U_0 = \frac{OK \cdot m_U}{3},$$

m_U -кернеу масштабы.

Тікелей және керісінше жүйелі кернеуді табу үшін векторларды формула бойынша қосамыз:

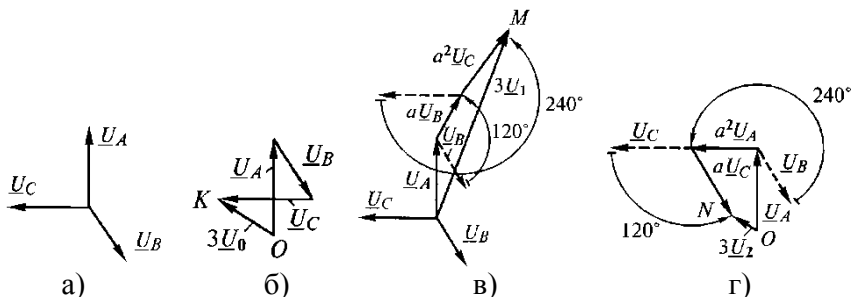
$$\underline{U}_1 = \frac{\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C}{3}; \quad U_{02} = \frac{U_{A+a2UB+aUc}}{3}$$

Векторларды салғанда, векторды а-ға көбейтуді, оны сағатқа қарсы 120^0 бұрылғанын, a^2 -қа көбейтуді, вектордың 240^0

бұрылуының сол бағытта екенін есепке алу керек. (3.33 в, г-сурет)

Диаграммдан табамыз:

$$U_0 = \frac{OK \cdot m_U}{3}; U_2 = \frac{OK \cdot m_U}{3}$$



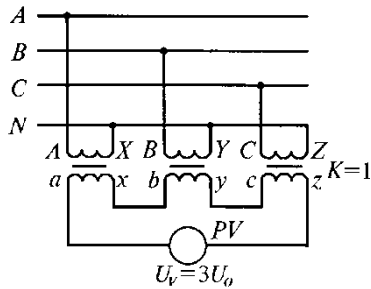
3.33-сурет

3.8.2 Симметриялы құраманы эксперименталды әдіспен өлшеу

Тоқ пен кернеудің симметриялы құрамасын тәжірибелі өлшеу үшін арнайы схема-фильтрі қолданылады. Бұл фильтрді, үш фазалы энергетика жүйесін авария режимінен сақтау үшін қолданылады. Нөлді және керісінше жүйе құрамасының болуы симметрияның бұзылғанын көрсетеді. Нөлді жүйелі кернеу фильтрі (3.34-сурет) Үш бір фазалы трансформатор кернеуден тұрады, бірінші реттік орама фазалы кернеуге қосылған, екінші реттік орама ажыраған үшбұрышқа ал қысқышына вольтметр қосылған.

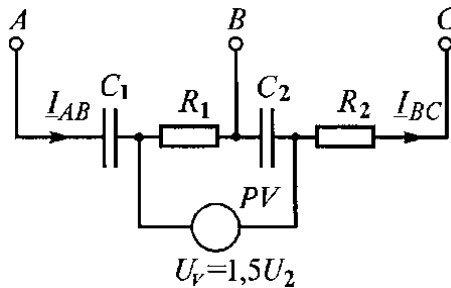
Трансформатор коэффициенті бірге тең болса, кернеу қосындысы формуламен анықталады:

$$\underline{U}_V = \underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = 3\underline{U}_0; U_0 = \frac{U_V}{3},$$



3.34-сурет

яғни, вольтметр көрсеткіш нөлді жүйелі кернеуге пропорционалды (тен).



3.35-сурет

Керісінше жүйелі кернеу фильтрінде (3.35-сурет) екі резистор мен екі конденсатор бар. Сондықтан оны төрт элементті деп атайды.

Фильтр параметр мына жағдайды қанағаттандыруы керек.

$$\frac{R_1}{X_1} = \frac{X_2}{R_2} = \sqrt{3}.$$

U кернеуі керісінше жүйенің құрамасына пропорционалды дейміз. Фильтр параметрлар арақатысын есептей отыра фильтр аралық кедергіні жазамыз:

$$\underline{Z}_{AB} = R_1 - jX_1 = R_1 - j \frac{R_1}{\sqrt{3}} = \frac{2R_1}{\sqrt{3}} e^{-j30^\circ};$$

$$\underline{Z}_{BC} = R_2 - jX_2 = \frac{X_2}{\sqrt{3}} - jX_2 = \frac{2X_2}{\sqrt{3}} e^{-j60^\circ}.$$

Симметриялы құрама арқылы сызықты кернеуді жазамыз:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2; \quad \underline{U}_{BC} = a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2; \quad \underline{U}_0 = 0.$$

Фильтр тармағындағы токтар:

$$\underline{I}_{-AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}} = \frac{\sqrt{3}}{2R_1} \underline{U}_1 e^{j30^\circ} + \frac{\sqrt{3}}{2R_1} \underline{U}_2 e^{j30^\circ};$$

$$\underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}} = \frac{\sqrt{3}a^2}{2X_2} \underline{U}_1 e^{j60^\circ} + \frac{\sqrt{3}a}{2X_2} \underline{U}_2 e^{j60^\circ}.$$

R_1 , X_2 элементтегі кернеу

$$\underline{U}_{R1} = \underline{I}_{AB} R_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \underline{U}_1 e^{j30^\circ} + \frac{\sqrt{3}}{2} \underline{U}_2 e^{j30^\circ};$$

$$\underline{U}_{X2} = \underline{I}_{BC} (-jX_2) = -\frac{\sqrt{3}}{2} \underline{U}_1 e^{j30^\circ} + \frac{\sqrt{3}}{2} \underline{U}_2 e^{j30^\circ}.$$

Вольтметр көрсеткіші

$$\underline{U}_V = \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{X2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \underline{U}_2 (e^{j30^\circ} + e^{j90^\circ}) = 1,5 \underline{U}_2 e^{j60^\circ}$$

$$U_V = 1,5 U_2 \text{ немесе } U_2 = \frac{U_V}{1,5}.$$

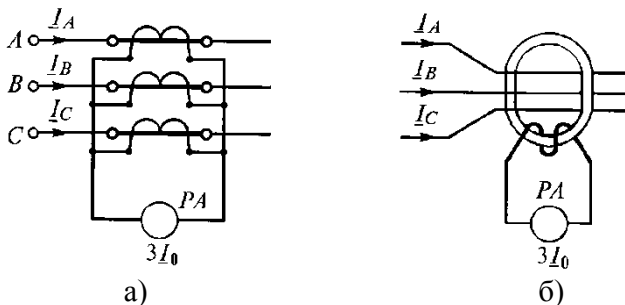
Сонымен, вольтметр көрсеткіші керісінше жүйелі кернеуге пропорционалды.

Егерде, А және С қысқышты орынын ауыстырса (3.35-сурет)

және мынаны орындасақ $\frac{R_1}{X_1} = \frac{R_2}{X_2} = \sqrt{3}$, онда вольтметр тікелей

жүйелі кернеуді көрсетеді:

$$U_v = \sqrt{3}U_1 \text{ немесе } U_1 = \frac{U_v}{\sqrt{3}}.$$



3.36-сурет

(3.36 а-сурет) нөлді жүйедегі трансформатор (3.36 б-сурет) трансформатор $K=1$ амперметр көрсеткіші

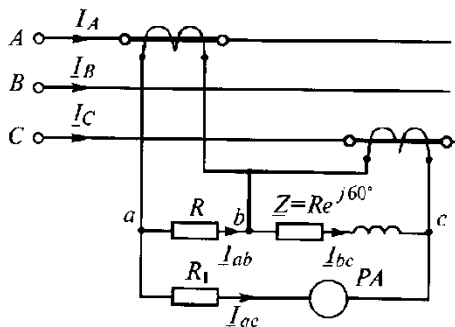
$$\underline{I} = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C; I_0 = \underline{I}/3.$$

Тоқтың трансформация коэффициенті n_i , аспаптың көрсетуіне қарай нөл жүйелі тоқты табамыз: $I_o = n_i \frac{I}{3}$

Үш өткізгіш жүйеде сызықты тоқ сомасы нөлге тең. Сондықтан, қалыпты режимде аспап нөлді көрсетеді. Амперметр көрсеткішінің өзгеруі тізбектің қалыпты режимінің бұзылуын көрсетеді.

Керісінше жүйелі тоқ фильтр. (3.37-сурет). Тармақтар параметрінің ара қатынасы:

$$\underline{Z}_{AB} = R \quad \underline{Z}_{AC} = R e^{j60^\circ} \quad \underline{Z}_{BC} = R$$



3.37-сурет

Амперметр көрсеткіші, керісінше жүйелі тоққа теңдес. Дәлелдеу үшін келесі туындыны қарастырамыз.

Кирхгоф заңы бойынша:

$$R\underline{I}_{ab} + Re^{j60^\circ} \underline{I}_{bc} - R_1 \underline{I}_{ac} = 0; \quad (3.53)$$

$$\underline{I}_{ab} = \underline{I}_a - \underline{I}_{ac}; \quad \underline{I}_{bc} = \underline{I}_c - \underline{I}_{ac}. \quad (3.54)$$

(3.54) қоямыз (3.53)-ке табамыз:

$$R\underline{I}_a - R\underline{I}_{ac} + Re^{j60^\circ} \underline{I}_c - Re^{j60^\circ} \underline{I}_{ac} - R_1 \underline{I}_{ac} = 0.$$

Бұдан табамыз:
$$\underline{I}_{ac} = \frac{R\underline{I}_a + Re^{j60^\circ} \underline{I}_c}{R + Re^{j60^\circ} + R_1}. \quad (3.55)$$

$$\underline{I}_0 = 0, \text{ онда } \underline{I}_a = \underline{I}_1 + \underline{I}_2; \quad \underline{I}_c = a\underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2. \quad (3.56)$$

(3.56) (3.55) қоямыз, $1 + ae^{j60^\circ} = 0$, тең болса, табамыз:

$$\underline{I}_{ac} = \frac{R + a^2 Re^{j60^\circ}}{R + Re^{j60^\circ} + R_1} = k\underline{I}_2,$$

k -амперметр көрсеткіші мен керісінше жүйелі ток арасындағы теңдеу коэффициенті. Егерде, кедергі \underline{Z}_{ab} мен \underline{Z}_{bc} орын ауыстырса, амперметр көрсеткіші тікелей ток жүйесіне тең болады.

3.8.3 Симметриялы құрама арқылы қуатты анықтау

Симметриялы емес үш фазалы жүйе қуаты, үш фаза қуатының жиынына тең. Үш фазалы тізбектің кешенді толық қуатын кешенді фазалы кернеу мен ток арқылы көрсетеміз:

$$\underline{S} = \underline{U}_A^* \underline{I}_A + \underline{U}_B^* \underline{I}_B + \underline{U}_C^* \underline{I}_C \quad (3.57)$$

Фазалы кернеу мен тоқты, симметриялы құрама арқылы көрсетеміз:

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= \underline{U}_0 + \underline{U}_1 + \underline{U}_2; & \underline{I}_A &= \underline{I}_0 + \underline{I}_1 + \underline{I}_2; \\ \underline{U}_B &= \underline{U}_0 + a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2; & \underline{I}_B &= \underline{I}_0 + a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2; \\ \underline{U}_C &= \underline{U}_0 + a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2; & \underline{I}_C &= \underline{I}_0 + a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2.\end{aligned}\quad (3.58)$$

Жалғасқан кешенді фазалы тоқты жазу үшін $a = a^2, a^2 = a$ деп аламыз:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \underline{I}_0 + \underline{I}_1 + \underline{I}_2; & \underline{I}_B &= \underline{I}_0 + a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_0 + a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2.\end{aligned}\quad (3.59)$$

(3.58,.....3.59) (3.57) қою арқылы, табамыз:

$$\underline{S} = 3\underline{U}_0 \underline{I}_0 + 3\underline{U}_1 \underline{I}_1 + 3\underline{U}_2 \underline{I}_2, \quad (3.60)$$

(3.60) теңдеуден активті және реактивті қуат:

$$P = 3U_0 I_0 \cos \varphi_0 + 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 + 3U_2 I_2 \cos \varphi_2;$$

$$Q = 3U_0 I_0 \sin \varphi_0 + 3U_1 I_1 \sin \varphi_1 + 3U_2 I_2 \sin \varphi_2;$$

Керісінше және нөлді жүйелі құрамасы тізбекте бар болса, электр жабдықтарының тиімді пайдалануы азаяды. Нөлді жүйелі тоғы бейтарап сымды қыздырады және кернеуін түсіреді. Керісінше жүйелі тоғы үш фазалы машинада магнитті өрісінің пайда болуына, тікелей жүйелі алаңға әсер етеді, керісінше айналатын. Бұл айналыс сәттерін азайтады және қозғалтқышты қатты қыздырады.

3.8 Үш фазалы тізбекті симметриялы құрамдас әдісімен есептеу

Симметриялы құрамдас әдісінің негізгі үстіне қою (салу) қағидаты: берілген үш фазалы тізбектің симметриялы емес жұмыс режимі, үш симметриялы режимінің қосындысының қорытындысы түрінде көрсетіледі.

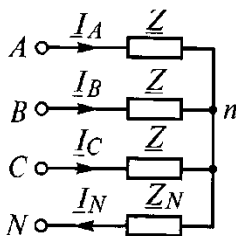
Симметриялы құрамдас әдісін қолдану, үш фазалы тізбектегі симметриялы құрамасының еркін әрекет етуіне негізделеді. Бұл қасиеттің тұжырымы мынада: симметриялы жүйе кернеуі, симметриялы үш тізбекке берілген, симметриялы ток жүйесінің пайда болуына әсер етеді және керісінше токтың әр симметриялы құрамасы сәйкес жүйедегі кернеудің түсуіне әсер етеді.

3.8.1 Түрлі жалғасқан токтың үш фазалы симметриялы тізбектегі кедергісі

Үш фазалы тізбектегі токты есептеу үшін тікелей, керісінше және нөлді жүйелі кернеу құрамасын білу жеткіліксіз. Кедергілерді білу керек, жалпы бұл жағдайда олар бірдей болмайды. Тікелей, керісінше және нөлді жүйедегі кешенді фазалы кернеудің сәйкес фазалы токқа арақатынасы, тізбектің кешенді кедергісі деп аталады:

$$\underline{Z}_1 = \frac{U_1}{I_1}; \quad \underline{Z}_2 = \frac{U_2}{I_2}; \quad \underline{Z}_0 = \frac{U_0}{I_0}; \quad (3.61)$$

Үш фазалы статистикалық тізбекте, яғни тізбектес айналмалы бөліктері бар электр машинасы жоқ тікелей және керісінше жүйедегі кедергі бірдей:



3.38-сурет

Нөлді жалғасқан кедергіге қосу сұлбасының мағынасы бар. Үш фазалы симметриялы тізбекті қарастырайық, онда $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}$ (3.38-сурет)

Бұндай тізбекте, симметриялы кернеу фазасының тікелейден керісіншеге өзгеруі, тоқ мағынасын өзгертпейді. Сондықтан бұл тізбекте $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}$.

Бұл тізбекте \underline{Z}_0 анықтаймыз, тізбек қысқышына нөлді жалғасты симметриялы кернеу жүйесі берілген: $\underline{U}_A = \underline{U}_B = \underline{U}_C = \underline{U}_0$.

Онда, тоқ жүйесіндегі симметриялы және нөлді жалғасты: $\underline{I}_A = \underline{I}_B = \underline{I}_C = \underline{I}_0$.

Бейтарап сымдағы тоқ $I_n = 3/I_0$ Кирхгофтың екінші заңы бойынша $AnNA$ контурына теңдеу құрамыз:

$$\underline{U}_A = \underline{I}_A \underline{Z}_A + \underline{I}_N \underline{Z}_N.$$

Бұл теңдеуге саламыз:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A = \underline{U}_0; \quad \underline{I}_A = \underline{I}_0; \quad \underline{I}_N = 3\underline{I}_0; \\ \underline{U}_0 = \underline{I}_0 \underline{Z} + 3\underline{I}_0 \underline{Z}_N = \underline{I}_0 (\underline{Z} + 3\underline{Z}_N), \end{aligned}$$

Бұдан,

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z} + 3\underline{Z}_N = \frac{\underline{U}}{\underline{I}}.$$

Егер де жүйеде бейтарап сым болмаса, нөлді жалғасты тоқ өтпейді. Онда:

$$\underline{Z}_0 = \infty; \quad \underline{I}_0 = 0.$$

Айналмалы бөліктері бар электр машиналарына:

$$\underline{Z}_1 \neq \underline{Z}_2 \neq \underline{Z}_3$$

Әдетте $\underline{Z}_1 > \underline{Z}_2$. қалыпты жұмыс режимінде, қозғалтқыш статор орамасына, тікелей жалғасты симметриялы кернеу жүйесі берілсе, магнитті өріс пен қозғалтқыш роторы бір жаққа айналады. Ротор айналымының жиілігі 1,5...4%, магнитті өрістің айналымынан аз болады.

Керісінше жалғасты тоқ пен кернеуге басқа жағдай болады. Қозғалтқыш роторының айналым жылдамдығын және бағытын қалыпты жұмыс режиміндегідей дейміз, орамасында, фазалар жалғасын өзгертеміз. Сонда қозғалтқыш орамасында, керісінше жалғасты симметриялы тоқ жүйесі өтеді, сол жылдамдықпен айналатын, қалыпты режимдегі, тек керісінше бағыттағы магнитті өріс пайда болдырады.

Бұл өрістің қатыстық жылдамдығы ротор өрісі жылдамдығынан көп болады.

Роторға берілген тоқтар өседі. Ротор тоғы магнитті ағымын туғызады, Ленц ережесі бойынша статор ағымына қарсы бағытталған. Егер де $I_1 = I_2$ болса, статор ағымы тікелей жалғасты Φ_1 тоқтан, тікелей жалғасты қорытындылау статор ағымынан көп болса, яғни $\Phi_1 > \Phi_2$ және $X_1 > X_2$ егер де статор орамасының активті кедергісі азғантай болса, $Z_1 > Z_2$ болады.

3.8.2 Симметриялы үш фазалы тізбек тоқтарын анықтау

Симметриялы тізбек есебін қарастырамыз симметриялы емес кернеу жүйесі берілді деп. Мысал түрінде, симметриялы емес кернеу жүйесімен қоректенсе қозғалтқышы бар тізбек болуы мүмкін. Келесі есептеу тәртібі ұсынылады.

1. Берілген симметриялы емес фазалы кернеу жүйесін симметриялы құрамаларға бөлеміз:

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C}{3}; \quad \underline{U}_1 = \frac{\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C}{3};$$

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C}{3}.$$

2. Ом заңы бойынша симметриялы тоқтар құрамасы анықталады:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1}; \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_2}; \quad \underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_0}.$$

3. Симметриялы құрамалар арқылы сызықты тоқтар анықталады:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_0 + \underline{I}_1 + \underline{I}_2; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_0 + a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_0 + a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2.$$

Сонымен, есептеу негізі теңестіру қағидаты болады, сондықтан бұл әдісті тек сызықты тізбекке қолдануға болады.

Мысалы. Асинхронды үш фазалы тоқ қозғалтқышта, симметриялы емес фазалы кернеу жүйесі берілген: $\underline{U}_A = 400 \text{ В}$; $\underline{U}_B = -j 300 \text{ В}$; $\underline{U}_C = j 300 \text{ В}$.

Қозғалтқыштың бейтарап нүктесі оқшауланған, тікелей және керісінше жалғасқан тоққа қозғалтқыш фазасының кедергісі: $\underline{Z}_1 = 6 + j 6 \text{ Ом}$; $\underline{Z}_2 = 0,3 + j 1,1 \text{ Ом}$.

Қозғалтқыш пайдаланатын сызықты тоғын, реактивті, активті және толық қуатын табу керек.

Есебі:

1. Фазалы кернеудің симметриялы құрамасы:

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C}{3} = \frac{400 - j300 + j300}{3} = 133 \text{ В};$$

$$\underline{U}_1 = \frac{\underline{U}_A + a \underline{U}_B + a^2 \underline{U}_C}{3} = \frac{400 + e^{j120^\circ} (-j300) + e^{j240^\circ} j300}{3} = 307 \text{ В};$$

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_A + a^2 \underline{U}_B + a \underline{U}_C}{3} = \frac{400 + e^{j240^\circ} (-j300) + e^{j120^\circ} j300}{3} = -40,7 \text{ В}.$$

2. Ом заңы бойынша тоқтың симметриялы құрамасын аңықтаймыз:

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_0} = \frac{133}{\infty} = 0;$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1} = \frac{307}{6 + j6} = 36,2 e^{-j45^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_2} = \frac{-40,7}{0,3 + j1,1} = -35,7 e^{-j75^\circ} \text{ A}.$$

3. СЫЗЫҚТЫ ТОҚТАР:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = 36,2 e^{-j45^\circ} - 35,7 e^{-j75^\circ} =$$

$$25,6 - j25,6 - 9,2 + j34,5 = 19,2 e^{j29^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{I}_B = a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 = 36,2 e^{-j45^\circ} e^{j240^\circ} -$$

$$35,7 e^{-j75^\circ} e^{j120^\circ} = 69 e^{-j160^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{I}_C = a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 = 36,2 e^{-j45^\circ} e^{j120^\circ} -$$

$$35,7 e^{-j75^\circ} e^{j240^\circ} = 51 e^{j29^\circ} \text{ A}.$$

Тексеруі: $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$.

4. АКТИВТІ ҚУАТ:

$$P = \operatorname{Re} \left| 3 \underline{U}_0^* \underline{I}_0 + 3 \underline{U}_1^* \underline{I}_1 + 3 \underline{U}_2^* \underline{I}_2 \right| = 3 U_1 I_1 \cos \varphi_1 +$$

$$3 U_2 I_2 \cos \varphi_2 =$$

$$= 3 \cdot 307 \cdot 36,2 \cdot \cos 45^\circ + 3 \cdot 40,7 \cdot 35,7 \cdot \cos 75^\circ = 24,7 \text{ кВт}.$$

5. РЕАКТИВТІ ҚУАТ:

$$Q = \operatorname{Im} \left| 3 \underline{U}_1^* \underline{I}_1 + 3 \underline{U}_2^* \underline{I}_2 \right| = 3 U_1 I_1 \sin \varphi_1 + 3 U_2 I_2 \sin \varphi_2 =$$

$$= 3 \cdot 307 \cdot 36,2 \cdot \sin 45^\circ + 3 \cdot 40,7 \cdot 35,7 \cdot \sin 75^\circ = 27,8 \text{ кВар}.$$

6. Толық қуат:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{24,7^2 + 27,8^2} = 37,2 \text{ кВА};$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{24,7}{37,2} = 0,68.$$

3.9.3. Симметриялы кернеу жүйесі көрек көзіндегі симметриялы емес тізбекті есептеу

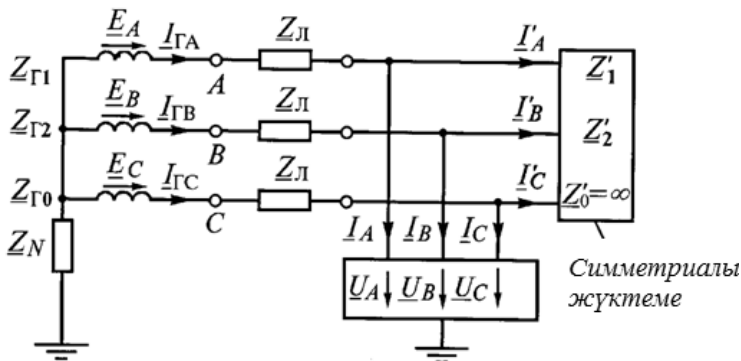
Егер де тізбек симметриялы емес болса, симметриялы кернеу жүйесінің көрек көзінде де, симметриялы емес тоқ жүйесін аламыз, негізінде, ол барлық үш жалғастың симметриялы құрамасынан тұрады. Бұл жағдайда, өтпелі қағидатын пайдалануға болады және симметриялы емес участкесін симметриялы емес ЭҚК жүйесімен ауыстыруға болады. Қорытындысында, симметриялы тізбек пен симметриялы емес ЭҚК жүйесін аламыз, оны симметриялы құрамдарға бөлуге болады.

Симметриясыздың екі түрі болады: көлденең және ұзынынан. Көлденең симметриясыз, симметриялы емес жүктемені симметриялы үш фазалы тізбекке қосқанда пайда болады. Оған симметриялы емес қысқа тұйықталу түрлері жатады (фаза арасындағы, бір немесе екі фазаның жерге тұйықталуы).

Ұзынынан симметриясыз, үзілген фаза бірдей емес кедергіні қосса және бір немесе екі фазада үзілу болса, пайда болады.

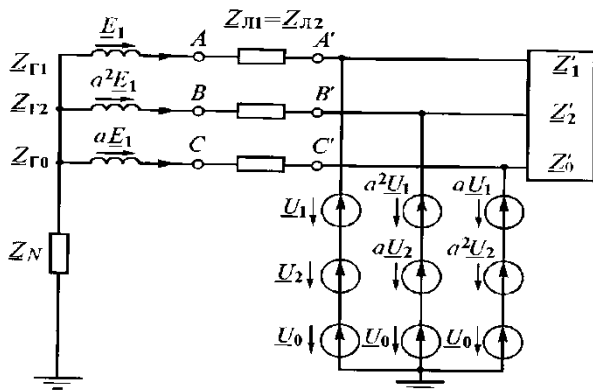
Көлденең симметриясыз үш фазалы тізбекті есептеу.

Мысалы: 3.39-суреттегі тізбек есебін қарастырайық. Үш фазалы синхронды генератор симметриялы ЭҚК жүйесі бар, сызығы мен жүктемесі бар, біреуі симметриялы, екіншісі симметриялы емес.



3.39-сурет

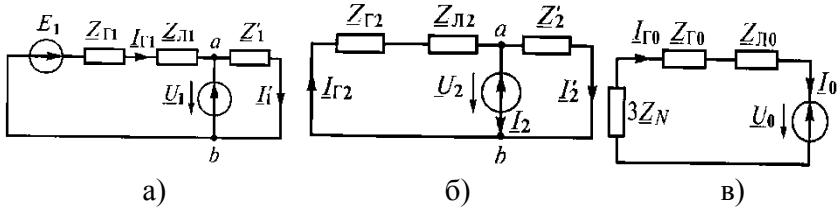
Симметриялы емес жүктемені үш белгісіз кернеумен \underline{U}_A , \underline{U}_B және \underline{U}_C бұлағымен алмастырамыз. Симметриялы сұлба пайда болады, генератордың симметриялы ЭҚК жүйесі мен симметриялы емес кернеу жүйесі бар. Бастапқы фазаны А десек, симметриялы сұлбаны табамыз (3.40-сурет)



3.40-сурет

Әр симметриялы кернеу жүйесі сол бағыттағы ток жүйесін пайда қылады. Сондықтан, үш тәуелсіз сұлба құрастыруға болады: тікелей жалғасқан кернеу жүйесіне (3.41 а-сурет) керісінше жалғасқан кернеу жүйесіне (3.41 б-сурет) нөлді жалғасқан кернеу жүйесіне (3.41 в-сурет).

Тікелей және керісінше жалғасқан сұлба конфигурациясы бірдей. Нөлді жалғасқан сұлба айырмашылығы, симметриялы сұлбада нөлді жалғасқан тоқ өтпейді. Бұл сұлбадағы бейтарап сым кернеу бастапқы тізбек сұлбасының бейтарап сым \underline{Z}_N кернеуінің 3-ке көбейгеніне тең.

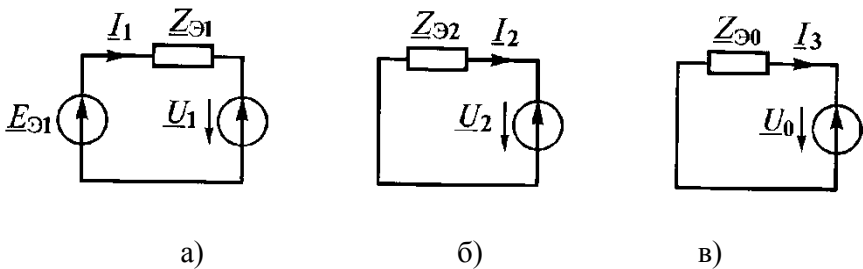


3.41-сурет

Тікелей жалғасқан сұлба есебі (3.41 а-сурет) эквивалентті генератор әдісімен есептейміз.

а, б қысқашқа қатысты барлық сұлбаны, параметрлары $\underline{E}_{\mathcal{E}1}$ мен $\underline{Z}_{\mathcal{E}1}$ және ЭҚК кернеу \underline{U}_1 эквивалентті генератор деп көрсетеміз. (3.42 а-сурет):

$$\underline{E}_{\mathcal{E}1} = \frac{\underline{E}_1 \underline{Z}'_1}{\underline{Z}_{\Gamma 1} + \underline{Z}_{\text{Л}1} + \underline{Z}'_1}; \quad \underline{Z}_{\mathcal{E}1} = \frac{\underline{Z}_{\Gamma 1} + \underline{Z}_{\text{Л}1} \underline{Z}'_1}{\underline{Z}_{\Gamma 1} + \underline{Z}_{\text{Л}1} + \underline{Z}'_1}; \quad \underline{E}_1 = \underline{E}_A.$$



3.42-сурет

Кирхгофтың екінші заңы бойынша:

$$\underline{E}_{\mathcal{E}1} = I_1 \underline{Z}_{\mathcal{E}1} + \underline{U}_1. \quad (3.62)$$

Керісінше жалғасқан сұлбада, генератор тармақтары мен симметриялы жүктемені біріктіріп (3.42 б-сурет) теңдеу табамыз.

$$0 = \underline{I}_2 \underline{Z}_{\Sigma 2} + \underline{U}_2, \quad (3.63)$$

бұл жерде

$$\underline{Z}_{\Sigma 2} = \frac{(\underline{Z}_{Г2} + \underline{Z}_{Л2}) \underline{Z}'_2}{\underline{Z}_{Г2} + \underline{Z}_{Л2} + \underline{Z}'_2}$$

Нөлді жалғасқан сұлбада, нөлді жалғасқан эквивалентті кедергі және кернеу бар ЭҚК ретінде көрсетеміз (3.42 в-сурет)

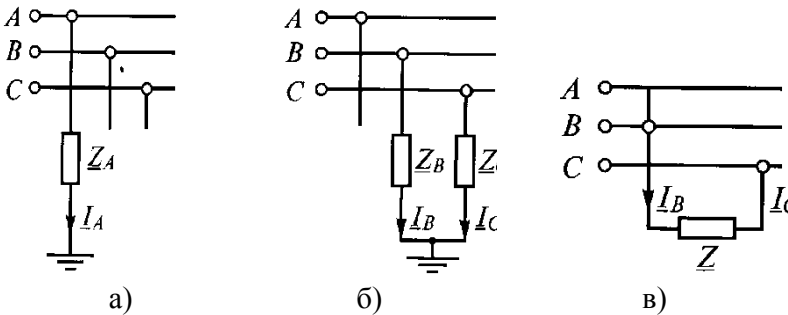
$$0 = \underline{I}_0 \underline{Z}_{\Sigma 0} + \underline{U}_0, \quad (3.64)$$

бұл жерде $\underline{Z}_{\Sigma 0} = \underline{Z}_{г0} + \underline{Z}_{л0} + 3\underline{Z}_N$

Симметриялы емес режимді үш симметрияға бөліп, үш теңдеу табамыз. (3,62.....3,64), алты белгісіз бар: $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0, \underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_0$.

Теңдеу белгісіздерін, нақты сұлба және симметриялы емес бөлігінің белгілі параметрлерін есепке алып, табуға болады.

Мысалы, 3.43-суреттегі тізбекті қарайық.



3.43-сурет

3.43 а-суреттегі бірінші сұлбада, А фазасындағы кедергі арқылы симметриясыз пайда болады. Сондықтан

$$\underline{U}_A = \underline{I}_A \underline{Z}_A; \quad \underline{I}_B = 0; \quad \underline{I}_C = 0.$$

Симметриялы құрама арқылы, кернеу мен тоқты түзетіп, үш қосымша теңдеулер табамыз.

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0) \underline{Z}_A; \\ a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0 &= 0; \quad a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0. \end{aligned} \quad (3.65)$$

Екінші сұлбада (3.43 б-сурет) В және С фазасындағы кедергі арқылы симметриясыз пайда болады. Сондықтан

$$\underline{I}_A = 0; \quad \underline{U}_B = \underline{I}_B \underline{Z}_B; \quad \underline{U}_C = \underline{I}_C \underline{Z}_C.$$

Осы теңдіктер арқылы қосымша теңдеулер табамыз:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 &= 0; \\ a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= (a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0) \underline{Z}_B; \\ a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= (a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0) \underline{Z}_C. \end{aligned} \quad (3.66)$$

Үшінші сұлбада (3.43 в-сурет) екі фазалы жүктеме арқылы симметриясыз пайда болады. Жерге қосылмаған. Нөлді жалғасқан тоқтар нөлге тең. Сондықтан, төрт белгісізі бар $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{U}_1, \underline{U}_2$, екі теңдеу қалады.

$$\underline{I}_A = 0; \quad \underline{U}_B - \underline{U}_C = \underline{I}_B \underline{Z}$$

Осы теңдік арқылы, қосымша теңдеу табамыз:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 + \underline{I}_2 &= 0; \\ a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 - (a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2) &= \underline{Z} (a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2) \end{aligned} \quad (3.67)$$

Сонымен, негізгі (3.62.....3.64) және қосымша (3.65.....3.67) теңдеулер арқылы, симметриялы емес жүктемеде симметриялы тоқтар құрамасын табуға болады.

Симметриялы емес жүктемедегі нақты тоқтар:

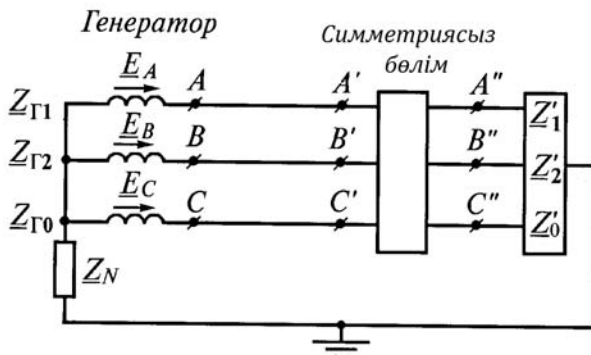
$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0; \quad \underline{I}_B = a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0; \\ \underline{I}_C &= a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0. \end{aligned}$$

Осыдан кейін симметриялы құрамалардың тікелей, керісінше және нөлді жалғасқан сұлбадағы тармақтарға бөлінгенін табамыз.

Әр тармақтағы тоқтар құрамасы бойынша, әр фазадағы нақты тоқты, кернеудің төмендеу құрамасы мен сұлба бөлігіндегі фазалы кернеуді анықтаймыз.

Ұзынынан симметриясыз үш фазалы тізбекті есептеу

Бұл симметриясыз болу түрі сызықтағы кедергі бірдей болмаса немесе үзінді болса пайда болады. Мысалы: ретінде (3.44-суретті) қарайық, симметриялы ЭҚК жүйе бұлағы, симметриялы участкесі бар сызық және симметриялы жүктемесі бар



3.44-сурет

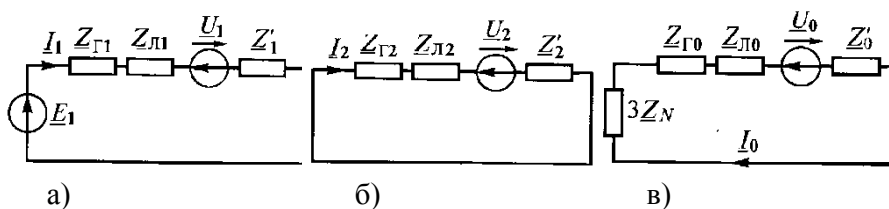
Бұл сұлбада бұлақ (генератор) және жүктеме (мысалы қозғалтқыш) үш түрлі кедергілері, ал сызықта бірдей тікелей және керісінше жалғасқан кедергісі бар.

Симметриясызды қалай есепке аламыз?

Ол үшін симметриясыз участкелерді, үш ЭҚК кернеу бұлағымен алмастырамыз, төмендегі формулалармен табамыз:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A'A''} &= \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0; \quad \underline{U}_{B'B''} = a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 + \underline{U}_0; \\ \underline{U}_{C'C''} &= a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2 + \underline{U}_0. \end{aligned} \quad (3.68)$$

Бұл жағдайда, сұлбаны үш бөлікке бөліп бір фазаны есептеуге мүмкіндік береді (тікелей, керісінше және нөлді жалғасқан) 3.45 сурет

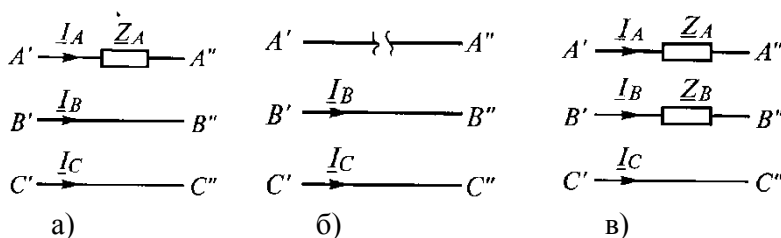


3.45-сурет

Кирхгофтың екінші заңы бойынша, теңдеулер жүйесін табамыз:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_1(\underline{Z}_{\Gamma 1} + \underline{Z}_{\text{Л}1} + \underline{Z}'_1) + \underline{U}_1 &= \underline{E}_1; \\
 \underline{I}_2(\underline{Z}_{\Gamma 2} + \underline{Z}_{\text{Л}2} + \underline{Z}'_2) + \underline{U}_2 &= 0; \\
 \underline{I}_0(\underline{Z}_{\Gamma 0} + \underline{Z}_{\text{Л}0} + \underline{Z}'_0 + 3\underline{Z}'_N) + \underline{U}_0 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.69}$$

Бұл теңдеулерде алты белгісіз бар $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0, \underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_0$. Сондықтан, симметриясызды ескере отырып үш қосымша теңдеулер құрастырамыз. Мысалы үшін, 3.46 суреттегі сұлбаны қарастырамыз.



3.46-сурет

3.46 а-суретте, фаза А-дағы кедергімен симметриясыз пайда болады. Симметриялы емес участкадегі кернеулер.

$$\underline{U}_{AA''} = \underline{I}_A \underline{Z}_A; \quad \underline{U}_{BB''} = 0; \quad \underline{U}_{CC''} = 0.$$

Оларды симметриялы құрамаға жазып, қосымша теңдеулер табамыз.

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0)\underline{Z}_A;$$

$$a^2\underline{U}_1 + a\underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0; \quad a\underline{U}_1 + a^2\underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0. \quad (3.70)$$

Сұлбада, фаза А-ның үзілуінен симметриясыз пайда болады, төменгі теңдіктерді жазамыз

$$\underline{I}_A = 0; \quad \underline{U}_{B'B''} = 0; \quad \underline{U}_{C'C''} = 0.$$

Қосымша теңдеулер.

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0; \quad a^2\underline{U}_1 + a\underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0;$$

$$a\underline{U}_1 + a^2\underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0. \quad (3.71)$$

Үшінші сұлбада (3.46 в-сурет) симметриясыз, А мен В фазасындағы кедергіден пайда болады. Симметриялы емес учаскедегі кернеулер.

$$\underline{U}_{A'A''} = \underline{I}_A \underline{Z}_A; \quad \underline{U}_{B'B''} = \underline{I}_B \underline{Z}_B; \quad \underline{U}_{C'C''} = 0.$$

Қосымша теңдеулер түрлері.

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0)\underline{Z}_A;$$

$$a^2\underline{U}_1 + a\underline{U}_2 + \underline{U}_0 = (a^2\underline{I}_1 + a\underline{I}_2 + \underline{I}_0)\underline{Z}_B;$$

$$a\underline{U}_1 + a^2\underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0 \quad (3.72)$$

(3.69) және (3.70....3.72) теңдеулерді қосып есептеп, кедергімен тоқтың симметриялы құрамасын табамыз.

Сызықтағы нақты тоқтар

$$\underline{I}_A = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0; \quad \underline{I}_B = a^2\underline{I}_1 + a\underline{I}_2 + \underline{I}_0;$$

$$\underline{I}_C = a\underline{I}_1 + a^2\underline{I}_2 + \underline{I}_0.$$

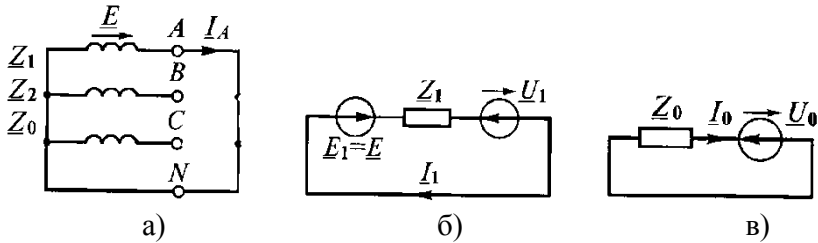
Симметриялы емес учаскедегі нақты кернеулер

$$\underline{U}_{AA'} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0; \quad \underline{U}_{BB'} = a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 + \underline{U}_0;$$

$$\underline{U}_{C'C''} = a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2 + \underline{U}_0.$$

Қысқа тұйықталу тоғын, симметриялы құрамалар әдісімен есептеу

Қысқа тұйықталу дегеніміз-әлеуеті бірдей емес қысқыштардың өзара қосылуы, б тізбектегі кедергінің азаюы, тоқтың өсуі. Тұйықталған және тұйықталмаған участка параметрлерінің есептеуі қиын болғандықтан, тұйықталмаған фаза тоғын есептемесе де болады



3.47-сурет

Бір фазалы қысқа тұйықталу 3.47 а-сурет, А фазасы қысқа тұйықталғанда $\underline{I}_B = \underline{I}_C = 0$; $\underline{U}_A = 0, \underline{I}_A = ?$

Генератор ЭҚК жүйесі симметриялы болғандықтан $\underline{E}_1 = \underline{E}$; $\underline{E}_2 = 0$; $\underline{E}_0 = 0$. Тікелей, керісінше және нөлді жалғасқан симметриялы құрамалар есебі 3.47 б, в, ғ-суретте көрсетілген. Кирхгофтың екінші заңы бойынша теңдеулер

$$\underline{U}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = \underline{E}; \quad (3.73)$$

$$\underline{U}_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = 0; \quad (3.74)$$

$$\underline{U}_0 + \underline{I}_0 \underline{Z}_0 = 0; \quad (3.75)$$

(3,73.,3,74, 3,75) теңдеулерді қосып, $\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0 = \frac{\underline{I}_A}{3}$ деп табамыз.

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 + \frac{\underline{I}_A}{3} (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0) = \underline{E}.$$

Бұл жерде $\underline{U}_A = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0$, сондықтан

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{1k} = \frac{3E}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}. \quad (3.76)$$

Екі фазалы қысқа тұйықталу (3.48 а-сурет) В мен С фаза арасындағы қысқа тұйықталу

$$\underline{I}_A = 0, \quad \underline{I}_B = -\underline{I}_C; \quad \underline{U}_{BC} = 0.$$

$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C$ теңдеп, фазалы кернеуді симметриялы құрама арқылы табамыз.

$$\underline{U}_B = a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 + \underline{U}_0; \quad (3.77)$$

$$\underline{U}_C = a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2 + \underline{U}_0. \quad (3.78)$$

3.77 мен 3.78 айырмашылығын табамыз

$$\underline{U}_B - \underline{U}_C = (a^2 - a) \underline{U}_1 + (a - a^2) \underline{U}_2 = 0.$$

$a^2 - a = -j\sqrt{3}$; $a - a^2 = j\sqrt{3}$ теңдеулерді есепке алып, табамыз

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2. \quad (3.79)$$

Ажырату формуласы арқылы тоқтың симметриялы құрамасын қысқа тұйықталған тоқ арқылы көрсетеміз

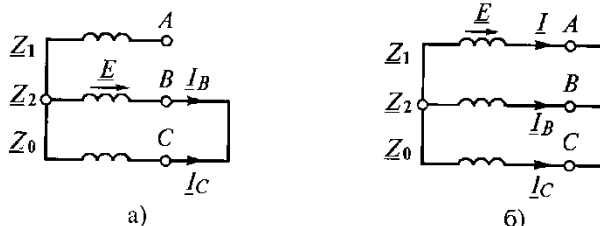
$$\underline{I}_0 = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) = 0; \quad (3.80)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a \underline{I}_B + a^2 \underline{I}_C) = \frac{\underline{I}_B}{3}(a - a^2); \quad (3.81)$$

$$\underline{I}_2 = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a^2 \underline{I}_B + a \underline{I}_C) = \frac{\underline{I}_B}{3}(a^2 - a). \quad (3.82)$$

(3.81) бен (3.82) ден $(a - a^2) = -(a^2 - a)$ есепке алып табамыз

$$\underline{I}_1 = -\underline{I}_2. \quad (3.83)$$



3.48-сурет

Нөлді жалғасқан тоқ нөлге тең болғандықтан 3.48-суреттегі тізбекте көрсетілмеген.

Кирхгофтың екінші заңы бойынша теңдеулер.

$$\underline{U}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = \underline{E}; \quad \underline{U}_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = 0$$

(3.79) бен (3.83) есепке алып жазамыз

$$\underline{U}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1 = \underline{E}; \quad (3.84)$$

$$\underline{U}_2 - \underline{I}_1 \underline{Z}_2 = 0. \quad (3.85)$$

(3.84) пен (3.85) ден

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}. \quad (3.86)$$

Кері жүйені (3.83) осылай тоқпен ескереміз

$$\underline{I}_2 = \frac{-\underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}. \quad (3.87)$$

B фазасындағы ток

$$\underline{I}_B = \underline{I}_0 + a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 = (a^2 - a) \underline{I}_1 = -\frac{j\sqrt{3}\underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}. \quad (3.88)$$

C фазасындағы ток

$$\underline{I}_{k2} = \underline{I}_C = -\underline{I}_B = \frac{j\sqrt{3}\underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}. \quad (3.89)$$

Үш фазалы $|\underline{I}_A| = |\underline{I}_B| = |\underline{I}_C|$ қысқа тұйықталу (3.48 б) тізбек симметриялысына қарай

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1}; \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1} e^{-j120^\circ}; \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1} e^{-j240^\circ}. \quad (3.90)$$

(3.76), (3.89), (3.90) теңдеулерді, $\underline{Z} \gg (\underline{Z} + \underline{Z})$ есепке алып салыстырып, бір фазалы, екі фазалы үш фазалы тұйықталу тоқтар модулінің теңсіздігін табамыз $I_{k1} > I_{k2} > I_{k3}$.

Бақылау сұрақтары.

1. Үш фазалы синхронды генератордың жұмысын түсіндіріңіз.
2. Симметриялы үш фазалы жүйе қуаттары.
3. Күрделі үш фазалы тізбектің симметриялы режимін есептеу.
4. Үш фазалы тізбектің симметриялы емес режимін есептеу.
5. Жұлдыз түрінде бейтарап сыммен қосу түрін түсіндіріңіз және фазалық токтарды табыңыз.
6. Жүктемені үш бұрышты қосу және тізбекті есептеу.
7. Бір фазалы және үш фазалы қабылдағышы бар тізбекті есепте.
8. Үш фазалы тізбектегі қуаттарды өлшеу.
9. Симметриялы жүктемедегі активті қуатты өлшеу.
10. Симметриялы емес жүктемедегі активті қуатты өлшеу.
11. Екі ваттметр көрсеткіші бойынша біркелкі жүктемеде реактивті қуатты анықтау.
12. Жұлдыз және үшбұрыш түрінде қосылған векторлы диаграммалар.
13. Айнымалы магнитті алау.
14. Дірілдеген магнит алауы.
15. Үш фазалы асинхронды қозғалтқыштың іс-әрекет қағидаты.
16. Симметриялы үш фазалы тізбек токтарын анықтау.
17. Симметриялы емес үш фазалы тізбекті есептеніз.

IV ТАРАУ

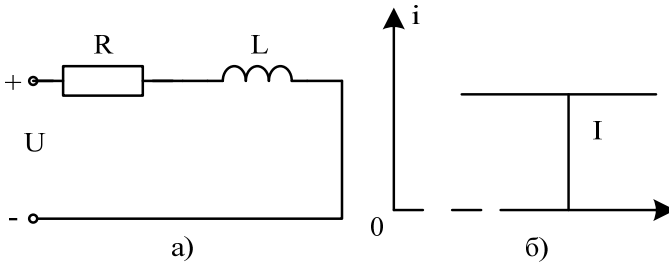
4. Электр тізбектегі өтпелі процестер

4.1 Жалпы мәлімет

Өткен бөлімдерде тұрақты режимдегі электр тізбегінің жұмыстарын қарастырдық, яғни өзгермейтін кернеу, тоқ, кедергі жүйесіндегі режимдер қаралады.

Мысалы, тізбектегі тоқ тізбектелген резистор мен катушкасы бар (4.1 а, в-сурет) тұрақты тоқ көрегімен қуаттанады:

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



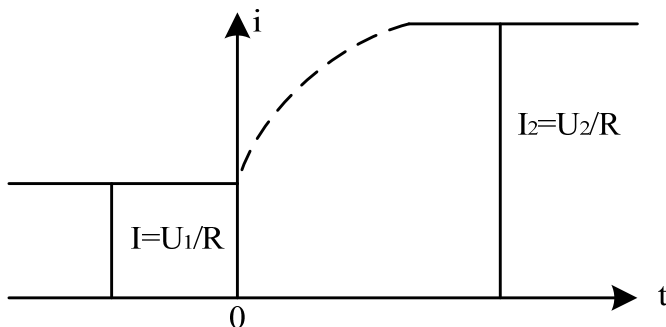
4.1-сурет.

Теория бойынша осындай тоқ тізбеке қосқанда шексіз көп уақыттан кейін, ал тәжірибеде соңғы белгілі уақытта тұрақтанады.

Егер де өзгермейтін тоқ тұрақталғанда, кернеуді қайта өзгертсек оған сәйкес тоқ та өзгереді. Тұрақталған бір режимнен екіншіге ауысу тез болмайды, біраз уақыт өткеннен кейін болады. (4.2-сурет). Бір тұрақталған режимнен екіншісіне ауысқандағы тізбектегі пайда болатын үдеріс (процесс) өтпелі деп аталады. Өтпелі үдерістер, тізбек параметрларының кенеттен өзгеруінен пайда болады, не тармақтарды қосып және ажыратқанан. Электр тізбегінің жұмыс режимінің кенеттен өзгерген уақытын, бастапқы (нөлді) уақыт сәті деп алады, осыған қарай тізбек жағдайын сипаттайды және өтпелі үдерісті жазады. Өтпелі тоқты, кернеуды, ЭҚК, т.б. кішкентай әріппен белгілейді, ал олардың нақты мағыналарын уақыт сәтімен. Арада режим өзгермегендегі уақыт сәтіндегі тоқты $i(0_-)$ деп белгілейді, ол солардан қатынасы бар режим өзгергендегі бастапқы уақыт сәтіндегі тоқ $i(0_+)$, ал берілген уақыт сәтіндегі тоқ $-i(t)$, өтпелі үдеріс аяқталғандағы

тұрақталған ток мағынасы $-i(\infty)$. Қарастыратын 4.2-суретте – $i(0_-) = i(0_+) = I_1$; $i(\infty) = I_2$

Тұрақталған Өтпелі Тұрақталған
режім 1 үдеріс режім 1



4.2-сурет.

Өтпелі үдеріс ұзақтылығы өте аз болуы мүмкін және секундпен есептеледі, ал процессті сипаттайтын ток пен кернеу және басқа параметрлер, үлкен және тосын мағынаға жетулері мүмкін.

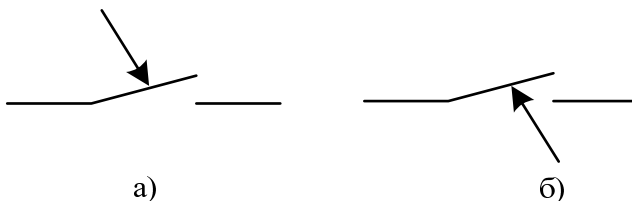
Мысалы, көп индуктивтілары бар тізбекті ажырытқанда кернеудің аса көбеюі пайда болады, ток та тез өзгереді, ЭҚК-ның өз индукциясы көбейеді:

$$e_L = -L \frac{di}{dt}$$

Тізбекті кенеттен ажыратса, осы ЭҚК болдырмайтын мөлшерімен электр қондырғы оқшаулығына қауіптілік тудырады немесе электр доғасы пайда болуына әсер етеді тізбектің ажыраған жерінде және ажыраған тізбек араларында қысқа тұйықталу режіміне көшеді. Өтпелі үдерістегі токтың өзгеру мысалдары, электр машинасы мен трансформатордың кенеттен қысқа тұйықталуы, конденсаторы бар тізбекті қосу т.б. Өтпелі үдерістің қысқаша талдауынан қорытынды жасауға болады, оны оқу инженерлік проблемаларды шешу үшін өте қажет деп есептейміз. Сондықтан электр тізбектеріндегі өтпелі үдерістер толық анализды талап етеді.

4.1.1. Коммутация заңдары

Өтпелі процестер тізбектегі коммутациялар арқылы болады. Коммутация дегеніміз – аппараттардың көп тоқтарының тұйықталуы мен ажырауы. (4.3 а, б-сурет) Осыған байланысты электр тізбегіндегі параметрлердің кенеттен өзгерулеріне байланысты коммутацияға дейінгі энергетикалық күйден коммутациядан кейінгі энергетикалық режим күйіне көшу пайда болады.



4.3-сурет.

Өтпелі үдерісті талдауға, коммутацияның екі заңы пайдаланылады.

Коммутацияның бірінші заңы, индуктивті катушкасы бар кез келген тармақта, тоқ пен магнит ағымы, коммутация сәтінде, коммутацияға дейінгі мағынасын сақтайды, одан кейін сол мағынадан бастап өзгере бастайды, немесе L-ден тоқ секіріп өте алмайды.

Бұл заңды, теңдік түрінде жазып көреміз:

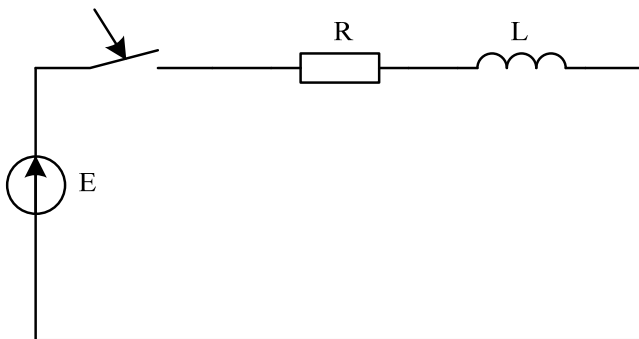
$$i_L(0_-) = i_L(0_+).$$

Бұл заңды дәлелдеу үшін Кирхгофтың екінші заңы бойынша жасалған тізбектің (4.4-сурет) теңдеуін қарастырамыз:

$$E = iR + L \frac{di}{dt}$$

Егер де, тізбектегі тоқ секіріп өзгереді десек, онда катушка кернеуі шексіздікке тең болады:

$$L \frac{di}{dt} = \infty$$



4.4-сурет.

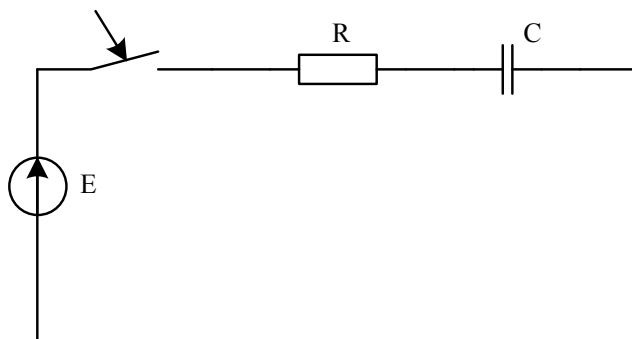
Бұл жағдайда тізбекте Кирхгоф заңы сақталмайды. Ол егер де, коммутация сәтінде, бірнеше тізбек өзара индуктивтілік пен байланысты болса және әр катушкада серпілу магнит ағымы болмаса мүмкін емес, жалпы магнит ағымы секіріп өзгере алмайды, ал тоқ әр тізбекте секіріп өзгереді. Коммутацияның екінші заңы: конденсаторы бар кез-келген тармақта, коммутация сәтінде, кернеу мен заряд тікелей коммутация алдындағы мағыналарын сақтайды, әрі қарай сол мағынадан бастап өзгереді.

Басқаша, конденсатордағы кернеу секіріп өзгере алмайды.

$$u_C(0_-) = u_C(0_+)$$

Бұл заңды дәлелдеу үшін, Кирхгофтың екінші заңы бойынша 4.5 суреттегі тізбек теңдеуін қарастырамыз:

$$E = iR + u_C = RC \frac{du_C}{dt} + u_C.$$



4.5-сурет

Егер де конденсатордағы кернеу секіріп өзгереді десек, $du_c/dt = \infty$

онда Кирхгофтың екінші заңы бұзылады.

Бірақ, конденсатордан өтетін ток секіріп өзгереді,

$$i = C \frac{du_c}{dt}$$

бұл Кирхгофтың екінші заңына қайшы келмейді.

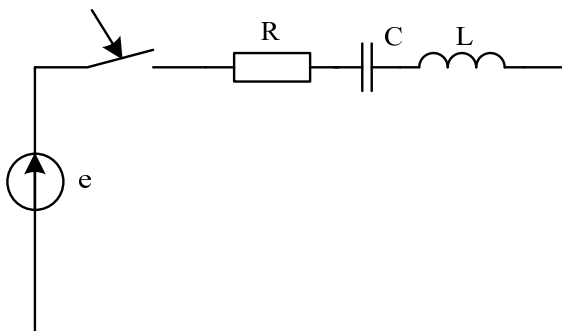
Энергетика заңдарының көзқарастары бойынша катушкадан өтетін ток күшімен конденсатордағы кернеу секіріп өте алмайтыны оларда сақталып қалған: катушкадағы магнит өрісінің энергиясы $\frac{Li^2}{2}$ және конденсатордағы электр өрісі $-Cu^2/2$ энергиялары кенеттен өзгермейді.

4.1.2. Өтпелі және еркін үдерістер

Электр тізбектегі өтпелі үдерісті, тұрақталған және еркін үдерістер түрінде елестетуге болады. Тармақталмаған R , L , C тізбекте (4.6-сурет) Кирхгофтың екінші заңы бойынша ЭҚК теңдеуінің жазылу түрі:

$$iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = e \quad (4.1)$$

i - ауыспалы ток



4.6-сурет.

Өтпелі үдеріс өтіп, тұрақты режим жеткенде (4.1) теңдеудің түрі мынандай болады:

$$i_y R + L \frac{di_y}{dt} + \frac{1}{C} \int i_y dt = e \quad (4.2)$$

$$(4.2) \text{ ден } (4.1) \text{ алғанда: } i_{cb}R + L \frac{di_{cb}}{dt} + \frac{1}{C} \int i_{cb} dt = 0 \quad (4.3)$$

$$\text{немесе: } u_{Rcb} + u_{Lcb} + u_{Ccb} = 0 \quad (4.3 \text{ а})$$

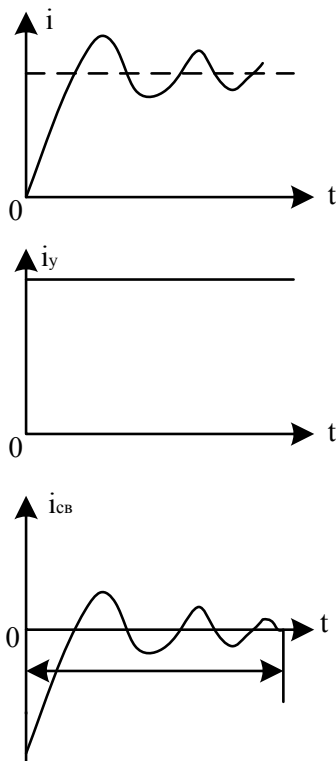
Бұл теңдеулерде тоқ пен кернеудің еркін құрамалары бар.

$$i_{cb} = i - i_y; u_{Ccb} = u_C - u_{Cy}; u_{Lcb} = u_L - u_{Ly} \quad (4.4)$$

Өтпелі және тұрақталған тоқ пен кернеу айырымдары тарап еркін тоқ пен еркін кернеу деп аталады. Бұл құрамалар 4.7-суретте графика қисықтары арқылы көрсетілген.

Сонымен, нақты үдерісті екіге бөлдік. Тікелей коммутациядан кейін пайда болған тұрақталған тоқ пен өтпелі үдеріс уақытында пайда болатын еркін ток:

$$i = i_y - i_{cb}; u_R = u_{Ry} + u_{Rcb}; \\ u_L = u_{Ly} + u_{Lcb}; u_C = u_{Cy} + u_{Ccb}.$$



4.7-сурет.

Дифференциалды теңдеулерді шешу үшін интегралдың тұрақты заттарын табуымыз керек.

Оларды, катушкасы бар тізбектегі еркін тоқтың және конденсатордағы кернеудің бастапқы мәндерінен табады.

Мысалы: 4.6-суреттегі тізбекті қарастырайық, коммутациядан бұрын тоқ ажыраған және конденсатор зарядталмаған:

$$i_c(0_-) = 0; u_c(0_-) = 0.$$

Коммутациядан кейін тұрақталған режимде:

$$\dot{i}_{Ly} = 0; u_{Cy} = e.$$

(4.4) теңдеу арқылы конденсатордағы катушкадағы еркін ток пен кернеудің бастапқы мағыналарын табамыз:

$$\begin{aligned}i_{Lcb}(0_+) &= i_L(0_+) - i_{Ly}(0_+) = -i_{Ly}(0_+); \\u_{ccb}(0_+) &= u_c(0_+) - u_{Cy}(0_+) = -u_{Cy}(0_+).\end{aligned}$$

Коммутациядан кейін тізбекте:

$$\begin{aligned}i_{Lcb}(0_+) &= i_L(0_+) - i_{Ly}(0_+); \\u_{ccb}(0_+) &= u_c(0_+) - u_{Cy}(0_+).\end{aligned}$$

4.1.3. Өтпелі үдерісті есептеу әдістерінің ерекшеліктері

Электр тізбегіндегі өтпелі үдерісті есептеу және талдау үшін келесі әдістер қолданылады: классикалық, операторлық, жиілік және Дюамели интегралы арқылы. Әр әдісті жеке және толығырақ қарастырайық.

Классикалық әдіс тізбектің дифференциалды теңдеуін шешуге бағытталған, Кирхгофтың бірінші және екінші заңдары бойынша ток пен кернеудің лездік мәндерінен құралған. Шешімі – сипаттама теңдеулерінің түбірлерін, өтпелі процестің еркін құрамасын, интегралдау тұрақтылықтарын, және өтпелі тоқтар мен кернеулерін анықтау. Классикалық әдістің ерекшелігі есепте нақты шама мен уақыт алынады. Есеп қорытындысы график түрінде көрсетіледі. Бұл есептер қиын және көп уақыт алады, сондықтан жоғарыдағы шешуде есептеу техникасы пайдаланылады.

Өтпелі үдерісті оператор әдісімен шешу: түпнұсқа деп аталатын нақты уақыт функциясын – бейнелеу деп атайтын басқа функциямен аустырады.

Бұл алмастыру Лапласың тікелей өзгерту теориясының көмегімен таза математика жолымен орындалады. Бейнелеу

функциясы уақытты емес, кешенді айнымалысы болады. Оны графика түрінде көрсету мүмкін емес.

Бұл кемшілік оператор әдісін, классикалық әдіспен салыстырғандағы артықшылығымен өтеледі, себебі дифференциалдау және интегралдау, уақытпен өтетін операциялар, алгебралық көбейту және болу операцияларымен өтелінеді. Теңдеулер жүйесін есептеп, бастапқы функция бейнесін табамыз, одан түпнускаға көшеді. Осы ерекшелігіне байланысты операторлық әдіс, инженерлік тәжірибеде кеңінен қолданылады.

Жиілік әдіспен есептеу операторлық әдіске ұқсас. Оның ерекшелігі есептегенде кіріс кедергілерінің эксперименталды сипаттамасын немесе тізбектің өткізгіштігін пайдалануға болады.

Жиілік әдіс, сызықты жүйе автоматикасының реттеуінің талдауы мен синтезінде кеңінен қолданылады, яғни жүйедегі өтпелі процесінің сапасын бағалауда (тұрақтылығын, тез әрекетін, фазасынның кешігуі, реттеуінің ауысуы, т.б.). Бұл мақсатта жиілік әдісті басқа пәндерде де пайдаланады.

Дюамели интегралы көмегімен өтпелі үдерісті, егер пассивті екі ұштық кернеуі күрделі заңмен өзгерсе есептеуге болады.

4.2. Өтпелі үдерісті классикалық әдіспен есептеу

4.2.1 Есептеу қағидаты

Бұл әдіс шоғырланған параметрлері бар сызықты тізбекке қолданылады. Өтпелі үдерісті классикалық әдіспен есептеу үшін келесі операцияларды орындау керек.

1. Кирхгоф заңдары бойынша тоқ пен кернеудің лездік мәндерінің дифференциалды теңдеулерін құру керек;

2. Изделінетін салыстырмалы кернеу және тоқ функциялары теңдеу жүйелерімен біртекті емес дифференциалды теңдеулер құрады;

Бұл теңдеудің жалпы есебі екі құраманың қосындысы болады: тұрақты режимнің біртекті емес теңдеудің жеке шешімі және еркін режимдегі біртекті дифференциалды теңдеудің жалпы шешімдері:

$$i = i_y + i_{cb}; u = u_y - u_{cb};$$

3. Коммутациядан кейін электр тізбегін есептеу арқылы тұрақталған құраманы табады.

4. Еркін құраманы табады, тізбектің мінездемесіне бағынышты, яғни мінезделген теңдеу түбір P_k анықталады. Үдерістің еркін құрамасының жалпы шешімі:

$$i_{cb} = A_k e^{P_k t} \quad (4.5)$$

A_k - интегралдау тұрақтылығы.

Егер де сиппаттамалы теңдеудің екі нақты түбірі болса оны:

$$i_{cb} = A_1 e^{P_1 t} + A_2 e^{P_2 t} \quad (4.6)$$

Егер де сиппаттамалы теңдеу түбірлері комплексті тоғаланған түрде болса $p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_0$, онда:

$$i_{cb} = A_1 e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi) \quad (4.7)$$

α - контурдың өшу коэффициенті

ω_0 - еркін ауытқудың бұрышты жиілігі

5. Бастапқы шарт бойынша, интегралды тұрақтылықты анықтайды. Катушкалы тармақтар тоғының бастапқы мағынасын, коммутацияның бірінші заңы бойынша еркін бастапқы шартпен анықтайды.

$$i_L(0_+) = i_L(0_+),$$

Ал конденсатордағы кернеудің бастапқы мағынасы коммутацияның екінші заңы бойынша анықталады:

$$u_C(0_-) = u_C(0_+).$$

Катушкасыз басқа тармақтағы тоқтың бастапқы мағынасын және басқа элементтегі кернеулерді, Кирхгоф заңдары мен коммутация заңдарын пайдаланып табады.

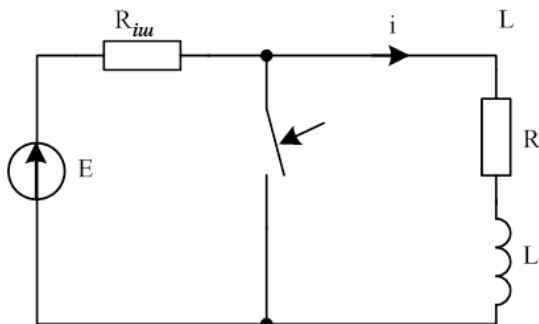
6. Өтпелі ток пен кернеуді, олардың тұрақталған және еркін ток құрамаларын қосу арқылы табады.

7. Өтпелі функция есебінің дұрыстығын бастапқы және тұрақталған өтпелі параметрлар мағынасын анықтау арқылы тексереді.

4.2.2. R, L тізбегіндегі өтпелі үдерістер

R, L тізбегіндегі қысқа тұйықталу

4.8-суреттегі берілген сұлбаға, катушкасы бар тармақтағы ток пен коммутациядан кейінгі кернеудің өзгеру зарядтарын табу керек.



4.8-сурет

Катушкадағы өтпелі тоқты тұрақталған және еркін құрамалардың қосындысы түрінде көрсетеміз:

$$i = i_y + i_{cb}. \quad (4.8)$$

Коммутациядан кейін R, L контурында қорек көзі жоқ кездегі, тұрақталған тоқ құрамасы

$$i_y = 0. \quad (4.9)$$

Тоқтың еркін құрамасын анықтау үшін Кирхгофтың екінші заңы бойынша теңдеу жазамыз:

$$i_{cb}R + L \frac{di_{cb}}{dt} = 0.$$

Сипаттамалы теңдеудің жазылу түрі:

$$R + \rho L = 0$$

Тоқтың еркін құрамасының жалпы шешімі:

$$i_{cb} = Ae^{pt} \quad (4.10)$$

$p = -\frac{R}{L}$, c^{-1} – сипаттамалы теңдеу түбірі.

Интегралды тұрақтысын анықтау үшін бастапқы шарт бойынша $t=0$ пайдаланамыз:

$$i(0_-) = i(0_+) = \frac{E}{(R_{\text{вн}} + R)}.$$

(4,8...4.10) есепке алып табатынымыз:

$$A = \frac{E}{(R_{\text{вн}}+R)} = I_0 \quad (4.11)$$

(4.11) (4.10) теңдеулерге қойып, одан кейін (4.10) мен (4.9) (4.8) теңдеулерін қойып өтпелі тоқты табамыз:

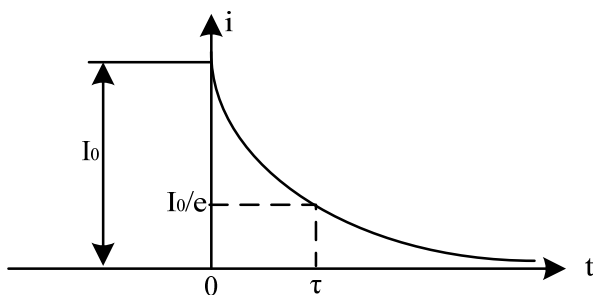
$$i = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} = I_0 e^{-t/\tau} \quad (4.12)$$

$$\tau = \frac{R}{L} - \text{тізбектің тұрақты уақыты. (4.13)}$$

$$(4.13) (4.10) \text{ қойып, табамыз. } i_{cb}(\tau) = \frac{I_0}{e} = 0,368 \cdot I_0$$

Сонымен, тұрақты уақыт дегеніміз - үдерістің еркін құрамасының $e=2,72$ есе бастапқы мағынасымен салыстырғандағы азаю уақыты, өтпелі токтың өзгеруі олар 4.9-суреттегі кестеде көрсетілген. Катушканың өзіндік индукциясындағы ЭҚК

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = \frac{R}{R_{\text{вн}} + R} E e^{-t/\tau} = I_0 \cdot R e^{-t/\tau}. \quad (4.14)$$



4.9-сурет

Коммутация кезінде, бұл ЭҚК резистор R -дің кернеуіне тең, ал әрі қарай экспоненциал заңымен азаяды. Жоғарыдағы айтылғандар бойынша келесі қорытындылар жасауға болады.

1) R , L тізбектегі қысқа тұйықталуда ондағы ток экспоненциалды заңымен өзгереді, ол бастапқы мағынасынан нөлге дейін азаяды.

2) Токтың жылдамдығының өзгеруі тізбектің тұрақты уақытымен анықталады, ол катушка индуктивтілігінің, контурдың активті кедергісінің бөлінісіне тең.

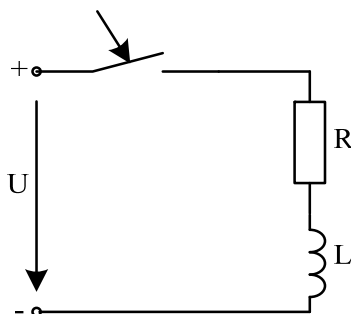
3) $t \approx 5 \tau$ тең болғанда өтпелі үдеріс аяқталады.

4) Бастапқы уақыттағы индуктивтегі кернеу активті кедергі кернеуіне тең.

$$U_L(0_+) = I_0 R$$

R, L тізбегін тұрақты кернеуге қосу.

4.10-суретте тізбектегі өтпелі ток көрсетілген.



4.10-сурет.

$$i = i_y + i_{cb}$$

Токтың тұрақты құрамасы

$$i_y = \frac{U}{R}$$

(4.10) бойынша еркін құрамасы

$$i_{cb} = Ae^{pt} = Ae^{-t/\tau}.$$

Бастапқы шарт бойынша ($t=0$) тең, тұрақты интегралдау мен еркін тоқты анықтаймыз.

$$i(0_+) = i_y(0_+) + i_{cb}(0_+)$$

немесе

$$0 = \frac{U}{R} + A; A = -\frac{U}{R}; i_{cb} = -\frac{U}{R}e^{-t/\tau}$$

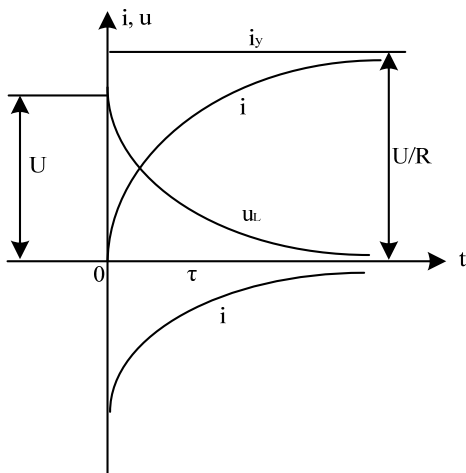
Өтпелі ток түрі

$$i = \frac{U}{R}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.15)$$

Индуктивтегі кернеу

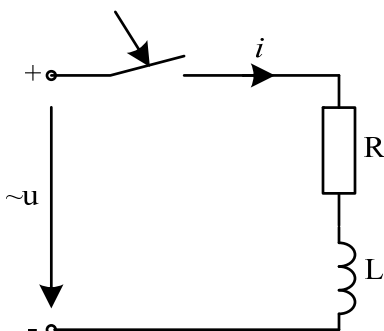
$$u_L = L \frac{di}{dt} = Ue^{-t/\tau} \quad (4.16)$$

Токтың өзгеруі i, i_y, i_{cb} қисықтары және индуктивтегі кернеу 4.11-суретте көрсетілген.



4.11-сурет.

R, L тізбегін синусоидалды кернеуге қосу.



4.12-сурет.

Қосқан кездегі қорек көзінің кернеуі 4.12-суреттегідей

$$u = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$$

Тұрақталған ток

$$i_y = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega_0 t + \psi - \varphi)$$

$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ - тізбектегі толық кедергі модулі,
 $\varphi = \frac{\text{arctg} \omega L}{R}$ - фаза бұрышы.

Еркін ток (4.5) анықталуы:

$$i_{cb} = Ae^{-t/\tau}$$

Тұрақталған және еркін құрамаларды қосып өтпелі тоқты табамыз:

$$i = i_y + i_{cb} = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) + Ae^{-t/\tau}$$

Бастапқы шарт бойынша $t=0$ деп

$$i(0_-) = i(0) = 0$$

Тұрақты интегралдауын табамыз:

$$A = -\frac{U_m}{Z} \sin(\psi - \varphi)$$

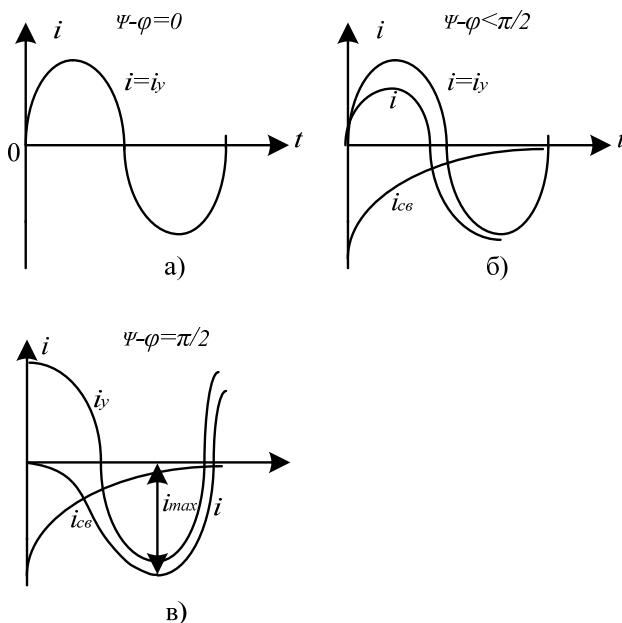
Өтпелі ток:

$$i = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{U_m}{Z} \sin(\psi - \varphi) e^{-t/\tau} \quad (4.17)$$

Есеп қорытындысын $t=0$ деп тексереді, $i(0)=0$ және $t=\infty$ десек, табамыз.

$$i(\infty) = i_y = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi)$$

Өтпелі тоқтың уақытқа байланыстылығы 4.13-суретте көрсетілген



4.13-сурет.

Бұларды талдап қорытындылар жасауға болады

1) Егер де, қосқан уақытта тұрақталған тоқ нөлге тең болса ($\psi - \varphi = 0$, немесе $\psi - \varphi = \pi$) 4.13-сурет, еркін тоқ пайда болмайды, тізбекте тұрақталған режім болады:

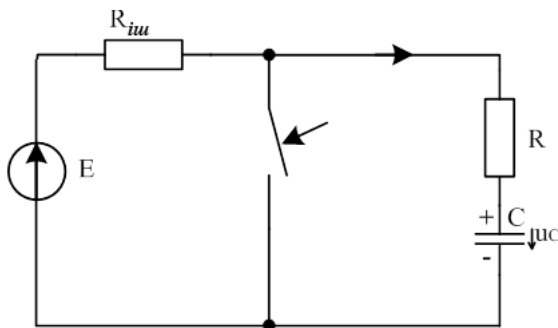
$$i = i_y = I_m \sin \omega t = \frac{U_m}{Z} \sin \omega t$$

2) Егер де, қосқан уақытта тұрақталған тоқ көп болса $\psi - \varphi = \frac{\pi}{2}$, өтпелі тоқ көп мағынаға жетеді, бірақ ешқандай жағдайда тұрақталған токтың екі есе амплитудасынан аса алмайды.

3) Тізбектің тұрақты уақыты көп болса, егер де, қосқан уақытта кернеуі нөл мағынасынан өтсе токқа көп болады.

4.2.3. R, C тізбектегі өтпелі үдеріс

R, C тізбектегі қысқа тұйықталу. Конденсатор-резистор тізбегіндегі қысқа тұйықталудың өтпелі үдерісін қарастырамыз (4.14-сурет) Егер де алдын ала конденсатор кернеуге дейін зарядталса $u_C(0_+) = U_0 = E$.



4.14-сурет.

Тұрқталған тоқ пен сыймдылықтағы кернеу нөлге тең. Кирхгофтың екінші заңы бойынша, еркін құрамалар теңдеуі

$$Ri_{cb} + u_{Ccb} = 0.$$

$$i_{cb} = \frac{dq_{cb}}{dt} = C \frac{du_{Ccb}}{dt} = 0 \text{ деп} \quad \text{есептеп,} \quad \text{жазамыз:}$$

$$RC \frac{du_{Ccb}}{dt} + u_{Ccb} = 0$$

Мінездемеленген теңдеу: $RCp + 1 = 0$.

Кернеудің еркін құрамасынның жалпы шешімі:

$$u_{Ccb} = Ae^{pt} = Ae^{-t/\tau} \quad (4.18)$$

$A = U_0$ интегралдау тұрақтылығы;

$p = -\frac{1}{RC}$ мінездемеленген теңдеу түбірі;

$\tau = RC$ тізбектің уақыт тұрақтылығы;

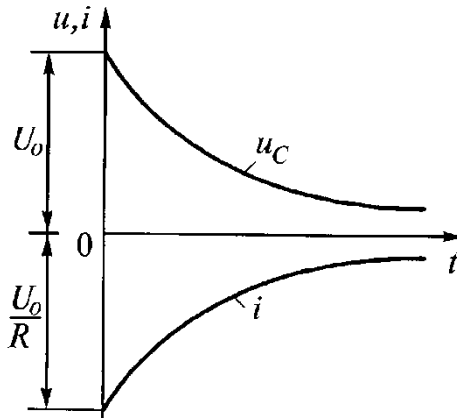
(4.18) бен тұрақталған кернеудің нөлді мағынасын есепке алып конденсатордағы кернеуді табамыз: $u_C = U_0 e^{-t/\tau}$.

Тізбектегі өтпелі ток

$$i = C \frac{du_C}{dt} = -\frac{U_0}{R} e^{-t/\tau}.$$

Конденсатордағы кернеу мен тізбектегі токтың уақытымен өзгеру қисықтары, экспонент түрінде 4.1-суретте көрсетілген. Энергетика көз қарасынан өтпелі процесс конденсатор алаңындағы электр энергиясының, резистордағы жылу энергиясына өтуін сипаттайды. Ескеру керек, резистор кедергісі жылу санына әсер етпейді, токтың бастапқы мағынасы мен разряд ұзақтығына әсер етеді. Дәлелдеу үшін теңдікті қарастырайық:

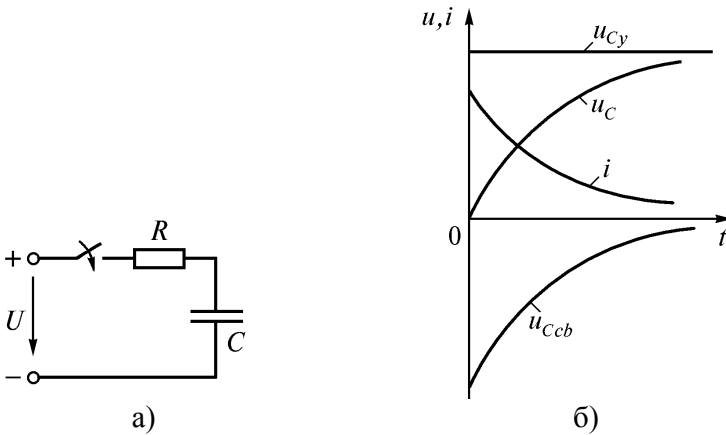
$$W = \int_0^{\infty} i^2 R dt = \frac{U_0^2}{R} \int_0^{\infty} e^{-2t/RC} dt = \frac{CU_0^2}{2}.$$



4.15-сурет

R, C тізбегін тұрақты кернеуге қосу(конденсатор заряды).

4.16-суреттегі сұлбада, конденсатордағы тұрақталған кернеу құрамасы $u_{C\gamma} = U$, ал еркін 4.18 бойынша $u_{Ccb} = Ae^{-t/\tau}$



4.16-сурет

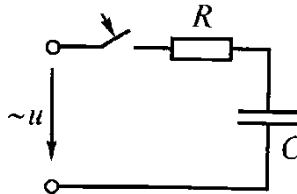
Коммутацияның екінші заңы бойынша $t = 0$ болғанда $u_C(0_-) = u_C(0_+) = 0$. Демек $u_C(0_+) = u_{C\gamma}(0_+) + u_{Ccb}(0_+)$, немесе $0 = U + A$, бұл жерден $A = -U$

Конденсатордағы өтпелі кернеу

$$u_C = U(1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.19)$$

$$\text{Тізбектегі өтпелі тоқ } i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{U}{R} e^{-t/\tau}. \quad (4.20)$$

Кернеу мен тоқтың уақыттан графикалық тәуелділігі 4.16 б-суретте көрсетілген. Суреттен көруге болады, конденсатордағы кернеу экспоненциалды заңы бойынша нөлден бұлақ кернеуіне дейін өседі, ал тоқ бастапқы мағынасынан нөлге дейін азаяды, өзгеру ұзақтылығы тұрақты уақытпен $\tau = RC$ анықталады. R , C тізбегін синусоидалды кернеуге қосу. Қосқан уақыттағы кернеуді (4.17-сурет) $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$ деп аламыз.



4.17-сурет.

Конденсатордағы тұрақталған кернеу құрамасын $u_{Cy} = \frac{U_m}{z} X_C \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right)$, бұл жерде

$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$ - тізбектің толық кедергісінің модулі.

$X_C = \frac{1}{\omega C}$ - сыйымдылық кедергі;

$\varphi = -\arctg(X_C / R)$ - тоқтың фазалы жылжуы.

Конденсатордағы кернеудің еркін құрамасы $u_{Ccb} = Ae^{-t/\tau}$

Конденсатордағы өтпелі кернеу

$$u_c = u_{Cy} + u_{Ccb} = \frac{U_m}{z\omega C} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) + Ae^{-t/\tau}.$$

Бастапқы шартын есепке алып жазамыз:

$$t = 0; u_C(0) = 0; A = -\frac{U_m}{Z\omega C} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right);$$

Конденсатордағы соңғы кернеудің түрі:

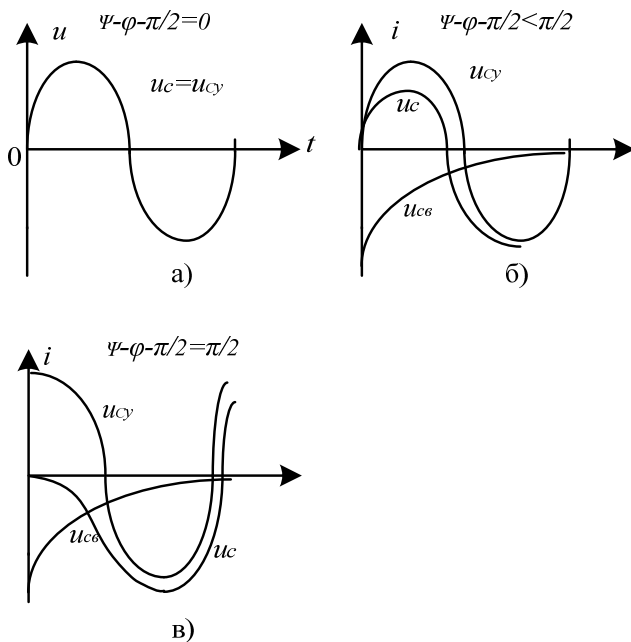
$$u_C = \frac{U_m}{Z\omega C} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{U_m}{Z\omega C} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) e^{-t/\tau} \quad (4.21)$$

Тізбектегі ток:

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{U_m}{R} \left[\cos \varphi \cdot \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin \varphi \cdot \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) e^{-t/\tau} \right].$$

Конденсатордағы өтпелі кернеудің графикалық тәуелділігі 4.18-суретте көрсетілген, оны талдап қорытынды шығаруға болады:

$$u_C = \frac{U_m}{z\omega C} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{U_m}{z\omega C} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) e^{-t/\tau}.$$

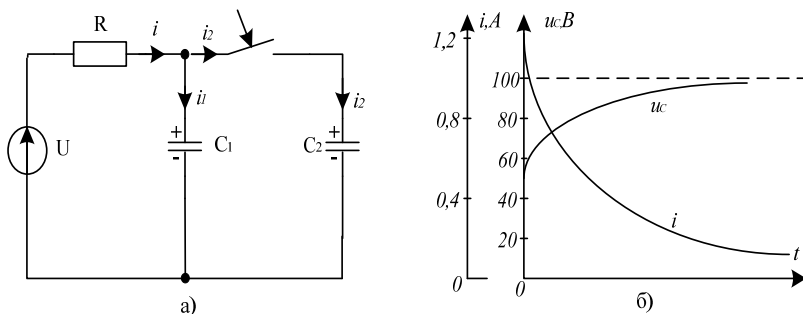


4.18-сурет.

1) Егер де қосқан уақытта конденсатордағы тұрақталған кернеу нөлге тең болса, 4.18 а-сурет ($\psi - \varphi - \frac{\pi}{2} = 0$), онда еркін кернеу нөлге тең. Тізбекте тұрақталған режим пайда болады.

2) Егер де қосқан уақытта тұрақталған кернеу мағынасы көп болса ($\psi - \varphi - \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2}$), (4.18 в-сурет), онда өтпелі кернеу мағынасы көп болады, жарты мезгілінен кейін тұрақталған кернеудің екі есе амплитудасына жетеді, бірақ одан аспайды.

Конденсаторы бар тізбектегі өтпелі үдеріс дұрыс мақсат қойылмаған жағдайда. 4.19 а-суретте, мысалы, конденсатордағы кернеуді және резистордағы тоқты анықтау керек, байланыстары тұйықталған кезде, егер де $U=100\text{В}$ болса. Конденсатордағы C_2 кернеуді, тұйықталу алдында 20В дейміз. Элемент параметрлері: $R=40\ \text{ОМ}$, $C_1=20\ \mu\text{кф}$, $C_2=30\ \mu\text{кф}$.



4.19-сурет.

Есептеу

1) Кирхгоф заңымен коммутациядан кейін тізбекке теңдеулер жүйесін жазамыз.

$$i = i_1 - i_2; u = iR + u_{C1};$$

2) U_C -ке қатысты теңдеулер жүйесін есептеп, дифференциалды теңдеу табамыз.

$$u = R(C_1 + C_2) \frac{du_C}{dt} + u_C;$$

3) Конденсатордағы кернеудің еркін құрамасы

$$u_{Ccb} = Ae^{-t/\tau},$$

Бұл жерде $\tau = R(C_1 + C_2) = 40 \cdot 50 \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 10^{-3}\text{с}$.

А-ның тұрақтылығы коммутацияның екінші заңы мен таба алмаймыз, себебі тізбектегі процесс анықтамасына сәйкес емес. Негізінде, коммутация заңымен жазуымыз керек:

$$u_{C1}(0_-) = u_{C1}(0_+) = 100V;$$

$$u_{C2}(0_-) = u_{C2}(0_+) = 20V.$$

Қатар қосқан уақытта, конденсатордағы кернеу коммутациядан кейін тең болу керек, біздің есепте

$$u_{C1}(0_-) \neq u_{C2}(0_+)$$

Қайшылық! Ол дұрыс мақсат қойылмағандықтан, байланыс лезде тұйықталады дедік. Шындығында, байланыс арасындағы кедергі, шексіздік тен нөлге дейін секіріп, бағытымен біршама уақытта өзгермейді. Қайшылықты қалай шешеміз? Электр зарядының сақталу заңы бойынша, коммутацияға дейінге заряд саласы коммутациядан кейінге заряд саласына тең, екі конденсаторда бірдей кернеу болса $U_C(0_+)$. Сондықтан:

$$u_{C1}(0_-) \cdot C_1 + u_{C2}(0_+) \cdot C_2 = u_C(0_+) \cdot (C_1 + C_2).$$

Осыдан, коммутациядан кейінгі конденсатордағы кернеу табылады.

$$\begin{aligned} u_C(0_+) = u_{C1}(0_+) = u_{C2}(0_+) &= \frac{u_{C1}(0_-) \cdot C_1 + u_{C2}(0_-) \cdot C_2}{(C_1 + C_2)} = \\ &= \frac{100 \cdot 20 \cdot 10^{-6} + 20 \cdot 30 \cdot 10^{-6}}{(20 + 30) \cdot 10^{-6}} = 52V. \end{aligned}$$

$t=0$ деп, $u_C = u_{Cy} + u_{Ccb} = U + Ae^{-t/\tau}$ тендеуді есепке алып, табамыз.

$U+A=52$, осыдан $A=52-U=52-100=-48V$. Конденсатордағы өтпелі кернеу.

$$U_C = 100 - 48e^{-t/2 \cdot 10^{-3}} = 100 - 48e^{-600t}, B;$$

4) Резисторы бар тармақтағы ток

$$i = \frac{U - u_C}{R} = \frac{100 - 100 + 48e^{-600t}}{40} = 1,2e^{-600t}, A$$

Кернеу мен токтың графикалық тәуелділігі 4.19 б-суретінде көрсетілген. Мақсат дұрыс болмағанда, заряд сақталу заңын қолдану керек. Конденсатордағы кернеу алғашқы уақытта секіріп өзгереді.

4.3 Тармақталған тізбектегі R, L, C өтпелі үдерістер

4.3.1 Еркін құрамалардың дифференциалды теңдеулері

Кирхгофтың екінші заңы бойынша контурдағы еркін кернеуге

$$Ri_{cb} + L \frac{di_{cb}}{dt} + u_{Ccb} = 0.$$

$i_{cb} = \frac{dq_{cb}}{dt} = C \frac{du_{Ccb}}{dt} = 0$ деп, еркін кернеудің дифференциалды теңдеуін табамыз:

$$\frac{d^2 u_{Ccb}}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{du_{Ccb}}{dt} + \frac{1}{LC} u_{Ccb} = 0 \quad (4.22)$$

Конденсатордағы еркін заряд пен тізбектегі тоқтың теңдеулерінде сәйкес:

$$\frac{d^2 q_{Ccb}}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dq_{cb}}{dt} + \frac{1}{LC} q_{cb} = 0 \quad (4.23)$$

$$\frac{d^2 i_{cb}}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di_{cb}}{dt} + \frac{1}{LC} i_{cb} = 0 \quad (4.24)$$

(4.22...4.24) теңдеулер тең келеді, өзгеру заңында бірдей. u_{Ccb}, q_{cb}, i_{cb} . Мінездемеленген теңдеу түрі

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0 \quad (4.25)$$

Еркін үдеріс параметрлеріне R, L, C және мінездемеленген теңдеу түбірінің түріне байланысты.

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad (4.26)$$

Түбір айырмашылығы белгісіне қарай затты немесе кешенді болады. Олар еркін үдеріс мінезін анықтайды.

4.3.2 R, L, C тізбегіндегі конденсатордың апериодикалық разряды

Конденсатордың резистор R және L катушкадағы разряд үдерісін қарастырамыз. Егер де тізбек параметрлар берілген жағдайды қанағаттандырса, $\frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC}$, немесе $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, бұл кезде мінездемеленген теңдеу түбірі нақты, әртүрлі және теріс түрде.

Бұл жағдайда, конденсатордағы кернеу разряд кезінде бастапқы U_0 -дан нөлге дейін азаяды, теңдікті қанағаттандырады:

$$u_{Ccb} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (4.27)$$

A_1 мен A_2 - бастапқы кезде анықталатын интегралдау тұрақтылықтары.

Еркін ток

$$i_{cb} = C \frac{du_{Ccb}}{dt} = C(A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}) \quad (4.28)$$

Кернеу мен токтың тұрақталған құрамалары нөлге тең. Сондықтан олардың өтпелі мағыналары еркін құрамаларына тең.

$$u_C = u_{Ccb}; \quad i = i_{cb}.$$

Бастапқы шарт бойынша тұрақты интегралдауды A_1 мен A_2 арқылы анықтаймыз.

$t = 0$ $u_C(0) = U_0$; $i(0) = 0$ дейміз. Осыларды (4.27) және (4.28) қосып, табамыз.

$$U_0 = A_1 + A_2; \quad 0 = A_1 p_1 + A_2 p_2$$

Осыдан:

$$A_1 = \frac{p_2}{p_2 - p_1} U_0; \quad A_2 = -\frac{p_1}{p_2 - p_1} U_0.$$

Бастапқы шартты есепке алып, жазамыз:

$$u_C = \frac{U_0}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}); \quad i = \frac{C p_1 p_2 U_0}{p_2 - p_1} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \quad (4.29)$$

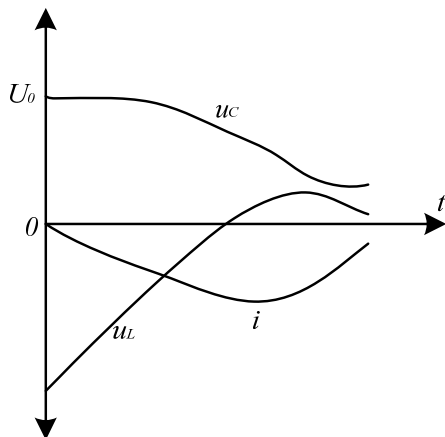
Түбірлер көбейтіндісі $p_2 p_1 = \frac{1}{LC}$ демек, ток

$$i = \frac{U_0}{L(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \quad (4.30)$$

Катушкадағы кернеу:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \frac{U_0}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) \quad (4.31)$$

(4.29.....4.31) теңдеулер графикалық тәуелділігі 4.20-суретте көрсетілген.



4.20-сурет.

Қорытынды.

1) R, L, C тізбегіндегі конденсатордың аперидикалық разряды, затты, теріс және бірдей емес мінездемеленген теңдеулер түбірінен пайда болады.

2) Аперидикалық разрядта конденсатордағы кернеу бастапқы мағынасынан нөлге дейін азаяды, ал тоқ басында өседі, сосын ең үлкен мағынасынан өтіп, азаяды.

3) Катушкадағы кернеу, нөл мағынасынан өтіп бастапқыдан азаяды, белгісін өзгертеді және ең үлкен мағынасына жетіп, нөлге дейін азаяды.

4.3.3 R, L, C тізбегіндегі шекті аперидикалық разряд

Параметрлар қатынасы

$$R = R_{kp} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

(R_{RP} -резистордың R кернеуі) мінездемеленген теңдеудің түбірі нақты, бірдей және теріс $P_1 = P_2 = -R/2L$ өтпелі үдеріс аперидикалық түрінде, бірақ шектеулі. Бұл жағдайдағы, біртекті дифференциалды теңдеудің, жалпы шешімі:

$$u_{ccb} = u_c = (A_1 + A_2 t)e^{pt};$$

$$i_{cb} = i = C \frac{du_{ccb}}{dt} = C(A_2 + pA_1 + pA_2)t e^{pt}.$$

Бастапқы шарт бойынша $u_C(0) = U_0$; $i(0) = 0$ деп табамыз
 $A_1 = U_0$; $A_2 = -pU_0$: Осы тұрақтыларды есепке алып, шешімін
табамыз:

$$u_C = U_0(1 - pt)e^{pt}; \quad (4.32)$$

$$i = -Cp^2 U_0 t e^{pt} = -\frac{U_0}{L} t e^{pt}; \quad (4.33)$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} = -U_0(1 - pt)e^{pt}. \quad (4.34)$$

$i, u_C, u_L = f(t)$ байланыстары, аperiодикалық разрядтағыдай.

4.3.3 R, L, C тізбектегі конденсатордың периодикалық (тербеліс) разряды

Параметрлер қатынасында $R < R_{kp} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ сипаттамалы
тендеу түбірі кешенді және тоғаланған:

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_0 \quad (4.35)$$

$\alpha = \frac{R}{2L}$ - еркін құраманың өшу коэффициенті

$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = \frac{2\pi}{T_0}$ - контурдың өз тербелісінің бұрыштық
жиілігі T_0 - өз тербелісінің шамасы;

(4.35) теңдеуден табамыз:

$$\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2} = \frac{1}{LC}; \quad \sin \psi = \frac{\omega_0}{\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}} = \omega_0 \sqrt{LC};$$

$$\cos \psi = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}} = \alpha \sqrt{LC}; \quad tg \psi = \omega_0 / \alpha \quad (4.36)$$

Еркін құраманың біркелкі дифференциалды теңдеуін есептеу
сипаттамалы теңдеудің комплексті түбірлерінен мына түрде
жазылады:

$$u_{Ccb} = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi) \quad (4.37)$$

Тізбектегі ток

$$i_{cb} = CAe^{-\alpha t} (-\alpha \sin(\omega_0 t + \psi) + \omega_0 \cos(\omega_0 t + \psi)) \quad (4.38)$$

Бастапқы шарт бойынша $t = 0$, $u_c = U_0$, $i = 0$ деп, (4.37) мен (4.38) теңдеулерін мына түрде жазамыз:

$$U_0 = A \sin \psi; 0 = CA(-\alpha \sin \psi + \omega_0 \cos \psi)$$

Осы теңдіктерден табатынымыз:

$$A = \frac{U_0}{\sin \psi} = \frac{U_0}{\omega_0 \sqrt{LC}}; \sin \psi = \frac{\omega_0}{\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}} = \omega_0 \sqrt{LC};$$

$$\cos \psi = \alpha \sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2} = \alpha \sqrt{LC}; \operatorname{tg} \psi = \omega_0 / \alpha,$$

(4.36) сәйкес.

A , $\sin \psi$, $\cos \psi$ -терді есепке алып, өтпелі кернеу мен ток формуласын табамыз:

$$u_c = U_{cm} e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi) \quad (4.39)$$

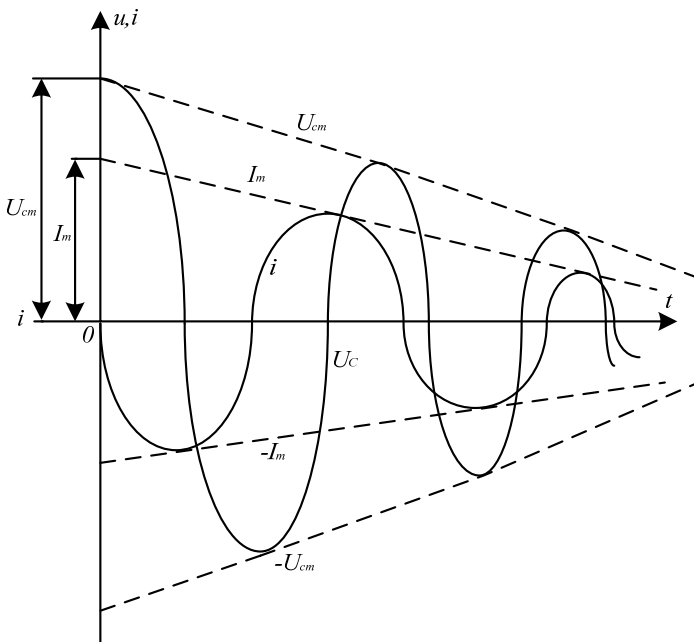
$$i = I_m e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \pi) \quad (4.40)$$

$$u_L = U_{Lm} e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi) \quad (4.41)$$

$$\text{Бұл жерде } U_{cm} = U_{Lm} = \frac{U_0}{\omega_0 \sqrt{LC}}; I_m = \frac{U_0}{\omega_0 L}.$$

Өтпелі кернеу мен ток байланыстығы 4.21-суретте көрсетілген. Олар өшіп бара жатқан синусоида тәрізді. Олардың өшу жылдамдылығы қозғалыс декрементімен бағаланады. Қозғалыс декременті дегенімізтире ол тұрақтылық, тізбектің R , L , C параметрлеріне бағынышты және өтпелі кернеу мен ток амплитудаларының қатынасына тең және оларды T_0 өзара қозғалыс периодикасына қосады

$$\frac{u_c(t)}{u_c(t+T_0)} = \frac{U_{cm} e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi)}{U_{cm} e^{-\alpha(t-T_0)} \sin(\omega_0(t+T_0) + \psi)} = e^{\alpha T_0} \quad (4.42)$$



4.21-сурет.

Қозғалыстың логарифмдік декременті жиі қолданылады:

$$\Delta = \ln \frac{u_c(t)}{u_c(t+T_0)} = \alpha T_0 \quad (4.43)$$

Ол конденсатордың разрядындағы тұрақталған ток нөлге тең болғанында.

4.3.4 R, L, C тізбегін тұрақты кернеуге қосу

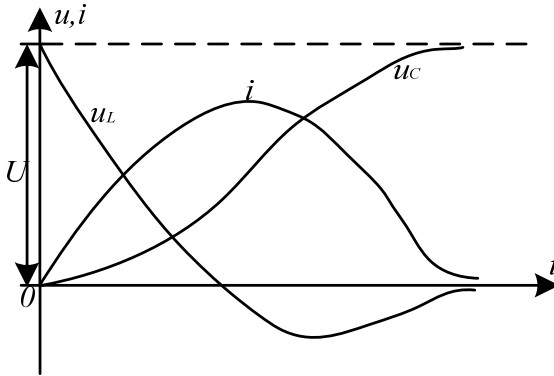
Апериодикалық разряд. Конденсатордың R, L, C тізбегіндегі разрядты және оны тұрақты кернеуге қосу араларында ұқсастық бар. Бірақ конденсатордағы тұрақталған кернеуі нөлге тең емес, яғни $u_{Cf}=U$. Сондықтан, еркін токтың апериодикалық түрде өзгеруінде конденсатордағы еркін кернеудің бастапқы мағынасы $u_{Cbd}(0_+) = -U$, яғни, интегралдау тұрақты белгілері A_1 мен A_2 керісінше өзгереді, ал ток пен конденсатордағы өтпелі кернеу, катушкадағы ток пен кернеу төмендегідей:

$$u_C = U - \frac{U}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) \quad (4.44)$$

$$i = \frac{U_0}{L(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \quad (4.45)$$

$$u_L = \frac{U}{p_2 - p_1} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}) \quad (4.46)$$

$u_C(t), u_L(t), i(t)$ байланыстықтары 4.22-суретте көрсетілген.



4.22-сурет.

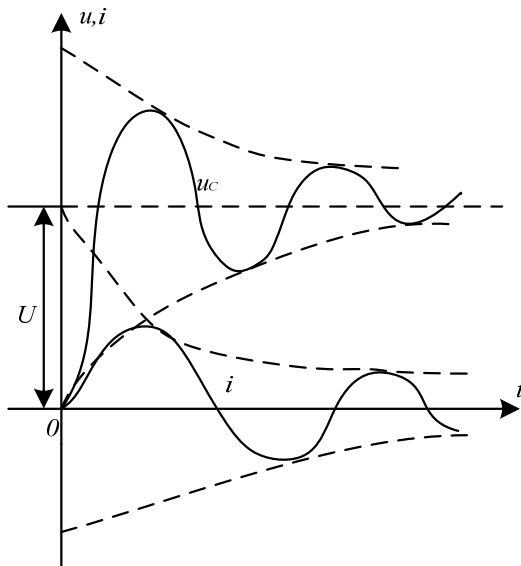
Қозғалыс разряды. R, L, C тізбегін тұрақты кернеуге қосу қозғалыс өтпелі үдеріспен қосталады. Оның разрядтан айырмашылығы еркін кернеудің бастапқы мағынасы және интегралдау тұрақтысы A белгісі керісінше өзгереді.

Өтпелі кернеу мен тоқ түрлері мыналар:

$$u_C = \frac{U}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi) \quad (4.47)$$

$$i = \frac{U_0}{\omega_0 L} e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t \quad (4.48)$$

$$u_L = \frac{U}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t - \psi) \quad (4.49)$$



4.23-сурет.

$u_c(t)$ және $i(t)$ қисықтары 4.23-суретте көрсетілген. Ток нөл мағынасына қатысты өзгереді, содан кейін өшеді, ал конденсатордағы кернеу қозғалыста, содан кейін тұрақталған мағынасына қатысты өшеді.

R, L, C-ты тұрақты кернеуге қосқанда, энергиясының бір бөлігі, өтпелі үдеріс уақытында қорек көзінен алынған жылуға көшеді, ал екінші бөлігі конденсатордың электр өрісінде сақталады. Негізінде:

$$\int_0^{\infty} U i dt = \int_0^{\infty} (u_R i + u_L i + u_C i) dt = \int_0^{\infty} i^2 R dt + \int_0^0 L i dt + \int_0^u C u_C du_C$$

яғни $\int_0^{\infty} i^2 R dt = \frac{CU^2}{2}$.

4.4 Тармақталған тізбектегі өтпелі үдерістерді есептеу

4.4.1 Есептеу ерекшелігі

Белгісіз сандардың және дифференциалды теңдеулердің көбеюі арқылы тармақталған R, L, C тізбектерін есептеу қиындай түседі. Оның есептеу жолдары мынадай:

1. Бастапқы тәуелсіз шартын анықтау мақсатымен, коммутацияға дейінгі тізбекті есептеу.
2. Тоқ пен кернеудің тұрақталған құрамаларын анықтау мақсатымен, коммутациядан кейінгі тізбекті есептеу.
3. Тоқ пен кернеудің еркін құрамаларына Кирхгоф заңдары байланысының теңдеулер жүйесін құрау.
4. Сипаттамалы теңдеулердің түбірін есептеу үшін теңдеулер жүйесін есептеу.
5. Табылған теңдеу түбірлері бойынша, еркін құрамалардың жалпы шешімін табу, тұрақталған және еркін тоқ құрамаларын қосып іздеген шаманы табу.
6. Интегралдаудың тұрақтылықтарын табу.
7. Өтпелі кернеулер мен токтарды жазу.

4.4.2 Үшінші дәрежелі дифференциалды теңдеудің жалпы шешімі

Тармақталған тізбекте теңдеу реті көбіне үшінші дәрежеге дейін өседі.

Бұл кезде сипатталынған теңдеу түбірлері қатысты, еркін құраманың жалпы шешімінің мынадай нұсқалары болады:

1) Егер де, сипатталған теңдеу түбірлері нақты, бірдей емес әртүрлі және теріс немесе $p_1 \neq p_2 \neq p_3$ болса, онда тоқ мынау

$$i_{cb} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + A_3 e^{p_3 t} \quad (4.50)$$

2) егер де сипаттамалы теңдеу түбірлері нақты өзара тең және теріс, немесе $p_1 = p_2 = p_3 = p$ болса, онда тоқ, мынау

$$i_{cb} = (A_1 + A_2 t + A_3 t^2) e^{p t} \quad (4.51)$$

3) егер де бір түбір нақты - P_1 басқа екеуі P_2 мен P_3 кешенді және тоғаланған ілістіруде болса, онда тоқ:

$$(4.52)$$

4.4.3 Интегралдау тұрақтылықтарын анықтау ерекшелігі

Үш тұрақты A_1, A_2, A_3 анықтау үшін үш теңдеу керек. Оны, негізгі теңдеуді қос дифференциалдау жолымен және бастапқы $t=0$ шартын пайдаланып табады. Мысалы, негізгі теңдеу

$$i = i_y + i_{cb} = i_y + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + A_3 e^{p_3 t}.$$

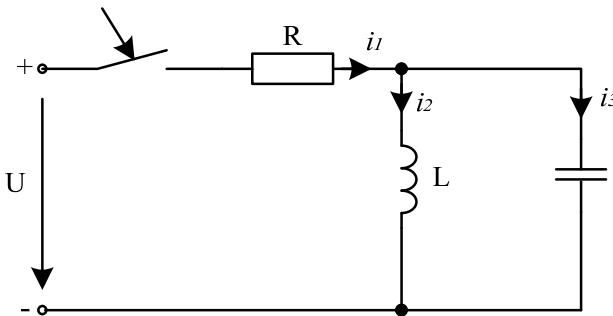
Интегралдау тұрақтылықтарын анықтау үшін теңдеулер жүйесі:

$$\begin{aligned} i(0) &= i_y(0) + A_1 + A_2 + A_3 \\ i'(0) &= i'_y(0) + p_1 A_1 + p_2 A_2 + p_3 A_3 \\ i''(0) &= i''_y(0) + p_1^2 A_1 + p_2^2 A_2 + p_3^2 A_3 \end{aligned}$$

$i_y(0)$, $i'_y(0)$, $i''_y(0)$ - бастапқы мағыналарын, Кирхгоф заңдарымен құрастырылған коммутация заңын пайдаланып, теңдеулерді есептеп табады.

4.4.4. Есептеу үлгісі

Есептеу сұлбасы 4.24-суретте көрсетілген.



4.24-сурет.

1-ші нұсқа: $U=125\text{В}$, $R=250\text{ Ом}$, $L=667\text{мГн}$ $C=2\text{мкф}$. Табу керек: i_1 , i_2 , i_3 , u_C

Есептелуі

1) Коммутацияға дейінгі сұлбаны есептеу. Бастапқы тәуелсіз шарттарды анықтаймыз: катушкадағы ток $I_2(0)=0$, конденсатордағы кернеу $u_C(0)=0$

2) Коммутациядан кейінгі сұлбаны есептеу (тұрақталған режим).

Тұрақталған құрамаларды анықтаймыз:

$$i_{1y} = i_{2y} = \frac{U}{R} = 0,5\text{А};$$

$$i_{3y} = 0; u_{Cy} = 0$$

Тұрақталған тізбектер белгілі әдістермен есептеледі: Кирхгоф заңдарымен, контурлы тоқ әдісімен және т.б.

3) Кирхгоф заңы бойынша еркін тоқ пен кернеу теңдеулері:

$$i_{1cb} - i_{2cb} - i_{3cb} = 0 \quad (4.53)$$

$$i_{1cb}R + L \frac{di_{2cb}}{dt} = 0 \quad (4.54)$$

$$-L \frac{di_{2cb}}{dt} + u_{Ccb} = 0 \quad (4.55)$$

Мұнда: $u_{Ccb} = \frac{1}{C} \int i_{3cb} dt$;

4) Коммутация заңын қолданып i_{2cb} -тоғына қатысты теңдеулер жүйесін есептейміз, интегралдау тұрақтылықтарды табу үшін тәуелсіз бастапқы жағдайларды пайдалануға болады. Сипатталған теңдеуді табу үшін үш әдіс қолдануға болады: лездік мағынасына дифференциалды теңдеуді есептеу, теңдеуді алгебраландыру, кез келген тармақты кірме кедергісімен есептеу.

Бірінші әдіс- (4.53.....4.55) лездік мағынаға есептеу. (4.55)-дифференциалдаймыз:

$$-L \frac{d^2 i_{2cb}}{dt^2} + \frac{1}{C} i_{3cb} = 0.$$

(4.53)-тен $i_{3cb} = i_{1cb} - i_{2cb}$ алып, жоғарыдағы теңдеуге қоямыз:

$$-L \frac{d^2 i_{2cb}}{dt^2} + \frac{1}{C} (i_{1cb} - i_{2cb}) = 0.$$

(4.54) тен $i_{1cb} = -\frac{L}{R} \cdot \frac{di_{2cb}}{dt} - i_{2cb}$ деп алып, жоғарыдағы теңдеуге қоямыз:

$$-L \frac{d^2 i_{2cb}}{dt^2} + \frac{1}{C} \left(-\frac{L}{R} \cdot \frac{di_{2cb}}{dt} + i_{2cb} \right) = 0.$$

Оны мына түрде жазамыз:

$$\frac{d^2 i_{2cb}}{dt^2} + \frac{1}{RC} \cdot \frac{di_{2cb}}{dt} + \frac{1}{LC} i_{2cb} = 0. \quad (4.56)$$

Екінші дәрежелі біртекті дифференциалды теңдеуді таптық:

$$p^2 + \frac{1}{RC}p + \frac{1}{LC} = 0. \quad (4.57)$$

Сипаттамалы теңдеулер түбірлері:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2RC} \pm \sqrt{\frac{1}{4R^2C^2} - \frac{1}{LC}} = -1000 \pm 500;$$

$$p_1 = -500c^{-1}; p_{21} = -1500c^{-1}.$$

Екінші әдіс - (4.53.....4.55) теңдеулерді алгебраландыру. Алгебраландыру мәні – функция туындысын, түбір Р-ды функция көбейтіндісіне алмастыру және функция интегралын, функцияны Р түбіріне бөлген мағынасына алмастыру. Егер де функция түрі, тоқ үшін:

$$i_{cb} = Ae^{Pt},$$

Онда туындысы мен интегралы:

$$\frac{di_{cb}}{dt} = pAe^{Pt} = pi_{cb};$$

$$\int i_{cb} dt = \int Ae^{Pt} dt = \frac{1}{p}Ae^{Pt}.$$

Сонымен, теңдеуді алгебраландыру үшін, алмастыру жасау керек:

$$\frac{d}{dt} = p; \int dt = \frac{1}{p}.$$

Онда (4.53.....4.55) теңдеулер түрі мынадай:

$$i_{1cb} - i_{2cb} - i_{3cb} = 0 \quad (4.53a)$$

$$i_{1cb}R + pLi_{2cb} = 0 \quad (4.54a)$$

$$-Lpi_{2cb} + \frac{1}{pC}i_{3cb} = 0 \quad (4.55a)$$

(4.53а.....4.55а) теңдеулер анықтағышы:

$$\Delta(p) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ R & pL & 0 \\ 0 & -pL & \frac{1}{pC} \end{vmatrix} = 0.$$

$\Delta(p)=0$ есебі, (4,57) теңдеуіне сәйкес:

$$p^2 + \frac{1}{RC}p + \frac{1}{LC}=0.$$

Екінші әдіс біріншіге қарағанда жеңілдеу, себебі интегралды, дифференциалды теңдеулер орнына алгебралық есептеу қолданылады.

Үшінші әдіс – кірме кедергі бойынша, тізбектегі кірме кедергі кешені 4.24-суретте

$$Z(j\omega) = R + \frac{j\omega L \cdot 1/j\omega C}{j\omega L + 1/j\omega C}$$

$j\omega$ -ны p -түбірі мен ауыстырамыз. Онда

$$Z(p) = R + \frac{pL \cdot 1/pC}{pL + 1/pC}$$

$Z(p)$ нөлге тең деп, формуланы жай бөлшек түріне өзгертеміз. Формула үсті (числитель) мінездемеленген теңдеу:

$$p^2 + \frac{1}{RC}p + \frac{1}{LC}=0.$$

Мінездемеленген теңдеуді табудың ең оңай әдісі.

5) Еркін құрама мен өтпелі токтың жалпы есебін жазамыз. Себебі табылған мінездемеленген теңдеу түбіріне: $P_1=-500c^{-1}$, $P_2=-1500c^{-1}$, токтың еркін құрамасының жалпы есебіне сәйкес:

$$i_{2cb} = A_1 e^{P_1 t} + A_2 e^{P_2 t}, \quad (4.58)$$

өтпелі ток

$$i_2 = i_{2e} + i_{2cb} = \frac{U}{R} + A_1 e^{P_1 t} + A_2 e^{P_2 t} \quad (4.59)$$

6) Тұрақты интегралдауды анықтаймыз. (4.59) туындысын алып, қосымша теңдеу жазамыз:

$$\frac{di_2}{dt} = p_1 A_1 e^{P_1 t} + p_2 A_2 e^{P_2 t} \quad (4.60)$$

Бастапқы жағдайды есепке алып (4.59) беп (4,60) мына түрде жазамыз:

$$i_2(0) = \frac{U}{R} + A_1 + A_2 = 0;$$

$$\left. \frac{di_2}{dt} \right|_{t=0} = p_1 A_1 + p_2 A_2.$$

Бастапқы кездегі тоқ туындысын анықтау үшін, теңдікті қолданамыз:

$$U = i_1(0)R + L \left. \frac{di_2}{dt} \right|_{t=0} \quad u_L = u_C.$$

Онда $L \left. \frac{di_2}{dt} \right|_{t=0} = u_C = 0$ бұдан $\left. \frac{di_2}{dt} \right|_{t=0} = 0$

Ал интегралдау тұрақтылықтары:

$$A_1 = \frac{p_2 U}{R(p_1 - p_2)} = \frac{-1500 \cdot 125}{250(-500 + 1500)} = -0,75;$$

$$A_2 = \frac{p_1 U}{R(p_1 - p_2)} = \frac{500 \cdot 125}{250(-500 + 1500)} = 0,25;$$

7) Өтпелі тоқты (4.59) бойынша анықтаймыз

$$i_2 = \frac{U}{R} + A_1 e^{P_1 t} + A_2 e^{P_2 t} = 0,5 - 0,75e^{-500t} + 0,25e^{-500t}, A.$$

8) Конденсатордағы кернеу:

$$\begin{aligned} u_C = u_{Lcb} = u_{Ccb} &= L \frac{di_2}{dt} = L(p_1 A_1 e^{P_1 t} + p_2 A_2 e^{P_2 t}) \\ &= 250(e^{-500t} - e^{-1500t})B \end{aligned}$$

Тексеру: $u_C(0)=0$, $u_C(\infty)=0$;

Конденсаторы бар тармақтағы тоқ

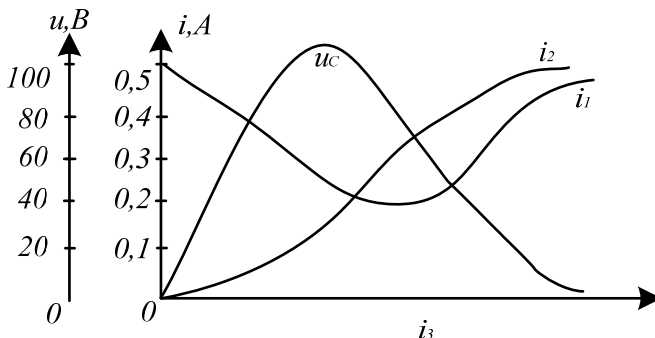
$$i_3 = C \frac{du_C}{dt} = 0,75e^{-1500t} + 0,25e^{-500t}, A.$$

Тексеру: $i_3 = (0)=0,5A$; $i_3 = (\infty)=0$

Резисторы бар тармақтағы ток

$$i_1 = i_2 + i_3 = 0,5 + e^{-1500t} - e^{-500t}, A.$$

Ток пен кернеу графиктері 4.25-суретте көрсетілген. Оларды талдап мынадай көріністерді жасаймыз.



4.25-сурет.

- 1) Өтпелі үдеріс аperiodты болады.
- 2) Конденсатордағы кернеу нөлден бастап өзгереді, ең үлкен мағынасынан жетіп, тұрақталған режимде қайтадан нөлге тең болады.
- 3) Конденсаторы бар тармақтағы ток бастапқы мағынасынан азаяды, нөлден өтеді, таңбасын өзгертіп тағы нөлге дейін азаяды
- 4) Катушкасы бар тармақтағы ток нөлден бастап тұрақталған 0,5A мағынасына дейін жетеді.

2-ші нұсқа. Сол жағдай, тізбек параметрлері $U=100B$, $R=10=0M$, $L=40mFж$; $C=5mkф$.

Сиппатталған теңдеу түбірлері кешенді түйіндес (ілестіру):

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_0 = -1000 \pm j2000.$$

Еркін құраманың жалпы шешіледі:

$$i_{2cb} = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi) \quad (4.61)$$

Бастапқы (искомый) тоқтың өзгеру заңы:

$$i_2 = i_{2y} + i_{2cb} = \frac{U}{R} + Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi) \quad (4.62)$$

(4.62) теңдеуде екі белгісіз A мен Ψ бар, қосымша теңдеу жазамыз:

$$\frac{di_2}{dt} = -\alpha Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi) + \alpha Ae^{-\alpha t} \cos(\omega_0 t + \psi) \quad (4.63)$$

(4.62) мен (4.63) бастапқы мағынасын есепке алып, келесі түрде жазуға болады:

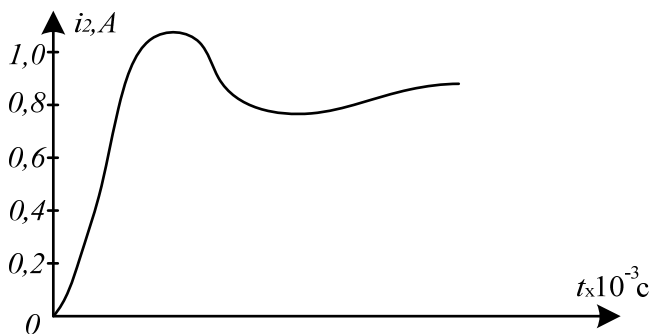
$$i_2(0) = \frac{U}{R} + A \sin \psi = 1 + A \sin \psi; \quad (4.64)$$

$$\left. \frac{di_2}{dt} \right|_{t=0} = -\alpha A \sin \psi + \omega_0 A \cos \psi. \quad (4.65)$$

(4.65) есебі, $A \neq 0$ тең емес десек, мына мағынаны береді $\Psi=63^\circ 30'$, ал (4.64) теңдеуден табамыз $A=-1,12$ (4.62) теңдеу бойынша, тоқтың өзгеру заңының түрі:

$$i_2 = i_{2y} + i_{2cb} = 1 - 1,12e^{-1000t} \sin(2000t + 63^\circ 30'), A.$$

Бұл тоқтың өзгеруі, 4.26 суреттегі кестесі.



4.26-сурет.

4.5 Өтпелі үдерісті операторлы әдіспен есептеу

4.5.1. Операторлы әдіс түсінігі

Лапласың тікелей және керісінше өзгертілуі

Операторлы әдіс авторы орыс ғалымы Ваченко-Захарченко, 1862 жылы, сызықты дифференциалды теңдеуді интегралдауға комплексті формада елестетуге болатындығын көрсетті, және ағылшын ғалымы О. Хевисайд, осы әдісті электромагнитті өтпелі үдерісін есептеуге қолданды.

Әдіс мағынасы, туындсқанын өзін бейнелеуге алмастыру және мына түрде жазуға болады:

$$f(t) \doteq F(p)$$

\doteq белгісі – сәйкестікті көрсетеді.

Бұндай операция қорытындысында дифференциалды теңдеу алгебралық пен ауысады. Ол теңдеулерді есептеп шамалар белгісін табамыз және түпнұсқаларын табу үшін керісінше өзгертіледі. Шартты жазу.

$$F(p) \doteq f(t)$$

Бірінші операция – түпнұсқалардың берілген функциясының бейнесін табу-Лапласың тікелей өзгертілуі мен табылады:

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-pt} dt \quad (4,66)$$

Бейнесінен түпнұсқаға ауысу математикалы операция арқылы болады:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{v-j\infty}^{v+j\infty} F(p)e^{pt} dp \quad (4,67)$$

Лапласың керісінше өзгертілуі деп аталады. Кейбір функциялардың есебі кестеде берілген. Кестеде берілмеген уақытты, шамамен есептеу керек.

4.5.2 Жай функцияларды бейнелеу

Тұрақтылық бейнесі $f(t)=A$. Лапласың тікелей өзгертілуі арқылы:

$$F(p) = \int_0^{\infty} A e^{-pt} dt = -\frac{A}{p} e^{-pt} \Big|_0^{\infty} = \frac{A}{p}, \quad A = \frac{A}{p}. \quad (4.68)$$

Мысалы, $e(t) = E = 50\text{В}$. Бұл ЭДС бейнесінің түрі:

$$E(p) = \frac{50}{p}$$

Уақыт функциясы арқылы.

Көрнекті функция бейнесін $f(t) = e^{at}$. (4.66) теңдеу бойынша

$$F(p) = \int_0^{\infty} e^{at} e^{-pt} dt = \frac{1}{p-a}$$

Сонымен

$$e^{at} \doteq \frac{1}{p-a} \quad (4.69)$$

$f(t) = e^{-at}$ функциясына бейнелеуіне сәйкес

$$e^{-at} \doteq \frac{1}{p+a} \quad (4.69a)$$

(4.69) талдап, қорытынды шығаруға болады:

$a = j\omega$ деп алып, табамыз

$$e^{j\omega t} \doteq \frac{1}{p-j\omega} \quad (4.70)$$

(4.70) I_m тоқ амплитудасының кешеніне көбейтіп, синусоидалды тоқ кешенінің бейнелеуін табамыз:

$$I_m e^{j\omega t} = I_m \frac{1}{p-j\omega}$$

Синусоидалды кернеу кешеніні бейнелеу де осыған сәйкес табылады.

Бірінші және екінші туындыны бейнелеу.

Бірінші туындының бейнелеуін жазамыз:

$$\frac{df(t)}{dt} = pF(p) - f(0) \quad (4.71)$$

$f(0)$ – функцияның бастапқы мағынасы:

Егер де, функцияның бастапқы мағынасы нөлге тең болса, туындыны бейнелеу, функция бейнелеуінің p -оператор көбейтіндісіне тең.

Екінші туындының бейнелеуі.

$$\frac{d^2 f(t)}{dt^2} = p^2 F(p) - pf(0) - f'(0) \quad (4.72)$$

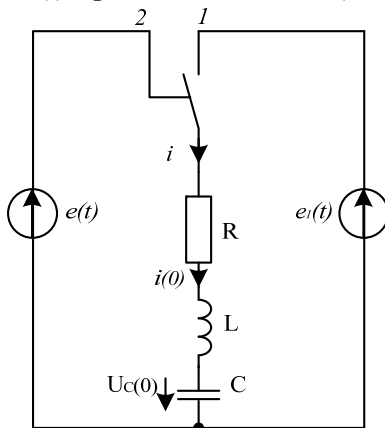
Интегралды бейнелеу:

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = \frac{F(p)}{p} \quad (4.73)$$

Біршама функцияның табылған интегралдың бейнелеу функция бейнелеуінің p -операторға бөлгендегісіне тең.

4.5.3 Операторлы формадағы Ом заңы

R, L, C тізбегін қарастырамыз, басында ЭҚК_e(t) бұлағына қосылған, сосын ЭҚК_e(t) бұлағына қосылған (4.27-сурет).



4.27-сурет.

Тізбек теңдеуінің Кирхгофтың екінші заңы бойынша, қайта қосқандағы лездік мағынасының түрі:

$$R_i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = e(t)$$

$-\infty$ интегралдау, тізбекте қайта қосқан уақытта режімнің тұрақталғанын және конденсатордың зарядталғанын білдіреді:

$$\frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i dt + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = u_c + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (4.74)$$

$u_c(0)$ -қайта қосқан уақыттағы конденсатордағы кернеу, $t=0$ тең болғанда

(4.74) Лаплас өзгертуін қолданамыз:

$$R \int_0^{\infty} e^{-pt} i dt + L \int_0^{\infty} e^{-pt} \frac{di}{dt} dt + \frac{1}{C} \int_0^{\infty} e^{-pt} \int_{-\infty}^t i dt \cdot dt = \int_0^{\infty} e^{-pt} e(t) dt$$

Осыдан, операторлы формадағы Ом заңының формуласын табамыз:

$$I(p) = \frac{E(p) + Li(0) - \frac{u_c(0)}{p}}{R + pL + \frac{1}{pC}} \quad (4.75)$$

Үстінде (числитель) операторлы формадағы сыртқы ЭҚК-тен басқа, екі қосымша ЭҚК бар: $Li(0)$ және $\frac{u_c(0)}{p}$. Бұл ЭҚК-тарды ішкі немесе есепті деп атайды. Олар, конденсатор мен катушкадағы кернеудің бастапқы мағынасымен, ескерілген. ЭҚК оң бағытын, тармақтағы тоқтың оң бағытына сәйкес алады. Егер де тоқтың оң бағыты, конденсатор кернеуінің оң бағытына қарсы болса, коммутацияға дейін, конденсаторы зарядталған десек, екінші ЭҚК қарама-қарсы белгісімен алынады.

(4.75) теңдеу астын (знаменатель) тізбектің операторлы формадағы толық кедергісі деп атайды немесе операторлы кедергі дейді:

$$Z(p) = R + pL + \frac{1}{pC} \quad (4.76)$$

Егер де j -ны R -мен алмастырсақ, бұны кешенді кедергіге сәйкес байқауға болады.

Сонымен, жалпы жағдайда, операторлы әдіспен есептегенде, L катушка индуктивтілігі, операторлы кедергі pL мен ЭҚК $Li(0)$ бұлағының бірізді сұлбасына алмастырылады, ал конденсатор C сыйымдылығы-операторлы кедергі $\frac{1}{pC}$ және ЭҚК - $\frac{u_c(0)}{p}$

бұлағына ауыстырылады.

Бастапқы нөлді мағынада Ом заңын келесі түрде жазуға болады:

$$I(p) = \frac{E(p)}{Z(p)} \quad (4.77)$$

4.5.4. Операторлы формадағы Кирхгоф заңдары

Кирхгофтың бірінші заңы бойынша, түйіндегі тоқтардың лездік мағынасының алгебралық қосындысы нөлге тең болады, түйіндегі тоқтардың бейнелеуінің алгебралық қосындысының нөлге тең екенділігін Лаплас өзгертуін қолданып дәлелдеуге болады:

$$\sum_{k=1}^n I_k(p) = 0 \quad (4.78)$$

Бұл теңдік, операторлы формадағы Кирхгофтың бірінші заңын көрсетеді. Кез келген тұйықталған контурға n -тармақтары бар, Кирхгофтың екінші заңы бойынша:

$$\sum_{k=1}^n R_k i_k + \sum_{k=1}^n L_k \frac{di_k}{dt} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k} \int_{-\infty}^t i_k dt = \sum_{k=1}^n e_k$$

Лаплас өзгертуін қолданып бастапқы мағынасын нөл емес деп, операторлы формадағы Ом заңының жазуындай, операторлы формадағы Кирхгофтың екінші заңын табамыз:

$$\sum_{k=1}^n R_k I_k(p) + \sum_{k=1}^n L_k (p I_k(p) - i_k(0)) + \sum_{k=1}^n \frac{u_{ck}(0)}{p} + \sum_{k=1}^n \frac{I_k(p)}{C_k(p)} = \sum_{k=1}^n E_k(p)$$

Оны мына түрде жазамыз:

$$\sum_{k=1}^n Z_k(p) I_k(p) = \sum_{k=1}^n (E_k(p) + L_k i_k(0) - \frac{u_{ck}(0)}{p}) \quad (4.79)$$

Бұнда $i_k(0)$, $u_{ck}(0)$ -катушкадағы токтың бастапқы мағынасы және сәйкес тармақтарындағы конденсатор кернеуі.

Бастапқы нөл мағынасы кезінде $i_k(0) = 0$, $u_{ck}(0) = 0$ Кирхгофтың екінші заңын келесі түрде жазуға болады:

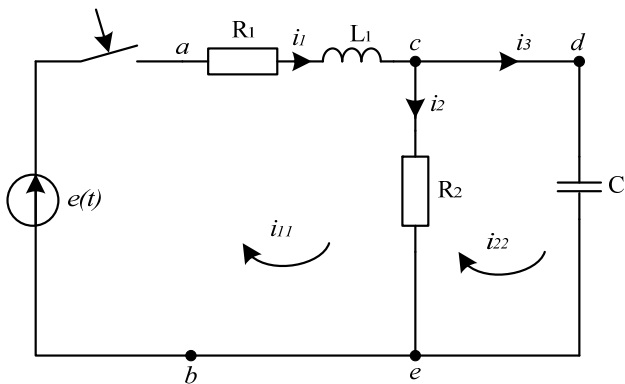
$$\sum_{k=1}^n I_k(p) Z_k(p) = \sum_{k=1}^n E_k(p) \quad (4.80)$$

4.5.5. Операторлы әдіспен есептеу жалғасы

Операторлы әдіспен есептеу негізінде екі жолмен жасалады: берілген функция уақытының бейнелеуін жазу және бейнелеуден түпнұсқаға өту. Әр жолды толығырақ қарастырамыз.

Берілген функция уақытының бейнелеуін жасауды, Ом заңы мен Кирхгоф заңын, бейнелеу теңдеуіне сәйкес операторлы формада қарастыра отырып дәлелдедік. Айырмашылығы нөлде емес бастапқы мағынасында ішкі барлық ЭҚК және операторлы кедергі қолданылады. Бұдан әрі, тоқ немесе кернеу бейнелеуін есептеу үшін, Кирхгоф заңында әдістерді қолдануға болады: контур токтарының түйіні әлеуеттерін, эквивалентті генератор, т.б., яғни барлық есептеу апаратын қолдану, тұрақталған тоқ пен кернеуді есептеу үшін бейнелеу мысалдарын қарастырайық.

1-мысал. Контурлы тоқ әдісін қолданып сұлба тоғына операторлы бейнелеу жасаймыз (4.28-сурет)



4.28-сурет.

Есебі: Лездік мағынасының теңдеу түрі:

$$i_{11}R_1 + L_1 \frac{di_{11}}{dt} + R_2(i_{11} - i_{22}) = e(t)$$

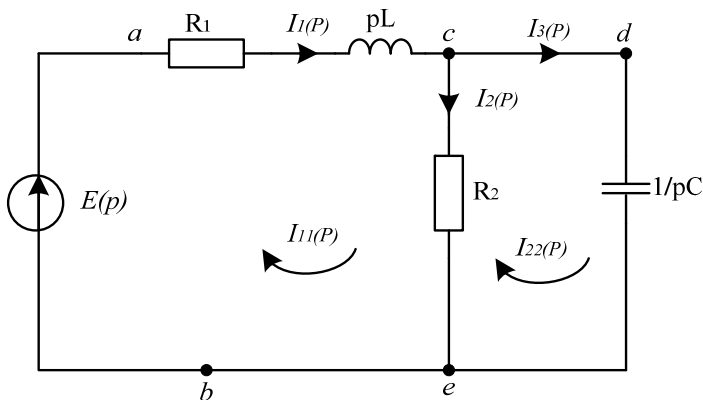
$$\frac{1}{C} \int_0^t i_{22} dt + R_2(i_{22} - i_{11}) = 0$$

Бастапқы мағынасын нөл деп есептеп операторлы сұлба жасаймыз (4.29-сурет)

Бейнелеу теңдеуінің түрі:

$$I_{11}(p)(R_1 + R_2 + pL_1) - I_{22}(p)R_2 = E(p)$$

$$-I_{11}(p)R_2 + I_{22}(p)\left(R_2 + \frac{1}{pC}\right) = 0$$



4.29-сурет.

Тоқтар бейнелеуіне қатысты теңдеулер жүйесін есептейміз:

$$I_{11}(p) = \frac{E(p)(1 + R_2 C p)}{p^2 R_2 L_1 C + p(R_1 R_2 C + L_1) + R_1 + R_2}$$

$$I_{22}(p) = \frac{E(p) R_2 C p}{p^2 R_2 L_1 C + p(R_1 R_2 C + L_1) + R_1 + R_2} \quad (4.81)$$

$I_1(p)$ және $I_3(p)$ тоқтар бейнелері сәйкес контурлы тоқтар бейнелеріне тең:

$$I_1(p) = I_{11}(p); I_3(p) = I_{33}(p);$$

(4.81) формуладағы ЭҚК бейнелеуі берілген ЭҚК түріне бағынышты. Тұрақты ток қорегі:

$$e(t) = E; E(p) = \frac{E}{p};$$

Синусоидалды ЭҚК қорегі

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \Psi); E(p) = \frac{E_m}{p - j\omega}$$

2-мысал. Ом және Кирхгоф заңдарымен. Сол сұлбада i_1 мен i_2 ток бейнелеуін жасау.

Есебі: $I_1(p)$ тоғын бейнелеу:

$$I_1(p) = \frac{E(p)}{Z_{BX}(p)}$$

$Z_{BX}(p)$ -сұлбадағы, операторлы формадағы кірме кедергі, аб қысқыш арасындағы формулада $i\omega$ -ны R -ге алмастырып, табылған ауыспалы токқа жазылуы

$$Z_{BX}(p) = R_1 + pL_1 + \frac{R_2 \frac{1}{pC}}{R_2 + \frac{1}{pC}} =$$

$$= \frac{p^2 R_2 L_1 C + p(R_1 R_2 C + L_1) + R_1 + R_2}{1 + R_2 C p}$$

Демек

$$I_1(p) = \frac{E(p)}{Z_{BX}(p)} = \frac{E(p)(1 + R_2 C p)}{p^2 L_1 R_2 C + p(R_1 R_2 C + L_1) + R_1 + R_2} \quad (4.82)$$

$I_1(p)$ және $I_3(p)$ оқтар бейнеленуін табу үшін қатар жалғасқан тармақтар кедергісін пайдалану керек.

$I_2(p)$ бейнелеу

$$I_2(p) = I_1(p) \frac{\frac{1}{pC}}{R_2 + \frac{1}{pC}}$$

$I_3(p)$ -бейнелеу

$$I_3(p) = I_1(p) \frac{R_2}{R_2 + \frac{1}{pC}}$$

(4.82) осыған салып, $I_2(p)$ мен $I_3(p)$ бейнелерін табамыз.

Бейнелеу мен функция оригиналын табу.

Лапласты керісінше өзгерту.

Операторлы әдістің екінші жолымен есептеу үшін, уақыт функциясын (оригинал) бейнелеуінен табу керек. Бейнелеу түріне бағышты, түрлі әдістерді қолдануға болады.

Бірінші әдіс – сәйкес формула арқылы (Лапластың керісінше өзгертілуі). 4.5.1-бөлімінде айтылғандай, бейнелеуден түпнұсқаға өту (4.67) арқылы болады.

Екінші әдіс – ажырату формасы арқылы. Егер де бейнелеудің кестелі формуласы болмаса, функция түпнұсқасын табу үшін ажырату теоремасы қолданылады.

Бейнелеуді орынды бөлшек түрінде көрсетеміз:

$$F(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)} \quad (4.83)$$

функция оригиналына сәйкес:

$$f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k) e^{p_k t}}{F_2'(p_k)} \quad (4.84)$$

(4.84) формуланы, ажырату теоремасы деп атайды. Ол әділді, мына жағдайда, көп мүшелердің $F_1(p)$ мен $F_2(p)$ -ың ортақ түбірі жоқ, ал көп мүшелер коэффициенті затты сандар.

(4.84) теңдеу сандар қосындысы $F_2(p)=0$ теңдеу түбір санына тең.

Есептеу тәртібі:

1) (4.83) теңдеу астын (знаменатель) нөлге тең деп теңдеу түбірін табамыз.

2) $F_2'(p)$ бірінші туындыны табамыз

3) түбір мағыналарын $F_1(p)$ мен $F_2'(p)$ – теңдеулерге қойып, (4.84) ажырату формуласына қосымша ескертулер:

а) ажырату формуласы кез-келген бастапқы мағынасында және кернеу формасында қолданылады.

б) егер де, бастапқы мағына нөл болмаса, $F_1(p)$ - құрамына барлық ЭҚК кіреді.

в) егер де, ЭҚК бұлағы синусоидалды болса: $E_m \sin(\omega t + \Psi)$ және оның бейнелеу түрін $\frac{E_m}{p-j\omega}$ (4.84) қолдансақ, кешеннен лездік мағынаға өту үшін j -дегі коэффициентті алу керек.

Сондықтан, тармақтарды ЭҚК-*j*-ге көбейту керек. Тұрақты ЭҚК тізбекте, тармақтар ЭҚК бұлағы *j*-ге көбейту керек емес.

Үшінші әдіс – ажырату формула негізінде, кернеу бұлағын пассивті екіұштыға қосу жай формуласын табуға болады:

1) $U = U_e^{at}$ -кернеу экспоненциалды заңмен өзгереді. Кернеу бейнелеуі:

$$U(p) = \frac{U}{p - a}$$

тоқ бейнесі:

$$I(p) = \frac{U}{(p - a)Z(p)} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}$$

$F_1(p) = U$; $F_2(p) = (p - a)Z(p)$

(4.84) теңдеу арқылы, экспоненциалды кернеуді қосу формуласын табамыз:

$$i(t) = \frac{Ue^{at}}{Z(a)} \sum_{k=1}^n \frac{Ue^{p_k t}}{(p_k - a)Z'(p_k)} \quad (4.85)$$

2) $u = U$ -тұрақты кернеу. (4.85) тен тұрақты кернеу әсерінен, $a=0$ деп, формула табамыз:

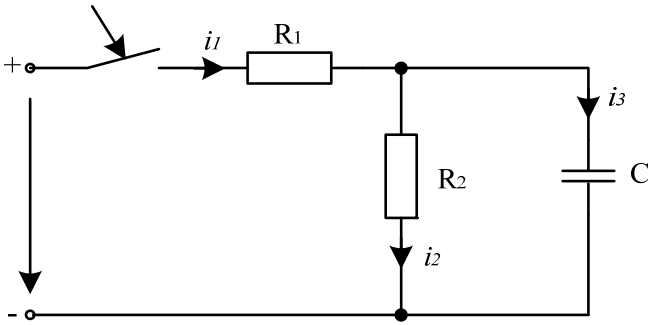
$$i(t) = \frac{U}{Z(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{Ue^{p_k t}}{p_k Z'(p_k)} \quad (4.86)$$

3) $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$ -синусоидалды кернеу $u = I_m \operatorname{Im} (U_m e^{j(\omega t + \psi)}) = I_m U_m e^{j\omega t}$ (4.85) қолданып, қосу формуласын табамыз, ал U кернеу орнына, U_m кешенді амплитуданы қолданып және $a = j\omega$ -ны аламыз. Түпнұсқаны $i(t)$, кешенді түпнұсқаны кілтіме бөлігі түрінде табамыз.

$$i(t) = I_m \left[\frac{U_m e^{j\omega t}}{Z(j\omega)} + \sum_{k=1}^n \frac{U_m e^{p_k t}}{(p_k - j\omega)Z'(p_k)} \right] \quad (4.87)$$

Қорытындысында, (4.85) пен (4.86) формулаларды пассивті тізбекті қосқанда, пайдалануға болады, конденсатор мен катушкада энергия қоры жоқ.

Мысалы: 4.30 берілген сұлбада, өтпелі ток $U = 200\text{В}$, $R_1 = 100\text{Ом}$, $R_2 = 400\text{Ом}$, $C = 5\text{мкф}$.



4.30-сурет.

Есептеу тоқ бейнелеуі $I_1(p)$ Ом заңы бойынша оперативті формада:

$$I_1(p) = \frac{U(p)}{Z(p)}$$

$$U(p) = \frac{U}{p} = \frac{200}{p}$$

$$Z(p) = R_1 + \frac{R_2 \cdot \frac{1}{pC}}{R_2 + \frac{1}{pC}} = \frac{0.2p + 500}{2 \cdot 10^{-3}p + 1}$$

Тоқтың бейнелеу түрі:

$$I_1(p) = \frac{0.4p + 200}{p(0.2p + 500)}$$

Түпнұсқа табамыз:

Бірінші әдіс-кесте бойынша.

Бейнелеуді екі қосынды түрінде есептейміз

$$I_1(p) = \frac{0.4}{0.2p + 500} + \frac{200}{p(0.2p + 500)} = 2 \frac{1}{p + 2500} + 0.4 \frac{2500}{p(p + 2500)}$$

Кестеден табамыз

$$\frac{1}{p+2500} \doteq e^{-2500t}, \quad \frac{2500}{p(p+2500)} \doteq 1 - e^{-2500t}.$$

Онда түпнұсқа

$$i_1(t) = 2e^{-2500t} + 0.4(1 - e^{-2500t}) = 0.4 + 1.6e^{-2500t}, \text{ A.}$$

Екінші әдіс – ажырату формуласы арқылы:

$$F_1(p)=0,4p+200; F_2(p)=p(0,2p+500)$$

теңдеуден $F_2(p)=0$ түбір табамыз: $p_1=0; p_2=-2500$

$$F_2'(p)=0,4p+500$$

Түбірлерді қоямыз:

$$F_1(p_1)=0,4 \cdot 0+200=200; F_1(p_2)=0,4(-2500)+200=-800;$$

$$F_2'(p_2)=0,4 \cdot 0+500=500; F_2'(p_2)=0,4(-2500)+500=-500;$$

Ажырату формуласы арқылы түпнұсқа табамыз:

$$i(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t} = \frac{200}{500} + \frac{-800}{-500} e^{-2500t} = 0,4 + 1,6e^{-2500t}, A.$$

Есепті тексеру:

$$i_1(0) = \frac{U - u_c(0)}{R_1} = \frac{200 - 0}{100} = 2A;$$

$$i_1(\infty) = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{200}{500} = 0,4A.$$

Мысалы. Бірізді R, L тізбекте, синусоидалды кернеуге $N=U_m \sin(\omega t + \psi)$ қосылған, қосу формуласы бойынша өтпелі тоқты табу.

Тізбектің операторлы кедергісі

$$Z(p)=R+pL$$

Теңдеудің түбірі $p_1 = \frac{-R}{L}, c^{-1}$, Туынды $Z'(p)=L$ оның мағынасы $Z'(p_1)=L$. Толық кедергі комплексі $Z(j\omega)=R+j\omega L$. (4.86) синусоидалды кернеу қосу формуласы арқылы өтпелі тоқты табамыз:

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m \left[\frac{U_m e^{j\omega t}}{Z(j\omega)} + \sum_{k=1}^n \frac{U_m e^{p_k t}}{(p_k - j\omega)Z'(p_k)} \right] = \\ &= I_m \left[\frac{U_m e^{j\psi} e^{j\omega t}}{R + j\omega L} + \frac{U_m e^{j\psi} e^{-\frac{R}{L}t}}{\left(-\frac{R}{L} - j\omega\right)L} \right] = \\ &= \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \Psi - \varphi) - \frac{U_m}{Z} \sin(\Psi - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t}, \\ &Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}; \varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}. \end{aligned}$$

4.6 Өтпелі үдерістерді жиілік әдіспен есептеу

4.6.1. Жалпы мәлімет.

Фурьенің тікелей және керісінше өзгертуі

Жиілік әдіс негізінде, периодикалық емес функция, шексіз көп сан жиыны, шексіз азғантай амплитудасымен барлық диапазон жиілігінде $-\infty$ ден $+\infty$ дейін. Басқаша айтқанда, периодикалық емес функция, тұтас жиілік спектрімен ауыстырылады. Бұндай көрініс сызықты электр тізбектегі өтпелі үдерісті жалпы есептеу әдісі арқылы зерттеуге мүмкіндік береді. Бұл қатынаста, периодикалық синусоидалды емес функциясын Фурье қатарына ажырату әдісіне сәйкес, қатарды өзгертіп, Фурье интегралын табамыз.

Уақыт функциясын $f(t)$ жиілік функциясын $F(j\omega)$ өзгерту, Фурьенің тікелей өзгертуі деп аталады, функцияның жиілік спектрын береді, ал жиілік спектрдың түпнұсқаға көшуі Фурьенің керісінше өзгертуі деп аталады. Төменде Лаплас пен Фурье өзгертуінің салыстыруы берілген.

Операторлы әдіс	Жиілік әдіс
$F(p) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-pt} dt$ <p>Лапласың тікелей өзгертілуі</p>	<p>Фурьенің тікелей өзгертілуі</p> $F(j\omega) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$ <p>Егерде $f(t) \neq 0; t < 0$, болса төменгі шегі $-\infty$</p>
$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(p)e^{pt} dp$ <p>Лапласың керісінше өзгертілуі</p>	$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(j\omega)e^{j\omega t} d\omega$ <p>Фурьенің керісінше өзгертілуі</p>
<p>Шектеу</p> $ f(t) < Me^{at}, p=a + jb$ <p>Функция өсуі шектелген</p>	<p>Шектеу</p> $\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)dt$ – соңғы шамасы яғни $ f(t) < Me^{at}$

Лаплас пен Фурье өзгертулерін салыстырғанда, олардың ұқсастығы байқалады. Лаплас өзгертуінде p ны $j\omega$ ауыстырып, Фурье өзгертілуі Лаплас өзгертілуінің жеке жағдайы болады.

Жиілік спектрін $F(j\omega)$ – p -ды $j\omega$ -ға ауыстырып табуға болады. Фурье өзгертуін, функцияның $f(t)$ барлық түріне пайдалануға

болмайды, себебі оған қатаң шектелу жүктеледі, кестеде берілген.

Операторлы әдістің Фурье өзгертуіне негізделген жиілік әдіспен салыстырғанда, Лаплас өзгертуіне негізделген кең мүмкіндігі бар.

Жиілік әдістің кейбір мүмкіндіктерімен операторлы әдістен артықшылығы бар.

Операторлы әдіс – бұл дерексіз, тікелей тәжірибелік тексеруге болмайтын математикалық тәсіл, ал жиілік әдіспен тәжірибелік мінездемесін анықтауға болады. Мысалы, біізді R тізбекте, L жиілік байланыстылық $\underline{z}(j\omega) = R + j\omega L = \underline{z}e^{jP}$ тәжірибені табуға болады. $Z(\omega)$ және $\varphi(\omega)$ жиілік байланыстылығын табамыз. Объектінің жиілік мінездемесін тәжірибелік анықтау, тұрақтылықты және күрделі жүйенің автоматикалық реттеу динамикалық қасиетін тез және жай есептеуге мүмкіндік береді, осы себептен инженерлік дағдыда кеңінен қолданылады.

4.6.2 Кейбір функциялар жиілік спектрі

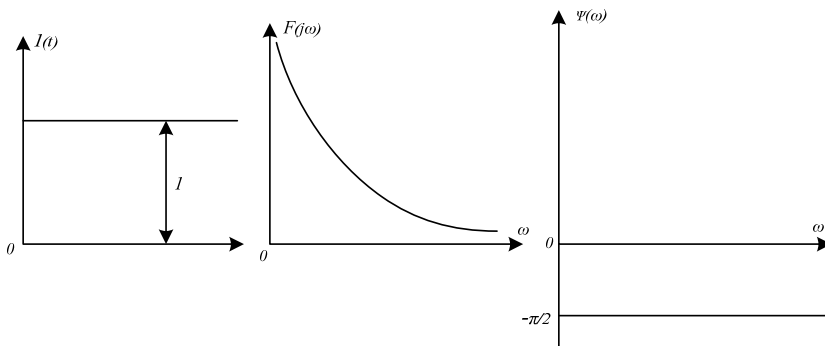
Бір секіру $I(t)$. Функция $I(t)$ түпнұсқасының жиілік спектріні теңдеумен табамыз:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t)e^{-at} e^{j\omega t} dt = \frac{1}{a+j\omega}.$$

$a \rightarrow 0$ болса, бір секіру жиілік спектріні табамыз:

$$I(j\omega) = \lim_{a \rightarrow 0} F(j\omega) = \frac{1}{j\omega} = 1(\omega) e^{j\psi(\omega)} = \frac{1}{\omega} e^{-j\pi/2}.$$

Бір секіру түпнұсқасы және оның амплитудалы, фазалы спектрі 4.31-суретте көрсетілген.



4.31-сурет.

Бір импульс $b(t)$ – бұл импульстің интегралы бірге тең, ал ұзақтылығы нөлге ынталанады. Бір секіріспен байланысы:

$$\delta(t) = \frac{dI(t)}{dt}$$

Осыны есептегенде, Фурье тікелей өзгертілуі:

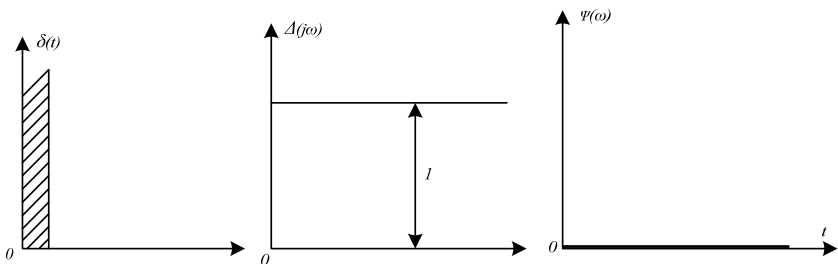
$$F_1(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{df_2}{dt} e^{-j\omega t} dt = j\omega F_2(j\omega) \quad (4.88)$$

бұл жерде $F_1(j\omega) = \frac{1}{j\omega}$ - бұрын табылған, бір секіру жиілік спектрі.

Сонымен, бір импульс жиілік спектрі:

$$b(j\omega) = 1 \quad (4.89)$$

4.32-суретте графикалық бейнесі көрсетілген:

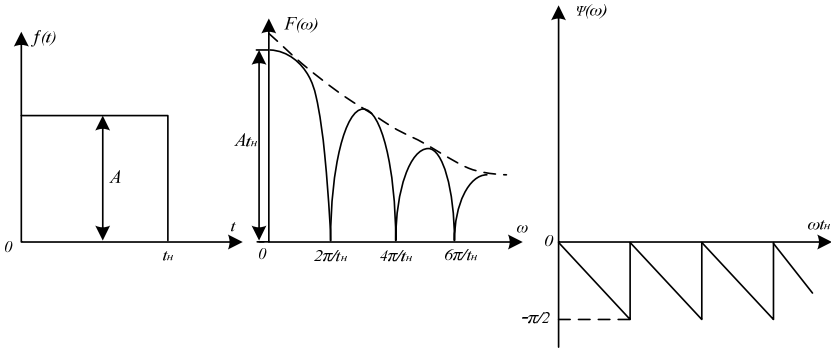


4.32-сурет.

Тік бұрышты импульс. Тік бұрышты импульстың спектралды мінездемесі A амплитудасымен және t_u ұзақтылығымен келесі түрде табылады:

$$\begin{aligned} F(j\omega) &= \int_0^{t_u} A e^{-j\omega t} dt = \frac{A}{j\omega} (1 - e^{-j\omega t_u}) = \\ &= \frac{2A}{\omega} e^{-j\frac{\omega t_u}{2}} \left(\frac{e^{j\frac{\omega t_u}{2}} - e^{-j\frac{\omega t_u}{2}}}{j^2} \right) = \frac{2A}{\omega} e^{-j\frac{\omega t_u}{2}} \sin \frac{\omega t_u}{2} \end{aligned} \quad (4.90)$$

4.33-суретте түпнұсқаның графикалық бейнесі мен оның жиілік спектрі көрсетілген.



4.33-сурет.

Экспоненциалды функция $f(t)=e^{-at}$.

Лаплас $1/(a+p)$ арқылы бейнелеу. P-ды $j\omega$ -ге ауыстырып, спектр табамыз:

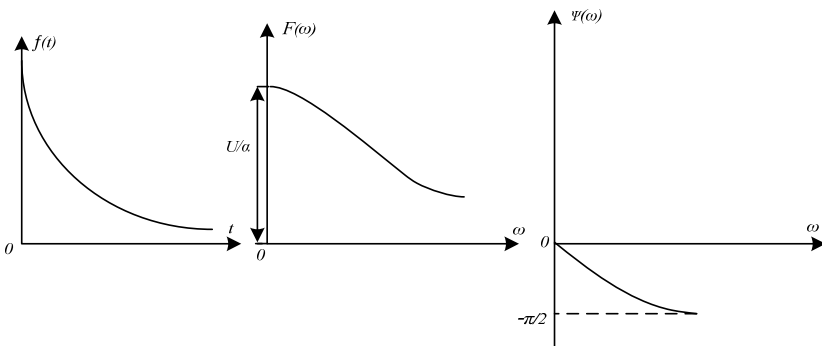
$$F(j\omega) = \frac{1}{a+j\omega} = \frac{1}{\sqrt{a^2+\omega^2}} e^{-j\arctg\omega/a} \quad (4.91)$$

Бұдан, амплитудалық- жиілік пен фазалық жиілік мінездемелері:

$$F(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{a^2 + \omega^2}}$$

$$\Psi(\omega) = -\arctg \frac{\omega}{a}$$

4.34-суретте түпнұсқа және жиілік спектрлер кестесі көрсетілген.



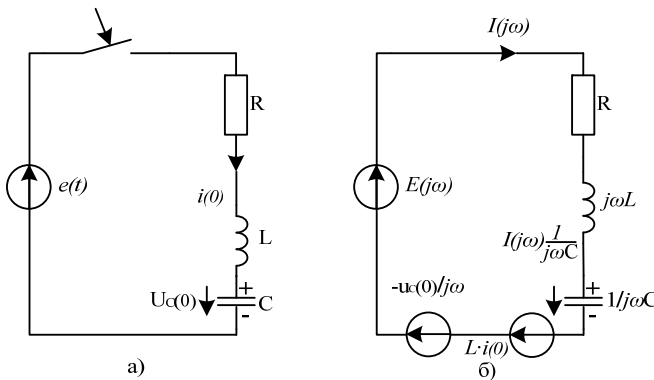
4.34-сурет.

4.6.3 Жиілік спектрлері үшін Ом және Кирхгоф заңдары

R, L, C тармақталмаған тізбектегі өтпелі үдерісін, ЭҚК $e(t)$ әсер етуін қарастырып және операторлы мен жиілік әдістер сәйкестігін есепке алып, жиілік спектрін Ом және Кирхгоф заңдарымен жазуға болады 4.35-сурет.

Бастапқы нөл емес жағдайдағы Ом заңы:

$$I(j\omega) = \frac{E(j\omega) + Li(0) - u_C(0) \frac{1}{j\omega}}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \quad (4.92)$$



4.35-сурет.

Нөл жағдайындағы Ом заңы

$$I(j\omega) = \frac{E(j\omega)}{Z(j\omega)} \quad (4.93)$$

Кирхгофтың бірінші заңы:

$$\sum_{k=1}^n I_k(j\omega) = 0 \quad (4.94)$$

Кирхгофтың екінші заңы:

$$\sum_{k=1}^n I_k(j\omega) \cdot Z(j\omega) = \sum_{k=1}^n \left[I_k(j\omega) + L_k i_k(0) - \frac{u_{ck}(0)}{j\omega} \right] \quad (4.95)$$

4.6.4. Жиілік әдіспен есептеу тәртібі. (Фурьенің интеграл әдісі)

Жиілік әдіс есебі, келесі түрде орындалады:

- 1) Кешенді параметрлері бар эквивалентті сұлба құрады.
- 2) Кез келген белгілі әдіспен, тоқ пен кернеу жиілік спектрлерін анықтайды.

3) Кесте мен ажырату формуласының көмегімен P -ны $j\omega$ -ға ауыстырып, түпнұсқаны табамыз, $F(j\omega) = F_1(j\omega)/F_2(j\omega)$ болса, түпнұсқа:

$$f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(j\omega_k)}{F_2'(j\omega_k)} e^{j\omega_k t}$$

4.6.5 Жиілік әдіспен есептеуге мысалдар

1-мысал. Бірізді тізбектегі R , L , жиілік әдіспен тұрақты кернеуге қосылғандағы өтпелі тоқтың өзгеру заңын анықтаймыз (4.10-сурет).

Есептелуі. Бір секіру жиілік спектрі (4.88) арқылы тұрақты кернеудің жиілік спектрін жазамыз:

$$U(j\omega) = \frac{U}{j\omega}$$

Тізбектің спектралды мінездемесі:

$$Z(j\omega) = R + j\omega L$$

Ом заңы бойынша тоқ спектрі (4.93)

$$I(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{Z(j\omega)} = \frac{U}{j\omega(R + j\omega L)} = \frac{F_1(j\omega)}{F_2(j\omega)}$$

Теңдеу түбірі $F_2(j\omega) = 0$; $j\omega_1 = 0$; $j\omega_2 = -\frac{R}{L}$; $F_2'(j\omega) = 2j\omega L + R$;

$F_1(j\omega) = U$:

Ажырату формула қосындысы:

$$F_1(j\omega_1) = U; F_1(j\omega_2) = U; F_2'(j\omega_1) = R; F_2'(j\omega_2) = -R;$$

Өтпелі тоқ:

$$i(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(j\omega_k)}{F_2'(j\omega_k)} e^{j\omega_k t} = \frac{U}{R} e^0 - \frac{U}{R} e^{-R/L \cdot t} = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Классикалық әдістегі (4.12) қорытындыға сәйкес, жиілік әдістің дұрыстығын растайды.

2-мысал. Өткен мысалдағы тізбектік бұрышты формадағы импульсті кернеу бұлағына қосылған (4.33). Тізбектегі өтпелі тоқты анықтау керек.

Есептелуі: Кернеу импульсінің жиілік спектрі тік бұрыш формасында $U = A$ (4.90) бойынша:

$$U(j\omega) = \frac{U}{j\omega} (1 - e^{-j\omega t_u})$$

Тоқтың жиілік спектрі:

$$I(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{Z(j\omega)} = \frac{U(1 - e^{-j\omega t_u})}{j\omega(R + j\omega L)} = \frac{U}{j\omega(R + j\omega L)} - \frac{U e^{-j\omega t_u}}{j\omega(R + j\omega L)} = \frac{F_1(j\omega)}{F_2(j\omega)} - \frac{F_1(j\omega)}{F_2(j\omega)} e^{-j\omega t_u}$$

Фурьенің керісінше өзгертілу әдісі, бұл жағдайда есептеуді қиындатады, сондықтан кешігуін есепке алып ажырату формуласын қолданамыз. Кернеу $0 < t \leq t_u$ импульсінің әсері кезінде, өтпелі ток мына заңмен өзгереді;

$$i_1(t) = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Әр қарай, $t > t_u$ болса, кірмедегі кернеу нөлге тең, өткен кернеу импульсі жалғанады және сондай импульстің керісінше белгісі болады.

Кернеудің екінші импульсі өтпелі токты пайда қылады:

$$i_2(t) = -\frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}})$$

Нақты өтпелі ток:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t) = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) - \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}})$$

3-Мысал. Бірізді тізбек R, C кірмесіндегі кернеу (4.5-сурет). Тізбек параметрлері: R=200 Ом, C=1000 мкф.

Бастапқы жағдайы: $j(0)$, $u_C(0)$ табу керек $j(t)$ мен $u_C(t)$ Есептелуі. (4.91) бойынша кернеу жиілік спектрі:

$$U(j\omega) = \frac{U}{a + j\omega}$$

Тізбектің спектралды мінездемесі:

$$Z(j\omega) = R + \frac{1}{j\omega C} = \frac{1 + j\omega RC}{j\omega C}$$

Тоқтың жиілік спектрі Ом заңы бойынша (4.93):

$$I(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{Z(j\omega)} = \frac{U j\omega C}{(a + j\omega)(1 + j\omega RC)} = \frac{F_1(j\omega)}{F_2(j\omega)}$$

Ажырату формуласында: $F(j\omega) = (a + j\omega)(1 + j\omega RC)$

бұдан түбірлер:

$$j\omega = -\alpha; j\omega = -\frac{1}{RC};$$

$$F_2'(j\omega) = 2j\omega RC + aRC + 1; F_1(j\omega) = j\omega CU;$$

$$F_1(j\omega_1) = -aCU; F_1(j\omega_2) = -\frac{U}{R};$$

$$F_2'(j\omega_1) = 1 - aCR; F_2'(j\omega_2) = 1aCR.$$

Ажырату формуласымен өтпелі тоқты табамыз:

$$i(t) = \frac{UC}{aRC - 1} \left(ae^{-at} - \frac{1}{RC} e^{-t/RC} \right),$$

Конденсатордағы өтпелі кернеу:

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = \frac{UC}{aRC - 1} (-e^{-at} + e^{-t/RC}),$$

Санды мағынасын қоямыз:

$$i(t) = 0.25(2e^{-10t} - e^{-5t}), A; u_c(t) = 50(e^{-5t} - e^{-10t}), B.$$

Осы қорытындыны келесі амалмен табуға болады: Кірме кернеу жиілік спектрі анықталады:

$$U_1(j\omega) = \frac{U}{a + j\omega};$$

Кернеудің берілетін функциясының жиілік спектрі анықталады:

$$K_u(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)};$$

$$U_2(j\omega) = I(j\omega) \frac{1}{j\omega C} = \frac{U_1(j\omega)}{R + \frac{1}{j\omega C}} \cdot \frac{1}{j\omega C};$$

$$K_u(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega CR};$$

Шықпа кернеудің жиілік спектрі:

$$U_2(j\omega) = K_u(j\omega) \cdot U_1(j\omega) = \frac{U}{(a + j\omega)(1 + j\omega RC)} = \frac{F_1(j\omega)}{F_2(j\omega)}.$$

Ажырату теоремасы мен шықпа кернеу түпнұсқасын табамыз:

$$u_2(t) = u_c(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(j\omega_k)}{F_2'(j\omega_k)} e^{j\omega_k t}.$$

Мұнда: $F_1(j\omega)=U=50B$; $F_2(j\omega) = (1 + j\omega RC)(\alpha + j\omega)=0$

Осыдан: $j\omega_1 = -\alpha = -10$; $j\omega_2 = -\frac{1}{RC} = -5$;

$$F'_2(j\omega) = j2\omega RC + \alpha RC + 1$$

$$F'_2(j\omega_1) = 1 - \alpha RC; F'_2(j\omega_2) = -1 + \alpha RC;$$

Онда:

$$u_c(t) = \frac{U}{1 - \alpha RC} e^{-\alpha t} + \frac{U}{-1 + \alpha RC} e^{-t/RC} = \\ = U(-e^{-\alpha t} + e^{-t/RC}) = 50(e^{-5t} - e^{-10t}), B;$$

$$i(t) = C \frac{du_c}{dt} = 0.25(2e^{-10t} - e^{-5t}), A.$$

4.7 Дюамели интегралы арқылы өтпелі үдерісті есептеу

4.7.1 Жалпы мәлімет

Бұл әдіс бастапқы нөлді мағынасы, егер де, пассивті екіұшты кірме кернеуі күрделі заңмен өзгерсе, үзгіні қосқанда уақытында қолданылады. Бұл әдістің мәні – тоқтың кірме кернеуінің ең аз импульсінің әсерінің нәтижесінен өтпелі ток анықталады.

Кернеудің бір секірісіндегі $u(t)=I$ өтпелі ток сол кернеу мен тізбек өткізгіштігінің көбейтіндісіне тең: $t_I(t)=I \cdot g(t)=g(t)$

$g(t)$ - екі ұшты өтпелі өткізгіштегі, Om^{+1} = Сим Осыған ұқсас тармақтағы кернеуді анықтаймыз:

$$u_I(t) = I \cdot y(t) = y(t)$$

$y(t)$ - кернеудің өтпелі функциясы егер де кірмеге тұрақты кернеу 1 В берсе, тізбектің берілген нүкте арасындағы кернеуге тең.

$g(t)$, $y(t)$ функцияларды уақытша функциялар деп атайды немесе уақытша мінездемелер және $h(t)$ деп белгіленеді. Мысалы, R, L бірізді тізбекте тұрақты кернеуге қосылған, өтпелі ток:

$$i(t) = \frac{U}{R} (1 - e^{-R/L \cdot t}) = U \cdot g(t),$$

$g(t) = \frac{1}{R} (1 - e^{-R/L \cdot t})$ - өтпелі өткізгіштілік 1В кернеудегі токқа тең.

R, C бірізді тізбекте, тұрақты кернеуге қосылған конденсатордағы өтпелі кернеу осыған ұқсас:

$$u_c(t) = U(1 - e^{-t/RC}) = U \cdot y(t)$$

$y(t)=1-e^{-t/RC}$ – кернеудің өтпелі функциясы,
 1В кірме кернеуде конденсатор кернеуіне тең.
 Осы тізбектің өтпелі өткізгіштігі:

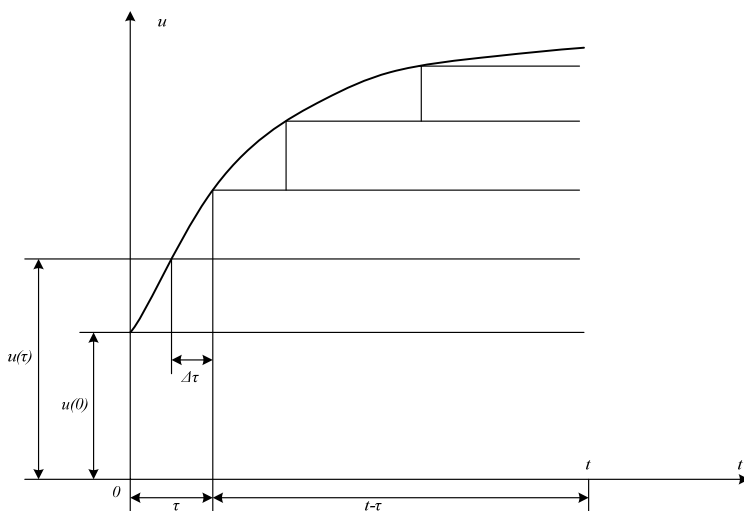
$$g(t) = \frac{1}{R} e^{-t/RC}$$

Кірмедегі кернеу қисығы тік бұрышты кернеу секірісіне, баспалдақ түрдегі функцияға алмасады, ал өтпелі тоқ олардың қосындысының әсерінен.

4.7.2 Дюамели интегралының жазу формасы

Пассивті екі ұштыны үздіксіз өзгеретін кернеумен қосқандағы, өтпелі үдерісті қарастырамыз (4.36-сурет). Оны, тік бұрышты секіріс Δu бар баспалдақты функцияға алмастырамыз.

Онда, қосу процессі келесіден тұрады, яғни бастапқы қосу $t=0$ кезінде кернеуге $u(0)$ және кернеу Δu жалғасқан қосулардан уақыт интервалы Δt жылжыған және кернеу қисығының өсуі мен төмендеуіне байланысты, қосу немесе алу белгісі бар.



4.36-сурет.

Уақыт мезгілі t болғанда $u(0): u(0) \cdot g(t)$ кернеудегі тоқ құрамасы. Сол уақыттағы тоқ құрамасы Δu кернеуден: $\Delta u \cdot g(t-\tau)$

бұдан $d(t-\tau)-\Delta u$ – кернеудің әсер ететін уақыты кернеу секірісін келесі түрде жазамыз:

$$\Delta u \approx \Delta \tau \cdot t d\alpha = \Delta \tau \cdot u'(\tau)$$

Онда ток құрамасы осы кернеуден:

$$\Delta u \cdot d(t-\tau) = u'(\tau) \cdot \Delta \tau \cdot g(t-\tau)$$

Егер де, барлық көрсетілген уақыт аралығын $t=0$ деп t -дейін, бір неше $\Delta \tau$ аралығына бөлсек, қортындылау ток бірнеше ток құрамасының жиыны болады.

$\Delta \tau \rightarrow 0$ десек, қосындыны интегралдаумен алмастырамыз. Ток түрі:

$$i(t) = u_0 \cdot g(t) + \int_0^t u'(\tau) \cdot g(t - \tau) dt. \quad (4.96)$$

(4.96) теңдеу, Дюамель интегралы немесе формуласы және жазбаның бірінші формасы болады.

Интегралдың екінші жазба формасы:

$$i(t) = u(0) \cdot g(t) + \int_0^t u'(t - \tau) \cdot g(\tau) dt \quad (4.97)$$

жазбаның үшінші формасы:

$$i(t) = g(0) \cdot u(t) + \int_0^t u(\tau) \cdot g'(t - \tau) dt; \quad (4.98)$$

төртінші:

$$i(t) = g(0) \cdot u(t) + \int_0^t u(t - \tau) \cdot g'(\tau) dt; \quad (4.99)$$

бесінші:

$$i(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t u(t - \tau) \cdot g(\tau) dt; \quad (4.100)$$

дифференциалдағаннан кейін оны бірінші немесе екінші формаға келтіреді.

алтыншы жазба формасы:

$$i(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t u(\tau) \cdot g(t - \tau) dt. \quad (4.101)$$

4.7.3 Дюамель интегралы арқылы өтпелі үдерісті есептеу тәртібі

Дюамель интегралы арқылы өтпелі үдерісті есептеу үшін:

1) $g(t)$ өтпелі өткізгіштілікті анықтайды
 2) $g(t)$ функциядағы уақытын t -ны $t-\tau$ -ға ауыстырып $g(t-\tau)$ -ны анықтайды

3) $u'(\tau)$, $u'(\tau)$ -да t -ны τ -ға ауыстырып туындыны анықтайды

4) (4.96) пайдаланып, шешімін табамыз.

Активті екі ұшты түрдегі тізбек есебін кезеңмен орындайды:

– пассивті екі ұштыны есептеу

- бұлақты қысқа тұйықталуында $u(t)$ активті екіұштыны есептеу;
- тізбектегі тоқты үстіне қою әдісімен есептеу

4.7.4. Дюамель интегралы арқылы мысалдарды есептеу.

1-мысал R, C бір-ізді тізбектің (4.5-сурет) параметралы: R=1000Ом, C=1мкФ. Берілген $u(t)$ кестесінің (4.37-сурет) өтпелі тоғын анықтау.

Есептелуі.

1) қорытындылау кернеуді екі құрама $u_1(t)$ және $u_2(t)$ түрінде аламыз уақытпен жылжыған бұлардың жиыны берілген кірме $u(t)$ кернеуді көрсетеді

2) R, C тізбектің өтпелі өткізгіштілігін анықтаймыз:

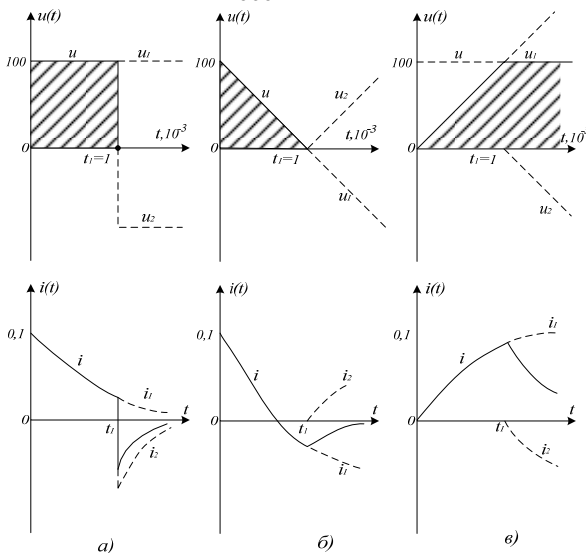
$$g(t) = \frac{1}{R} e^{-t/RC} = \frac{1}{1000} e^{-1000t};$$

3) Дюамель интегралының жазбасының бірінші формасын пайдаланамыз:

$$i(t) = u(0) \cdot g(t) + \int_0^t u'(\tau) g(t - \tau) d\tau; \text{ а) } 0 \leq t \leq t_1$$

$$u(t) = U = \text{const}; u'(\tau) = 0;$$

$$i(t) = u(0) \cdot g(t) = 100 \frac{1}{1000} e^{-1000t} = 0.1 e^{-1000t}, \text{ А;}$$



4.37-сурет.

$t \geq t_1$ болғанда:

$$i(t) = U \cdot g(t) - U g(t - \tau) = 0.1e^{-1000t} - 0.1e^{-1000t} - 0.1e^{-1000(t-t_1)} A.$$

Бұл жерде екінші қосынды кернеу құрамаларының жылжуын есепке алады.

б) $0 \leq t \leq t_1$ болғанда Дюамели интеграл құрамасы

$$u(0) \cdot g(t) = 100 \frac{1}{1000} e^{-1000t} = 0.1e^{-1000t}, A;$$

$$u' = \frac{U}{t_1} = -100 \cdot 10^3 = -10^5 B/C;$$

$$g(t) = \frac{1}{1000} e^{-1000t}; \quad g(t - \tau) = \frac{1}{1000} e^{-1000(t-\tau)};$$

$$\int_0^t g(t - \tau) d\tau = \int_0^t \frac{1}{1000} e^{-1000(t-\tau)} d\tau = 10^{-6} - 10^{-6} e^{-1000t}$$

Берілген уақыт интервалындағы өтпелі ток:

$$i(t) = 0.2e^{-1000t} - 0.1, A.$$

$t \geq t_1$ болғанда:

$$i(t) = u(0) \cdot g(t) + \int_0^t u'(\tau) g(t - \tau) d\tau + \int_{t_1}^{t_2} u'_2(\tau) g(t - \tau) d\tau$$

алдыңғы екі қосынды белгілі. Үшіншісін табамыз:

$$\int_{t_1}^{t_2} u'_2(\tau) g(t - \tau) d\tau = \int_{t_1}^{t_2} 10^5 \frac{1}{1000} e^{-1000(t-\tau)} d\tau = 0.1 - 0.1e^{-1000(t-t_1)}.$$

Өтпелі ток түрі:

$$i(t) = 0.2e^{-1000t} - 0.1e^{-1000(t-t_1)}, A.$$

в) $0 \leq t \leq t_1$ болғанда

$$i(t) = u(0) \cdot g(t) + \int_0^t u'(\tau) g(t - \tau) d\tau = 0 + \int_0^t 10^5 \frac{1}{1000} e^{-1000(t-\tau)} d\tau = 0.1(1 - e^{-1000t}), A.$$

$t \geq t_1$ болғанда, табылған ток құрамасына кернеудің $u(t)$ ток құрамасы қосылады, керісінше таңбасы бар және t уақытқа жылжыған:

$$i(t) = 0.1(1 - e^{-1000t}) - 0.1(1 - e^{-1000(t-t_1)}) = 0.1e^{-1000(t-t_1)} - 0.1e^{-1000t}, \text{ A.}$$

Шешімдер графикалық бейнелері 4.37 а, б, в-суретте көрсетілген.

2-Мысал. R, L бірізді тізбектің (4.4-сурет) параметрлері: R=100 Ом, L=0,5 Гн. тік бұрыш импульс әсерінен, өтпелі тоқты анықтау керек.

Оның параметрлері: U=100В, ұзақтылығы t₁=0,05с.

Импульс бейнесі графикалық түрде 4.37 а-суретте берілген.

Есептелуі: Дюамель интегралының құрамасы:

$$u(0) = U = 100\text{В}; g(t) = \frac{1}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) = 0.1(1 - e^{-20t});$$

$$u'(\tau) = 0; g(t - \tau) = 0.1(1 - e^{-20(t-\tau)}).$$

0 ≤ t ≤ t интервалына

$$i(t) = u(0) \cdot g(t) + \int_0^t u'(\tau)g(t - \tau)d\tau = 100 \cdot 0.1(1 - e^{-20t}) + 0 = 10(1 - e^{-20t}), \text{ A.}$$

t ≥ t болғанда:

өткен мысалда (4.37 а-суретте) көрсетілгендей, t ≥ t болғанда жаңа бұлақ u₂(t)=-100В әрекет етеді.

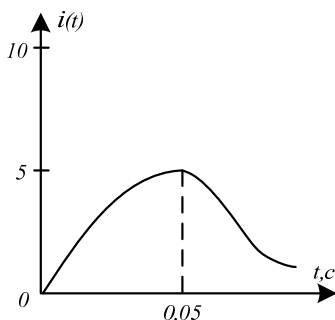
Бұл жағдайда өтпелі ток: i(t)=i₁(t)+ i₂(t)

бұнда i (t)=10(1-ℓ^{-20 t}) - бұрын табылған i₂ (t)=10(1-ℓ^{-20 (t - t₁)}),

A.

t ≥ t, дегі қорытындылау ток i(t)=10(1-ℓ^{-20 t})-10(1-ℓ^{-20(t - t₁)})=10ℓ^{-20(t - t₁)}(ℓ^{20t₁}-1), A;

Өтпелі ток кестесі 4.38-суретте көрсетілген.



4.38-сурет.

4.7.5 Түйіншік теоремасы

Үздіксіз өзгертін кернеуді, тік бұрышты секірісті баспалдақты функциямен ауыстырмай бірден импульспен алмастыруға болады.

4.6.2-бөлігінде көрсетілген бір импульс пен бір секіріс байланысты:

$$\delta(t) = \frac{dI(T)}{dt}$$

Тектес байланыс олардың шықпа мінездемесінде импульсті өтпелі мінездеме түрінде көрсетіледі

$$K(t) = \frac{dh(t)}{dt} h(0) = 0;$$

$$K(t) = \frac{dh(t)}{dt} + h(0)\delta(t)h(0) \neq 0.$$

Бұнда $h(t)$ – бір секіріс өтпелі мінездемесі.

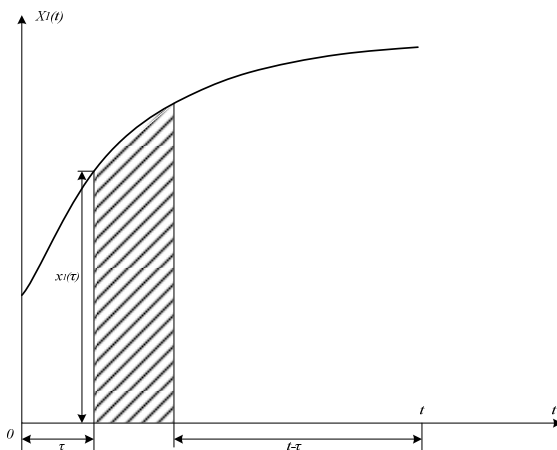
Барлық қисықты $x_1(t)$ -бөлек импульс түрінде көрсетеміз, амплитудасы $x_1(t)$, ұзақтылығы $d\tau$ (4.39-сурет). $t=\tau$ уақытта берілген бір импульстік шықпадағы әсері импульсті өтпелі мінездемесімен анықталады $k(t-\tau)$, бұнда $(t-\tau)$ -импульсті әсер ететін уақыт шамасынан берілген t уақыт шамасына дейін. Қарастырылып жатқан импульс ауданы бірге тең болмай, $x_1(t)$ $d\tau$ -болғандықтан, өтпелі мінездеме: $K(t-\tau) \cdot x_1(\tau)d\tau$ болады.

Барлық импульс әсерін қосып, шықпадағы ықпалын сыртқы ауысудан $x_1(t)$ табамыз:

$$x_2(t) = \int_0^t K(t-\tau) \cdot x_1(\tau)d\tau$$

немесе

$$x_2(t) = \int_0^t K(\tau) \cdot x_1(t-\tau)d\tau.$$



4.39-сурет.

Табылған формуланы екі функцияның $K(t)$ және $x(t)$ түйіншек теоремасы деп атайды.

Мысал. Өткен мысалды түйіншек теоремасы арқылы есептеу. Кірме кернеуі тікбұрышты импульсті, амплитудасы $U=100\text{В}$, ұзақтылығы $t_1=0,05\text{с}$.

Бірізді тізбекте $R=10\text{ Ом}$, $L=0,5\text{ Гн}$. табу керек $i(t)$

Есептелуі: Әсер ететін сигналды екі қосынды түрде аламыз (4.37 а-сурет)

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t).$$

Түйіншек теоремасының бірінші жазба формасын пайдаланамыз:

$$i(t) = \int_0^t K(t - \tau) \cdot u(\tau) d\tau.$$

Түйінше теоремасының құрамасын анықтаймыз, импульсті өтпелі мінездемесі:

$$K(t) = \frac{dg(t)}{dt} = 2e^{-20t};$$

Бақылау сұрақтары

1. Электртізбектегі өтпелі үдерістер дегеніміз не?
2. Коммутация заңдарын түсіндіріңіз.
3. Дифференциалды теңдеуді түсіндіріңіз және оны өтпелі үдеріске қалай қолданамыз?
4. Өтпелі үдерісті есептеу әдісінің ерекшеліктері.
5. Өтпелі үдерісті есептеуді классикалық әдісімен шешкенде, тұрақты интегралдарды табу жолдарын көрсетеміз.
6. R , L және R , C тізбектердегі үдерістердің i , u -ді есепте.
7. Тармақталған RLC тізбегіндегі үдерістердің ерекшелігі.
8. R , L , C тізбегіндегі конденсатордың апериодикалық разрядын математикалық түрінде түсіндіріңіз.
9. R , L , C тізбегіндегі конденсатордың тербеліс разрядын математикалық түрінде жаз және физикасын түсіндіріңіз.
10. Үшінші дәрежелі дифференциалда теңдеудің жалпы шешімін түсіндіріңіз.
11. Өтпелі процесте тізбектің кірме кедергісін не үшін қолданады?
12. Өтпелі процесті оператор әдісімен шешудің не ерекшелігі бар?
13. Тұрақты сан мен көрсеткіш функциясының бейнеулерін дәлелденіз.
14. Интеграл мен дифференциал функцияларының бейнелеулерін дәлелденіз.
15. Ом және Кирхгоф заңдарының оператор түрлерін жазып, олардың ерекшеліктерін түсіндіріңіз.
16. Түпнұсқадан бейнелеуді және керісінше формулаларды жазыңыз және олардың физикалық мәндерін түсіндіріңіз.
17. Дюамель интегралын қай уақытта қолданады?

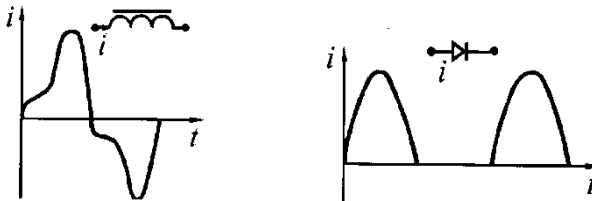
5. Синусоидалды емес тоқ тізбегі

Бұрынырақ, синусоидалды ЭҚК, тоқ және кернеу электр тізбегін қарастырдық. Тәжірибеде кернеу мен тоқтар қисығының формалары кейбір себептермен, синусоидалдыдан өзгеше. Электрбайланыс тізбектерінде, электронды және жартылай өткізгіш құрылғыларында, синусоидалды формада өзгешілігі, құрылғылардың жұмыс үдерісіне байланысты. Сондықтан кезенді синусоидалды емес тоқ теориясының элементерін, автоматика, электроника құрылғыларының іс-әрекет қағидаттарын білу қажет. Осындай тізбектерді есептеу әдістері осы бөлімде беріледі.

5.1. Айнымалы тоқтардың синусоидалды формада өзгешелігінің себептері

Тоқтар мен кернеулер қисықтарының синусоидалды формада өзгешілік себептері бір нешеу.

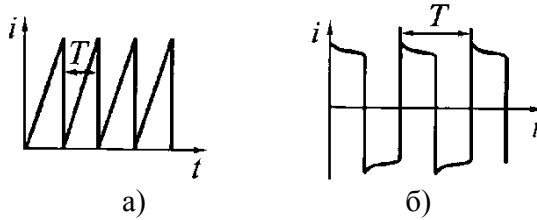
Біріншіден, айнымалы тоқты генераторларда ауа өзегін жағалай магнит индукциясының қисығының таратылуынан, машиналардың заманада жетілмегендіктерінен, синусоидтан өзгешілігі болуы мүмкін. Осы себептен орамада синусоидалды емес ЭҚК пайда болады. Бұндай ЭҚК қисығының формасының синусоидалдыдан өзгешілігі қажет емес, оны азайтуға тырысады.



5.1-сурет

Екіншіден, синусоидалды емес тоқтар мен кернеулердің тізбекте пайда болуы, тізбекке түрлі сызықты емес элементердің сызықты емес катушкалар, конденсаторлар, түзеткіштер т.б. қосылуына байланысты 5.1-суретте тізбектегі тоқ қисығы

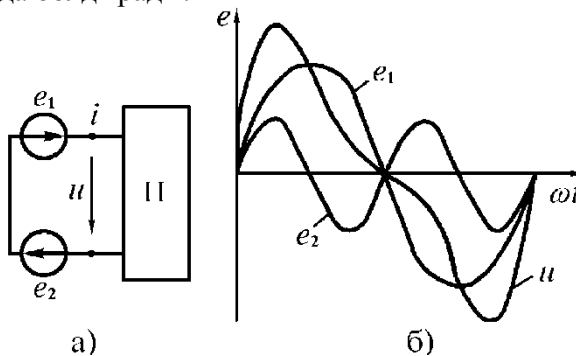
көрсетілген, оның ферромагнитті өзегі бар катушкасы және тізбектегі жартылай өткізгіш диоды мен резисторы бар.



5.2-сурет

Үшіншіден, көп электротехникалық және радиотехникалық құрылғыларда генераторларды құрағанда, электр тізбектегі кернеу мен тоқты синусидалды емес жасайды. Импульстер формасы түрлі болады: ара тәрізді (5.2 а-сурет) және тік бұрышты (5.2 б-сурет) т.б.

Төртіншіден, электр тізбегіне, түрлі жиілікті синусидалды ЭҚК – лы генераторларда қосса, синусидалды емес тоқ пен кернеуді пайда болдырады.



5.3-сурет.

Синусидалды емес тоқ пен сызықты электр тізбегінің есептеу әдістерін мысалмен қарастырайық. Сызықты параметрлері бар пассивті екіұшты кірмесіне түрлі жиілікті ЭҚК екі қорек көзі қосылған (5.3-сурет):

$$e_1 = E_{1m} \sin \omega t; \quad e_2 = E_{2m} \sin 2\omega t$$

Екіұшты қысқышындағы кернеу ЭҚК қосындысына тең:

$$u = e_1 + e_2 = E_{1m} \sin \omega t + E_{2m} \sin 2\omega t$$

Кернеудің синусиодалды еместігін (5.3 б-суретте) көруге болады. Екіұшты кірмесіндегі i тоғы да синусиодалды емес. Тізбекті есептеу үшін теңестіру қағидатын қолданамыз, қортындылау тоқ ЭҚК әсерімен бөлек пайда болатын жеке тоқтар қосындысы түрінде анықталады.

Егерде тізбекте, синусиодалды емес ЭҚК қорек көзі болса, оларды үйлесімді құрамаларға ыдырату керек. Бөлек үйлесімді құрамалар есебі, белгілі, синусиодалды тоқ электр тізбегін есептеу әдісімен орындалады.

5.2. Синусиодалды емес функцияларды Фурьенің тригонометриялық қатарына ыдырату

Математикадан белгілі, әрбір кезеңді синусиодалды емес функция $f(\omega t)$, Дирихле шартын қанағаттандыратын Фурьенің тригонометриялық қатарын ыдыратуға мүмкіндігі бар:

$$f(\omega t) = A_0 + A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + A_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) = \sum_{k=0}^{\infty} A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k), \quad (5.1.)$$

A_0 – тұрақты құрамы (нөлді үйлесім $k=0$) $A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$ - бірінші (негізгі) гармоника кезеңі бастапқы синусиодалды емес функция кезеңіне тең (барлық басқа қосындылар жоғарғы гармоника деп аталады). k гармоника номері

$A_{1m}, A_{2m} \dots A_{km}$ - сәйкес гармоникалар амплитудасы
 $\psi_1, \psi_2 \dots \psi_k$ - гармоника бастапқы фазалары; $\omega = \frac{2\pi}{T}$ - негізгі жиілік.

T – синусиодалды емес функция кезеңі. (5.1) теңдеудің әр мүшесін формула мен көрсетеміз.

$$A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) = A_{km} \cos \psi_k \cdot \sin k\omega t + A_{km} \sin \psi_k \cdot \cos k\omega t = B_{km} \sin k\omega t + C_{km} \cos k\omega t, \quad (5.2)$$

Мұнда $B_{km} = A_{km} \cos \psi_k$; $C_{km} = A_{km} \sin \psi_k$; (5.2) есепке алып, Фурьенің тригонометриялық қатарындағы (5.1) теңдеуді басқа формада жазамыз:

$$f(\omega t) = A_0 + B_{1m} \sin \omega t + B_{2m} \sin 2\omega t + \dots + B_{km} \sin k\omega t + \dots + C_{1m} \cos \omega t + C_{2m} \cos 2\omega t + \dots + C_{km} \cos k\omega t = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (B_{km} \sin k\omega t + C_{km} \cos k\omega t). \quad (5.3)$$

(5.3) теңдеу қатар коэффициенті Эйлер формуласымен анықталады. Тұрақты құрамы A_0 , синусоидалды емес функцияның орташа мағынасы түрінде анықталады:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t. \quad (5.4)$$

Гармоника амплитуда құрамасы

$$B_{km} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin k\omega t d\omega t; \quad (5.5)$$

$$C_{km} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos k\omega t d\omega t \quad (5.6)$$

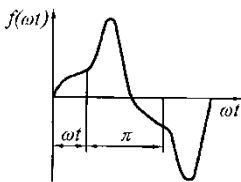
(5.4...5.7) теңдеулер, синусоидалды емес функцияны, аналитикалық тапсырма жағдайында, Фурье қатары түрінде елестетуге мүмкіндік береді. Гармоника, k – тақ сан болса, тақ гармоника деп аталады, егерде k – жұп сан болса, жұп гармоника деп аталады. Фурье қатарына синусоидалды емес функциясын ыдыратқанда қатар коэффициентін жеңіл табатын әдіс қолдану керек. Бұл әдістер негізі мынада функция жиі түрлі түсті симметрияны иемденеді.

5.3. Синусоидалды емес функция симметриясы.

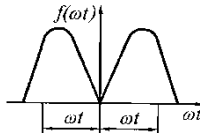
Гармоника есебін азайту үшін, қатарға ыдыратудың кейбір ерекшеліктерін ұғып алу керек.

1) Абсцисса өсіне қатысты симметрия. Кезекті қисықтар, $f(\omega t) = -f(\omega t + \pi)$ шартын қанағаттандыратын, абсцисс өсіне қатысты деп аталады, яғни кез келген екі абсцисске, жарты кезеңге айырмашылығы бар, ординаттар сәйкес шамасымен керісінше белгісімен теңдес. (5.4-сурет) Бұндай функциялардың тұрақты құрамасы мен жұп гармоникасы жоқ қатарға ыдырайды. $A_0 = A_{2m} = A_{4m} = A_{6m} = \dots = 0$. Сондықтан абсцисс өсіне қатысты симметриялы қисықта тек тақ гармоника болады:

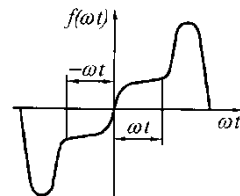
$$f(\omega t) = A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + A_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3) + A_{5m} \sin(5\omega t + \psi_5) + \dots \quad (5.8)$$



5.4-сурет



5.5-сурет



5.6-сурет

Электротехникада абсцисс өсіне қатысты симметриялы қисыққа, болат өзекті катушкадан өтетін тоқ қисығы жатады, синусоидалды кернеу көрек көзіне қосылған.

2) Ординат өсіне қатысты симметрия. Айнымалы тоқ және кернеуді түзеткеннен кейін, форма пайда болады, функция түрі тиісті координат басын таңдағанда, $f(\omega t) = f(-\omega t)$ шартын қанағаттандырады. Мұндай функцияларды жұп деп айтады, ординат өсіне қатысты олар симметриялы Фурье қатарына ыдырағанда синусты құрамалар болмайды, яғни $B_{km} = 0$;

$$C_{km} = A_{km}$$

Қатарда тұрақты құрамалар және бастапқы фазасыз косинусоидтар болады:

$$f(\omega t) = A_0 + C_{1m} \cos \omega t + C_{2m} \cos 2\omega t + C_{3m} \cos 3\omega t + \dots \quad (5.9)$$

3) Координат басына қатысты симметрия. Кезеңді қисықтар, координат басына қатысты симметриялы деп аталады, егер де

оған шарт $f(\omega t) = -f(-\omega t)$ орындалса, яғни кез келген екі абсциске бірдей мағыналы, белгілері түрлі, ординаттар сәйкес болса, шамасы бірдей және белгілері керісінше (5.6-сурет). Мұндай функцияны тақ деп атайды. Фурье қатарында бұндай қисықтарда тұрақты құрама мен бастапқы фазасыз косинусоид болмайды:

$$\psi_k = 0; A_0 = 0; C_{km} = 0; A_{km} = B_{km}.$$

$$f(\omega t) = A_{1m} \sin \omega t + A_{2m} \sin 2\omega t + A_{3m} \sin 3\omega t + \dots \quad (5.10)$$

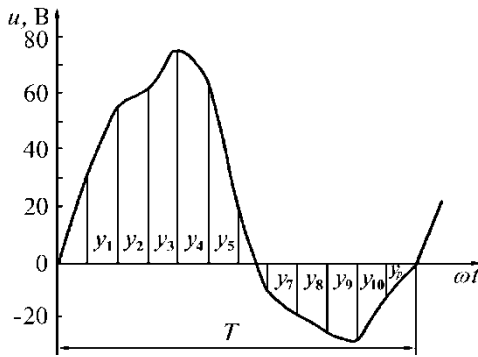
Егер кезеңді функция п.п 1 мен 2 дегідей симметриялы болса, Фурье қатарына ыдырағанда тақ номерлі косинусоид болады, ал егер де 1 т.т. дегідей симметрия түрі болса Фурье қатарына ыдырағанда тақ нөмірлі синусоид болады. Симметрия түрлері есеп басын таңдауға байланысты. Симметриялы емес қисықты екі топқа бөлуге болады:

- геометрия түрінде дұрыс формадағы қисықтар, мысалы: үш бұрыш, тік бұрыш, т.б.
- шамалаған қисықтар формасы (геометрия түрінде дұрыс емес) кестелер.

5.4. Фурье қатарының гармоникасын графоаналитикалық әдіспен табу

Егерде, аналитикалақ функцияны тоқ пен кернеу осциллограммасынан табу қиын болса, ыдыратудың графоаналитикалық әдісін пайдаланады. Фурье қатарына графика түрінде ыдырату алдында функцияның симметрия түрін білу керек.

Бірінші, осциллограммадан синусоидалды емес функцияның Т кезеңін табады (5.7-сурет). Содан кейін кезең интервалын бірдей n – бөлікке бөледі $\Delta x = \frac{2\pi}{n}$; $n=12, 24, 36$ және бөлінген нүктелерде ординат жүргізеді $y_1, y_2 \dots y_p$ (p – ордината нөмірлері)



5.7-сурет

$A_0, B_{km}, C_{km}, A_{km}$ амплитудасын есептегенде интегралдау операциясын, қосындылардың соңғы санының сомасымен ауыстырады, ал дифференциал аргументін $d\omega t = \Delta x = \frac{2\pi}{n}$ мен ауыстырады.

(5.4....5.6) теңдеулерді өзгертпейміз:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t \approx \frac{1}{2\pi} \left[y_1 \frac{2\pi}{n} + y_2 \frac{2\pi}{n} + y_3 \frac{2\pi}{n} + \dots \right] = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^{p=n} y_p; \quad (5.11)$$

$$B_{km} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin k\omega t d\omega t \cong \left[y_1 \sin\left(k \frac{2\pi}{n}\right) \cdot \frac{2\pi}{n} + y_2 \sin\left(2k \frac{2\pi}{n}\right) \cdot \frac{2\pi}{n} + y_3 \sin\left(3k \frac{2\pi}{n}\right) \cdot \frac{2\pi}{n} + \dots \right] = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^{p=n} y_p \sin\left(kp \frac{2\pi}{n}\right); \quad (5.12)$$

$$C_{km} = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^{p=n} y_p \cos\left(kp \frac{2\pi}{n}\right). \quad (5.13)$$

(5.12, 5.13) теңдеулерде k – гармоника нөмірі, p – координат нөмірі. Қатарлар гармоникасының амплитудасы мен бастапқы

фазаларын (5.7) теңдеумен анықтайды. ψ_k бұрыш белгісі, B_{km} мен C_{km} белгісіне байланысты.

5.5 Синусоидалды емес тоқ пен кернеудің модуль бойынша нақты және орташа мағынасы

Синусоидалды емес токтың кернеудің нақты мағынасын кезеңдегі токтың орташа квадратты мағынасы түрінде анықтайды. Тоқ қатары берілген дейміз:

$$i = I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{2m} \sin(2\omega t + \psi_1) + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k).$$

Тоқтың нақты мағынасын формула бойынша есептейміз:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{k=0}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) \right]^2 dt}. \quad (5.14)$$

Интегралды квадраттағанда, бірнеше интегралға бөлінеді, қорытындысында тұрақты құрама квадратын және жеке синусоидтар орташа лездік квадрат мағынасын береді. Одан басқа, лездік мағынасының екі есе көбейтілген орташа мағынасын көрсететін түрлі жиілікті синусоидтың интегралдары бар:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_0^T \int I_{km}^2 \sin^2(k\omega t + \psi_k) + \frac{2}{T} \sum_0^T \int I_{km} I_{im} \sin(k\omega t + \psi_k) \sin(i\omega t + \psi_i) dt} \quad (5.15)$$

Теңдеулердің әр интегралдың екінші қосындысы (5.15) нөлге тең, себебі, түрлі жиілікті екі синусоид көбейтіндісінің орташа мағынасы нөл болады.

(5.15) теңдеуде синусоидалды емес токтың әсер мағынасы:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_0^T \int I_{km}^2 \sin^2(k\omega t + \psi_k) dt} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}. \quad (5.16)$$

Сонымен синусоидалды емес токтың әсер мағынасы тұрақты құрамаларды қоса, барлық гармоникалардың әсерлік

мағынасының квадрат түбіріне тең. Ол әр бөлек гармониктің бастапқы мағынасына байланысты емес. Осыған сәйкес синусоидалды емес кернеудің әсерлік мағынасы анықталады:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}$$

Мысалы, егерде тоқтың лездік мағынасы берілсе, тоқтың әсерлік мағынасын былай табу керек:

$$i = 100 + 282 \sin \omega t + 141 \sin(3\omega t + 30^\circ) + 70,7 \sin(5\omega t - 20^\circ), A,$$

$$I = \sqrt{100^2 + \frac{282^2}{2} + \frac{141^2}{2} + \frac{70,7^2}{2}} = 250 A.$$

Кезекті синусоидалды емес функция $f(t)$ модуль бойынша орташа мағынада беріледі

$$A_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T |f(t)| dt. \quad (5.17)$$

Функцияның модуль бойынша орташа мағынасы дегеніміз - кезеңдегі сол функцияның модулінің орташа мағынасы. Әсерлік мағынадан өзгешілігі, ол ψ_k мағынасына бағынышты. Егерде, $f(\omega t)$ қисығы, абсцисс өсіне қатысты симметриялы болса және жарты кезең уақытында белгісін өзгертпесе, оның модуль бойынша орташа мағынасы жарты кезеңдегі орташа мағынаға тең:

$$A_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(t) dt$$

Егерде, барлық кезең кезіндегі функция белгісін өзгертпесе, модуль бойынша функцияның орташа мағынасы тұрақты құрамаға тең.

Мысал: Модуль бойынша синусоидалды емес тоқтың орташа мағынасын анықтау керек :

$$i = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3) + I_{5m} \sin(5\omega t + \psi_5).$$

(5.17) теңдеуді интегралдап табамыз :

$$I_{\text{ср. по мод}} = \frac{2}{\pi} \left(I_{1m} \cos \psi_1 + \frac{I_{3m}}{3} \cos \psi_3 + \frac{I_{5m}}{5} \cos \psi_5 \right)$$

5.6. Синусоидалды емес кезекті функциялар формасын сипаттайтын коэффициенттер

Зерттеп жатқан қисықтың синусоидтан өзгешілігін санды бағалау үшін, амплитуда, форма және бұрмалау коэффициенттері енгізіледі. Амплитуда коэффициенті дегеніміз – максималды токтың әсерлі мағынасына қатынасы.

$$K_a = \frac{I_{\max}}{I}, K_a > 1.$$

Синусоидқа $K_a = \sqrt{2} = 1,41$.

Форма коэффициенті дегеніміз – токтың әсерлі мағынасының, модуль бойынша орташа токтың мағынасына қатынасы:

$$K_{\phi} = \frac{I}{I_{\text{ср.по мод}}}, K_{\phi} > 1.$$

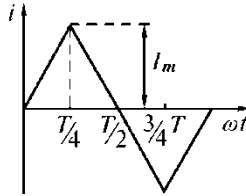
Егер синусоид болса $K_{\phi} = 1,11$;

Бұрмалау коэффициенті дегеніміз – токтың негізгі гармоникасының әсерлі мағынасының барлық синусоидалды емес токтың әсерлі мағынасына қатынасы:

$$k_u = \frac{I_1}{I}; K_u < 1$$

Бұл жерде $I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 \dots}$;

Есеп: Синусоидалды емес токтың өзгеру кестесі берілген (5.8-сурет). Амплитуда мен форма коэффициенттерін табу керек. Ток қисығы, абсцисс осіне қатысты симметриялы болғандықтан, әсерлі және модульге қатысты токтың орташа мағынасын табу үшін 0 ден $t = T/4$ интервалда интегралдаймыз. $t=0$ ден $t=T/4$ интервалындағы токтың теңдеуі: $i = \frac{4}{T}t$



5.8-сурет

Токтың әсерлі мағынасы:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{4}{T} \int_0^{T/4} \left(I_m \frac{4t}{T} \right)^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{3}}$$

Модуль бойынша токтың орташа мағынасы:

$$I_{cp} = \frac{4}{T} \int_0^{T/4} i dt = \frac{4}{T} \int_0^{T/4} \frac{I_m \cdot 4}{T} dt = \frac{I_m}{2}$$

Форма коэффициенті:

$$K_\Phi = \frac{I}{I_{cp}} = \frac{I_m \cdot 2}{\sqrt{3} \cdot I_m} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,15$$

Амплитуда коэффициенті:

$$K_a = \frac{I_m}{I} = \sqrt{3} = 1,73;$$

5.7 Синусоидалды емес токтың тізбек қуаты

Синусоидалды емес токтың активті қуаты дегеніміз – бірінші гармониканың T кезеңіндегі лездік қуаты:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt. \quad (5.18)$$

Кернеу мен токты Фурье қатарымен елестетеміз:

$$u = U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k);$$

$$i = I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1 - \varphi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2 - \varphi_2) + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_k).$$

Бұл қатарларды интеграл белгісін қоямыз (5.18):

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_{k=0}^{\infty} U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) \right) \left(\sum_{k=0}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_k) \right) dt$$

Кезеңдегі түрлі жиілікті синусоидалды функция көбейтіндісінің орташа мағынасын нөлге тең деп есептеп, табамыз:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=0}^{\infty} U_{km} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) \sin(k\omega t + \psi_k - \varphi_k) dt$$

Интегралдаудан кейін:

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_{km} I_{km} \cos \varphi_k}{2} = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + U_3 I_3 \cos \varphi_3 + \dots = P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} P_k. \quad (5.19)$$

(5.19) теңдеуден көруге болады, синусоидалды емес тоқтың активті қуаты, бөлек гармоникалар активті қуаттар қосындысына тең.

Осыған сәйкес реактивті қуат формуласын табуға болады:

$$Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + U_3 I_3 \sin \varphi_3 + \dots = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k. \quad (5.20)$$

Синусоидалды емес тоқтың реактивті қуаты (5.20 теңдеу), бөлек гармоникалар реактивті қуаттарының алгебралық қосындысына тең.

Толық қуат, синусоидалды емес ток пен кернеудің әсерлі мағынасының көбейтіндісімен анықталады:

$$S = UI \quad (5.21)$$

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots};$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots};$$

Тоқ қысығы жалпы жағдайда формасымен кернеу қысығынан өзгеше,

$$S^2 \neq P^2 + Q^2$$

Тоқ пен кернеу қысықтар формасының өзгешілігін санды бағалау үшін қуаттың бұрмалау T түсінігін енгіземіз:

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (5.22)$$

$\frac{T}{S}$ қатынасы, қысықтар формасының өзгешілік өлшемі.

Тәжірибеде бұрмалау қуатты, қуатты түзету құрылғыларды зерттеуде есепке алады.

Активті қуаттың толық қуатпен қатынасы – қуат коэффициенті деп аталады:

$$\cos \varphi_3 = \frac{P}{S}$$

φ_3 - тоқ пен кернеу эквиваленті синусоидтар арасындағы фазалар бұрышының жылжуы, әсерлі мағынасы, синусоидалды емес шаманың әсерлі мағынасына тең.

Есеп. Тізбектің кірмесіндегі кернеумен тоқтың лездік мағынасы:

$$u = 7 + 52 \sin(\omega t - 60^\circ) + 14,1 \sin(3\omega t + 15^\circ), B;$$

$$i = 5 \sin(\omega t - 15^\circ) + 1,2 \sin(3\omega t - 45^\circ), A.$$

Активті және толық қуатты, қуат коэффициентін табу керек.

Есептелуі. Активті қуатты (5.19) теңдеумен анықтаймыз, $I_0 = 0$ деп есептеп.

$$P = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_3 I_3 \cos \varphi_3 = \frac{52}{\sqrt{2}} \cdot \frac{5}{\sqrt{2}} \cos(-45^\circ) +$$

$$+ \frac{14,1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1,2}{\sqrt{2}} \cos 60^\circ = 91,92 + 4,2 = 96,12, Bm,$$

Бұл жерде

$$\varphi_1 = \psi_{u1} - \psi_{i1} = -60^\circ - (-15^\circ) = -45^\circ;$$

$$\varphi_3 = \psi_{u3} - \psi_{i3} = 15^\circ - (-45^\circ) = 60^\circ.$$

Толық қуат:

$$S = U \cdot I = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2} \cdot \sqrt{I_1^2 + I_3^2} =$$

$$\sqrt{7^2 + \left(\frac{52}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{14,1}{\sqrt{2}}\right)^2} \times \sqrt{\left(\frac{5}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{1,2}{\sqrt{2}}\right)^2} =$$

$$= 38,72 \cdot 3,64 = 140,94, \text{ ВА.}$$

Қуат коэффициенті.

$$\cos \varphi_3 = \frac{P}{S} = \frac{96,12}{140,94} = 0,682.$$

5.8 Синусоидалды емес тоқтың электр тізбегін есептеу.

Синусоидалды емес тоқ тізбегін есептеу үшін, қорек көзінің кернеуі мен ЭҚК-ны Фурье қатарымен көрсету керек.

Есеп негізі теңестіру қағидаты болады, осы бойынша кез келген тармақтағы тоқтың лездік мағынасы, бөлек гармониктар тоқтарының лездік мағыналар қосындысына тең. Әр гармоникаға бөлек, тізбектің кез келген әдісімен есеп жүргізіледі. Бірінші ЭҚК-ның тұрақты құрамасы мен пайда болатын, содан кейін бірінші гармоника ЭҚК-сы мен пайда болатын тоқ пен кернеуді есептейді, т.б.

Тоқ пен кернеуді есептеуде, ЭҚК тұрақты құрамасымен пайда болатын, катушкадағы кернеуді нөлге тең дейміз.

$$\omega_0 = 0; \quad \omega_0 L = 0; \quad U_L = I_0 \omega_0 L = 0;$$

Конденсатордан тұрақты тоқ өтпейді:

$$x_C = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{0 \cdot C} = \infty; \quad I_0 = \frac{U_0}{x_C} = \frac{U_0}{\infty} = 0.$$

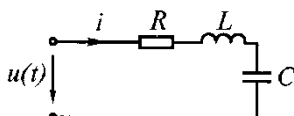
Бірінші және жоғарғы гармониктар есебін, белгілі, синусоидалды тоқ сызықты электр тізбегін есептеу әдісімен орындайды. Есептегенде ескеру керек, индуктивті кедергі жиілікке пропорционалды өседі, ал сыйымдылық кедергі жиілік өссе азаяды:

$$x_{L1} = \omega L; \quad x_{Lk} = k\omega L = kx_{L1};$$

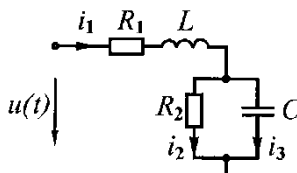
$$x_{C1} = \frac{1}{\omega C}; \quad x_{Ck} = \frac{1}{k\omega C} = \frac{x_{C1}}{k}.$$

(5.9) суреттегі тізбекте синусоидалды емес кернеу дейміз

$$u(t) = U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + U_{3m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots \quad (5.23)$$



5.9-сурет



5.10-сурет

Токтың лездік мағынасын табу керек. Синусоидалды емес токтың лездік мағынасы теңестіру қағидаты бойынша $i = I_0 + i_1 + i_3$

Тізбекте конденсатор болғандықтан, $I_0 = 0$, токтың тұрақты құрамасы жоқ.

Тізбектегі әр гармоникаға толық кедергі кешенін анықтаймыз:

$$\underline{Z}_1 = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = z_1 e^{j\varphi_1};$$

$$\underline{Z}_3 = R + j3\omega L - j\frac{1}{3\omega C} = Z_3 e^{j\varphi_3}.$$

Тоқтар амплитудасының кешені:

$$\underline{I}_{1m} = \frac{U_{1m}}{\underline{Z}_1} = \frac{U_{1m} e^{j\psi_1}}{Z_1 e^{j\varphi_1}} = I_{1m} e^{j(\psi_1 - \varphi_1)};$$

$$\underline{I}_{3m} = \frac{U_{3m}}{\underline{Z}_3} = \frac{U_{3m} e^{j\psi_3}}{z_3 e^{j\varphi_3}} = I_{3m} e^{j(\psi_3 - \varphi_3)}.$$

Токтың лездік мағынасы:

$$i = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1 - \varphi_1) + I_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3 - \varphi_3).$$

Синусоидалды емес кернеуі бар тізбектің есебі (5.23)

а) Тізбекте катушка бар. Бұл жағдайда ток қатарын мына түрде жазуға болады:

$$i = \frac{U_{1m}}{\omega L} \sin(\omega t + \psi_1 - 90^\circ) + \frac{U_{3m}}{3\omega L} \sin(3\omega t + \psi_3 - 90^\circ) + \frac{U_{5m}}{5\omega L} \sin(5\omega t + \psi_5 - 90^\circ) + \dots$$

Гармоника жоғары болған сайын, тізбекте кедергі көп болады. Жиілік өскенде, гармоника тоғы сөнеді кернеу қисығынан гөрі ток қисығы формасымен синусоидқа жақын.

Қорытынды: катушка ток қисығына сипайтындай әсер етеді

б) Тізбекте тек конденсатор бар. Ток теңдеуі:

$$i = U_{1m} \omega C \sin(\omega t + \psi_1 + 90^\circ) + U_{3m} 3\omega C \sin(3\omega t + \psi_3 + 90^\circ) + U_{5m} 5\omega C \sin(5\omega t + \psi_5 + 90^\circ) + \dots$$

Көп жоғарғы жиілікті гармоникаға конденсатор, аз жиілікті гармоникадан гөрі аз кедергі тудырады. Сондықтан ток қисығы синусоидтан айырмашылығы кедергі қисығынан гөрі көбірек.

Қорытынды. Синусоидалды емес кернеуі бар тізбекте конденсатор ток формасын бұрмалайды.

Есеп. 5.10 схемада электр тізбекке кернеу салынды.

$$u(t) = 50 + 141 \sin(\omega t + 30^\circ) + 70,7 \sin(3\omega t - 60^\circ), B.$$

Тармақтардағы тоқтардың лездік мағыналарын есептеу керек және нақты мағыналарын табу керек, егер де $R_1 = 200 \text{ м};$

$$R_1 = 50 \text{ м}; \quad \omega L = 50 \text{ м}; \quad \frac{1}{\omega C} = 90 \text{ Ом}.$$

Есептелуі. Тұрақты құрама $U(0) = 50 \text{ В}$ әсер ететін тізбекті есептейміз:

$$I_1(0) = I_2(0) = \frac{U(0)}{R_1 + R_2} = \frac{50}{20 + 5} = 2 \text{ А}; \quad I_3(0) = 0.$$

Бірінші гармоника әрекетінің тізбегін есептеу:

$$u_1(t) = 141 \sin(\omega t + 30^\circ), B; \quad \underline{U}_1 = 100 e^{j30^\circ}, B.$$

Жапсарлас бөліктің кешенді кедергісі:

$$\underline{Z}_{23(1)} = \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_{3(1)}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{3(1)}} = \frac{R_2 \left(-j \frac{1}{\omega C} \right)}{R_2 - j \frac{1}{\omega C}} =$$

$$\frac{5 \cdot (-j9)}{5 - j9} = 4,37e^{-j29,05^\circ} = 3,82 - j2,12, \text{ Ом.}$$

Бірінші гармониканың барлық тізбегінің эквиваленті кешенді кедергісі:

$$\underline{Z}(1) = \underline{Z}_1(1) + \underline{Z}_{23(1)} = R_1 + j\omega L_1 + \underline{Z}_{23(1)} = 20 + j3 +$$

$$+ 3,82 - j2,12 = 23,82 + j0,88 = 23,9e^{j2,12^\circ} \text{ Ом}$$

Бірінші гармоникадағы жалпы тоқ әсерлі мағынасының комплексі:

$$\underline{I}_1(1) = \frac{\underline{U}(1)}{\underline{Z}_1} = \frac{100e^{j30^\circ}}{23,9e^{j2,12^\circ}} = 4,184e^{j27,88^\circ}, \text{ A.}$$

Жапсарлас бөліктегі кернеу:

$$\underline{U}_{23(1)} = \underline{I}_1(1)\underline{Z}_{23(1)} = 4,184e^{j27,88^\circ} \cdot 4,37e^{-j29,05^\circ} = 18,28e^{-j1,17^\circ}, \text{ B.}$$

Екінші және үшінші тармақтар тоғы:

$$\underline{I}_2(1) = \frac{\underline{U}_{23(1)}}{R_2} = \frac{18,28e^{-j1,17^\circ}}{5} = 3,66e^{-j1,17^\circ}, \text{ A.}$$

$$\underline{I}_3(1) = \frac{\underline{U}_{23(1)}}{-j \frac{1}{\omega C}} = \frac{18,28e^{-j1,17^\circ}}{-j9} = 2,03e^{j88,83^\circ}, \text{ A.}$$

Бірінші гармоника тоғының лездік мағынасы:

$$i_1(1) = 4,184\sqrt{2} \sin(\omega t + 27,88^\circ), \text{ A;}$$

$$i_2(1) = 3,66\sqrt{2} \sin(\omega t - 1,17^\circ), \text{ A;}$$

$$i_3(1) = 2,03\sqrt{2} \sin(\omega t + 88,83^\circ), \text{ A.}$$

Үшінші гармоника тізбегін есептеу:

$$u_{(3)} = 70,7 \sin(3\omega t - 60^\circ), B; \quad \underline{U}_{(3)} = 50e^{-j60^\circ}, B.$$

Үшінші гармониканың кешенді кедергісі:

$$\underline{Z}_{23(3)} = \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_{3(3)}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{3(3)}} = \frac{R_2 \left(-j \frac{1}{3\omega C} \right)}{R_2 - j \frac{1}{3\omega C}} =$$

$$\frac{5 \cdot (-j3)}{5 - j3} = 2,57e^{-j59^\circ} = 1,32 - j2,2, Ом.$$

$$\underline{Z}_{(3)} = R_1 + j3\omega L_1 + \underline{Z}_{23(3)} = 20 + j9 + 1,32 - j2,2 =$$

$$= 21,32 + j6,8 = 22,38e^{j17,69^\circ}, Ом.$$

Тоқтар мен кернеу:

$$\underline{I}_{1(3)} = \frac{\underline{U}_{(3)}}{\underline{Z}_3} = \frac{50e^{-j60^\circ}}{22,38e^{j17,69^\circ}} = 2,23e^{-j77,69^\circ}, A;$$

$$\underline{U}_{23(3)} = \underline{I}_{1(3)} \cdot \underline{Z}_{23(3)} = 2,23e^{-j77,69^\circ} \cdot 2,57e^{-j59^\circ} = 5,73e^{-j136,69^\circ}, B;$$

$$\underline{I}_{2(3)} = \frac{\underline{U}_{23(3)}}{R_2} = \frac{5,73e^{-j136,69^\circ}}{5} = 1,146e^{-j136,69^\circ}, A;$$

$$\underline{I}_{3(3)} = \frac{\underline{U}_{23(3)}}{-j \frac{1}{3\omega C}} = \frac{5,73e^{-j136,69^\circ}}{-j3} = 1,91e^{-j46,69^\circ}, A.$$

Үшінші гармоника тоғының лездік мағынасы:

$$i_{1(3)} = 2,23\sqrt{2} \sin(3\omega t - 77,69^\circ), A;$$

$$i_{2(3)} = 1,146\sqrt{2} \sin(3\omega t - 136,69^\circ), A;$$

$$i_{3(3)} = 1,91\sqrt{2} \sin(3\omega t - 46,69^\circ), A.$$

Тармақтардағы қорытындылау тоқтар:

$$i_1 = I_{1(0)} + i_{1(1)} + i_{1(3)} = 2 + 4,184\sqrt{2} \sin(\omega t + 27,88^\circ) + 2,23\sqrt{2} \sin(3\omega t - 77,69^\circ), A;$$

$$i_2 = I_{2(0)} + i_{2(1)} + i_{2(3)} = 2 + 3,66\sqrt{2} \sin(\omega t - 1,17^\circ) + 1,146\sqrt{2} \sin(3\omega t - 136,69^\circ), A;$$

$$i_3 = I_{3(0)} + i_{3(1)} + i_{3(3)} = 2,03\sqrt{2} \sin(\omega t + 88,83^\circ) + 1,91\sqrt{2} \sin(3\omega t - 46,69^\circ), A.$$

Тармақтардағы тоқтардың нақты мағыналары:

$$I_1 = \sqrt{I_{1(0)}^2 + I_{1(1)}^2 + I_{1(3)}^2} = \sqrt{2^2 + 4,184^2 + 2,23^2} = 5,146, A;$$

$$I_2 = \sqrt{I_{2(0)}^2 + I_{2(1)}^2 + I_{2(3)}^2} = \sqrt{2^2 + 3,66^2 + 1,146^2} = 4,32, A;$$

$$I_3 = \sqrt{I_{3(1)}^2 + I_{3(3)}^2} = \sqrt{2,03^2 + 1,91^2} = 2,79, A.$$

5.9. Үш фазалы тізбектегі жоғарғы гармоникалар

Егерде, үш фазалы жүйеде ЭҚК жоғарғы гармоникасы пайда болса, симметриялы көп фазалы тізбекке жазылған байланыстар орындалмайды. Синусоидалды емес ЭҚК әрекет ететін симметрияны үш фазалы жүйені қарастырайық.

Үш фазалы генераторда симметриялы құрылғылар болады, оның ЭҚК қысығы абсцисс өсіне қатысты симметриялы, қатарда тек тақ гармоникалар, ал фазалы ЭҚК бір біріне қатысты үш кезеңге жылжыған.

$$e_A = E_{1m} \sin \omega t + E_{3m} \sin 3\omega t + E_{5m} \sin 5\omega t + \dots; \quad (5.24)$$

$$e_B = E_{1m} \sin(\omega t - 120^\circ) + E_{3m} \sin(3\omega t - 3 \cdot 120^\circ) + E_{5m} \sin(5\omega t - 5 \cdot 120^\circ) + \dots = E_{1m} \sin(\omega t - 120^\circ) + E_{3m} \sin 3\omega t + E_{5m} \sin(5\omega t - 240^\circ) + \dots; \quad (5.25)$$

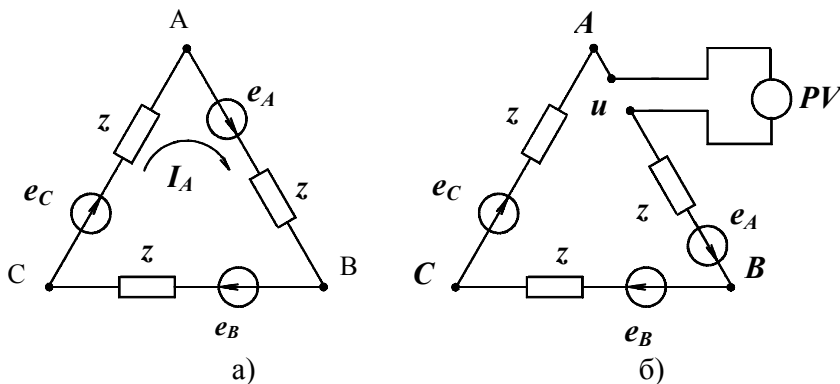
$$e_C = E_{1m} \sin(\omega t - 240^\circ) + E_{3m} \sin(3\omega t - 3 \cdot 240^\circ) + E_{5m} \sin(5\omega t - 5 \cdot 240^\circ) + \dots = E_{1m} \sin(\omega t - 240^\circ) + E_{3m} \sin 3\omega t + E_{5m} \sin(5\omega t - 120^\circ) + \dots \quad (5.26)$$

(5.24.....5.26) теңдеулерді талдаудан көруге болады, барлық фазалар жоғарғы гармоникалары үш еселенген (3, 9, 15 т.б.) кез келген уақытта тең, яғни нөлді жалғасқан жүйені құрастырады. Бірінші, және 7, 13, 19 мен т.б. гармоникалар тікелей нөлді жалғасқан жүйені құрастырады. 5, 11, 17 гармоникалар және т.б. керісінше жалғасқан жүйені құрастырады. Тікелей және керісінше жалғасқан құрамалар симметриялы жүйені көрсетеді, бұлардың есебінен бұрын қарастырылған өзгешілігі жоқ.

Үш фазалы тізбектегі нөлді жалғасқан ток пен кернеу іс-әрекетінің ерекшеліктері бар, барлық фаза токтары мен кернеулер лездік мағынасының жиыны, кез келген уақытта нөлге тең емес.

Үш еселі гармоника ерекшеліктерін нақты мысалдарда қараймыз.

1.Электр тізбегінде үш фазалы генератор бар, орамасы үш бұрышты қосылған (5.11 а-сурет)



5.11-сурет

Генератордың фазалы ЭҚК-сы, бірінші гармоникадан, басқаларында жоғарғы гармоника қатары бар. Үш еселі емес барлық гармоника фазалы ЭҚК лездік мағыналар жиыны, нөлге тең:

$$e_{kA} + e_{kB} + e_{kC} = 0; \quad k \neq 3, 9, 15, 21 \dots \quad (5.27)$$

Үш еселі ЭҚК гармоникалар фаза бойынша теңеседі, және олардың қосындысы нөлге тең емес:

$$e_{kA} + e_{kB} + e_{kC} = 3e_{kA} \neq 0; \quad k = 3, 9, 15, 21 \dots \quad (5.28)$$

Егерде, үш бұрыш тұйықталса, ЭҚК қосындысы, жүктеме жақта, оның контурында тоқты пайда болдырады. Ол тоқтың әсерлі мағынасы:

$$I_{\Delta} = \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots}, \quad (5.29)$$

Бұл жерде $I_3 = \frac{E_3}{Z_3}$; $I_9 = \frac{E_9}{Z_9}$; $I_{15} = \frac{E_{15}}{Z_{15}}$ гармоника тоқтарының әсерлі мағыналары.

Егерде орамалар ашық үшбұрышты (5.11 б-сурет) кернеу и үш еселі гармоникалар ЭҚК қосындыларына тең:

$$u = e_{kA} + e_{kB} + e_{kC} = 3e_{kA}; \quad k = 3, 9, 15 \dots$$

Осы кернеудің әсерлі мағынасы:

$$U = 3\sqrt{E_3^2 + E_9^2 + E_{15}^2 + \dots} \quad (5.30)$$

Сәйкес қатынастар орамасы үшбұрышты қосылған трансформаторда болады.

2. Жұлдызша қосылған симметриялы үш фазалы генераторды қарастырамыз. Бұндай генератордың сызықты кернеуінде үш еселі гармоника болмайды. Оның бос жүрісінен көруге болады:

$$u_{AB} = e_A - e_B.$$

Үш еселі гармоника фазада болатындықтан, оның ЭҚК алсақ, ноль болады.

Сызықты кернеу әсерлі мағынасы:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} \sqrt{E_{1\phi}^2 + E_{5\phi}^2 + E_{7\phi}^2 + E_{11\phi}^2 + \dots},$$

$E_{1\phi}^2, E_{5\phi}^2, E_{7\phi}^2 \dots$ фазалы ЭҚК сәйкес гармоникалардың нақты

мағынасы:

Фазалы кедергі нақты мағынасында барлық гармоникалар бар:

$$U_{\phi} = \sqrt{E_{1\phi}^2 + E_{3\phi}^2 + E_{5\phi}^2 + E_{7\phi}^2 + E_{9\phi}^2 + E_{11\phi}^2 + \dots},$$

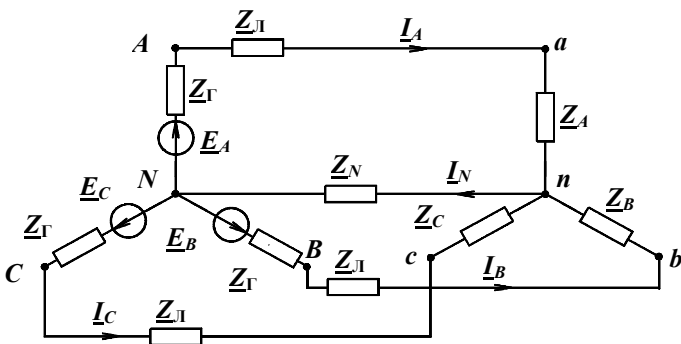
Сондықтан $\frac{U_{\text{л}}}{U_{\phi}} < \sqrt{3}$.

3. Симметриялы генератор мен жүктемені жұлдызша қосса бейтарап сымсыз, үш еселі гармоника тоқтары сызықты сымнан өте алмайды. Жүктеме мен генератордың бейтарап нүктелер арасында үш еселі гармоника кернеуі болуы мүмкін.
 $u_N = e_3 + e_9 + e_{15} + \dots$

Бұл кернеудің әсерлі мағынасы:

$$U_N = \sqrt{E_3^2 + E_9^2 + E_{15}^2 + \dots}$$

4. Жұлдыз – бейтарап сымы бар жұлдызша қосылған симметриялы генератор мен жүктемесі бар, тізбекті қарастырамыз (5.12-сурет)



5.12-сурет

Бұл сұлбада сызықты сымдарда барлық жалғасқан тоқтар гармоникалары бар, ал бейтарап сымда үш еселі гармоника тоқтары болуы мүмкін:

$$i_{\text{Л}} = i_1 + i_3 + i_5 + i_7 + i_9 + i_{11} + \dots$$

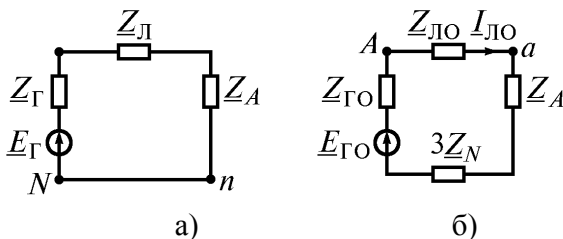
$$i_N = 3(i_3 + i_9 + i_{15} + \dots)$$

Лездік мағыналар:

$$I_{\text{Л}} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2};$$

$$I_N = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots}$$

Үш еселі гармониканың бір фазасының алмастыру эквиваленті сұлбасының түрі 5.13 а-суретте көрсетілген, ал (5.13 б-сурет) нөлді жалғасқан тоқтарға қатысты



5.13-сурет

Сонымен, нөлді жалғасқан тоқтың алмастыру сұлбасы тікелей және керісінше жалғасып қосылған тоқтың алмастыру сұлбасынан өзгеше. Үш фазалы тізбектегі жоғарғы гармоникалар, электр машиналардың тиімді пайдалануын төмендетеді.

Кері жалғасты тоқ пен пайда болатын магнит алаңы, тежеуіш уақыт туғызады және қозғалтқышта қосымша жоғалу пайда болады.

Бақылау сұрақтары.

1. Айнымалы тоқтардың синусоидалды формадан өзгешілігін түсіндіріңіз.
2. Тізбекке түрлі сызықты емес элементтердің қосылуына байланысты синусоидалды емес тоқтар мен кернеулердің қалай пайда болатынын түсіндіріңіз.
3. Пассивті екіұшті тізбектің кірмесіне түрлі жиілікті ЭҚК екі көрек көзін қосып синусоидалды емес тоқтың пайда болу себебін түсіндіріңіз.
4. Фурьенің тригонометриялық қатарлары және оларды түсіндіру үшін қалай қолданады?

5. Синусоидалды емес функция симметриясы дегеніміз не?
6. Тригонометриялық қатардағы негізгі гармоника дегеніміз не?
7. Гармониканың қатары бар тізбекте ЭҚК болса L және C кедергілері қалай анықталады?
8. Синусоидалды емес ЭҚК бар R , L , C электр тізбегіндегі кернеу және тоқ резонанстарын түсіндіріңіз.
9. R , L , C электр тізбегіне гармоникалы ЭҚК қосылса – ол қалай есептеледі?
10. Синусоидалды емес электртізбегіндегі ЭҚК, кернеу, тоқ күштерінің әсерлік мәндері қалай табылады?
11. Синусоидалды емес функциялар формасын сипаттайтын қандай коэффициенттер бар?
12. Синусоидалды емес тоқты тізбектің қуаттардың формулаларын көрсетіңіз.
13. Синусоидалды емес нақты тізбектің қуат коэффициентінің формуласын жазыңыз және оның физикалық мәнін түсіндіріңіз.
14. Үш фазалы тізбектегі жоғарғы гармоникаларын түсіндіріңіз.

VI ТАРАУ

6. Сызықты емес электр тізбегі

6.1. Жалпы мәлімет

Сызықты тізбек теориясында, барлық шоғырланған элементтер параметрлері яғни, R резистор кедергісі, L катушка индуктивтігі, конденсатор сыйымдылығы C-тоқ пен кернеуге байланысты емес, өзгермейді деп ұйғарылады. Бұл ұйғарым ізгілікті. Шынында элементтер параметрлері, тоқ пен кернеуге бағынышты. Сондықтан, R, L, C-ты параметрлары, тоқ пен кернеудің өзгеруінің шектеулі мөлшерінде ғана өзгермейді деп есептеуге болады. Бірақ көп элементтер мен құрылғылар бар, параметрлері тоқ пен кернеуге байланысты. Бұндай элементтер сызықты емес деп аталады, ал тізбек, бір сызықты емес элементті болса, сызықты емес тізбек деп аталады.

Сызықты емес тізбек, электротехника, радиотехника, автоматика т.б. кеңінен қолданылады.

Сызықты тізбектегіден көрі сызықты емес тізбектегі үдерістер теория түрінде зерттеу қиындау.

Элементтің берілген геометриялық кескін үйлесімінде оның параметрлері R немесе L немесе C электр және магнит өрісітері мен элементтің жасалған материалы ара қатынасының сандық мінездемесі болады. Мысалы, тік сызықты өткізгіштің ұзындығы L, кесігі s болса, кедергісі мына формуламен анықталады.:

$$R = \frac{l}{\gamma s} \quad (6.1)$$

ω орама саны бар катушканың индуктивтігі S кесігі бар өзекке оралған және l орташа ұзындық бағыты бар:

$$L = \mu \frac{w^2 s}{l} \quad (6.2)$$

Пластина ауданы S және олардың ара қашықтығы d жазық конденсатор C-тың сыйымдығын мына формуламен табуға болады:

$$C = \frac{\varepsilon S}{d} \quad (6.3)$$

Электр өткізгіштілік γ , абсолютті магнитті бойлаушылық μ , абсолютті диэлектр бойлаушылық ε (6.1...6.3) формуладағы, электромагнит өрісінің қасиетіне бағышты болуы мүмкін.

Түрлі материалдар сызықты емес бағыштылығы, өткізгіштің тоқтың тығыздығынан γ (б), магнитті бойлаушылықтың магнит өрісінің күш қуатынан μ (н), диэлектр бойлаушылықтың электр өрісінің күш қуатынан ε (Е) айырмашылықтары бар. Сондықтан электр тізбегінің элементтері, осы материалдардан жасалған, сызықты емес қасиеттерімен иеленеді.

Сызықты емес элементтер, сызықты емес резистор, сызықты емес катушка және сызықты емес конденсаторға бөлінеді.

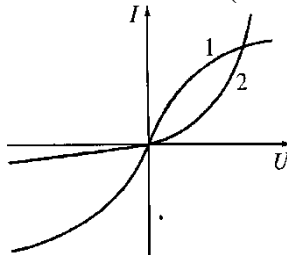
Әдетте, сызықты емес элементтер екі топқа бөлінеді:

а) Басқарылмайтын сызықты емес элементтер (сызықты емес екі ұшты) оны бір кірісі бар элемент түрінде қарауға болады, мысалы, диод, термокедергі, қыздырғыш шам, болат, өзекті катушка және т.б.

б) басқарылатын сызықты емес элементтер (сызықты емес үш, төрт және көп ұштылар) бірнеше кірісі бар, оның біреуі басқарушы түрінде, қалғандары басқарылатын түрде қолданылады, мысалы, транзистор, тиристор, магнитті үдеткіш және т.б.

Сызықты емес резистордың қасиетін, вольт-ампер сипаттамасы арқылы талдау қолайлы. Оны график кесте немесе аналитикалық шамамен көрсетеді.

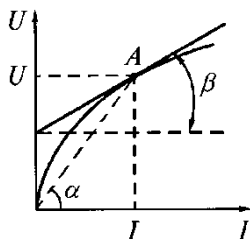
Вольт-ампер сипаттамасы, координат осіне қатысты симметриялы және симметриялы емес болып бөлінеді. Симметриялы элемент мінездемесі, ондағы тоқтың бағыты мен қысқыштағы кернеуге бағынышты емес. (6.1-сурет, қисық 1)



6.1-сурет

Мұндай элементке терморезистор, қыздырғыш шам және т.б. жатады. Сызықты емес элементтерді симметриялы емес деп атайды. Ондағы тоқтың түрлі бағытында және қысқыштағы кернеуде мінездемесі бірдей емес (6.1-сурет, қисық 2)

Симметриялы емес вольт-ампер сипаттамасы диодта, стабилитронда, динисторде және т.б. бар. Сызықты емес резистор қасиеті, вольт-ампер сипаттамасымен басқа, оның статикалық және дифференциалды кедергілерінің тоққа бағыштылығымен мінезделеді



6.2-сурет

Сызықты емес резистордың вольт-ампер сипаттамасын қарастырайық (6.2-сурет). Оның жұмыс режимі А нүктемен белгілейміз. Резистордағы кернеудің өтіп жатқан тоққа қатынасын статикалық кедергі деп атайды.

$$R_{ст} = \frac{U}{I} = m_R \operatorname{tg} \alpha$$

6.2-суреттен, көруге болады, кедергі, тангенс бұрышы α пропорциялы тік арасында, А нүктесін, координат басы мен тоқ осін қосатын. Сызықты емес элементтегі кернеудің аз өсімінің dU сәйкес тоқ өсімінің dI қатынасы дифференциалды кедергі деп аталады:

$$R_q = \frac{dU}{dI} = m_R \operatorname{tg} \beta$$

Бұл кедергі, тангенс бұрышы β пропорционалды, А нүктесі мен тоқ осі аралығында. Дифференциалды кедергі, тоқ пен кернеудің аз өзгеруіндегі сызықты емес элементтің тәртібін мінездейді.

Тік сызықты саладағы вольт-ампер мінездемесіндегі дифференциалды кедергі, соңғы кернеу өсімінің, соңғы тоқ өсімінің қатынасына тең.

$$R_q = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

Сызықты емес элементтерге, құлап жатқан вольт-ампер мінездемесімен (6.16 а-сурет) саласы көрсетілген, онда дифференциалды кедергі теріс, себебі тоқтың дұрыс осімін, кернеудің теріс өсімімен қосталады.

6.2. Тұрақты тоқтағы сызықты емес электр тізбектің есебі

Сызықты емес тізбектің есептеу әдісі, сызықты емес элементтердің вольт-ампер сипаттамасымен берілгеніне байланысты: кесте түрінде, кесте немесе аналитикалық өрнектеу. Осыған сәйкес сызықты емес тізбектің есептеу әдісі үш топқа бөлінеді:

1) Графикалық әдіс дегеніміз – сызықты емес элементтердің және тізбектің сызықты сала сипаттамасы кесте түрінде көрсетіледі, ал Кирхгоф тендеуінің жүйесі графика түрінде есептеледі.

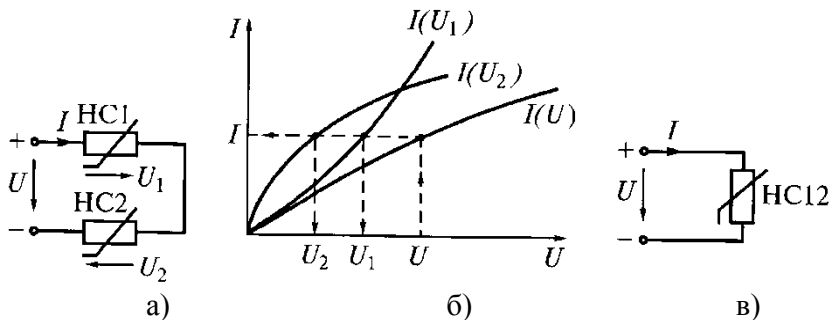
2) Аналитикалық әдіс дегеніміз – сызықты емес элементтердің вольт-ампер сипаттамасы аналитикалық функциямен анықталады.

3) Графикалық-аналитикалық әдіс дегеніміз – тізбектің сызықты саласы, аналитикалық түрде жазылады, ал сызықты емес элементтердің сипаттамасы кесте түрінде көрсетіледі.

6.2.1 Сызықты емес тізбекті графикалық есептеу

Жәй кескін үйлесімді сызықты емес электр тізбегін, графикалық әдіспен есептеген жөн. Сызықты емес тізбекті есептеу дегеніміз – тізбектегі тоқ пен кернеуді вольт-ампер сипаттамасымен анықтау.

Сызықты емес элементтердің жалғас қосылуы. (6.5 а-суретте көрсетілген, екі сызықты емес элементтердің НС1 және НС2) жалғасқан қосылғаны, сипаттамалары $I(U_1)$ және $I(U_2)$ 6.3 б-суретте көрсетілген.



6.3-сурет

Тізбектегі тоқтың және сызықты емес элементтегі кернеуді табу үшін осы тізбекке Кирхгофтың екінші заңын қолданамыз $U = U_1 + U_2$,

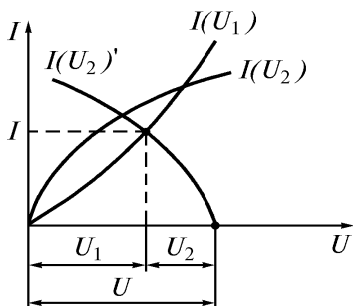
Яғни, екі сызықты емес элементтердің жалғас қосылғанын, бір сызықты емес элементпен алмастырамыз, вольт-ампер сипаттамасына эквиваленті (6.3 в-сурет).

Эквиваленті вольт-ампер сипаттамасын табу үшін, бірдей координатты абсцис V_1 мен V_2 қосу керек, ол үшін тіке, қатарласқан абсцис осін жүргізу керек ($I = \text{const}$) және бірдей нүктедегі кернеуді қосу керек. Нүктелер арқылы қортындылау вольт-ампер сипаттамасын саламыз. Берілген V кернеу бойынша әр сызықты емес элементтегі ток I және кернеулер U_1 мен U_2 табамыз.

Бір элемент сызықты болсада, ток пен кернеуді есептеу үшін осылай табуға болады.

Жалғас қосылған үш немесе көп санды сызықты емес элементтер бар тізбекті осыған сәйкес есептеуге болады.

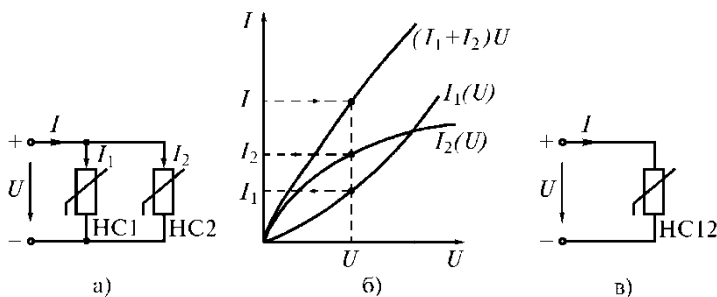
Сызықты элементтердегі ток пен кернеуді (6.3 а-сурет) қорытындылау сипаттамасын салмай табуға да болады. Ол үшін Кирхгофтың екінші заңы мына түрде $U - U_1 = U_2$ қолданылады. Ол үшін $I(U_2)$ қисықты абсцисс осіне қатарластырып көшіреміз, координат басынан оңға қарай берілген кернеуге U (6.4-сурет) және оны ток осіне қатысты, қисықтың айнадағы сәулесіндей көргенше бұрамыз. Айна сәулесіндегідей сипаттама нүкте қиылысы $I(U_2)' = I(U - U_1)$ бір сызықты емес элементтің, екіншісінің сипаттамасы мен $I(U_1)$, тізбекте ток пен U_1 және U_2 кернеу береді.



6.4-сурет

Сызықты емес элементтердің қатарлас қосылуы

6.5 а-суретте, қатарлас қосылған сызықты емес элементтер НС1 және НС2 көрсетілген, вольт-ампер сипаттамалары $I_1(U)$ және $I_2(U)$ (6.5 б-суретте) берілген. Егерде, тізбек кірмесінде кернеу U берілсе, вольт-ампер сипаттамасы $I_1(U)$, $I_2(U)$ арқылы, сызықты емес элементтегі I_1 және I_2 тоғын анықтауға болады және Кирхгофтың теңдеуі $I = I_1 + I_2$ арқылы тізбектің тармақталмаған бөлігіндегі тоқты табамыз.



6.5-сурет

Егер де ток I берілген болса, сызықты емес элементтердегі кернеу U және тоқтар I_1 мен I_2 анықтау үшін, қорытындылау сипаттамасы $(I_1 + I_2)U$ -ны салу керек, яғни ток қосындысының U кернеуден тәуелділігін қатарлас қосылғанда $U_1 = U_2 = U$, бұл сипаттама, $I = I_1 + I_2$ теңдеуге сәйкес көрсету үшін, кернеудің бір

мағынасына (6.5 б-сурет), $I_1(U)$ және $I_2(U)$ қисықтар координаттарын қосамыз.

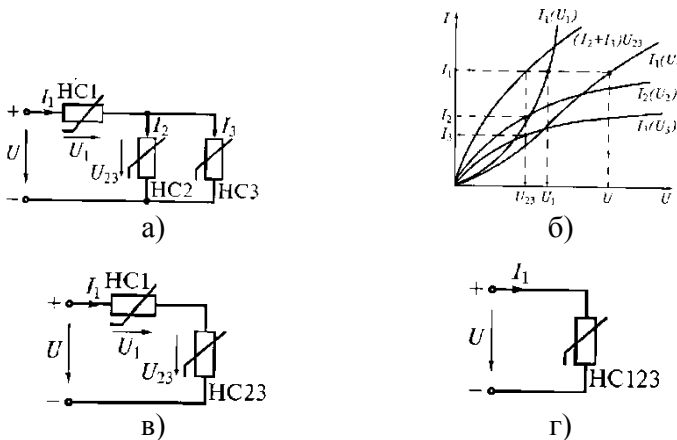
Табылған вольт-ампер сипаттамасы $(I_1 + I_2)U$ эквивалентті НС12 (6.5 в-суретке) сәйкес.

Әрі қарай белгілі I тоқпен кернеу U және тармақтағы тоқтар (6.5 б-сурет) табылады.

Осы әдіспен, көп санды, қатарлас қосылған сызықты емес элементтердің электр тізбегін есептеуге болады.

Сызықты емес элементтердің аралас қосылуы.

6.6 а-суретте, сызықты емес элементтердің аралас қосылған сұлбасы көрсетілген. Кернеу қорек көзі U және сызықты емес элементтер вольт-ампер сипаттамасы $I_1(U_1)$, $I_2(U_2)$, $I_3(U_3)$ берілді дейміз. (6.6 б-сурет)



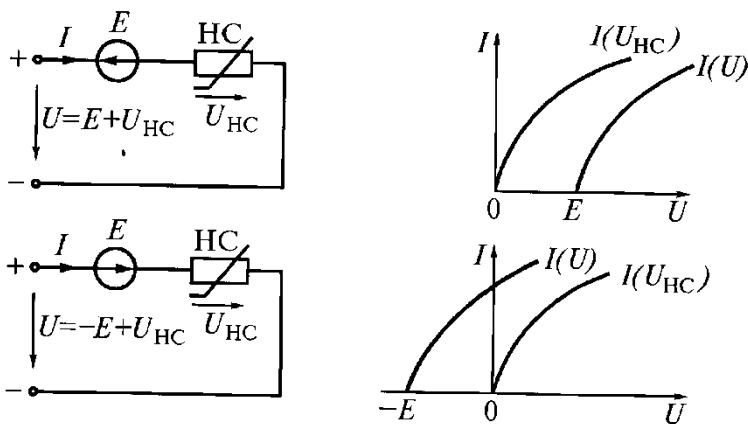
6.6-сурет

Барлық тармақтағы элементтердегі тоқтарды және кернеулерді табу керек. $I_2(U_2)$, $I_3(U_3)$ -қисықтар ординаттарын қосамыз, кернеудің тек бір мағынасына $U_2 = U_3 = U_{23}$. Қорытындысында, қатар қосылған НС2 мен НС3 вольт-ампер сипаттамасын саламыз (6.6 б-суреті). Аралас қосылған сұлба, екі сызықты емес элементтер НС1 мен НС2 жалғас қосылған сұлбасына айналады (6.6 в-суретті). Әрі қарай $I_1(U_1)$ және $(I_2 + I_3)U_{23}$ қисықтар абсцисін қосып, $I_1 = I_2 + I_3$ тоқтың бір

мағынасына, барлық тізбектің вольт-ампер сипаттамасын табамыз, яғни екі жалғас қосылған сызықты емес элементтерді бір эквивалентке алмастыруға болады (6.6 г-сурет). Одан кейін, керекті ток пен кернеуді табуға болады. Берілген U кернеу бойынша, I_1 тоқты, содан кейін U_1 және U_{23} кернеулерді табамыз. U_{23} кернеулік біліп, I_2 және I_3 тоқтарды табамыз.

Сызықты емес элементтің және тізбектелген ЭҚК вольт-ампер сипаттамасы. Екі түйін әдісі.

Егерде, сызықты емес элемент пен тізбектеліп тұрақты ЭҚК қосылса, онда тізбектің бөлігіндегі ВАС, осы сызықты емес элемент және ЭҚК вольт-ампер сипаттамасы абсцисстен алға қарай жылжиды, егер ЭҚК көрек көзіне тең болса және S токпен бір бағытта болса, ал егер ток пен бір бағытта болмаса, ол оңға жылжиды (6.7-сурет).



6.7-сурет

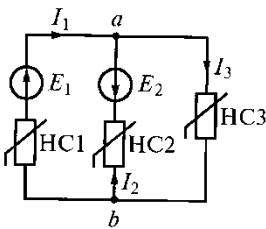
Екі түйіні бар сұлбаға, сызықты емес тізбекті есептеуде графикалық әдіс екі түйін әдісі қолданылады.

Екі түйінді тізбекті қарастырамыз, арасында үш қатарлы тармақтары, сызықты емес элементтері және тұрақты ЭҚК көрек көзі бар (6.8 а-сурет). Сызықты емес элементтердің вольт-ампер сипаттамасы $I_1(U_1)$, $I_2(U_2)$, $I_3(U_3)$ қисықтармен көрсетілген (6.8 б-сурет). Егер де $E_1 > E_2$ көп болса, тармақтар тоғының бағытын

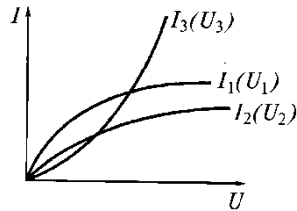
таңдаймыз (6.8 а-сурет). Тізбекті есептеу үшін, алдын ала әр тармақтың $I_1(U_{ab})$, $I_2(U_{ab})$, $I_3(U_{ab})$ вольт-ампер сипаттамаларын саламыз.

$I_1(U_{ab})$ сипаттамасы табу үшін, абсцистегі $I_1(U_1)$, сипаттамасы, E_1 ЭҚК-ға тең, солға жылжытамыз, себебі E_1 және ток I_1 , бағыттары түйіседі.

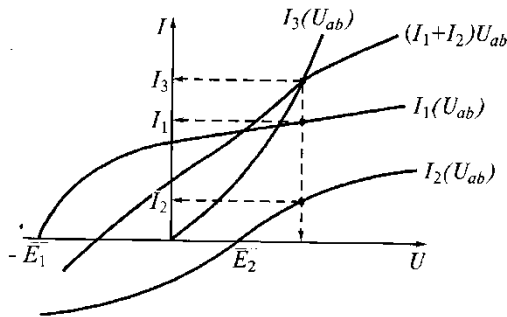
$I_2(U_{ab})$ сипаттамасы абсцистегі $I_2(U_2)$ мінездемесін, E_2 ЭҚК-не тең, оңға қарай жылжытып табамыз, себебі E_2 ток I_2 қарсы бағытталған (6.8 в-сурет)



а)



б)



в)

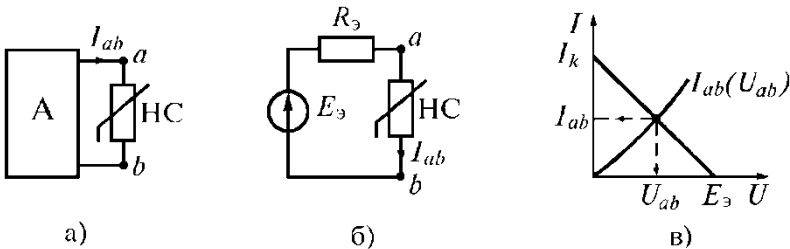
6.8-сурет

Кирхгофтың бірінші заңы бойынша $I_1 + I_2 = I_3$. Бірінші, екінші тармақтағы токтың вольт-ампер сипаттамасын қосамыз. Шешімі, $I_3(U_{ab})$ және $(I_1 + I_2)U_{ab}$ сипаттамалар қиылысқан

нүктеде болады. Әр сызықты емес элементтегі ток, берілген кернеу U_{ab} -ге, сәйкес вольт-ампер сипаттамасы анықталады.

Күрделі сызықты емес тізбекті эквивалентті генератор әдісін қолданып есептеу.

Бір сызықты емес элементті күрделі тізбекті эквивалентті генератор теоремасы арқылы есептеген ыңғайлы. Ол үшін сызықты емес элементті бар тармақты айырамыз, ал қалған барлық сызықты сұлбаларды, активті екі-ұшты түрінде көрсетеміз (6.9 а-сурет). Активті екі-ұшты теоремасында айтылғандай, сызықты активті екі-ұшты сұлбасын, айырылған тармақ қысқышына қатынасын, эквивалентті генератор түрінде көрсетуге болады, оның ЭҚК-сы, ажыраған тармақтар қысқышындағы кернеуі U_{abxx} тең, ал ішкі кедергісі, пассивті екі ұштының кірме кедергісіне тең (6.9 б-сурет).



6.9-сурет

Бос жүріс кернеуі $U_{abбж}$, сызықты тізбек есебінің қорытындысы бойынша кез-келген әдіспен анықталады. Есептелген тізбекті графика әдісі түрінде элементтердің тізбектеп қосылғандай орындауға болады (6.9 б-сурет). Ол үшін $U_{ab} = E_{э} - I_{ab}R_{э}$ - теңдеу арқылы эквивалентті генератордың сыртқы сипаттамасын салу керек.

Сыртқы сипаттама, екі нүктеден өтетін түзеу сызық тәрізді:

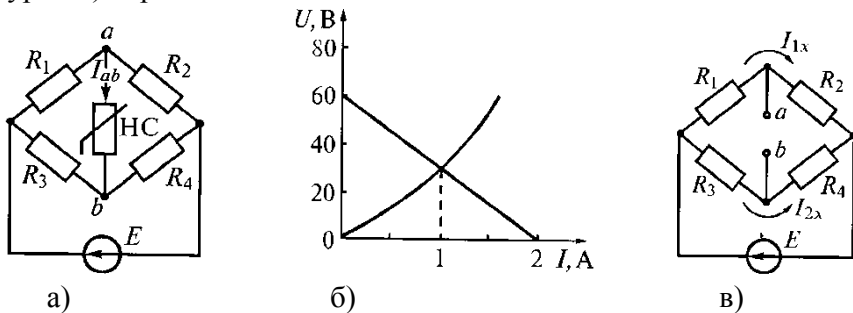
- 1) $I_{ab} = 0; U_{ab} = E_{э};$
- 2) $U_{ab} = 0;$

$$I_{ab} = \frac{E_{э}}{R_{э}} = \frac{U_{abxx}}{R_{ВХ}} = I_k$$

Сызықты емес элементтің вольт-ампер сипаттамасы және эквиваленті генератордың сыртқы сипаттамаларының қыйылысқан нүктесі, дұрыс шешім береді.

Мысалы: Эквиваленті генератор әдісі арқылы, сызықты емес элементтен өтетін тоқты табамыз (6.10 а-сурет). Егер де $R_1 = 30 \text{ Ом}$; $R_2 = 60 \text{ Ом}$; $R_3 = 20 \text{ Ом}$; $R_4 = 20 \text{ Ом}$; $E = 360 \text{ В}$.

Сызықты емес элементтің вольт-ампер сипаттамасы (6.10 б-суретте) көрсетілген.



6.10-сурет

1) $U_{\text{авбж}}$ элементі сызықты емес тұйықталмаған тармағы бар, (6.10 в – сурет) сұлбасынан бос жүріс кернеуін табамыз:

$$I_{1x} = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{360}{30 + 60} = 4 \text{ A};$$

$$I_{2x} = \frac{E}{R_3 + R_4} = \frac{360}{20 + 20} = 9 \text{ A};$$

$$U_{\text{авбж}} = I_{2x} R_3 - I_{1x} R_1 = 9 \cdot 20 - 4 \cdot 30 = 60 \text{ В}.$$

2) $R_э$ эквивалентті генератордың ішкі кедергісін (6.10 г-сурет) E қорек көзі тұйықталған сұлбасынан табамыз:

$$R_э = R_{\text{вх}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = \frac{30 \cdot 60}{30 + 60} + \frac{20 \cdot 20}{20 + 20} = 30 \text{ Ом}.$$

3) Эквиваленті генератордың сыртқы мінездемесін салу үшін, қысқа тұйықталған тоқты анықтаймыз:

$$I_k = \frac{E_3}{R_3} = \frac{U_{ab\text{бж}}}{R_{\text{iш}}} = \frac{60}{30} 2A.$$

(6.10 б-суретте) екі нүкте бойынша эквиваленті генератордың сыртқы сипаттамасы көрсетілген:

1) $E_3 = 60 \text{ В}; I = 0;$

2) $U = 0; I_k = 2 \text{ А}$

Сипаттама нүктелерінің қыйылысқаны, сызықты емес элементтің тоғын анықтауға жағдай туғызады: $I_{ab} = 1 \text{ А}$.

6.2.2. Сызықты емес тізбекті аналитикалық есептеу

Сызықты емес тізбекті аналитикалық есептеу үшін, сызықты емес элементтің вольт-ампер сипаттамасын математикалық есеппен көрсету керек. Графика мен кестені аналитикалық тәбізбен ауыстыруды аппроксимация атайды ол есептің ажыратылмайтын бөлігін құрайды.

Сызықты емес электротехниканы, аппроксимациялағанда көбіне келесі функциялар қолданылады:

1) Дәрежелі полином:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n; \quad (6.4)$$

2) Экспоненциалды полином

$$y = A_0 + A_1e^{a_1x} + A_2e^{a_2x^2} + \dots + A_n e^{a_nx^n}; \quad (6.5)$$

3) Тригонометриялық полином

$$y = A_0 + A_1 \sin(x + \varphi_1) + A_2 \sin(2x + \varphi_2) + \dots + A_n \sin(nx + \varphi_n); \quad (6.6)$$

4) Бөлшекті-дәрежелі функция

$$y = Ax^\alpha \quad (6.7)$$

α - бөлшек саны

5) Әр түрлі трансцендентты функциялар

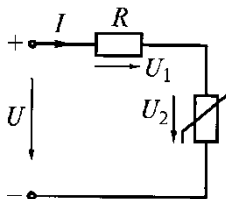
$$y = a + b \text{th} \beta x; \quad y = a + \text{barctg} \beta x; \quad y = a \text{sh} \beta x. \quad (6.8)$$

Аппроксимация есептері екі кезеңмен есептеледі:

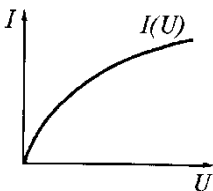
1) Функция класстарын таңдайды, яғни аппроксимацияланатын функцияның керекті құрылымын таңдайды.

2) Аппроксимацияланатын функциясына кіретін белгісіз коэффициенттерді есептемейді.

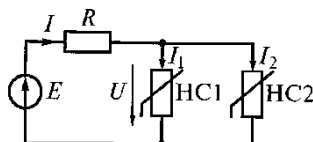
Жалғас қосылған сызықты және сызықты емес элементтері бар тізбекті қарастырайық (6.11 а-сурет). Сызықты емес элементтің вольт-ампер сипаттамасы (6.11 б-суретте) берілген, ол дәрежелі полиномымен аппроксимацияланады.



а)
6.11-сурет



б)



6.12-сурет

Егер де, алдыңғы екі мүшесімен шектелсе, онда тізбектегі сызықты емес элементтегі кернеудің азаюынаң тоқпен байланысын, мына түрде жазуға болады. $U_2 = a_1 I + a_2 I^2$

Кирхгофтың екінші заңы бойынша:

$$U = U_1 + U_2 = R + a_1 I + a_2 I^2$$

Осы квадратты теңдеудің шешімі бойынша тоқтың, кернеулер мен тізбек параметрлерінің функциясы ретінде анықтайды.

Мысалы: 6.12-суреттегі схемада $E=30 \text{ В}$; $R=20 \text{ Ом}$ болса, сызықты емес элементтердің HC1 мен HC2 вольт-ампер сипаттамалары, $I_1 = a_1 U + a_2 U^2$ -қа сәйкес берілген, бұнда $a_1=0,1 \text{ А/В}$; $a_2=0,003 \text{ А/В}^2$, $I_2 = b_1 U + b_2 U^2$, бұнда $b_1=0,04 \text{ А/В}$; $b_2=0,002 \text{ А/В}^2$. Сызықты емес элементтердің кернеуімен тоғын табу керек.

Есептелуі: Кирхгофтың бірінші заңы мен Ом заңы бойынша

6.12 суреттегі схемаға: $I = I_1 + I_2$; $I = \frac{E - U}{R}$.

Берілген $I_1(U)$, $I_2(U)$ формулаға қойып, теңдеулерді біріктіріп шыққанда, квадрат теңдеуін табылады.

$$\frac{(E-U)}{R} = (a_2 + b_2)U^2 + (a_1 + b_1)U$$

Немесе берілген сандар мағынасымен:

$$0,005U^2 + 0,1U - 1,5 = 0; \text{ бұл жерде } U = 10 \text{ В}$$

Берілгендері бойынша тоқты табамыз:

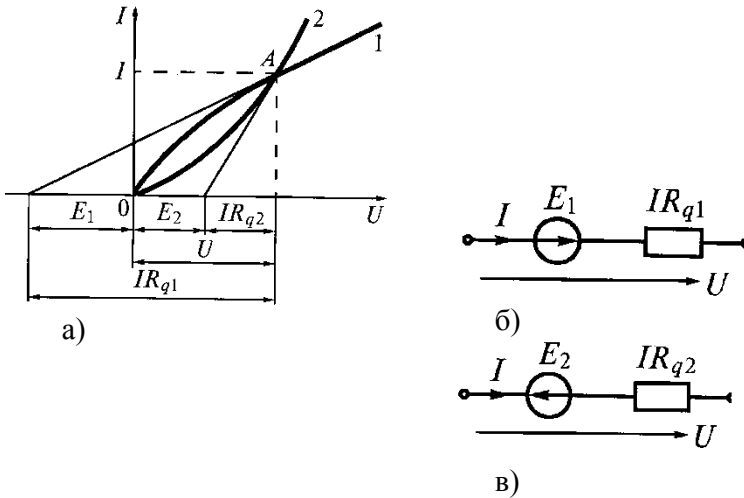
$$I_1 = 0,4 \text{ А}; I_2 = 0,6 \text{ А}.$$

6.2.3 Сызықты емес тізбекті линеаризация әдісімен есептеу

Егерде вольт-ампер сипаттамасы жұмыс саласында, тік сызыққа жақын болса, есептеу үшін сызықты емес элементті эквивалентті сұлбаға алмастыруға болады, олардың ЭҚК қорек көзінен және дифференциалды R_g кедергісі бар сызықты элементтен аустырады. (6.13 а-сурет) жұмыс нүктесі А-дағы екі сызықты емес 1 мен 2 элементтердің вольт-ампер сипаттамаларын, тікелей сызықпен ауыстырып, мынадай теңдеу табамыз:

$$U = -E_1 + IR_{q1}; \quad U = E_2 + IR_{q2}.$$

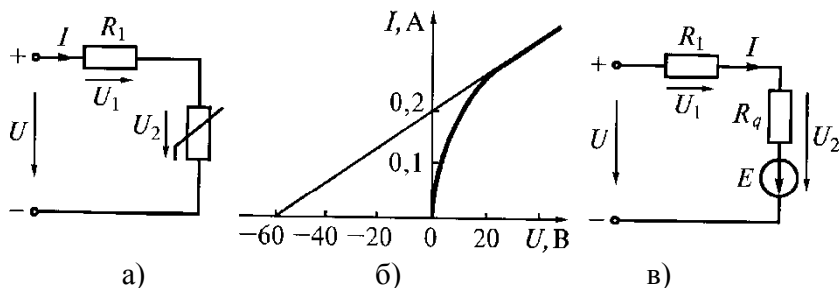
осы теңдеу (6.13 б, в-суретте) сұлбаға сәйкес берілген.



6.13-сурет

Сонымен, сұлбадағы сызықты емес элементі, эквиваленті сызықты кедергі және ЭҚК мен алмастыруға болады. Бұл кезде, ЭҚК бағыты, егер де кестеден теріс және токқа керісінше болса, кестедегі бағыты оң болса ток бағытымен түйіседі. Алмастырғаннан кейін барлық схемалар сызықты болады және оның кез келген әдіспен есептеуге болады. Линеаризация әдісі дәл дұрыс нәтижесін береді.

Мысалы. Элементтегі кернеуді және тізбектегі токты табу керек. (6.14 а-сурет) егерде $U = 230\text{В}$; $R_1 = 190\text{Ом}$, сызықты емес элемент вольт-ампер сипаттамасы (6.14 б-суретте көрсетілген)



6.14-сурет

Есептелуі: Жұмыс саласындағы сызықты емес элементің вольт-ампер сипаттамасын, тікелей сызықпен ауыстырамыз (6.14 б-сурет)

$$U_2 = E + IR_q,$$

$$E = -60\text{В}; R_q = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{60}{0,2} = 300\text{Ом}.$$

Қорытындысында сызықты тізбек табылады (6.14 в-сурет). Кирхгофтың екінші заңы бойынша:

$$\begin{aligned} U &= U_1 + U_2 = IR_1 + E + IR_q = \\ 190 \cdot I - 60 + 300 \cdot I &= 490 \cdot I - 60 \\ I &= \frac{U + 60}{490} = \frac{230 + 60}{490} \cong 0,6\text{А}; \\ U_1 &= IR_1 = 0,6 \cdot 190 = 110\text{В}; \\ U_2 &= -60 + I \cdot 300 = -60 + 0,6 \cdot 300 = 120\text{В}. \end{aligned}$$

6.2.4 Сызықты емес тізбекті итерациондық әдіспен есептеу

Күрделі сызықты емес тізбекте, кернеудің қорек көзі бар дейміз, сызықты емес элементтер параметрлері және сызықты емес элементтердің вольт-ампер сипаттамаларды. Тармақтардағы тоқтарды табу керек.

Осы берілген сұлбаға, Кирхгофтың бірінші және екінші заңдары бойынша теңдеу жүйесін жазамыз:

$$\sum I = 0; \sum E = \sum (RI + U).$$

Бұл теңдеуге, E мен R санды мағыналарынан басқа, белгісіз кернеу мен тоқ кіреді. Олар өзара вольт-ампер сипаттамаларымен байланысты.

Есепті итерационный әдісімен есептеуге болады. Бірінші тоқ пен кернеудің алғашқы жақындау мәндерін табады. Ол үшін әр сызықты емес элементтердің ВАС сызықтандырады, яғни тұрақты кернеуі және жалғас қосылған ЭҚК-сы бар резистордың вольт-ампер сипаттамасын ауыстырамыз. Кирхгоф теңдеу жүйесінің шешімі жақындаған тоқ мағынасын береді. Сосын кейін есепті берілген вольт-ампер сипаттамасы арқылы анықтаймыз: табылған жақындаған тоқ мағынасы мен вольт-ампер сипаттама арқылы жақындаған мағынасын анықтаймыз, есеп түрінде беріледі.

Есептелген тоқ мағынасына вольт-ампер сипаттамасындар жаңа анықталған U мен I сәйкес келеді. Кирхгоф теңдеуіне қайта қойылады. Бұл жағдай U мен I санды мағыналары қайталанғанша қайталана береді.

6.2.5 Сызықты емес элементтер сипаттамасы

Сызықты емес элементтерді бойынша бөлуге болады.

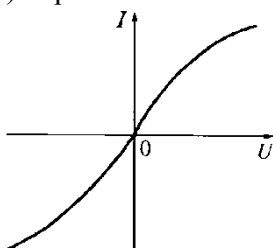
а) терморезисторлар, сызықты емес кедергілер металдар (вольфрам, темір сутегі атмосферасында) қасиеттеріне байланысты – терморезисторлар немесе жартылай өткізгіштер (термисторы)

б) Температураға байланысты емес сызықты емес кедергілер резисторлары.

в) вакуумды және газоразрядты элементтер.

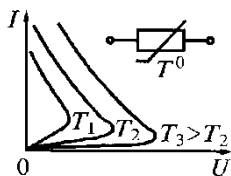
Терморезисторлардың вольт-ампер мінездемесінің сызықты еместігінің негізгі себебі, тоқ өткендегі қызудың әсерінен электр

кедергінің өзгеруі, себебі кедергі қызуын бағынышты. Темір терморезисторларға темір жібі бар шам жатады, вольт-ампер мінездемесі (6.15-суретте) көрсетілген.

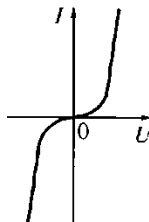


6.15-сурет

Қызуға байланысты жартылай өткізгіш резисторлар-термисторлар кеңінен қолданылады. Термисторлар екі немесе көп компоненттер қосындысынан тұрады, үлкен теріс қызу коэффициенті бар. Кедергінің қызуға қатты байланыстылығы, термистордың вольт-ампер мінездемесі, тоқтың бір кездегі мағынасында, элементтегі кернеу төмендейді тоқ өскеніне қарамай түсе бастайды (6.16 а-сурет)



а)



б)

6.16-сурет

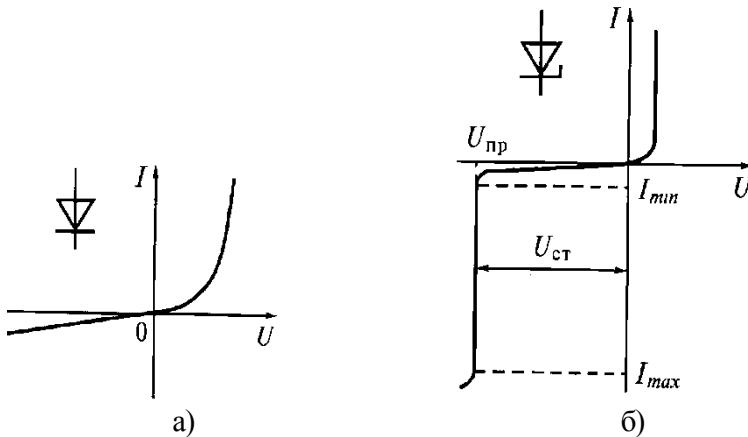
Вольт-ампер сипаттамасының сызықты емес болуының себебі қызу өскенде жартылай өткізгіште заряд санының көбеюі. Сипаттама түрі қоршаған ортаның қызуына байланысты және ортаның термистордағы жылуды аудару қабілеті. Қызуға бағышты емес резисторға, тиритті және вилитті резисторлар жатады, олардың сипаттамалар симметриялы, оларды варисторлар деп атайды. Тиритті және вилитті резисторлар, графит және карборунд ұнтағы қоспасынан дайындалады. Вольт-ампер сипаттамасының сызықты еместігі 6.16 б-суретте көрсетілген. Окись кремнийдің жұқа пленкасы өткізгішті

жабатын, кедергісі кернеуге бағынышты, жартылай өткізгіш болады.

Жартылай өткізгіш диодтың сипаттамасы симметриялы емес, ол 6.17 а-суретте көрсетілген.

$p-n$ өтуде потенциалды кедергінің бары оның сипаттаманың симметриялы еместігі.

Оң бағаттағы кернеуде, диодтан өтетін ток экспоненциалды заңмен тез өседі, ал теріс болса-тоқ аз болады.

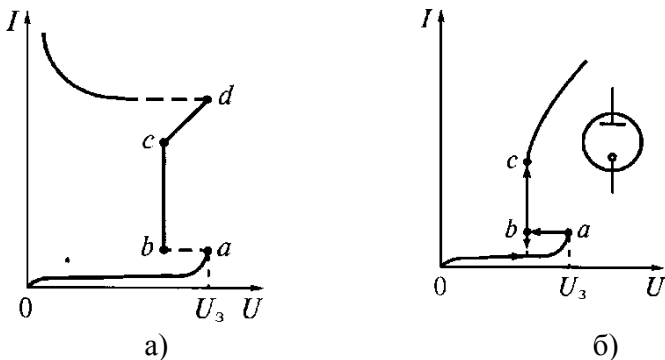


6.17-сурет

Жартылай өткізгіш стабилитрон дегеніміз ол, бір $p-n$ өтуі бар диод болады, егер оларда кейбір кернеу мағынасына теріс тоғы болса оны, секіріп өсетін, өтімді деп атайды.

Бұл жағдай өтімнен көшкін өткендей, одан кейін кернеудің аз өскені, тоқтың кенет өсуіне әкеледі. Қорытындысында, сипаттама тармағы $u = U_{пр}$ болса үзіледі және сызықты күшті өзгеретін бөлігі болады (6.17 б-сурет).

Бұл бөлікке, кернеу тұрақталғанда және кері кернеу шектелгенде, көп көңіл бөлінеді.



6.18-сурет

Түрлі газоразряд паспабтарын аз қысыммен электродтардың арасында қойылған тоқ жүретін құбылыстар пайдаланады.

Түрлі газоразряд аралығындағы вольт-ампер сипаттамасы берілген. Мінездеменің төменгі тармағы аз тоқпен, бағышты емес разрядқа сәйкес. Бұл кездегі тоқтың өтуі зарядтың қозғалуымен болады, сыртқы факторлар әсерімен пайда болған. Осыдан кейін, пәрменді ионизациядан тоқ тез өседі де электронды көшкін пайда болады.

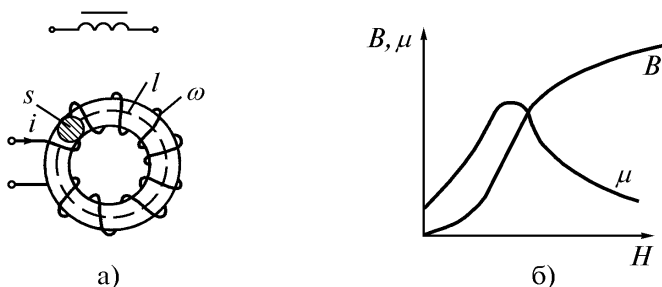
Тұтандыру кернеуіне жеткенде газоразрядты аралық тесіледі, ол бағышты емес разрядқа өткенін білдіреді. Тесілгеннен кейін, разрядтың тұрақты емес формасы кезіндегідей, бықсыған разряд пайда болады. Бұл разрядты ұстау үшін аз кернеу керек, тоққа бағышты емес. *c* нүктесінде, катод ауданын басатын бықсыған разряд болады. Кернеу тоқпен бірге өседі. *d* нүктесінде тағы разрядтың тұрақты емес формасы пайда болады, одан кейін вольт-ампер мінездемесі түсетін дуга тәрізді разряд тұрақталады. Дуга тәрізді разрядты сүйемелдеу үшін аз кернеу керек. Бықсыған разряд қолданылатын құралға, неон шамы жатады, вольт-ампер мінездемесі (6.18 б-суретте) көрсетілген. Тоқты азайтқанда (*b* нүктеде) бықсыған разряд тоқтайды және тоқ тұтату тоғынан аз болады. Сондықтан разрядтың өші кернеудің тұтынуы кем. Тоқтың кері өзгеруінде, сипаттама шыңы болмайды.

6.3 Ферромагнитті элементтері бар ауыспалы тоқтың сызықты емес электр тізбегі

6.3.1 Сызықты емес индуктивті элементтер

Сызықты емес катушка дегеніміз, тұйықталған ферромагнитті магнит өткізгішке оралған катушка оған магнит өткізгіштегі магнит ағымы, орамадығы өтіп жатқан тоққа байланысты сызықты емес. Бұндай катушкада, ауыспалы тоққа әсер ететін индуктивті кедергі тұрақты емес:

(6.19 а-суретте) схема түрінде ферромагнитті магнит өткізгіші бар катушка көрсетілген, (катушка орамасы саны W , магнит өткізгішінің кесігі S және орташа магнит сызығы l)



6.19-сурет

Егерде, магнит өткізгіштегі магнит өрісін біркелкі десек, катушкадағы тіркесу ағымы мынадай болады:

$$\psi = \Phi W = BSW \quad (6.9)$$

Φ – өзектегі магнит ағымы, $B\delta$;

B – магнит индукциясы, магнит ағымының тығыздығын көрсетеді, Тл

Магнит индукциясы мен магнит өрісінің кернеулігі мына формула арқылы байланысады

$$B = \mu_a H = \mu_0 \mu H \quad (6.10)$$

μ_a -материалдың абсолютті магнитті өтімділігі, $\frac{\Gamma_H}{M}$;

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m} \text{ магнитті өтімділік.}$$

μ -магнит өткізгішінің салыстырмалы магнитті өтімділігі.

Ферромагнитті материалдың магнитті өтімділігі өрістің кернеулігіне байланысты болғандықтан (6.19 б-сурет) оның сызықты еместігінің себебі осында.

Толық тоқ заңына байланысты, магнит өрісінің кернеулігі H толық тоққа пропорционалды, сол өрісті пайда қылатын:

$$\text{Біркелкі өріске } Hl = wi \text{ (6.11)}$$

Hl -шамасын, магнитті кернеу дейді, ал wi -көбейтіндісін-магниттау күші деп атайды.

(6.9) бен (6.11) есепке алып, индуктивті элементтің вебер-амперлі сипаттамасы WAC , мына түрде көрсетуге болады:

$$\psi = Bsw = \psi \frac{Hl}{w} = \psi (i) \quad (6.12)$$

Осы теңдеуден сызықты емес катушка сипаттамасы индукцияның өріс кернеулігімен байланысты екенін, анықтайтынын көруге болады: $V=B(H)$, яғни магнит өткізгіштің ферромагнитті материалының магнитталу мінездемесімен (6.19 б-сурет).

Сызықты емес катушканың магнит өткізгіші төменгі жиілігіне қатысты екі түрлі болады: пакетті және спиралды. Пакетті-ферромагнитті II немесе III формасы тәрізді материалдың жұқа төсенішінен тұрады.

Спиралді магнит өткізгіші оралған сағатты серіппе (пружина)түрінде болады. Пакет төсенішін және спиралды магнит өткізгіш орамасын бір-бірінен оқшаулау үшін, эмалды лак, сұйық шыны қолданылады.

6.3.2 Ауыспалы магнит өрісіндегі ферромагнитті материалдардың негізгі қасиеттері

Ауыспалы тоқтың, ферромагнитті магнит өткізгіші бар катушқадан өтуі магнитті гистерезиспен және құйынды тоқтың пайда болуымен қосталады. Бұл жағдайда, қосымша электромагнит энергиясы жоғалады.

Гистерезистің бір циклдегі қайта магниттау кезіндегі, жоғалған энергиясы, гистерезистің ілмек ауданына

пропорционалды. Гистерезистегі жоғалған қуат P_{Γ} , ток жиілігі f , гистерезис ілмек ауданына, магнит өткізгіш көлеміне пропорционалды және түрлі эмпирикалық формуламен анықталады.

Мысалы:

$$P_{\Gamma} = \sigma_{\Gamma} f B_m^{1,6} G B_m = 0,1 \dots 1,0 \text{ Тл};$$

$$P_{\Gamma} = \sigma_{\Gamma} f B_m^2 G B_m = 1,0 \dots 1,6 \text{ Тл}, \quad (6.13)$$

σ_{Γ} – болат сортына қатысты коэффициент.

B_m – магнит индукциясының амплитудасы

G – магнит өткізгішінің салмағы

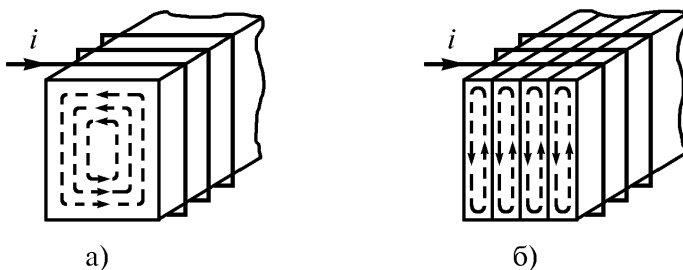
Ауыспалы магнит ағымы, магнит өткізгіші материалында ЭҚК туғызады. ЭҚК әсерімен магнит өткізгішінде құйынды ток пайда болады. Ленц ережесі бойынша, катушканың өзгермелі ток бағытына, қарсы бағытталған (6.20 а-сурет).

Құйынды ток, тек энергияны жоғалтпай, магнит өткізгіштің магнитін, әсіресе, орта бөлігіндегі көлденең кесімінде әлсіретеді. Себебі, орта бөлімде құйынды ток көбірек өтеді. Сол себептен, кесікте магнит индукциясы тең бөлінбейді: ортада аз, жан жағында көп. Осы кезде, магнит өткізгіштің ішкі саласы құйынды токпен экранда көрсеткендей болады.

Құйынды тоқтан жоғалған қуатты эмпирический формуламен табады

$$P_B = \sigma_B f B_m^2 G \quad (6.14)$$

σ_B - коэффициент, болат сортына және болат төсеніш өлшеміне байланысты



6.20-сурет

Құйынды тоқтан, энергияны аз жоғалту үшін және экранды әсерінен магнит өткізгішін тегіс емес төсеніш бетінен жасайды, бір-бірінен оқшауланған. Бұндай магнит өткізгіште құйынды ток азаяды, себебі көп кедергі көрсететін тар созылған сызықта тұйықталады (6.20 б-сурет).

Жиілік $f=50\text{Гц}$ -те, төсеніш бетінің қалыңдығы $0,25\text{-}0,5\text{мм}$ болады, егерде жиілік 100 немесе 1000 Гц болса, қалыңдығы $0,02\text{-}0,05\text{мм}$ төсеніш беті қолданылады. $30\text{-}50\text{ мГц}$ жиілікте магнитодиэлектрик-феррит қолданылады. Құйынды тоқты азайту үшін, төсеніш бетін электротехникалық болаттың арнайы сортынан жасайды (құрамында кедергіні көбейтетін $0,3\text{-}5\%$ кремний бар).

Гистерезис пен құйынды тоқ әсерінен магнит өткізгіштегі жоғалу, болаттағы жоғалу деп аталады:

$$P_{\text{ст}} = P_{\Gamma} + P_{\text{В}}$$

Есептеуде, $P_{\text{ст}}$ болаттағы жоғалту мөлшері қолданылыды килограмға ваттмен өлшенетін:

$$P_{\text{ст}} = P_{1/50} \cdot B_m^2,$$

$P_{1/50}$ – болаттағы жоғалту мөлшері, $B_m = 1,0\text{ Тл}$; $f = 50\text{ Гц}$ болғанда

$P_{1/50}$ – мағнасын, анықтағыштан табуға болады.

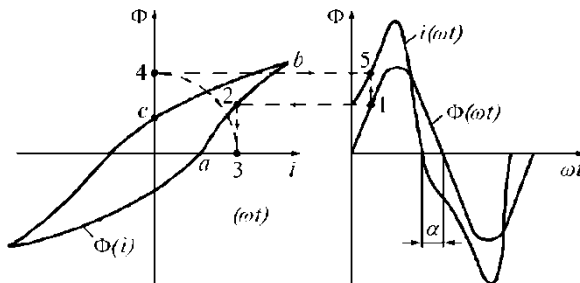
6.3.3. Тоқ қисығының формасына гистерезистің әсері

Ферромагнитті магнит өткізгіші бар айнымалы ток тізбегі, сызықты емес тізбек болады, себебі магнит өткізгіші болды, токтын қисығын бұрмалайды. Магнитті гистерезис бұрмалауды өсіреді.

Тізбектегі, магнит өткізгіші бар катушканың ток қисығын графикалық әдіспен анықтаймыз. Талдауды қысқарту үшін, катушканың активті кедергісіне көңіл бөлмейміз. Көрек көзінің синусоидалды кернеуінде озиндукция ЭҚК-сы және $R=0$ кездегі, катушкадағы магнит ағымы синусоидалды болады.

Тоқ қисығын синусоидалды емес деп көрсетеміз. Гистерезис ілмегін саламыз. 6.21-суретте $i(\omega t)$ қисығын салу тәртібі көрсетілген. $\Phi(\omega t)$ магнит ағымының қисығында нүкте

таңдаймыз, 1-2 көлбеу сызық $\Phi(i)$ қисығымен қыйылысатын және 2-3 тік сызық, 3 нүктесіндегі тоқ осімен қыйылысатын, 1 нүктедегі ағымға сәйкес. Бұл тоқтың абсциссін 0-4 координата түрінде саламыз және 1-5 тік сызықпен қилысқанша 4-5 көлденең сызықты жүргіземіз.



6.21-сурет

Тоқ қисығының координаты бірінші бөлікте гистерезис ab ілмегінің көбейту тармақтарымен анықталады, екінші бөлікте азаятын bc тармақпен.

6.21-суреттегі тоқ қисығы синусоидалды және абсцисс осіне симметриялы емес, ол жұп гармониканың жоқ екенін білдіреді.

Тоқ нөл мағнасынан өткенде, ағым тоқтан қалады. Егер де тоқ қисығын эквивалентті синусоидпен алмастырсақ, онда ағым қисығы тоқтан a бұрышына қалады, оны гистерезис бұрышы немесе магнит бұрышының кешігуі дейді. Тәжірибеде ол бұрыш $3 \dots 5^\circ$ тең. Тоқ қисығын эквивалентті синусоидпен ауыстырса, векторлы диаграмманы қолдануға болады және комплексті әдісін қолдануға болады. Эквиваленттілік шарты, табылған қисық мен эквиваленттілікке тоқ мағнасының тең болуы, және жойылу қуаттың тең болуы. Нақты тоқ мағнасын табу үшін, тоқтың синусоидалды функциясын, Фурье қатарына жайғастыру керек.

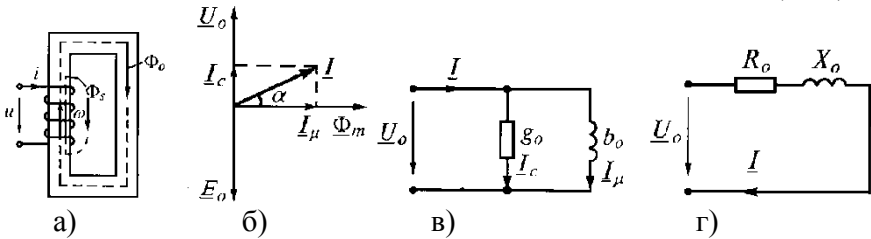
6.3.4. Ферромагнитті магнит өткізгіші бар катушканың векторлы диаграммасы және алмастыру сұлбасы

Тұйықталған ферромагнитті магнит өткізгіші және орамасында W иірілімі бар катушканың жұмысын қарастырамыз. Орамадан өтетін тоқ i (6.22 а-сурет) магнит

ағымын тудырады. Бұл ағымның көп бөлігі-негізгі ағым Φ_0 -магнит өткізгішінде тұйықталады, ал азғантай бөлігі кеңістікте тарқайды-тарқаған ағым Φ_z , Φ_s , Φ_0 -ның бірнеше пайызынан тұрады.

Егерде, магнит өткізгішінде үлкен ауа саңылау болса, Φ_s ағымы, Φ_0 ағымымен өлшемдес. Егер де катушка кедергісінің активті құрамасына және таралған ағымына көңіл бөлмесек, онда негізгі магнит ағымында

$$\Phi_0 = \Phi_m \sin \omega t \quad (6.15)$$



6.22-сурет

Катушка иірімінде, өзіндік индукция ЭҚК пайда болады.

$$\begin{aligned} e_0 &= -W \frac{d\Phi}{dt} = -W \omega \Phi_m \cos \omega t = \\ &= -W \omega \Phi_m \sin (\omega t + 90^\circ) \end{aligned} \quad (6.16)$$

Бұл ЭҚК қорек көзінің кернеуіне тең

$$u_0 = -e_0 = W \omega \Phi_m \sin (\omega t + 90^\circ) = U_{0m} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (6.17)$$

(6.15 және 6.17) теңдеуден көруге болады, \underline{U}_0 тармағы $\underline{\Phi}_m$ тармақтан 90° озық.

Нақты кернеу мағынасы

$$U_0 = \frac{U_{0m}}{\sqrt{2}} = \frac{w \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{W 2 \pi f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w \Phi_m \quad (6.18)$$

Электр машиналарының жұмысын талдауда осы теңдеу қолданылады.

Идеалды катушка вектор диаграммасын саламыз ($R = 0$, $\Phi_s = 0$). Магнит ағымының $\underline{\Phi}_m$ комплексті амплитудасын бастапқы тармақ, деп аламыз (6.22 б-сурет)

Кернеу тармағы \underline{U}_0 магнит ағымының тармағынан 90° озық, ал өзіндік индукция ЭҚК тармағы \underline{E}_0 , кернеу тармағы \underline{U}_0 тең, бірақ бағытты керісінше. Катушкадан өтетін нақты ток \underline{I} тармағы, $\underline{\Phi}_m$ тармақтан α бұрышқа озық гистерезиспен қуаландырылады. \underline{I} тармағын екі құраманың жиыны дейміз: активті-ток тармағының кернеу тармағына \underline{I}_c проекциясын және реактивті \underline{I}_μ магнитталған ток деп аталады. Яғни

$$\underline{I} = \underline{I}_c + \underline{I}_\mu \quad (6.19)$$

Бұл теңдеуге, алмастыру схемасы сәйкес (6.22 в-сурет), ал ток \underline{I}_c магнит өткізгіштегі жоғалуын ескертеді.

$$\underline{I}_c = \frac{P_{ст}}{U_0} \quad (6.20)$$

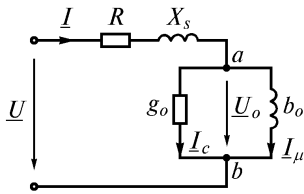
\underline{I}_μ құрамасы-идеалды катушкадағы ток (магнит өткізгішіндегі энергия жоғалмайды), (6.22 в-суреттегі) сұлбаны тармақтар өткізгіштілігін пайдаланып келесі сұлбаға өзгертуге болады (6.22 г-сурет):

$$R_0 = \frac{g_0}{g_0^2 + b_0^2}; \quad X_0 = \frac{b_0}{g_0^2 + b_0^2}.$$

6.22-суреттегі в мен г сұлбасында R_0, g_0 -кедергісі активті құрамасы және өткізгіштілік активті құрамасы, магнит өткізгіштегі қуат жоғалуын есепке алатын: X_0, b_0 -кедергінің реактивті құрамасы және өткізгіштілікті реактивті құрамасы, негізгі магнит ағымы мен қуаландырылатын.

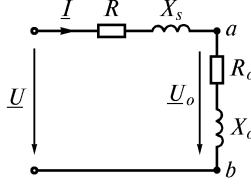
Нақты катушканың ауыстыру сұлбасында катушканың активті кедергісі R -деп және реактивті кедергісін X_s -деп аламыз, тарқалатын магнит ағымымен қуаландырылады (6.23 а,

б-сурет). Бұл сұлбаларда **ав** бөліктерін магниттау тармағы деп атайды.



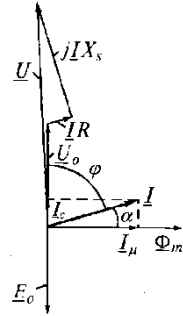
а)

6.23-сурет



б)

6.24-сурет



Тармақтағы толық кедергі $Z_0 = \frac{U_v}{I} = \sqrt{R_0^2 + X_0^2}$ Кирхгофтың екінші заңы бойынша, 6.23-суреттегі сұлбаның кешенді түрдегі тендеуі

$$\underline{U} = \underline{U}_0 + \underline{I}R + j\underline{I}X_s.$$

Осы тендеумен, идеалды катушканың векторлы диаграммасын саламыз (6.24-сурет)

Гистерезиспен куәландырылған бұрыш:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I_c}{I_\mu}$$

Тәжірибеде $\varphi + \alpha = 90^\circ$ немесе $\alpha = 90^\circ - \varphi$

Қуат коэффициенті:

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI} = \frac{R + R_0}{\sqrt{(R + R_0)^2 + (X + X_0)^2}}$$

Ферромагниті магнит өткізгіші бар катушканың жалпы активті қуаты P_μ өткізгіш қуатының жоғалуы және магнит өткізгіштегі P_{cm} қуатының жоғалуы.

$$P = P_\mu + P_{cm} = I^2 R + I^2 R_0;$$

$$P_{cm} = UI \sin \alpha = E_0 I \cos(90^\circ - \alpha)$$

a бұрышы үлкен болған сайын, ток I_c активті құрамасы және магнит өткізгіште жоғалу көбейді. Сондықтан **a** – бұрышын магнит өткізгіштегі жоғалу бұрышы деп атайды.

Қорытындысында, ауыстыру сұлбасында және ферромагниті магнит өткізгіші бар катушканың векторлы диаграммасын салуда эквивалентті синусоид әдісі қолданылады. Алмастыру сұлбадағы нақты параметрлар g_0 , R_0 , b_0 , x_0 , қорек көзінің кернеуіне бағынышты.

6.3.5 Кернеу феррорезонансы

Жалғас қосылған сызықты емес индуктивті катушка мен сызықты конденсатор тізбегінде сызықты тізбектегі резонансқа сәйкес құбылыс болуы мүмкін. Катушканы магнит өткізгіші мен алмастыру сұлбасының талдауын қысқарту үшін, таралу ағымына орама мен магнит өткізгіштегі жойылуға көңіл бөлмейміз. Барлық тізбекті, синусоидалды кернеудің қорек көзіне қосылған дейміз (6.25 а-сурет).

Барлық кернеу мен тоқ уақытпен синусоидалды өзгереді дейміз (6.25 б-сурет).

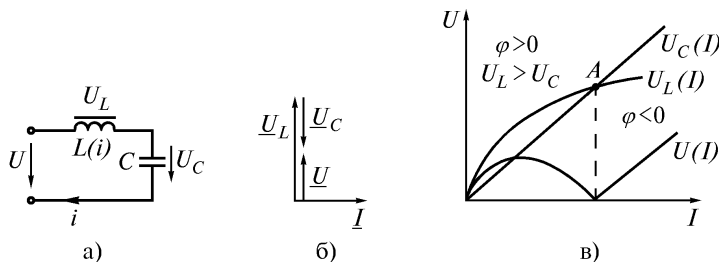
Кірме кернеудің әсерлі мағынасы

$$U = |\underline{U}_L + \underline{U}_C| = |U_L - U_C|. \quad (6.21)$$

6.25-суретте $U_L(I)$ мен $U_C(I)$ -тын байланыстары көрсетілген.

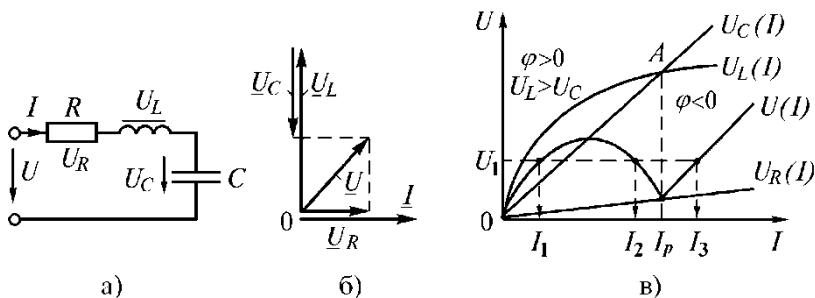
$U_L(I)$ формасымен $B(H)$ магниттелген қисыққа ұқсайды, ал $U_C(I)$ -тура сызық.

$U(I)$ қатынасын салу үшін 6.21-тендеуді пайдаланамыз. А мінездемесінің қыйылысқан нүктесінде, $U(I)$ қысығы тоқ осіне фаза бойынша тоқпен түйіседі. Бұл құбылыс, сызықты тізбектегі құбылыстай, кернеу резонансы деп аталады.



6.25-сурет

Егер тізбекке резистор қосылса, қорек көзінің кернеуі және ондағы кернеу құлауы (6.26 а, б) $U=(U_R+U_L)=\sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$



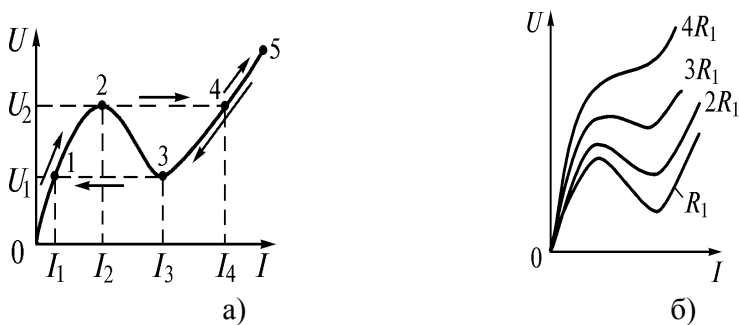
6.26-сурет

Осы теңдеуге сәйкес қорек көзінің кернеуі үш бұрыштың катеттері

$(U_L - U_C)$ және U_R гипотенуза ретінде анықталады (6.26 б-сурет). Резисторы бар тізбектің вольт-ампер сипаттамасы (6.26 в-суретте) көрсетілген. $U(I)$ сипаттама қосындысының негізгі өзгешілігі резонанс нүктесіндегі тоқ осінен оның көтерілуі. Резонансқа дейін, конденсатордан, катушкадағы кернеу көп, сондықтан, тізбекте индуктивті сипаттама. Резонанстан кейін, тізбек сипаттамасы өзгереді де кернеудің қайнар көзіне байланысты болады. Бұл байланыс сызықты емес тізбекке тән. Тізбектің вольт-ампер сипаттамасының қосынды түрі бір неше факторларға байланысты.

Мысалы, егер $U = U_1$ болса, тоқтың үш мағынасы болады. Егерде, тоқты синусоидалды емес деп, магнит өткізгіштегі жоғалуды есепке алсақ, нақты сипаттамасын жәй түрде көрсетуге болады.

(6.27 а-суретте) $U(I)$ қисығы көрсетілген. Нөлден бастап, жайлап қорек көзінің кернеуін көбейтеміз. Бұл кезде, U мен I байланысын көрсететін нүкте, 0-ден 1 нүктесіне өтіп 2 нүктеге ауысады. Кернеуді әрі қарай көбейтсе, бұл нүкте секіріп 2 мен 4-ке ауысады. Бұл кезде, тізбек мінездемесі индуктивтіктен 2 нүктеде, сыйымдылыққа өзгереді 4-нүктеде. Фаза керісінше өзгереді, содан кейін 4-5 бөлікте өзгеріс болады.



6.27-сурет

Кернеуді азайтса, байланысты көрсететін нүкте $U(t)$ 5-тен 4-ке өтіп, ауысады 3 нүктеге, сосын секіріп 1-ге, сосын 0-ге түсіреді. Сонымен, кернеуді көбейтіп U_2 мағынаға жеткізсек, тізбектегі ток I_2 ден I_4 -ке секіріп өседі. Кернеуді U_3 -тен азайтса, тізбектегі ток секіріп I_3 ден I_1 азаяды.

Тізбектегі токтың тез өзгеру құбылысы кернеудің аз өзгеруінде, тригерлік нәтиже деп аталады.

(6.27-суреттегі) 2-3 бөліктегі вольт-ампер мінездемесінің процесі, тізбек қорек көзінен қоректенсе, тұрақты болмайды. 2-3 бөлікті эксперимент түрінде табу үшін, қорек көзіне токтың реттеуші қорек көзін пайдаланамыз.

Тізбектің активті кедергісінің өсуі мінездеменің өсуіне әкеледі 6.27 б-сурет ал активті көп кедергіде, мінездеменің (3-нүктесінде) құлауы жойылады. Конденсатордың сыйымдылығының өзгеруі, резонанс үдерісіне әсер етеді. Егер де $U_C(I)$ қысығы жоғары немесе төмен $U_L(I)$ өтсе, онымен қиылыспай, феррорезонанс пайда болмайды.

6.3.6 Токтар феррорезонансы

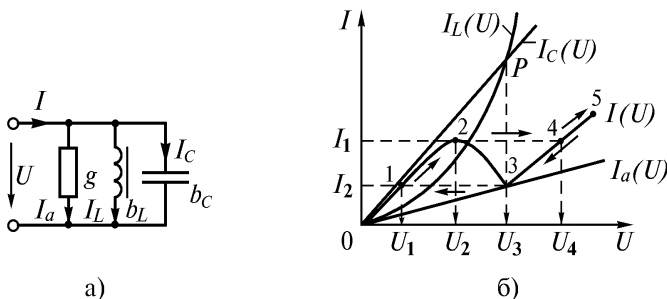
Қатар қосылған магнит өткізгіші бар катушкамен конденсатор тізбегінде, ток феррорезонансы болады. Бұндай тізбектің ауыстыру сұлбасы (6.28 а суретте) көрсетілген. Тізбектегі токтың өзгеру мінезі кернеу $I_a(U)$, $I_L(U)$, $I_C(U)$, тізбектегі ток функциясының кернеуінің өзгеруі мінезіне сәйкес (6.26 в сурет), (6.28 б суретте) қорек көзінің V кернеуінің 0-ден

жайлап өсуіндегі ток қисығы көрсетілген. Тізбектің жиыны вольт-ампер мінездемесін анықтау үшін Кирхгофтың бірінші заңын қолданамыз

$$\underline{I} = \underline{I}_a + \underline{I}_L + \underline{I}_C.$$

Ток түрлі кедергіде келесі формуламен анықталады.

$$I = \sqrt{I_a^2 + (I_L - I_C)^2}$$



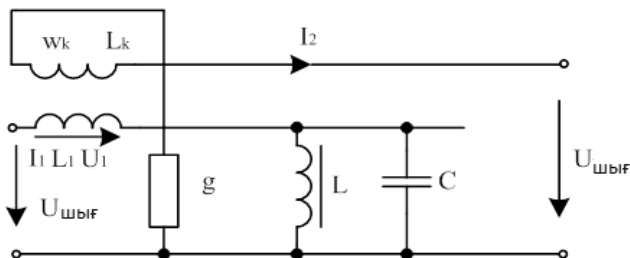
6.28-сурет

Р-нүктесі, қисықтар $I_L(U)$ мен $I_C(U)$ қиылысқан нүктесі тізбектің режиміне сәйкес, тоқтың феррорезонансы деп аталады.

Тоқтың феррорезонансында тізбек режимінде, бірінші ток I_L құрамасы сыйымдылық ток I_C тең. Бұл режимде тізбектің тармақталмаған бөлігіндегі ток I_L нөлге тең емес. Ол активті құрама I_a мен ток I_L жоғарғы гармоникасынан тұрады. Қатарлы тізбектеде триггерлы нәтиже пайда болуы мүмкін. Егерде тізбектегі тоқты бірте-бірте көбейтсек, I мен U байланысын көрсететін нүкте, әр мезгілде, бірінші 0-1-2 бөлікте, содан сон секіріп 2-ден 4-ке, әрі қарай 4-тен 5-ші бөлікке жылжып отырады. Әр қарай тоқты бірте-бірте азайтсақ қисық 5 тен 4-ке сосын 3 нүктегі, сосын секіріп 3-тен 1-ге әрі қарай 1-ден 0-ге өзгереді (6.28 б-сурет). Ескеру керек, тоқтың феррорезонанс режиміне жету үшін, конденсатор сыйымдылығы бұрыш жиілігі болса және сызықты емес катушканың вольт-ампер мінездемесі өзгермесе кірме кернеу өзгеруі керек.

6.3.7. Кернеудің жәй ферррезонансты стабилизаторы

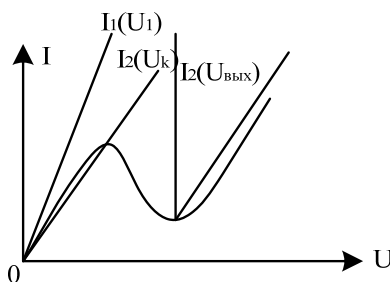
Кернеуді ферррезонансты тізбек көмегімен тұрақтандыруға стабилизация болады. Техникада, тоқ немесе кернеу ферррезонансын пайдаланатын түрлі стабилизаторлар қолданылады.



6.29-сурет

(6.29-суретте) жай ферррезонансты тұрақтандырғыш (стабилизатор) қатар қосылған ферррезонанстың контуры L - C және жалғас қосылған катушка L_1 бар, онымен өтемді катушка L_k индуктивті байланысты.

L_1 және L_k катушкалар бір магнит өткізгішке оралған және қарсы қосылған. Катушкаға U_k кернеу беріледі, ол тоқтан сызықты тәуелді. Сондықтан $\underline{U}_{шығыс} = \underline{U}_0 - \underline{U}_k$. Тұрақтандырғыштың шығыс $I_2(U_{шығыс})$ мінездемесін табу үшін, резонансты контурының $I_1(U_0)$ сызықты катушка $I_1(U_1)$ және өтемді катушканың $I_2(U_2)$ вольт-ампер мінездемесін саламыз (6.30-сурет).



(6.30-сурет).

Графикалық талдауды қысқарту үшін, тұрақтандырғыштың кірмесіндегі мен шығысындағы тоқты бірдей дейміз $I_1 \approx I_2 = I$. Кернеу арасындағы фазаның жылжуын есепке алмаймыз. Резонанстан кейін кернеу қисықтарын $I_1(U_1)$ мен $I_1(U_0)$ қосамыз. Шығыстағы $I_2(U_{шығыс})$ табу үшін $I_1(U_0)$ қысықтан кернеудің $I_2(U_k)$ вольт-ампер сиппаттамасын аламыз.

Табылған қысықтарды талдап, қорытынды шығарамыз, қарастырылған сұлбаны, кернеуді тұрақтандыруға пайдалануға болады, себебі, кірмедегі кернеу мен шығыстағы кернеу өзгермейді.

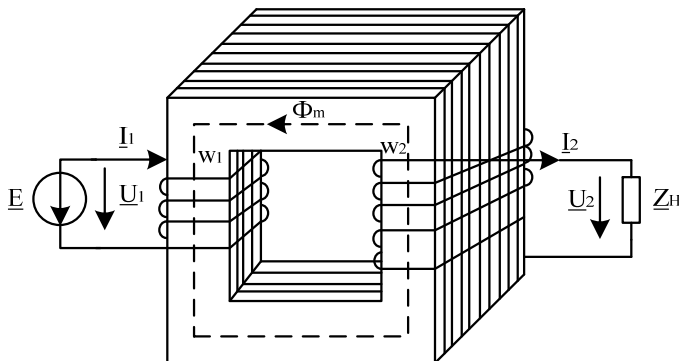
6.3.8 Ферромагнитті магнит өткізгіші бар трансформатор

Ферромагнитті магнит өткізгіші жоқ трансформатор екінші тарауда қарастырылған. Магнит өткізгіштің бар болуы, магнит ағымын көбейтуге жағдай жасайды және бір тізбектен келесі тізбекке беретін қуат өседі.

Көп жағдайда, магнит өткізгіш көлемін және ораманың иірім санын таңдағанда, магнит өткізгіш материалын тойдырмайтын қылып алады. Сонда ондағы кернеу, токтар ЭҚК және магнит ағымын синусоидалды дейміз.

Түрлі типті трансформаторлардағы болатын үдерістерді, екі орамды қуатты трансформатор мысалында қарастыруға болады (6.31-сурет).

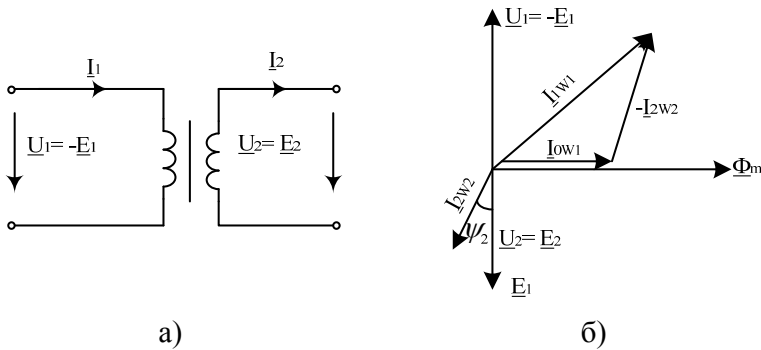
Электр энергиясы берілетін орама-алғашқы деп аталады, ал жүктемеге қосылатын орама-туынды деп аталады. Алғашқы орамаға жататын шамалар - 1 индексі мен, туындыға жататындар - 2 индексмен белгіленеді.



6.31-сурет

Ең жақсы трансформатордағы негізгі қатынастар.

Ең жақсы трансформаторда, ораманың активті кедергісін, таралатын магнит ағымын, магнит өткізгіштегі қуат жоғалуын есепке алмаймыз (6.32 а-сурет)



6.32-сурет

Трансформаторды көрек көзіне қосқанда, орамада индукцияланады. ω_1 орамада ЭҚК-ға қарсы $E_1 = 4,44f\omega_1\Phi_m$, ал ω_2 орамада оз ара индукция ЭҚК $E_2 = 4,44f\omega_2\Phi_m$. Егерде орамадағы кернеудің құлауын есепке алмасақ,

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1; \underline{U}_2 = \underline{E}_2 \quad (6.22)$$

Бұл жағдайда, теңдеу орын алады:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = n \quad (6.23)$$

n - трансформация коэффициенті.

Көбейтетін трансформатор болса, $U_2 > U_1$, сондықтан $n < 1$

Ал азайтатын трансформаторға $U_2 < U_1$, болса, $n > 1$

Ең жақсы трансформатордың векторлы диаграммасын саламыз. ω_1 орама тоғын бос жүрісте I_0 белгілейміз. $I_0 \omega_1$ - бос жүрістегі магнит қозғағыш күші - $I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2$ жұмыс режиміндегі трансформатордың магнит қозғағыш күші.

Көрек көзінің кернеуі өзгермегенде, магниттеу күші де өзгермейді дейміз, сондықтан:

$$I_0 \omega_1 = I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2 \quad (6.24)$$

6.22-теңдеуі $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1$, бос жүрісте де, жүктемеде де әділетті. Сондықтан ағым өзгермейді. Егер де $\Phi_m = const$ болса, сол режимдегі магнит қозғағыш күші де тең болады. Трансформатордың векторлы диаграммасын, мына жағдайда саламыз, ω_2 орамадағы ток векторы, өзара индукциялық ЭҚК

векторынан φ_2 бұрышка қалдық (6.32 б-сурет) $\underline{I}_1\omega_1$ векторды табу үшін, $\underline{I}_0\omega_1$ вектордан $\underline{I}_2\omega_2$ векторын аламыз: $\underline{I}_1\omega_1 = \underline{I}_0\omega_1 - \underline{I}_2\omega_2$

Бұл кезде \underline{I}_1 мен \underline{I}_2 векторлар арасындағы бұрыш 180° жақын болады.

Ол ω_2 ораманың магнит өткізгіштің магнитінің жойылуына әсер етеді сол себептен алғашқы тізбекте тоқ көбейеді. Жүктеме тоғының өсуі, трансформатордың ω_1 , орамасының тоғын өсіреді. Автореттеуші ретінде қарсы ω_1 ЭҚК орамасы шығады.

Бос жүрістегі \underline{I}_0 тоғын есепке алмай, табамыз

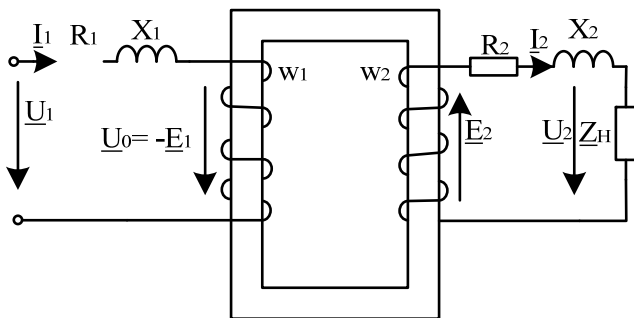
$$\underline{I}_1\omega_1 + \underline{I}_2\omega_2 = 0 \text{ онда } \frac{I_2}{I_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = n$$

Сондықтан өте жақсы трансформаторда орамадағы токтың сәйкес кернеуге қатынасы керісінше болады. Шынайы трансформаторлардағы қатынасы басқаша.

Номиналдыға жақын жүктеме кезінде, айырмашылығы аз болады.

Ферромагнитті магнитөткізгіші бар шынайы трансформатордың кернеу теңдеуі мен векторлы диаграммасы

Шынайы трансформаторды қарастыру үшін ораманың R_1, R_2 активті кедергісін магнит өткізгіштің P_{cm} қуатының жоғалуын және таралған ағымдар әсерін ескереміз. (6.33-суретте) трансформатор сұлбасы берілген, онда ораманың активті R_1, R_2 және индуктивті X_1 мен X_2 кедергілері таралған ағымдарымен көрсетілген.



6.33-сурет

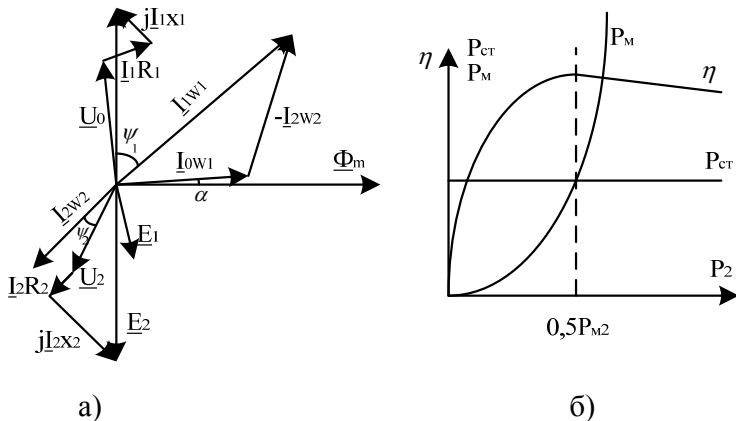
Кирхгофтың екінші заңы бойынша, теңдеулер жазамыз:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_0 + \underline{I}_1 R_1 + j \underline{I}_1 X_1 \quad (6.25)$$

$$\underline{E}_2 = \underline{U}_2 + \underline{I}_2 R_2 + j \underline{I}_2 X_2 \quad (6.26)$$

(6.34 а-суреттегі) векторлы диаграмманы салғанда, барлық векторлардағы магнит ағымы Φ_m векторына қатысты бағдарлаймыз. Диаграммадан бақылаймыз, I_2 тоғының өсуімен I_1 тоғы өседі және жүктеменің өсуімен қуат коэффициенті өседі. Бос жүрісте, таратылу ағымы аз, негізгі ағымның 0,25% құрайды.

Себебі, жүктелген режимде ω_2 орама негізгі ағымның магнитінің әлсіреуіне әсер етеді, ал таратылу ағымы тоққа теңдес өседі, номиналды жүктемеде 5% болады, яғни 20 есе өседі. Магнит ағымының тұрақтылығына байланысты магнит өткізгіштегі жойылуда тұрақты, ал сымдағы жойылу ток квадратына теңдес, яғни тез өседі (6.34 б-сурет)



6.34-сурет

Трансформатор КПД-сы формуласымен анықталады

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_M + P_{cm}} \quad (6.27)$$

$P_M = P_{M1} + P_{M2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$ - орама сымындағы қуаттың жоғалуы

P_{cm} - магнит өткізгіштегі қуаттың жоғалуы

$P_{cm} = P_M$ болса, КПД ең үлкен болады. Осы режимге сәйкес жүктеме, номиналды жүктеменің 50% болады (6.34 б-сурет).

Трансформатордың алмастыру сұлбасы. Қарастыратын трансформатор төртұшты дейміз, сондықтан эквиваленті сұлба құрамыз (Т–тәрізді). Ол үшін, байланысы жоқ контурлар арасындағы магнитті байланысты электр тізбегімен алмастырамыз. Осы мақсатпен трансформатордың туынды тізбегіндегі барлық параметрлерін өзгерту керек, алғашқы және

туынды орама ЭҚК-сы тең болу керек. Ол үшін екі орамада бір санды иірім жасайды, әдеттегідей алғашқы орама иірім саны алынады.

Туынды тізбек электр параметрларын, алғашқы иірім санына келтірілген, штрихы бар сәйкес әріппен белгілейміз. Орамаға берілетін қуат

$$E_2 I_2 \cos \psi_2 = E'_2 I'_2 \cos \psi_2 \quad (6.28)$$

Трансформатрдың қабылдағышқа беретін қуаты:

$$U_2 I_2 \cos \varphi_2 = U'_2 I'_2 \cos \varphi_2 \quad (6.29)$$

Орама ω_2 қыздыруға жұмсалатын қуат:

$$I_2^2 R_2 = (I'_2)^2 R'_2 \quad (6.30)$$

Бұрыш жылжуы φ_2 мен ψ_2

$$\varphi_2 = \psi_2 = \arctg \frac{X_2}{R_2} = \arctg \frac{X'_2}{R'_2} \quad (6.31)$$

Сонда $\omega'_2 = \omega_1$ болса

$$E'_2 = E_1 = n E_2 \quad (6.32)$$

(6.28) және (6.32) теңдеулерден табамыз

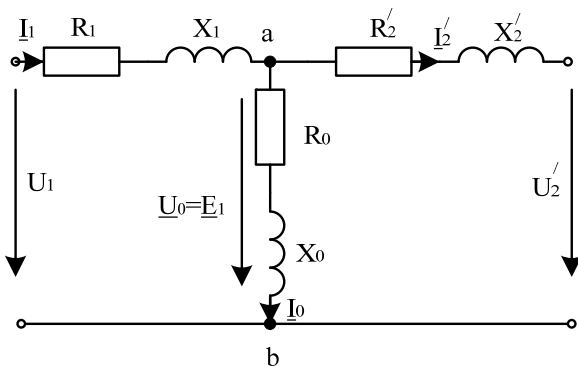
$$I'_2 = \frac{E_2}{E'_1} I_2 = \frac{I_2}{n} \quad (6.33)$$

(6.29) және (6.33) теңдеуден, $U'_2 = n U_2$

(6.30, 6.31, 6.33) теңдеулерді біріктіріп шығарамыз:

$$R'_2 = R_2 n^2; X'_2 = X_2 n^2$$

Алғашқы және туынды орама ЭҚК теңдігі трансформатордың алғашқы және туынды орамасы электр тізбегін бір сұлбаға біріктіреді (6.35-сурет)



6.35-сурет

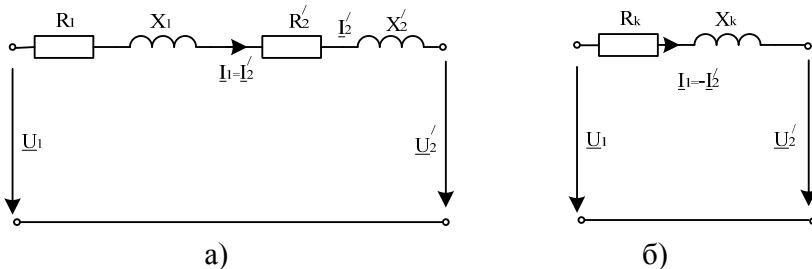
Тізбектің жалпы бөлігі **ab** магнитталу тармағы деп аталады. Бұл сұлбада R_0 – активті кедергі, магнит өткізгіштегі қуат

жойылуын ескеретін x_0 - реактивті кедергі. $R'_2; X'_2-\omega_2$ -ораманың активті және реактивті кедергісі ω_1 - иірімге келтірілген.

Тәжірибелік жағдайда, трансформаторды алмастыру оңайлау сұлбасын қолдануға болады. Ол сұлбада, бос жүрістегі I_0 тоғын есепке алмау және Т-тәрізді алмастыру сұлбадан магниттау тармағын алып тастау. (6.36 а-сурет).

$$I_0=0; I_1=I_2, \text{ болса } R_1+R'_2=R_k; X_1+X'_2=X_k$$

Есепке алғанда сұлба жәй түрлі болады (6.36 б-сурет).



6.36-сурет

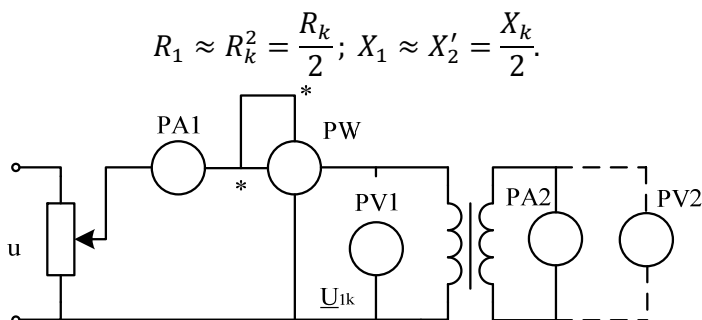
Жеңілдеу алмастыру сұлбасын, жүктеме номиналдыға жақын болғанда қолдануға болады. Аз жүктеме режимінде, бос жүрістегі токқа көңіл бөлмеуге болмайды және есептеу үшін, трансформатордың Т-тәрізді алмастыру сұлбасын қолдану керек.

Трансформатор алмастыру сұлбасы параметрларын тәжірибе жолымен анықтауға болады. Ол үшін, екі тәжірибе өткізу керек: қысқа тұйықталу тәжірибесі және бос жүріс тәжірибесі. Қысқа тұйықталу тәжірибеде, трансформатор кірмесіне U_{1k} кернеу орнатады ω_2 орамадан номиналды ток өтуі керек. Бұл кезде, ω_1 орамадан да номиналды ток өтеді (6.37-сурет). Берілген кернеу аз болғасын, магнит ағымыда аз. Сондықтан магнит өткізгіштегі қуат жойылуын ескермеуге болады. Яғни, ваттметр көрсетуі орама қуатының жойылуына теңдес: $P_M = R_{1k}$,

$R_0 \gg R'_2$ және $X_0 \gg X'_2$ есептесек, магниттеу тармақтар кедергілерін R_0, X_0 есепке алмауға болады. Қысқа тұйықталу тәжірибесінен табамыз:

$$R_k = \frac{P_{1k}}{I_{1k}^2}; Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}; X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$$

$R_1 \approx R'_2$ және $X_1 \approx X'_2$ болса, трансформатор алмастыру сұлбасының параметрлерін анықтаймыз:



6.37-сурет

Бос жүріс тәжірибесінде амперметр $PA2$ вольтметр $PV2$ алмастырамыз. Кернеу қорек көзін U_{10} шығысында номиналды кернеу болатындай етіп тандаймыз. (6.37-сурет)

Бос жүрістегі тоқ аз, сымдағы қуат жоғалуын U_{10} кернеу номиналдыға жақын болғандықтан, магнит өткізгіштегі жойылу номиналды режим кезіндегі жойылуға сәйкес ескермеуге болады. Бұл жойылу қуатын ваттметр көрсетеді:

$$P_{10} = P_{cm}.$$

Бос жүріс берілгендерінен, магниттелу тармақтар параметрлерін анықтаймыз:

$$Z_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}}; R_o = \frac{P_{10}}{I_{10}^2}; X_o = \sqrt{Z_{10}^2 - R_o^2}$$

Қорытындысында атап кету керек, трансформатор алмастыру сұлбасы параметрлерін есептегенде, трансформатор жүктеме кедергісін жоғарғы кернеу орамасына келтіру керек: $R_H' = R_H n^2; X_H' = X_H n^2;$

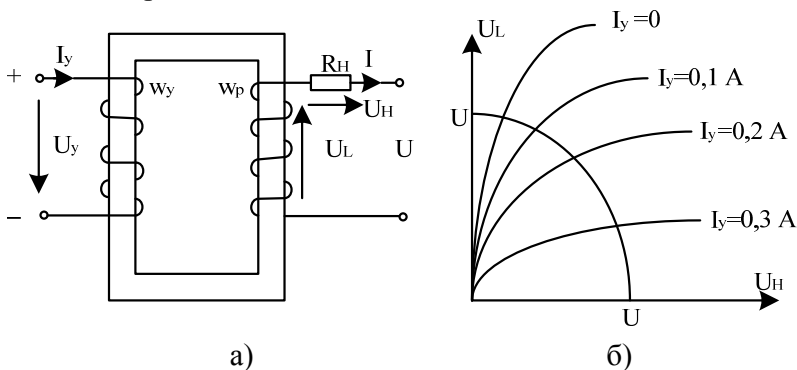
6.3.9 Сызықты емес индуктивті элементтерді тәжірибелік мысалда пайдалану. Қуаттың магнитті күшейткіші

Қуаттың магнитті күшейткіші, сызықты емес күшейткішке жатады. Оның әрекет принципінің негізі, ферромагнитті магнит өткізгішінің тойым дәрежесінің өзгеруі тұрақты тоқтың магниттелуіне қатысты.

Магнитті күшейткіш әрекетінің принципін түсіну үшін, оның схемасын, магнит өткізгіш және екі орама түрінде көрсетеміз (6.38 а-сурет). Жұмыс орамасын ω_p , R_H кернеу бар синусоидалды тоқтың қорек көзіне, жалғас қосылады. Сол магнит өткізгіште

оралған басқарушы орама ω_y , тұрақты тоқ U_y қорек көзіне қосылған, $\omega_y \gg \omega_p$. Басқарушы орама тізбегін кірме тізбек деп атайды, ал жұмыс орама тізбегі жүктеме R_H -бар, шығыс тізбегі деп аталады. Күшейту үдерісінің мағынасы мынада, ферромагнитті магнит өткізгішке аз басқарушы токпен әсер етіп, жүктеме тізбегінің шығысында көп ток аламыз. Бұл кезде қабылдағышқа беретін қуата өседі.

Күшейткіш сұлбасындағы жағдайларды қараймыз. Магнитталу күші $I_y \omega_y$ әсерінен, магнит өткізгіштің магнит жағдайы өзгереді.



6.38-сурет

Қорытындылау магнит ағымын екі қосындыдан тұрады дейміз. Тұрақты және ауыспалы. $\Phi = \Phi_0 + \Phi_m \sin \omega t$.

Басқарушы тізбекте тоқты көбейтсек, магнит өткізгіші магнитке тойынады, магниттік бойлаушылық азаяды, жұмыс орамасының реактивті кедергісі де азаяды, ал жүктемеден өтетін ток өседі. Егер де жүктеме кедергісі активті десек, ω_p орама кедергісін таза индуктивті десек (яғни, активті кедергіге қуат жоғалуына көңіл бөлсек) жұмыс тізбегіндегі ток.

$$I = \frac{U}{\sqrt{R_H^2 + X_L^2}}; U = \sqrt{U_H^2 + U_L^2}$$

U_H – жүктемедегі кернеу

U_L – ω_p жұмыс орамадағы кернеу

Басқарушы тізбек тоғын реттеп, күшейткіштің жүктемелі мінездемесін табамыз.

Кирхофтың екінші заңы бойынша жазылған теңдеу $U^2 = U_H^2 + U_L^2$ туынды тізбекке, шеңбер теңдеуі болады (6.38 б-сурет). U радиусты шеңбер жүргіземіз. Түрлі басқарушы тоқтарда шеңбердің қысықтар мен қиылысқан нүктелер U_H мен U_L береді.

Сондықтан басқарушы тоқты көбейтсек, жүктеме кернеуі өседі, орамада азаяды.

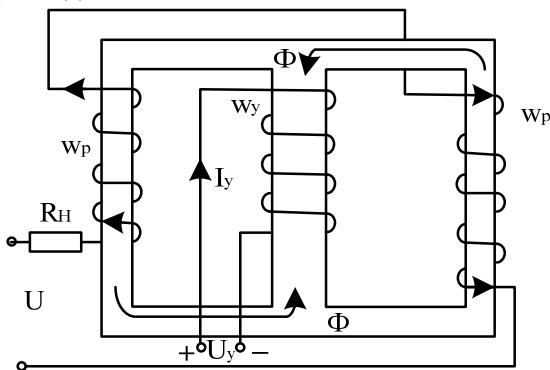
Магнитті күшейткішті, қуат күшейткіш коэффициентімен бағалайды, жүктеме қуат өсімінің, басқарушы тізбек қуатына қатынасымен анықталады.

$$k_p = \frac{\Delta P_H}{P_y} = \frac{P_H - P_{Hxx}}{I_y^2 R_y} = \frac{I^2 R_H - I_{xx}^2 R_{Hxx}}{I_y^2 R_y}$$

Бұл жерде P_{Hxx} , R_{Hxx} , I_{xx} -қуат, жүктеме кедергісі, жүктемедегі тоқ, басқарушы тізбекте тоқ жоқ кезінде ($I_y=0$). Әдеттегідей $k_p=100\dots 10000$.

Сонымен,қарастырылған (6.38 а-сурет) сұлбада, басқарушы орамада ауыспалы тоқ маңызды ЭҚК жасайды ($\omega_y \gg \omega_p$), ал басқарушы орама ауыспалы тоқта қысқаша тұйықталған, сол ЭҚК басқару дабылын бұзады. Бұл жетіспеушілікті жою үшін, тармақталған магнит өткізгіште магнитті күшейтеді (6.39-сурет).

Екі жұмыс ораманы шеткі өзекке, ал басқарушы ораманы ортадағыға орнатады.



6.39-сурет

Жұмыс орамасы солай оралады, ортадағы өзекте пайда болатын ағым қосындысы нөлге тең болу керек.

Бақылау сұрақтары

1. Келесі түсініктерге анықтама беріңіздер: сызықты емес *кедергі*, сызықты емес *электр тізбегі*, статикалық және дифференциалдық кедергілер.

2. Сіздерге белгілі басқарылмалы емес және басқарылатын сызықты емес кедергілері типтерін В.А.С. (вольтамперлік сипаттамаларын) сапалылық түрде келтіріңіз.

3. Сызықты емес кедергілері және ЭҚК көздері бар бірнеше *қатарлас* тармақтарын қалай бір баламалыға ауыстырады? Балама *тармақ* элементтерінің сипаттамаларын анықтаңыздар.

4. Екі түйіндік әдісімен және балама генератор әдісімен *сызықты* емес тізбектерді есептеу кезеңдерін атап келтіріңіз.

5. Сызықты тізбектерде кездеспейтін белгілі бір *шарттылық кезіндегі* сызықты емес тізбектердің қасиеттерін атап келтіріңіз.

6. Электр кернеу түрлендірушісінің (стабилизаторының) тұрақтандырушы қасиетін қарастырыңыз.

7. Сызықты емес төртұштықтары бар электр тізбектерін талдау және синтездеу әдістеріне мысалдар келтіріп, балама генератор қағидатын қолдануды қарастырыңыз. Тұрақты кернеу күшейткіштеріне және үзiкті (дискретті) техниканың қисынды элементтеріне түсінік беріңіз.

8. Сызықты емес кедергі, сызықты емес электр тізбектері, статикалық және дифференциалдық кедергі түсініктеріне анықтама беріңіз.

9. Басқарылмалы емес және басқарылмалы белгілі типті сызықты емес кедергілерді в.а.с. сапалы түрде бейнелеп көрсетіңіз.

10. Өзіңізге белгілі сызықты емес активті, индуктивті, сыйымдылықты кедергі түрлерін сипаттаңыз.

11. Сызықты тізбектерде байқалмайтын құбылыстардың сызықты емес тізбектерде кездесетін қандай физикалық құбылыстары байқалады?

12. Лездік мәндері үшін құрылған сипаттамалардан бірінші гармониктер үшін құрылған в.а.с-ның әсерлік мәндерінің шамаларына қалай в.а.с. алуға болады?

13. Электрондық шамдардың және транзисторлардың кіші айнымаларының құраушылары үшін орын басу сұлбаларын сызыңыз.

14. Сіздерге белгілі сызықты емес тізбектердегі кезеңдік үдерістерді есептеу әдістерінің негізгі «жағдайларын қысқаша сипаттаңыз.

15. Сызықты емес екіұштықтар және төртұштықтар жайында түсінік беріңіз.

16. Сызықты резистивтік төртұштықтардың сызықты емес төртұштықтардан айырмашылықтары қандай?

17. Қай уақытта сызықты емес төртұштықтарды пассивті, активті деп қарастырамыз?

18. Сызықты емес төртұштықтардың, екіұштықтардың сипаттамаларындағы жұмыс нүктелерін қалай анықтаймыз?

19. Сызықты емес төртұштық тогының айнымалы құраушысы және оның параметрі үшін орын басу сұлбасын келтіріңіз.

20. Тұрақты және айнымалы тоқтардың сызықты емес тізбектеріндегі құбылыстарын баяндаңыз.

21. Қандай сызықты емес тізбектерді есептеу әдістерін білесіз, қысқаша түсінік беріңіз.

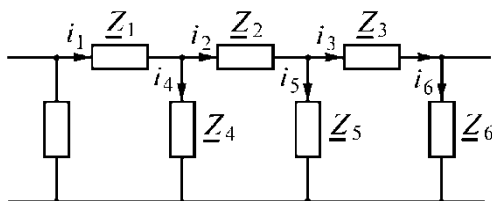
VII ТАРАУ

7. Параметрлері таратылған электр тізбектері

7.1 Жалпы мәлімет

Электр тізбегі параметрлері, егер де, электромагнитті энергияны тізбектің барлық ұзындығына берген уақытта тоқ пен кернеу белгілі бір шамаға өзгерсе таратылған электр тізбегіне жатады.

Сондықтан, жиілікті өсіргенде, қысқа бағыттарда да параметрлері таратылған тізбек ретінде қарастырады, мысалы, электр байланыс бағыты. Осындай тізбекке биік вольтті электр энергия беретін ұзын бағыттар жатады. Мысал ретінде трансформатор және электр машиналар орамасы, тоқ пен кернеудің импульсті әсерінде. Параметрлары таратылған тізбектің ауыстырмалы эквиваленті сұлбасы 7.1-суретте көрсетілген.



7.1-сурет.

Егер де барлық көлденең және ұзынды кедергі бөліктері тең болса, яғни $Z_1 = Z_2 = Z_3$ және $Z_4 = Z_5 = Z_6$, сызықты біртекті деп атайды, ал егерде тең болмаса-біртекті емес деп атайды. Әрі қарай, біртекті параметрлері таратылған сызықтарды (бағыттарды) қарастырамыз.

7.2 Біртекті екі сымды желінің дифференциалды теңдеулері

Барлық бағыттағы желелердің, тізбектеліп қосылған ұзындығы аз, dx бөліктен тұрады дейміз.

Әр қайсының кедергісі $R_0 dx$ индуктивтігі $L_0 dx$, өткізгіштігі $g_0 dx$, сыйымдылығы $C_0 dx$. Желі параметрлерін ұзындықтың бір шамасына есептейміз:

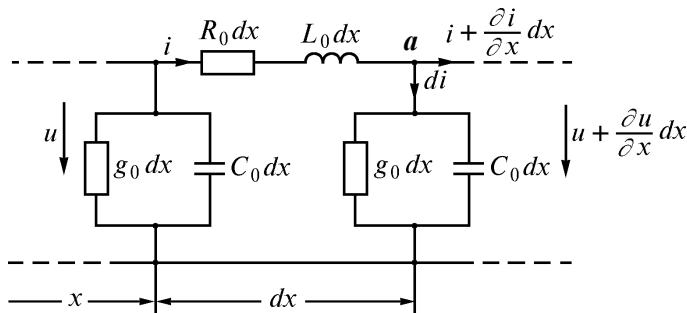
R_0 - тіке және кері сымдар кедергісі Ом/м

L_0 - тіке және кері сымдар индуктивтігі Гн/м

g_0 - сымдар арасындағы өткізгіштігі Сн/м

C_0 - сымдар арасындағы сыйымдылығы Ф/м

Эквиваленті алмастыру сұлбасы 7.2-суретте көрсетілген.



7.2-сурет

Бұндай желіде тоқ пен кернеу, екі айнымалы тәуелсіз функциясы болады - x координаты және t уақыты. Егерде, бөлік басында тоқ x координатында i -ге тең болса, $x+dx$ нүктеде, ол $\frac{\partial i}{\partial x} dx$ -ке айырықша және $i + \frac{\partial i}{\partial x} dx$ -тең. Кернеуде де оған ұқсас: u және $u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$.

Тұйықталған контурды сағат бағыты мен бағыттап Кирхгофтың екінші заңы бойынша теңдеу құрамыз:

$$-u + R_0 dx \cdot i + L_0 dx \frac{\partial i}{\partial x} + \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) = 0$$

Қысқартқаннан кейін табамыз:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial x} \quad (7.1)$$

Кирхгофтың бірінші заңы бойынша бөлім соңындағы а түйінге теңдеу құрамыз:

$$i = di + \left(i + \frac{\partial i}{\partial x} dx \right)$$

Бұл теңдеуде di тоғы, $g_0 dx$ өткізгіштен және $C_0 dx$ сыйымдылықтан өтетін токтар қосындысына тең немесе:

$$di = \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) g_0 dx + C_0 dx \frac{\partial}{\partial t} \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right)$$

Өте аз қосындыларды есепке алмай, табатынымыз:

$$di = u g_0 dx + C_0 dx \frac{\partial u}{\partial t}$$

Қысқартып табамыз:

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = g_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (7.2)$$

(7.1) және (7.2) теңдеулер параметрлері таратылған желілер дифференциалды теңдеулері болады.

7.3 Кешенді түрдегі біртекті желілер теңдеулері

Ток пен кернеу желілерде бұрышы жиілік ω -мен синусоидалды заңмен өзгертін уақыттымен (7.1) және (7.2) теңдеуді, кешенді форма нақты мағынасында табамыз:

$$-\frac{dU}{dx} = (R_0 + j\omega L_0) \underline{I} = \underline{Z}_0 \underline{I}; \quad (7.3)$$

$$-\frac{dI}{dx} = (g_0 + j\omega C_0) \underline{U} = \underline{Y}_0 \underline{U}, \quad (7.4)$$

$\underline{Z}_0, \underline{Y}_0$ -бағыттың бір ұзындығының кешенді кедергісі мен өткізгіштігі.

Z_0 мен Y_0 біріне-бірі керісінше емес, ал \underline{U} мен \underline{I} кешені, координат x функциясы болады.

(7.3) және (7.4) теңдеулерін дифференциалдаймыз.

$$-\frac{d^2 U}{dx^2} = \underline{Z}_0 \frac{dI}{dx}; \quad -\frac{d^2 I}{dx^2} = \underline{Y}_0 \frac{dU}{dx}.$$

Өзгерткеннен кейін табамыз:

$$\frac{d^2 \underline{U}}{dx^2} = \gamma^2 \underline{U}; \quad (7.5)$$

$$\frac{d^2 \underline{I}}{dx^2} = \gamma^2 \underline{I}, \quad (7.6)$$

Бұл жерде $\gamma = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0}$ – электромагнит толқынының тарау коэффициенті.

$\gamma = \alpha + j\beta$; α – әлсіреу коэффициенті; β – фаза коэффициенті; $[\gamma] = [\alpha] = [\beta] = 1/m$. (7.5) теңдеудің шешім түрі

$$\underline{U} = \underline{A}_1 e^{-\gamma x} + \underline{A}_2 e^{\gamma x} \quad (7.7)$$

\underline{A}_1 мен \underline{A}_2 комплексті тұрақты интегралдауын бағыт басында кернеу мен ток арқылы немесе бағыт соңында кернеу мен ток арқылы анықтаймыз.

\underline{I} тоғын (7.6) теңдеуден (7.7) ескеріп табамыз

$$\underline{I} = -\frac{1}{\underline{Z}_0} \frac{d\underline{U}}{dx} = \frac{\gamma}{\underline{Z}_0} \left(\underline{A}_1 e^{-\gamma x} - \underline{A}_2 e^{\gamma x} \right)$$

$\gamma = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0}$ тең болғандықтан

$$\underline{I} = \frac{\underline{A}_1}{\underline{Z}_B} e^{-\gamma x} - \frac{\underline{A}_2}{\underline{Z}_B} e^{\gamma x}. \quad (7.8)$$

Кедергі – $\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}} = Z_B e^{j\varphi_B}$ толқынды

кедергі деп аталады,

\underline{Z}_B – модуль, ал φ_B – оның аргументі.

Толқынды кедергінің физикалық мағнасы, бағыттың кез келген нүктелерінде бірдей.

Бұл кезде кернеу мен ток бұрынғы мағыналарын сақтайды.

7.4. Гиперболикалық түріндегі біртекті желі теңдеулері

(7.7) мен (7.8) теңдеулерін $x=0$, кезінде, немесе бастапқы бағытқа жазамыз:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}_1 + \underline{A}_2, \quad \underline{I}_1 \underline{Z}_B = \underline{A}_1 - \underline{A}_2.$$

Бұл теңдеулердің біріккен есебінен табатынымыз:

$$\underline{A}_1 = \frac{1}{2}(\underline{U}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_B), \quad \underline{A}_2 = \frac{1}{2}(\underline{U}_1 - \underline{I}_1 \underline{Z}_B).$$

\underline{A}_1 мен \underline{A}_2 (7.7) мен (7.8) теңдеулерге қойып, желінің кез келген нүктесіндегі кернеу мен тоқты табамыз:

$$\underline{U} = \frac{1}{2}(\underline{U}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_B)e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}(\underline{U}_1 - \underline{I}_1 \underline{Z}_B)e^{\gamma x},$$

$$\underline{I} = \frac{1}{2}\left(\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_B} + \underline{I}_1\right)e^{-\gamma x} - \frac{1}{2}\left(\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_B} - \underline{I}_1\right)e^{\gamma x}.$$

$$sh \gamma x = \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \text{ гиперболикалық синус,}$$

$$\text{ал } ch \gamma x = \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \text{ гиперболикалық косинус болған-}$$

дықтан, желінің кез-келген нүктесіндегі тоқ пен кернеуді, бастапқы желі мағынасы түрінде жазуға болады:

$$\underline{U} = \underline{U}_1 ch \gamma x - \underline{I}_1 \underline{Z}_B sh \gamma x, \quad (7.9)$$

$$\underline{I} = -\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_B} sh \gamma x + \underline{I}_1 ch \gamma x. \quad (7.10)$$

Бағыттың аяғындағы кернеу мен тоқты анықтау үшін (7.7) мен (7.8) теңдеулерге координат $x = l - x'$ қоямыз, x' -желі аяғынан есептеледі:

$$\underline{U} = \underline{A}_1 e^{-\gamma l} e^{\gamma x'} + \underline{A}_2 e^{\gamma l} e^{-\gamma x'} = \underline{A}_3 e^{\gamma x'} + \underline{A}_4 e^{-\gamma x'};$$

$$\underline{I} \underline{Z}_B = \underline{A}_1 e^{-\gamma l} e^{\gamma x'} - \underline{A}_2 e^{\gamma l} e^{-\gamma x'} = \underline{A}_3 e^{\gamma x'} - \underline{A}_4 e^{-\gamma x'},$$

$$\text{Бұл жерде } \underline{A}_3 = \underline{A}_1 e^{-\gamma l}, \quad \underline{A}_4 = \underline{A}_2 e^{\gamma l}$$

$$x=0 \text{ тең болғанда, } \underline{U} = \underline{U}_2 \text{ және } \underline{I} = \underline{I}_2, \text{ онда } \underline{U}_2 = \underline{A}_3 + \underline{A}_4,$$

$$\underline{I}_2 \underline{Z}_B = \underline{A}_3 - \underline{A}_4.$$

$$\text{Бұдан } \underline{A}_3 = \frac{1}{2}(\underline{U}_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_B); \quad \underline{A}_4 = \frac{1}{2}(\underline{U}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_B).$$

Ең сонында:

$$\underline{U} = \underline{U}_2 ch \gamma x' + \underline{I}_2 \underline{Z}_B sh \gamma x'; \quad (7.11)$$

$$\underline{I} = \frac{U_2}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma x' + I_2 \operatorname{ch} \gamma x'. \quad (7.12)$$

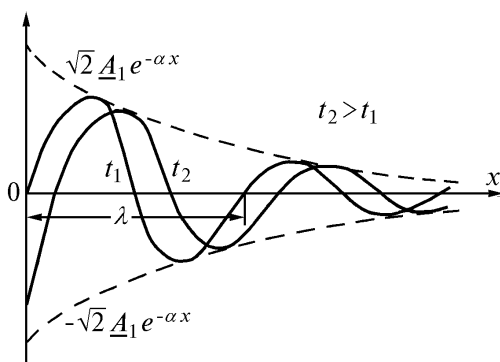
7.5. Желі кернеу мен тоқтың лездік мағынасындағы теңдеуі

(7.7) мен (7.8) теңдеулер арқылы кернеу мен тоқтың лездік мағынасын анықтауға болады:

$$u = \sqrt{2} A_1 e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x + \psi_1) + \sqrt{2} A_2 e^{\alpha x} \sin(\omega t + \beta x + \psi_2); \quad (7.13)$$

$$i = -\frac{\sqrt{2} A_1}{Z_B} \sqrt{2} A_1 e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x + \psi_1 - \varphi) - \frac{\sqrt{2} A_1}{Z_B} \sqrt{2} A_1 e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \beta x + \psi_1 - \varphi) \quad (7.14)$$

(7.13) пен (7.14) бірінші қосындыларынан көруге болады, координат уақытының өсуімен X өседі (7.13-сурет). Сондықтан, оны тікелей толқын дейді. Екінші қосындысын кері толқын дейді. Нақты электромагнит толқыны тікелей және кері толқындар қосындысы болады.



7.3-сурет

7.6. Біртекті желі параметрлері және олардың желі сипаттамасы мен қасиетіне әсер етуі

Бағыт параметрлерін R_0 , L_0 , g_0 , C_0 – алғашқы деп атайды, ал $\gamma = \alpha + j\beta$, \underline{Z}_B – туынды дейді. Осы параметрлер арқылы, электромагнитті толқынының таратылу фазалы жылдамдығын және толқын ұзындығын анықтаймыз.

Фазалы жылдамдықты табу үшін, кұлайтын толқын аргументін дифференциалдаймыз (7.13):

$$\frac{d}{dt}(\omega t - \beta x + \psi_1) = 0; \quad \omega - \beta \frac{dx}{dt} = 0.$$

Бұл жерде :

$$c = \frac{\omega}{\beta}. \quad (7.15)$$

Толқын ұзындығы – бағыттың толқын жылжуындағы екі нүкте арасындағы қашықтық, фазалы айырмашылығы 2π , яғни

$$\omega t - \beta(x + \lambda) + \psi_1 = \omega t - \beta x + \psi_1 - 2\pi; \quad \beta \lambda = 2\pi.$$

Бұл жерде:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta}. \quad (7.16)$$

Толқын жылдамдығы мен ұзындығы байланысты

$$c = \lambda f. \quad (7.17)$$

Сәйкес мысал келтірейік.

1-мысал. Өзгерісі жоқ желі.

Өзгерісі жоқ желіде барлық жиілік бірдей фазалы жылдамдық пен таралады және бірдей дәрежеде өшеді. Мұндай желіде әлсіреу коэффициенті α , фазалы жылдамдығы c және толқын кедергісі \underline{Z}_B жиілікке қатысты болмау керек. Бұл шарт теңдеумен дәлелденеді:

$$\frac{R_0}{L_0} = \frac{g_0}{C_0} \quad (7.18)$$

Басқа параметрлары мен мінездемелері тең:

$$\alpha = \sqrt{R_0 g_0}; \quad \beta = \omega \sqrt{L_0 C_0}; \quad Z_B = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (7.19)$$

$$c = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}};$$

2-мысал. Желіде жоғалу жоқ. Жоғалуы жоқ желі деп $R_0=0$, $g_0=0$; немесе $\omega L_0 \gg R_0$; $\omega C_0 \gg g_0$ болса айтады.

Бұндай желіге:

$$\alpha=0; \underline{\gamma} = j\beta; \beta = \omega\sqrt{L_0 C_0}; Z_B = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}};$$

$$\varphi_B = 0; c = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}; \lambda = \frac{2\pi}{\beta}. \quad (7.20)$$

(7.20) талдауынан көреміз, бағыттағы өшу нөлге тең, толқынды кедергісі активті және жиілікке бағышты емес. Фазалы жылдамдық пен толқын ұзындығы жоғалуы жоқ бағытта, жоғалуы бар өзгерісі жоқ бағытағыдай.

Кешенді аргументтер (7.9).....(7.12) гиперболикалық формадағы желі теңдеуі, жоғалуы жоқ желі, затты аргументі айналмалы функциясы бар теңдеуге айналады.

$$\underline{U} = \underline{U}_1 \cos \beta x - j \underline{I}_1 \underline{Z}_B \sin \beta x; \quad (7.21)$$

$$\underline{I} = -j \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_B} \sin \beta x + \underline{I}_1 \cos \beta x; \quad (7.22)$$

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \cos \beta x + j \underline{I}_2 \underline{Z}_B \sin \beta x; \quad (7.23)$$

$$\underline{I} = j \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_B} \sin \beta x + \underline{I}_2 \cos \beta x. \quad (7.24)$$

7.7. Төртұшты тәрізді біртекті желі

(7.11) мен (7.12) желі теңдеулерін салыстырамыз:

$$x' = l \quad \text{деп} \quad \text{алып.} \quad \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l + \underline{I}_2 \underline{Z}_B \operatorname{sh} \gamma l;$$

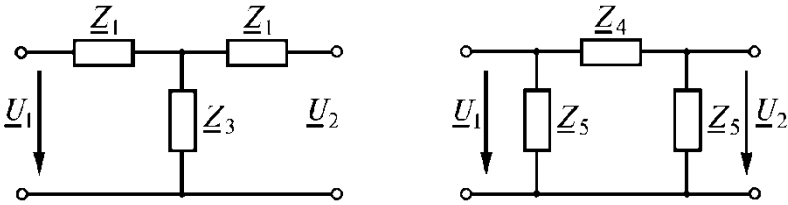
$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_B} \operatorname{sh} \gamma l + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l;$$

Төртұштының белгілі теңдеулерімен:

$$\underline{U}_1 = A \underline{U}_2 + B \underline{I}_2, \quad \underline{I}_1 = C \underline{U}_2 + D \underline{I}_2.$$

Бұл жерде, ұзын желі симметриялы төртұшты болады, коэффициенттері (7.4-суретте)

$$\underline{A} = ch\gamma l; \quad \underline{B} = \underline{Z}_B sh\gamma l; \quad \underline{C} = \frac{sh\gamma l}{\underline{Z}_B}; \quad \underline{D} = A = ch\gamma l. \quad (7.25)$$



7.4-сурет

$\underline{AD} - \underline{BC} = 1$ шарты орындалады, себебі $ch^2\gamma l - sh^2\gamma l = 1$
Төртұшты параметрлері тұрақты \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} мен анықталады

I тәрізді сұлбаға :

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{A}-1}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_3 = \frac{1}{\underline{C}}, \quad (7.26)$$

II тәрізді сұлбаға :

$$\underline{Z}_4 = \underline{B}; \quad \underline{Z}_5 = \frac{\underline{B}}{\underline{A}-1}. \quad (7.27)$$

7.8. Таратылған параметрлері бар тізбектің өтпелі процесі.

7.8.1 Біртекті желі дифференциалды теңдеуінің жалпы есептелуі

$R_0 = 0, \quad g_0 = 0$ деп (7.1) мен (7.2) есептейміз:
 $-\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t}$ Бірінші теңдеуді x -пен, екінші t
 мен дифференциалдаймыз:

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t}; \quad -\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} = C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}.$$

$L_0 C_0 = \frac{1}{c^2}$ есепке алсақ, біріктірген есебі кернеуді береді:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2}. \quad (7.28)$$

Егерде, осыған ұқсас бірінші теңдеуді t мен екіншісін $-x$ пен дифференциалдасақ, табамыз:

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (7.29)$$

(7.28) бен (7.29) теңдеулерін толқынды деп атайды. Бұл теңдеулердің жалпы есептелуі:

$$u = f_1\left(t - \frac{x}{c}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{c}\right) = u_{\Pi} + u_0; \quad (7.30)$$

$$i = \varphi_1\left(t - \frac{x}{c}\right) + \varphi_2\left(t + \frac{x}{c}\right) = i_{\Pi} + i_0. \quad (7.31)$$

Бұл жерде u_{Π}, u_0 және i_{Π}, i_0 – тікелей және кері толқындар. $c = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$ – толқынды жылдамдық санды түрінде фазалыға тең.

Кернеу мен тоқ толқындар арасында байланыс бар.

$$i_{\Pi} = \frac{u_{\Pi}}{Z_B}; \quad i_0 = -\frac{u_0}{Z_B} \quad (7.32)$$

Бұл жерде Z_B – толқын кедергісі.

(7.30) бен (7.31) функция аргументінен көруге болады, тікелей толқындар u_{Π}, i_{Π} бағыт басынан аяғына дейін уақыттың өсуімен жылжиды, ал кері толқындар u_0, i_0 бағыт аяғынан басына қарай жылжиды.

Бағыттағы кернеу мен тоқты, тікелей және кері толқындар жиыны деп қарастырсақ, тағы бір анықтама кіргіземіз – өтпелі немесе үзілген толқын.

Екі желі қосылған жерінде тікелей толқынның бір құрамасы сәулеленеді, басқа құрамасы екінші желіге өтеді.

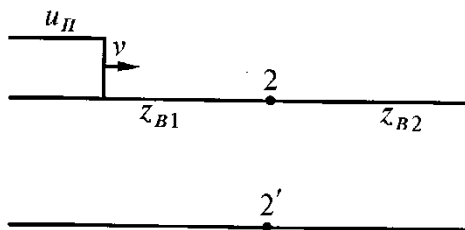
7.8.2 Параметрлері таратылған желідегі толқынды үдерісін зерттейтін алмастыру сұлбасы

Тік бұрышты толқынның біртекті желіден басқаға көшу үдерісін қарастырамыз 7.5-сурет. Екінші желі кернеуі мен тоққа теңдеу жазамыз

$$u_2 = u_n + u_0; i_2 = i_n - i_0 = \frac{u_n - u_0}{Z_{B1}}$$

Немесе

$$u_2 = u_n + u_0; i_2 Z_{B1} = u_n - u_0.$$



7.5-сурет

Екі теңдікті қосып, толқынның бейнеленген жеріндегі кернеу мен тоқты анықтау үшін, есепті теңдеу табамыз. (2 мен 2' нүктелер)

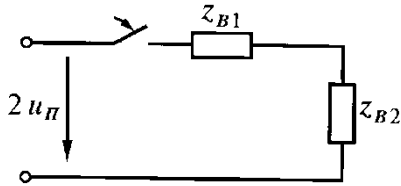
$$2u_n = u_2 + i_2 Z_{B1}$$

Бұл теңдеуге алмастыру сұлбасына сәйкес (7.6-сурет) кірмеде, екі еселенген кернеуі $2u_n$ бар, ішкі кедергісі Z_{B1} бар қорек көзі қосылған, екінші сызықта, шоғырланған Z_{B2} кедергі көрсетілген. Кернеу толқыны екінші сызықпен жүретін (сіндырылған) оның түрі:

$$u_2 = \frac{2u_n Z_{B2}}{Z_{B1} + Z_{B2}}$$

Бірінші сызықта, кернеу толқынының бейнесі тікелей толқынмен қосылады:

$$u_1 = u_n + u_0 = u_n - \frac{Z_{B1} - Z_{B2}}{Z_{B1} + Z_{B2}} u_n = u_n + \rho u_n = (1 + \rho) u_n,$$



7.6-сурет

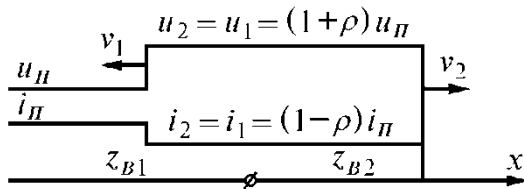
Екінші сызықтағы ток толқынын табамыз

$$i_2 = i_{\Pi} - i_0 = \frac{u_2}{Z_{B2}}$$

Бірінші сызықта

$$i_1 = i_{\Pi} - i_0 = (1 - \rho)i_{\Pi}$$

Егер де $Z_{B2} > Z_{B1}$ болса, толқын кабельді сызықтан әуе сызығына өтеді, бұл кезде кернеу u_2 мен u_1 өседі, ал токтар тікелей толқынмен салыстырғанда азаяды (7.7-сурет.) Сондықтан кабельді сызық пен қабылдағыш арасында әуе сызығын қоспайды.



7.7-сурет

Ескерту керек, сындырылған және кері толқын сызықтарда бірдей жылдамдықпен таратылмайды сызықтар параметріне бағышты.

Өтпелі процестердің жеке жағдайларын қарастырайық.

1-мысал. Резисторға тұйықталған, сызықтың аяғынан басталған тік бұрышты майданы бар толқын бейнесі. Сызықтың аяғына жеткенде электромагнитті толқын жартылай кері бағытта жылжиды. Сызықтың кері бағыттағы толқыны бар бөлігіндегі кернеу мен ток:

$$u_2 = \frac{2u_{\Pi} R_2}{Z_B + R_2}; \quad i_2 = \frac{2u_{\Pi}}{Z_B + R_2}. \quad (7.33)$$

Жекеше жағдайлар:

1) Сызық (бағыт) қосылмаған ($R_2 = \infty$) бейнелеу коэффициенті $\rho_2 = 1$, кері толқындар $u_0 = u_{\Pi}$; $i_0 = i_{\Pi}$, яғни, толқын толығымен бейнеленеді. Сызықтың аяғында кернеу мен толқын.

$$u_2 = (1 + \rho)u_{\Pi} = 2u_{\Pi}; \quad i_2 = (1 - \rho)i_{\Pi} = 0$$

Бұлар (7.8-суретте) көрсетілген.

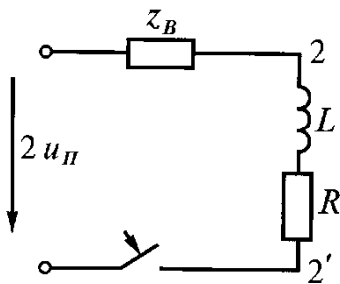
2) Сызық қысқа тұйықталған ($R_2 = 0$) бейнелеу коэффициенті $\rho_2 = -1$, кері толқындар $u_0 = -u_{\Pi}$; $i_0 = -i_{\Pi}$, яғни толқын белгілері ауысып толығымен бейнеленеді. Желі аяғындағы кернеу мен ток (7.8-сурет)

$$u_0 = -u_{\Pi}; \quad i_0 = -i_{\Pi}.$$

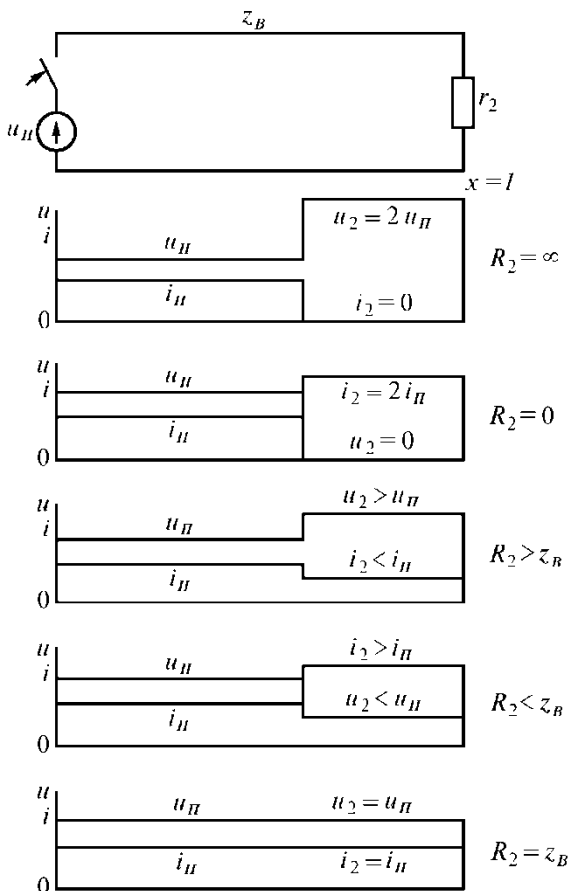
2-мысал. Желі резисторға тұйықталған- $R_2 \neq 0$ кедергімен.

(7.33) теңдеуге сәйкес $R_2 > Z_B$ болса, құлайтын толқын желі аяғында үлкен кедергіні қарсылайды. Сондықтан, желі аяғында кернеу өседі, ал ток азаяды (7.8-сурет). $R_2 < Z_B$ болса, керісінше $R_2 = Z_B$ $\rho = 0$, $u_0 = 0$, $i_0 = 0$, болғанда, тізбекте өзгермейтін ток болады. Құлайтын электромагнитті толқынның барлық энергиясын жүктеме жұтып алады.

3-мысал. Желі аяғынан басталған тік бұрышты майданы бар толқын бейнесі индуктивті катушкаға тұйықталған (7.9-сурет)



7.9-сурет.



7.8-сурет.

Коммутацияның бірінші заңы бойынша, ток индуктивті элементтен секіріп өзгермейді. Ол экспоненциалды заң бойынша уақытымен өзгереді

$$i_2 = \frac{2u_{\Pi}}{Z_{\text{B}} + R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (7.34)$$

$\tau = \frac{L}{Z_{\text{B}} + R}$ формула уақыт тұрақтылығы.

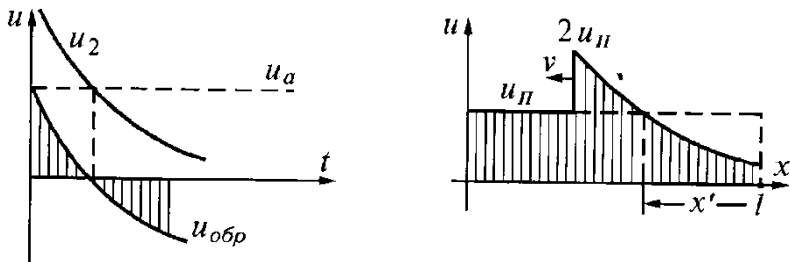
Жүктемедегі кернеу уақытымен, заңмен өзгереді:

$$u_2 = \frac{2u_{\Pi}}{Z_{\text{B}} + R} \left(R + Z_{\text{B}} e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (7.35)$$

Егер 7.34 пен 7.35 теңдеуге t уақыт орнына, $t - \frac{x'}{c}$ қойсақ, бейнелеуден кейінгі желі бойынша ток пен кернеудің таратылу заңын табамыз:

$$i = \frac{2u_{\Pi}}{Z_{\text{B}} + R} \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau} - \frac{x'}{c\tau} \right)} \right);$$

$$u = \frac{2u_{\Pi}}{Z_{\text{B}} + R} \left(R + Z_{\text{B}} e^{-\left(\frac{t}{\tau} - \frac{x'}{c\tau} \right)} \right) \quad (7.36)$$



7.10-сурет.

Уақыттағы кернеу u мен тоқ i желі бойындағы (7.10-сурет) кестеде көрсетілген.

Қорытынды:

1) Индуктивті элемент тікелей толқынның үзілуін көрсетеді, толқын үзілген желі белгімен бейнеленеді.

2) Толқын құлағанда, индуктивті элементтегі кернеу екі есе өседі, оқшаулыққа қауіпті.

3) Индуктивті элементтен тоқ өссе, кері толқын кернеуі мен тоғы азаяды, резистор R бейнеленген мағынаға жақындайды.

7.8.3 Тік бұрышты майданы бар толқынның активті элементпен көп бейнеленуі

Бұрынырақ, бір бейнелеу өтпелі үдерісін қарастырдық. Бұл кездегі уақыт интервалы.

$$\frac{l}{c} \leq t \leq \frac{2l}{c}$$

Жалпы жағдайда $l \gg \frac{2l}{c}$ болса, желі аяғы мен басынан көп бейнелеу пайда болады

$$p_2 = \frac{R_2 - z_B}{R_2 + z_B}; p_1 = \frac{R_1 - z_B}{R_1 + z_B}$$

Бірінші тікелей толқын U кернеу бар қорек көзінен

$$u_{п1} = \frac{U z_B}{z_B + R_1}$$

Бірінші кері толқын

$$u_{o1} = u_{п1} \cdot p_2$$

Бейнеленгеннен кейін толқын желі басынан қайтадан желі аяғына ауысады:

$$u_{o2} = u_{п1} \cdot p_1$$

ал аяғынан бейнеленгендегі кернеуі:

$$u_{o2} = u_{o1} \cdot p_1$$

Жалпы жағдайда k - толқынға

$$u_{ok} = (p_2 \cdot p_1)^{k-1} \cdot p_2 \cdot u_{п1}$$

ал $(k+1)$ толқынға

$$u_{п(k+1)} = (p_2 \cdot p_1)^k \cdot u_{п1}$$

Тікелей және кері толқындар теңесуі кез келген уақытта толқынды анықтауға мүмкіндік береді. Егер $R_2 > z_B$ болса,

жүктемедегі кернеу тұрақталған $u_2 = U$ жақындайды, жоғарғы және төмен мағынадан ауытқиды. Егер $p_2 < z_B$ болса, жүктемедегі кернеу сатылап қорек көзінің кернеуіне дейін өседі.

7.9 Электр сүзгіші.

7.9.1 Сүзгіш жіктелімі мен мағынасы

Жиілік электр сүзгіштің қоректену көзімен қабылдағыш арасына қосылған төртұшты мағынасы мынада: қабылдағышқа бір жиілікті тоқ өткізетін және басқа жиілікті тоқ жібермеу. Өткізу жолы (сүзгіштің мөлдір аймағы) – жиілік жолы, өшуі белгілі бір мағынадан төмен. Өшу жолы (өшу аймағы) – ол жиіліктің қалған аймағы, өшуі белгілі бір мағынадан жоғары.

Өткізу жолының жиілігіне қарай сүзгіштің түрлері болады: төменгі жиілікті, жолды, кедергілі. Сұлбасына қарай түрлері: Т-тәрізді, П-тәрізді, Г-тәрізді сүзгіштер. Т және П сұлба параметрлеріне қарай (7.4-сурет) сүзгіштерді К-сүзгіш және М-сүзгішке бөледі.

К-сүзгіштің мағынасы, ұзынынан тұрған кедергі элементтерін, көлденең көбейтсе тұрақты болып қала береді, олар жиілікке бағынышты емес:

$$z_1 z_3 = K = const, z_4 z_5 = K = const;$$

М-сүзгіштің мағынасы, параметрлер көбейтіндісі жиілікке бағынышты:

$$z_1 z_3 = M \neq const, z_4 z_5 = M \neq const,$$

Элементтер түріне қарай LC-сүзгіштер, RC-сүзгіштер, т.б. болады.

7.9.2 Сүзгіш теңдеулері. Сүзгіштік қасиетін бағалау

Электр сүзгіштер теориясы төртұштының жалпы теориясына негізделеді. Кернеу мен ток арасындағы байланыс сүзгіштің кірмесі мен шығысындағы теңдеумен анықталады:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}\underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 &= \underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2 \end{aligned} \quad (7.37)$$

Бұл теңдеулерді сүзгіштің параметрлері мен мағынасымен байланыстыру үшін, төртұшты эквиваленттігін және таратылған параметрлері бар сызықты пайдаланады.

Біртектес сызық теңдеуі гиперболикалық формада, мына түрінде беріледі:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l + \underline{I}_2 \underline{Z}_B \operatorname{sh} \gamma l; \underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_B} \operatorname{sh} \gamma l + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l \quad (7.38)$$

(7.38) теңдеуде, $\gamma l = \alpha l + j\beta l$ орнына, беретін коэффициентті қойсақ

$g = a + jb$, орнына \underline{Z}_B , орнына \underline{Z}_C мінезделген кедергі қойсақ, табамыз:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \operatorname{ch} g + \underline{I}_2 \underline{Z}_C \operatorname{sh} g; \underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \operatorname{sh} g + \underline{I}_2 \operatorname{ch} g \quad (7.39)$$

Келісімді жүктеме режимін $z_H = z_C$ қарастырып $\underline{U}_2 = \underline{I}_2 \underline{Z}_C$, және $\operatorname{ch} g + \operatorname{sh} g = e^g$ есепке алып, табамыз.

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 e^g; \underline{I}_1 = \underline{I}_2 e^g; \quad (7.40)$$

(7.40) теңдеуден:

$$\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = e^{-g} = e^{-a} \cdot e^{-jb}$$

e^{-a} - сүзгіштің шығысындағы кернеу мен ток кірмедегі кернеумен және токпен салыстырғанда модулінің өзгеруін мінездейді.

Сондықтан $a = \ln \frac{U_1}{U_2}$ көрсеткішін, өшу коэффициенті деп атайды. Оның өлшем бірлігі Нп (Непер) немесе Б(Бел), $1\text{Б} = 1.15\text{Нп}$ ($1\text{Нп} = 0,8686\text{Б}$).

e^{-jb} сүзгіштің шығысындағы сигнал фазасын қалуын мінездейді, кірме сигнал фазасымен салыстырғанда фаза коэффициенті - b -фаза коэффициенті. Келісімді жүктемеде фаза коэффициенті $b=0$, ал беру коэффициенті өшу коэффициентке тең: $g=0$. Сүзгіштік қасиеті теңдік негізінде бағаланады және \underline{A} коэффициенті арқылы, сүзгіштің параметрлері арқылы:

$$\underline{A} = \operatorname{ch} g = \operatorname{ch}(a + jb) \quad (7.41)$$

T-сұлбаға (7.4-сурет): $\underline{A} = 1 + \frac{Z_1}{Z_3}$;

П-сұлбаға формула: $\underline{A} = 1 + \frac{Z_4}{Z_5}$;

\underline{A} коэффициенті заттылы. Сондықтан(7.41) теңдеуде

$$\begin{aligned} \underline{A} &= \operatorname{ch}(a + jb) = \operatorname{cha} \cdot \operatorname{chjb} + \operatorname{sha} \cdot \operatorname{shjb} \\ &= \operatorname{cha} \cdot \cos b + \operatorname{jsha} \cdot \sin b \end{aligned}$$

Кілtime бөлігі нөлге тең.

Осыдан формула керек:

$$\underline{A} = cha \cdot \cos b; \quad (7.42)$$

$$sha \cdot \sin b = 0. \quad (7.43)$$

(7.42) және (7.43) теңдеулер, өшу коэффициенті $a(\omega)$ мен фаза коэффициентінің $b(\omega)$ бағышты екенін анықтау үшін қолданылады.

Бақылау сұрақтары

1. Таратылған параметрлері бар электр тізбегі дегеніміз не?
2. Таратылған параметрлері бар электр тізбегінің сұлбасын сызыңыз.
3. Біртекті екі сымды желінің теңдеулерін дәлелдеңіз.
4. Біртекті желідегі қалыптасқан ережелерді айтыңыз.
5. Толқынның фазалық жылдамдығы дегеніміз не?
6. Ұзындықтың бірлігіндегі кешендік кедергі және кешендік өткізгіштіктің формулаларын жазыңыз.
7. Толқын кедергі дегеніміз не, ол неден тұрады?
8. Толқынның ұзындығы жегеніміз не, ол нені көрсетеді?
9. Гиперболасы функциялардағы біртекті желінің теңдеулерін жазыңыз.
10. Біртекті желінің сипаттамаларын түсіндіріңіз.
11. Желінің кіріс кедергісі және толқынның шағалу коэффициенттері дегеніміз не?
12. Желінің келіскен жүктемесін түсіндіріңіз.
13. Бұрғылауы жоқ желін түсіндіріңіз.
14. Шығындары жоқ желі дегеніміз не?
15. Тұйық толқындар дегеніміз не?
16. Бағыт тоғы кернеу мен токтың лездік мағыналарының теңдеуін жазыңыз.
17. Параметрлері реттелген тізбектің өтпелі үдерісін түсіндіріңіз.
18. Сүзгіш жіктелімі.
19. Төменгі жиілікті сүзгілердің сұлбасын және оның физикасын түсіндіріңіз.
20. Өткізу және сөну алқаптары дегеніміз не?
21. К,М- түрлі сүзгіштері дегеніміз не, мысалдар келтіріңіз.
22. Жоғарғы жиіліктер сүзгілерін сызып, түсіндіріңіз.

23. Жолақ алқапты өткізгіш сүзгілері.
24. Бөгегіш сүзгілер.
25. Төменгі жиілікті, жоғарғы жиілікті, жолақты және бөгеуші сүзгілердің жолақ шекарасын қалай анықтайды?
26. Барлық бізге белгілі сүзгілер типтері үшін Z_C сипаттамалық кедергісінің a және b коэффициенттерінің ω жиіліктік функциясынан өзгертін кестені сызыңыз.
27. Өшу жолағында сүзгінің Z_C сипатын анықтау барысында не нәрсенің нәтижесіне сүйену керек?
28. k сүзгінің кемшіліктері қандай?
29. m сүзгінің жарты буыны k сүзгісімен қалай келістіріледі?
30. Кейбір жиіліктер кезінде m сүзгілерінде ненің есебінде шексіз үлкен өшу пайда болады?
31. K сүзгілерінің алдында m сүзгілерінің артықшылығы неде?
32. K және m сүзгісінен RC сүзгісінің маңызды айырмашылығы қандай?
33. Толқын ұзындығы және жылдамдығы, (формулалары).

VIII ТАРАУ

8 Электромагнитті өріс

8.1 Электромагнитті өрісті анықтау

Қазіргі кезде “Электромагнитті өріс” терминіне келесі анықтама береді. Векторлы шамаларымен анықталатын “электр өрісі” және “магнит өрісі” деп аталатын екі жағымен сипатталатын зарядталған бөлшектерге күшпен ықпал ететін заряд және олардың шамасымен жылдамдықтарына байланысты болатын материал түрі. Осы екі бөлімдерге бөлгеннің өзі салыстырмалы және олардың бақылау жағдайына байланысты. Мейлі зарядталған зат және екі бақылаушылары болып, олардың әрқайсысында магнитті мен байқайтын электр заряды бар дейік. Бір бақылаушы зарядталған затқа қатысты қозғалмайды, ал екіншісі жылжиды. Бірақ біріншісі тек электр өрісін байқайды, бірақ магнит өрісін көрмейді, ал екіншісі екеуінде байқайды.

Тұрақты магнит және екі бақылаушылар жоғардағы ұқсаған жағдайда қарайтын ұқсас. Қозғалмайтын магниттің магнит өрісінің барын бекітеді. Бөлудегі шарттына қарамай электромагнитті өрісін екі жағыннан әрқайсына белгілі жағдайларды жеке және орынды қарайды, одан кейін электромагнитті өрісті зерттейді.

8.2 Магнитті өріс және магнитті тізбек

8.2.1 Магнитті өрісін сипаттайтын негізгі шамалар

Бөлік заряды мен оның магнитті өрісі – электромагнитті өрістің екі жағының, біреуі бір беті, жылжыған зарядталған бөлікке жылдамдығына пропорционалды күшпен әсер ететінін сипаттама.

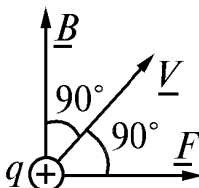
Магнитті өрісінің әр нүктесінде белгілі бағыт бар, ең өзара әсерететін күш үлкен мағынада болады. Бұл бағытта магнитті индукция векторын бейнелейді, ол магнит өрісінің қарқынын сипаттайды.

Математикалық жазба түріндегі жалпы жағдай:

$$\underline{F} = q [V, B]$$

Егер $\underline{V} \perp \underline{B}$ болса $F = qVB$, Н
 q - электр заряды, Кл;
 V - заряд жылжуының жылдамдығы, м/с;
 B – магнитті индукция, Тл.

Бұл шамалардың байланысы кесте түрінде 8.1-суретте көрсетілген.



8.1-сурет

F тармағының бағытын анықтау үшін, сол қол ережесін пайдаланамыз: қолды, магнитті индукция күш желі алақанға кіретіндей өтіп орнатамыз, саусақтар бағытын заряд жылжуына қаратып, ал үлкен саусақ бағыты күш бағытын көрсетеді.

Сонымен, магнитті индукция: $B = \frac{F}{qV}$;

Егер де, жылжыған заряд орнына, тоғы бар өткізгіш алсақ,
 $q = It$, $B = \frac{l}{t}$ екеннің есепке алып $F=Biil$ -ді табамыз.

Магнитті индукция мөлшері:

$$[B] = \left[\frac{F}{Il} \right] = \frac{H}{A \cdot m} = \frac{\frac{Дж}{c}}{\frac{Кл}{c} \cdot m} = \frac{B \cdot c}{m^2} = Тл \text{ (Тесла)}.$$

Магнитті қозғалтқыш күші:

Тоғы бар өткізгіш магнитті өрісін туғызады, күш желісі бағытын бұраманың оңға жүре айналатын ережесімен анықтайды: егер бұраманы тоқ бағытымен жылжытса, бұрама басының сәйкес айналуы күш желісінің бағытын көрсетеді. Сондықтан, өткізгіш осіндегі күш желілері шеңберде ортасында тұйықталады.

Тоғы бар катушка магнитті өріс туғызады, тұйықталған контур құрады күш желілері катушка ішімен де, сыртымен де

өтеді. Күш желілерінің бағытын оң жүрісті бұрама ережесімен немесе оң қол ережесімен анықтайды: егер де катушканың сыртынан саусақтармен тоқ бағытын сәйкес қылып ұстасақ, онда үлкен саусақ катушка ішіндегі күш желісінің бағытын көрсетеді.

Электр тоғының магнитті өрісті қоздыру қасиетін, магнит қозғалтқыш күші деп атайды (МҚК).

Тоғы бар өткізгішке

$$F = I$$

Тоғы бар катушкаға

$$F = I\omega$$

МҚК мөлшері токпен бірдей: (магнит қозғалтқыш күші)

$$[F] = A$$

Магнитті өріс кернеулігі. МҚК-ның күш желісінің бір ұзындығына қатысты мөлшерлі мағынасы, кернеулігі деп аталады:

$$H = \frac{F}{l}$$

Кернеулік өлшемі: $[H] = \left[\frac{F}{l} \right] = \frac{A}{m}$.

Магнитті кернеу. Магнитті өрісінің күш желісінің 1 бөлігіндегі магнитті кернеу:

$$U_M = Hl$$

Магнит өрісіндегі кез келген жолда:

$$U_{Mab} = \int_a^b H dl$$

Өлшемі:

$$[U_M] = [Hl] = \frac{A}{m} m = A$$

B мен H арасындағы өзара байланысы:

$$B = \mu_a H = \mu_0 \mu H, \quad (8.2)$$

Бұл жерде $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{M}$ - вакуумның абсолютті магнитті өтімділігі;

μ – ортаның салыстырмалы магнитті өтімділігі;

μ_0 – ортаның абсолютті магнитті өтімділігі.

Өлшемі:

$$[\mu_a] = \left[\frac{B}{H} \right] = \frac{\frac{T}{M}}{\frac{A}{M}} = \frac{B \cdot c}{A \cdot M} = \frac{Om \cdot c}{M} = \frac{\Gamma_H}{M}$$

Магнитті ағын.

Магнитті индукцияның ағын векторы:

$$\Phi = B_s \int \underline{B} \cdot \underline{S} \text{ жағдайында} \quad (8.3)$$

Магнитті ағын өлшемі:

$$[\Phi] = [B_s] = \frac{B \cdot C}{m^2} m^2 = B \cdot C = \text{Вб (вебер)}$$

8.2.2 Ферромагнитті материалдар және олардың магнитті қасиеттері

Үлкен мағыналы магнитті өтімділігі бар және сыртқы магнитті өріске бағынышты материалдарды ферромагнитті деп атайды. Ферромагнитті материалдар қасиеті оның кейбір кіші бөліктерінде тоқтарымен бар түсіндіріледі, себебі олар тоқтың ауданының көбейтіндісіне тең, олар қарапайым магнитті сәттерді құрады:

$$\underline{m} = is\text{-ға тең}$$

Кезең тармағы, бұраманың оң жүрісті ережесіне сәйкес контур жазықтығына тікелей бағытталған, ал оның моменттердің қосындысы қарапайым моменттердің геометриялық қосындысына тең:

$$\underline{M} = \sum \underline{m} .$$

Егер сыртқы магнитті өрісі жоқ болса, болса қарапайым сәттердің үлгіні жай жағдайларына қарасты, сәттердің қосындылары нөлге тең. Сыртқы магнитті өріс пайда болғанда, жай бөліктер кезеңімен өріс бағытына қарай бағытталады, кернеулігі көп болған сайын, бағытталуы көбейеді. Бұл оның магниттелгенін көрсетеді:

$$M = \frac{M}{V} ;$$

V – ферромагнитті материал көлемі.

Магниттелу өлшемі:

$$[M] = \left[\frac{M}{V} = \frac{A \cdot M^2}{M^3} = \frac{A}{M} \right]$$

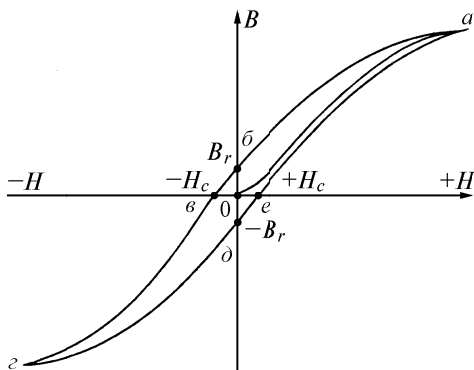
Яғни H кернеулігіндей.

Ферромагнитті ортада магнитті индукция :

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 H \left(1 + \frac{M}{H} \right) = \mu_0 \mu H ,$$

Бұл жерде $M = 1 + \frac{M}{H}$ – салыстырмалы магнитті өтімділік.

Сыртқы магнитті өріс кернеулігін көбейткенде, қарапайым магнитті моменттер толығымен соның бағытына бағытталады, магнит тойынуы пайда болады, магнитті индукция өсуі бәсеңдейді. Егер де үлгісіне параметр магнит өрісінде қайта магниттелсе, онда $B(H)$ қисығы ілмек түрінде болады, гистеризис ілмегі (петля гистеризиса) деп аталады. 8.2-суреттегі бөлігі магниттеу қисығы деп аталады, себебі өріс индукцияның нөлді шамасында пайда болады. Не b мен d нүктелері, қалдық индукцияға дәл келді, v мен e нүктелердегі кернеулікті бөгеуші немесе коэрцитивті H_c күші деп атайды.



8.2-сурет

Ферромагнитті материалдарды екі топқа бөлуге болады:

1) Магниті жұмсақ үлкен магнитті өтімділігі мен және аз коэрцитивті күшімен :

$$H_c < 400 \frac{A}{m}$$

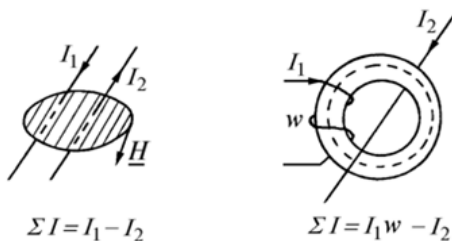
2) Магниті қатты азғантай магнитті өтімділігімен, үлкен коэрцитивті күшімен $H_c = 5000...8000 \frac{A}{M}$; және үлкен қалдық индукциясымен $B_r = 0.8 ... 1 Tл$.

8.2.3 Толық тоқ заңы және магнитті өрісін есептеуде оны қолдану

Толық тоқ заңының математикалық жазба түрі:

$$\underline{H} \underline{dl} = \sum I \quad (8.4)$$

Оның тұжырымы: тұйықталған контур интегралы, магнитті өріс кернеулігі тармағынан толық токқа тең, сол контурмен өрмектелген жазықтықтан өтетін. 8.3-суретте, толық тоқ заңының пайдалану екі жеке жағдайы көрсетілген.



8.3-сурет

Кернеулік пен токтың оң бағыттарын, бұраманың оң жүрісті ережесімен анықтайды.

1. Тоғы бар дөңгелек сымды магнитті өріс.

Ортасы сым өсіндегі шеңберлі түрдегі контурды қарастырайық. Егерде шеңбер радиусы, сым радиусынан аз болса, мынаған тең:

$$I' = \delta S' = \frac{I}{\pi r_1^2} \pi r^2 = I \frac{r^2}{r_1^2}.$$

Магнитті өріс кернеулігі, шеңбердің әр нүктесінде бірдей болғандықтан, толық тоқ заңын теңдік түрінде жазуға болады:

$$H 2\pi r = I' = I \frac{r^2}{r_1^2}.$$

Бұдан, сым ішіндегі магнитті өріс кернеулігі:

$$H = \frac{I r}{2\pi r_1^2}. \quad (8.5)$$

Өткізгіш осінде $r = 0$, $H = 0$. Өткізгіш сыртында $r = r_1$,

$$H = \frac{I}{2\pi r_1}.$$

Сым сыртындағы контурда ($r > r_1$) толық ток өзгермейді, өріс кернеулігі:

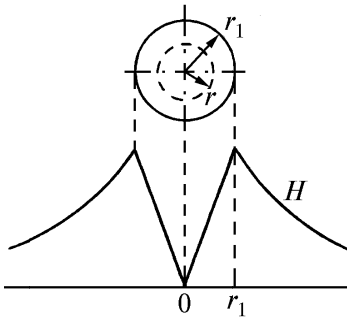
$$H = \frac{I}{2\pi r}. \quad (8.6)$$

Өткізгіш ішіндегі және сыртындағы өріс кернеулігінің өзгеруі 8.4 суретте көрсетілген.

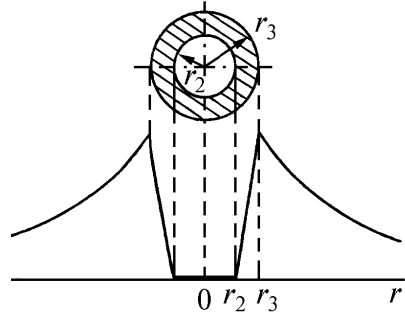
2. Жартылай дөңгелек өткізгіш магнитті өрісі.

Егер де өткізгіш r_2 , r_3 радиустарды бар (8.5-суретте) цилиндр түрінде болса, және контурдағы трубка ішінде $r < r_2$ болса, толық ток нөлге тең болады да, толық ток заңы мына түрде жазылады:

$$\underline{H} \, dl = 0$$



8.4-суре



8.5-сурет

Интеграл $\oint dl = 2\pi r$ болғандықтан, өріс кернеулігі H нөлге тең. Егер өткізгіш қабырғасында $r_2 \leq r \leq r_3$ болса, контурдан ток бөліктері өтеді:

$$I' = \delta S' = \frac{I}{S} S' = \frac{I\pi(r^2 - r_2^2)}{\pi(r_3^2 - r_2^2)} = \frac{I(r^2 - r_2^2)}{r_3^2 - r_2^2}.$$

Толық ток заңының түрі:

$$H \cdot 2\pi r = \frac{I(r^2 - r_2^2)}{r_3^2 - r_2^2}.$$

Бұдан өріс кернеулігі:

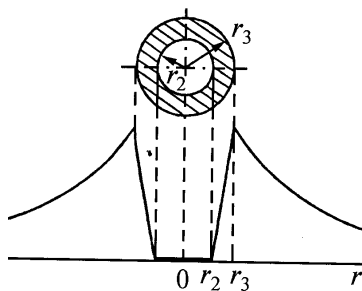
$$H = \frac{I(r^2 - r_2^2)}{2\pi r(r_3^2 - r_2^2)}. \quad (8.7)$$

Трубканың ішкі бетінде $r = r_2$ және $H = 0$, ал сыртқы бетінде $r = r_3$ болса және магнитті өріс кернеулігі: $H = \frac{I}{2\pi r}$;

Яғни, тоғы бар кез келген өткізгіштегідей.

3. Коаксиалды кабельдің магнитті өрісі

Коаксиалды кабель дегеніміз- өсімен біріккен екі цилиндр (8.6-сурет). Біреу (ішкі) – дөңгелек кесікті өткізгіш, екіншісі(сыртқы) – цилиндр. Олардан бір тоқ өтеді, тек қарама-қарсы бағытта. Бірінші өткізгіш ішінде $r \leq r_2$ өріс кернеулігі (8.5) тендеумен анықталады. $r_1 \leq r \leq r_3$ кесігінде өріс кернеулігі (8.6) сәйкес, ал сыртқы трубка тәрізді өткізгіш қабырғасында $r_2 \leq r \leq r_3$ болса, магнитті өріс ішкі өткізгіш тоғымен пайда болады және сыртқы трубка тәрізді өткізгіш тоқ бөлігімен, тек кері бөлігімен, яғни $H = H' - H''$.



8.6-сурет

Бірінші құрама (8.6) сәйкес, екіншісі (8.7) сәйкес. Сыртқы өткізгіш қабырғасындағы қорытындылау кернеулігі:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \left(1 - \frac{r^2 - r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \right). \quad (8.8)$$

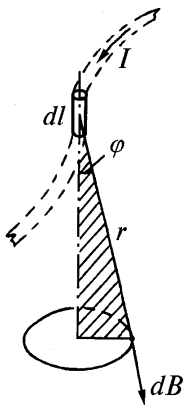
(8.8)-ден көруге болады, кабельдің сыртқы бетінде өріс кернеулігі нөлге тең, яғни кабельдің коаксиалды өрісінің сыртында магнитті өріс жоқ. 8.6-суретте көрсетілген.

8.2.4 Био-Савар заңы және оны пайдалану мысалдары

Био-Савар заңының түрі :

$$dB = \frac{\mu_a I dl \sin \varphi}{2\pi r^2}. \quad (8.9)$$

Индукция токқа, өткізгіш ұзындығына, абсолютті магнитті өтімділікке және тоқ пен тармақ радиусы бағыт арасындағы синус бұрышына пропорционалды элементін өріс нүктесімен қосатын өткізгіш және тармақ радиусы ұзындығының квадратына кері пропорционалды (8.7-сурет)



8.7-сурет

Индукция тармағы жазықтықта тікелей бағытта, dl элемент ұзындығы мен тармақ радиусынан өтеді. Барлық өткізгіштегі тоқтан пайда болған магнитті индукция.

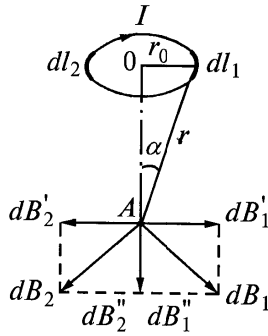
$$\underline{B} = \int \underline{dB}.$$

Заңның нақты мысалдарда қолдануын қарастырайық.

1. Тоғы бар шығыршық өткізгіш осінің магнитті өрісі.

8.8-суретке сәйкес $\varphi = 90^\circ$ болса, (8.9) формула түрі мынадай болады:

$$dB = \frac{\mu_0 I dl}{2\pi r^2}.$$



8.8-сурет

Элемент ұзындығы dl_1 , индукцияны dB_1 , туғызады, ал dl_2 элемент $dl_2 - dB_2$ олардың көлбеу құрамасы dB_1 мен dB_2 өтемделеді. Сондықтан олардың қосындысы нөлге тең.

Сондықтан А нүктесіндегі қорытындылау индукциясы:

$$B = \int dB'' = \int \frac{\mu_a I dl}{4\pi r^2} \sin \alpha = \frac{\mu_a I \sin \alpha}{4\pi r^2} \int dl.$$

$$\int dl = 2\pi r_0, \text{ бұнда } r_0 = r \sin \alpha,$$

$$B = \frac{\mu_a I \sin^3 \alpha}{2r_0}. \quad (8.10)$$

Шығыршық ортасында $\sin \alpha = 1.0$ және индукция

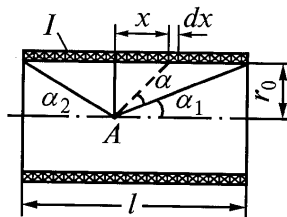
$$B = \frac{\mu_0 L}{2r_0} = \frac{\mu_0 I}{D_0};$$

2. Цилиндрлі түрдегі катушканың магнитті өрісі.

Цилиндрлі түрдегі катушка ұзынды L және радиусы r_0 осіндегі магнитті өріс кернеулігін анықтаймыз. (8.9-сурет)

Қалыңдығы dx жай шығыршық тоғы

$$i = \frac{lw}{e} dx$$



8.9-сурет

Шығыршықты тоқ өріс кернеулігі (8.10) бойынша

$$dH = \frac{i}{2r_0} \sin^3 \alpha = \frac{Iw}{l} dx \frac{\sin^3 \alpha}{2r_0}.$$

$x = r_0 \operatorname{ctg} \alpha$ болғандықтан

$$dx = d(r_0 \operatorname{ctg} \alpha) = -\frac{r_0}{\sin^2 \alpha} d\alpha; \quad dH = -\frac{Iw}{2l} \sin \alpha \, d\alpha.$$

$\alpha = \pi - \alpha_2 - \alpha_1$ дейін интегралдап, табамыз:

$$H = \frac{Iw}{2l} \int_{\pi - \alpha_2}^{\alpha_1} -\sin \alpha \, d\alpha = \frac{Iw}{2l} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2);$$

$$H = \frac{Iw}{2l} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2). \quad (8.11)$$

Егерде $l \gg r_0$ болса, катушканың орта бөлігінде $\cos \alpha_1 \approx \cos \alpha_2 \approx 1,0$. Сондықтан

$$H \approx \frac{Iw}{l}. \quad (8.12)$$

Катушканың шетінде бұрыштың біреуі α_1 немесе α_2 90° тең. Сондықтан, катушка шетіндегі ось өрісіндегі кернеулігі:

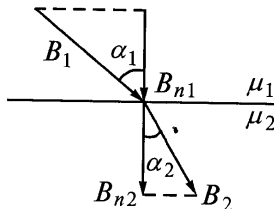
$$H = \frac{Iw}{2l}. \quad (8.13)$$

8.2.5. Екі орта шекарасындағы магнитті өріс

Магнитті ағын бір ортадан екінші ортаға өткенде өзгермейді. Бұл қасиетін теңдік түрінде көрсетеміз (8.10-сурет.)

$$\underline{B}_S = B_n s; \quad B_1 \cos \alpha_1 = B_2 \cos \alpha_2;$$

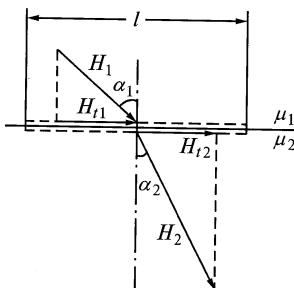
$$\mu_1 H_1 \cos \alpha_1 = \mu_2 H_2 \cos \alpha_2. \quad (8.14)$$



8.10-сурет

Екі орта бөлігінің жазықтығында тігінен бағытталған магнитті индукция тармақтарының құрамасы тең. 8.11-суретте магнитті өріс кернеулігінің тармақтары көрсетілген. Егерде, екі орта шекарасындағы контурды зерттесек, токтың толық заңы бойынша табамыз:

$$\sum I = 0; H_1 \sin \alpha_1 = H_2 \sin \alpha_2; H_{t1} = H_{t2}. \quad (8.15)$$



8.11-сурет

Екі орта бөлігінің жазықтығында, магнитті өріс кернеулігінің тармақтар құрамалары тең. Сондықтан (8.15)-ті (8.14) бөліп, бір ортадан екінші ортаға өткендегі, магнитті күш желінің сындырылуын табамыз:

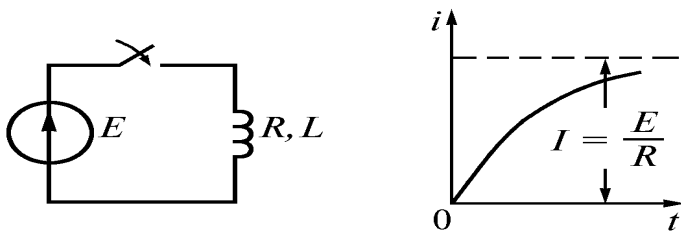
$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}. \quad (8.16)$$

Тангенс бұрыштар қатынасы, екі ортадағы магнитті индукция тармақтары мен пайда болған және олардың бөлігінің жазықтығына тігінен бағытталған, сол ортаның магнитті өтімділік қатынасына тең.

8.2.6. Магнитті өріс энергиясы

Магнитті өріс, жылжыған зарядқа немесе тоғы бар өткізгішке күшімен әсер етеді. Олардың жылжуынан жұмыс пайда болады.

Демек, магнитті өрісте энергия бар. Тұрақты ток қорек көзіне, индуктивті катушка қосу процесін қарастырамыз (8.12-сурет). Кирхгофтың екінші заңы бойынша: $E + e_L = iR$,



8.12-сурет

Бұнда $e_L = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$.

Теңдіктің екі жағын idt -ға көбейтіп табамыз:

$$Eidt = i^2 Rdt + id\psi,$$

Екінші қосындысы, dt уақытындағы катушканың тапқан энергиясы:

$$dt: dW_M = id\psi.$$

Катушканың толық энергия қоры:

$$W_M = \int_0^\psi id\psi = L \int_0^I idi = \frac{LI^2}{2} = \frac{\psi I}{2}. \quad (8.17)$$

Энергия өлшемі $[W_M] = [\psi I] = B \cdot c \cdot A = Bm$.

Егерде, біртекті магнитті өткізгіші бар шығыршықты катушканы қарастырсақ, теңдікті есепке алып, табамыз:

$$W_M = \frac{BH}{2} v; \quad W_M = \frac{\mu_a H^2}{2} v; \quad W_M = \frac{B^2}{2\mu_a} v. \quad (8.18)$$

(8.18) теңдеулерді көлемге бөліп, магнитті өріс энергиясының тығыздығын табамыз:

$$w_M = \frac{BH}{2}; \quad w_M = \frac{\mu_a H^2}{2}; \quad w_M = \frac{B^2}{2\mu_a}. \quad (8.19)$$

Энергия тоғыздығының мөлшері $[w_M] = \frac{Дж}{м^3}$.

8.2.7 Магнитті өрістегі механикалық күш

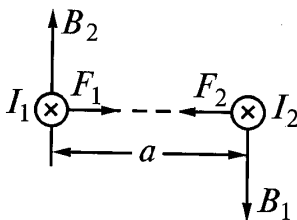
1. Магнитті өріс пен тоғы бар өткізгіштің өзара әрекет күші. Магнитті өрістегі тоғы бар өткізгішке күш әсер етеді:

$$F = BIl \sin \alpha .$$

Егер де тоқ бағыты мен магнитті күш желі арасындағы бұрыш 90° болса, күштің ең көп мағынасы болады:

$$F = BI l , H.$$

2. Екі жапсарлас тоғы бар өткізгіштердің өзара әрекеті. Бір бағыттағы тоғы бар екі өткізгішті қарастырамыз (8.13-сурет).



8.13-сурет

Бірінші өткізгіш I_1 тоғымен, екінші өткізгіш аймағында магнитті индукцияны туғызады $B_1 = \mu_a \frac{I_1}{2\pi a}$.

Екінші өткізгішке әсер ететін күш:

$$F_2 = B_1 I_2 l = \frac{\mu_a I_1 I_2 l}{2\pi a}$$

Осыған ұқсас, екінші өткізгіш I_2 тоғымен бірінші өткізгіш аймағында магнитті индукцияны туғызады $B_2 = \mu_a \frac{I_2}{2\pi a}$.

Бірінші өткізгішке әсер ететін күш:

$$F_1 = \frac{\mu_a I_1 I_2 l}{2\pi a}.$$

Өзара әрекет күші:

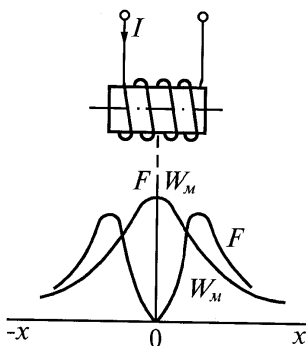
$$F_1 = F_2 = \frac{\mu_a I_1 I_2 l}{2\pi a}. \quad (8.20)$$

Қорытынды:

- тоғы бар екі жапсарлас өткізгіштер өзара әрекет күшімен тоқтың көбейтіндісіне тікелей пропорционалды және олардың ара қашықтығына керісінше пропорционалды.
- бір бағыттағы тоғы бар өткізгіштер жақындай түседі, кері бағыттағы тоғы барлар бір бірінен қашықтайды.

3. Механикалық күшті, координата магнитті өріс энергия туындысы түрінде көрсету.

Тоғы бар катушка мен ферромагнитті магнитөткізгіштің өзара әрекетін қарастырамыз (8.14-сурет). Егер олар өсімен бірігіп орыналасса, жүйенің магнитті өріс энергиясы үлкен мағынада болады, ал өзара әрекет күші нөлге тең. Магнитөткізгіш қалай орналассада күш пайда болады, оны катушкаға тартатын, ол координат бойынша магнитті өріс энергия туындысына пропорционалды.



8.14-сурет

Санды бағалау үшін, тоғы бар k - контурлы жүйені қарастырамыз. Бір контурды, басқа контурлар күштері әсерінен, dx қашықтыққа жылжыды дейміз. Қорытындысында жүйенің магнитті энергиясы dW_M -ге өзгереді.

Кирхгофтың екінші заңы бойынша k - контурда:

$$e_k = i_k R_k + \frac{d\psi_k}{dt}.$$

Тендеудің екі жағын $i_k dt$ -ға көбейтеміз және контурларға қосамыз:

$$\sum_{k=1}^n e_k i_k dt = \sum_{k=1}^n i_k^2 R_k dt + \sum_{k=1}^n i_k d\psi_k.$$

Оң жақтағы екінші қосындысы механикалық жұмыс сомасын көрсетеді, контурдың Fdx жылжыған және магнитті өріс энергия өсімін dW_M , яғни:

$$\sum_{k=1}^n i_k d\psi_k = Fdx + dW_M.$$

Бұдан механикалық күш

$$F = \frac{\sum_{k=1}^n i_k d\psi_k - dW_M}{dx}. \quad (8.21)$$

Екі жекеше жағдайды қарастырамыз.

1. Контурлар ағын тіркесіуі өзгермейді, яғни $d\psi_k = 0$.

(8.21) табамыз:

$$F = -\frac{dW_M}{dx}. \quad (8.22)$$

2. контурдағы токтар өзгермейді, яғни $i_k = const$.

$$W_M = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n i_k \psi_k \text{ болғандықтан, } dW_M = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n i_k d\psi_k.$$

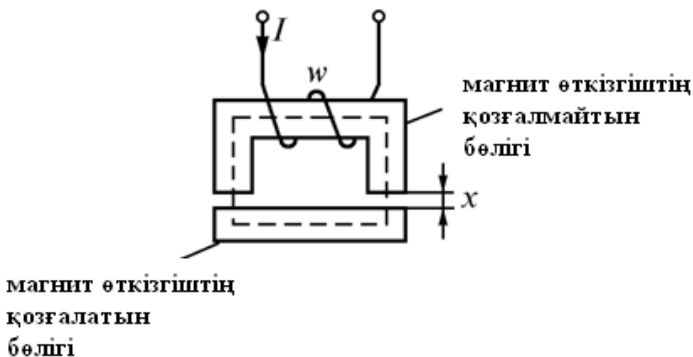
$$F = \frac{\sum_{k=1}^n i_k d\psi_k - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n i_k d\psi_k}{dx} = \frac{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n i_k d\psi_k}{dx} = \frac{dW_M}{dx}. \quad (8.23)$$

(8.22) мен (8.23) формулалар айырмашылығы таңбасында. Таңбаның физикалық мәні, күштің координат x -ке әсері, оны көбейтеді немесе азайтады.

Мысал. Жазық электромагнит күшін анықтау. Жазық электромагнит (8.15-сурет) магнитталған орамасы бар магнит өткізгіші- тұрақты бөліктен және қозғалғыш бөлігі – зәкірден

тұрады. Магнитті өткізгіш мөлшері мен катушка иірім санын белгілі деп электромагнит тарту күшін анықтау керек. Жүйенің магнитті өріс энергиясы:

$$W_M = W_{MC} + W_{MO} = \frac{B \cdot H_C}{2} v_C + \frac{B \cdot H_0}{2} v_0$$



8.15-сурет

Магнитті өткізгіштегі өріс кернеулігі ауалы бөліктегіден аз болғандықтан, бірінші қосындыны есепке алмай, энергияның бәрі ауалы бөлікте дейміз:

$$W_M \approx W_{MO} = \frac{BH_0}{2} sx,$$

s - екі бөлік ауданының қосындысы

x - ауалы бөлік

(8.23) ескеріп, электромагнит тарту күшін теңдеу түрінде жазамыз:

$$A = \frac{BH_0}{2} s = \frac{B^2}{2\mu_0} s = \frac{\mu_0 H_0^2}{2} s \quad (8.24)$$

Егер барлық МҚК магнит ағынының ауалы бөліктен өтуіне кетеді десек, яғни $Iw \approx H_0 2x$, келесі формула табамыз:

$$F = \frac{\mu_0 (Iw)^2}{8x^2} s \quad (8.25)$$

8.2.8 Магнитті тізбектер. Негізгі заңдар және есептеу әдістері

Магнитті тізбек дегеніміз – электромагнитті үдерістер, магнитті қозғалтқыш күштер, магнитті ағын мен магнитті әлеуеттер алымы түсініктерімен жазылған ферромагнитті заттары бар құрылғылардың бірігуі. Магнитті тізбектер біртекті және біртекті емеске, тармақталған және тармақталмаған, симметриялы тармақталған және симметриялы емес тармақталған түрлеріне бөлінеді.

Магнитті тізбектер негізгі заңдары.

Тармақталмаған магнитті тізбектің бір бөлігін қарастырамыз. Магнитті кернеулігі $U_M = Hl$. Белгілі қатынастарды есепке алып $B = \mu_a H$, $\Phi = BS$ магнитті тізбектің бөлігіне Ом заңын табамыз:

$$U_M = \Phi \cdot R_M, \quad (8.26)$$

бұнда $R_M = \frac{l}{\mu_a S}$, l - бөліктің магнитті кедергісі.

Магнитті кедергі сызықты емес болғандықтан, Ом заңының ферромагнитті бөлігіне пайдалануға болмайды. Оның ауалы бөлікте қолдануға болады.

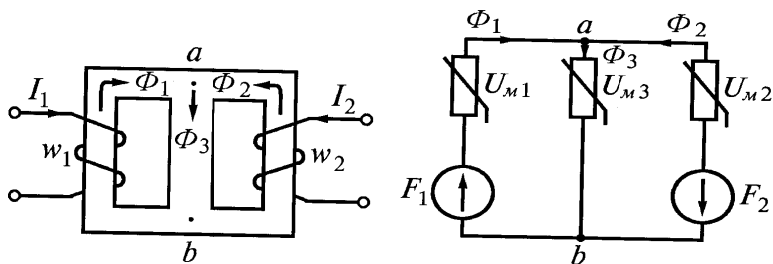
Тармақталған симметриялы емес магнитті тізбегін 8.16-суретте қарастырамыз. Тармақтар магнитті ағынының бағыттарын (жәй алып) Кирхгофтың бірінші заңын жазамыз:

$$\sum \Phi = 0 \text{ немесе } \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0, \quad (8.27)$$

Яғни түйіндегі магнитті ағынның алгебралық қосындысы нөлге тең.

Контурды аралап шығу бағытын сағат тіліне сәйкес алып Кирхгофтың екінші заңын жазамыз. Бірінші контурға: $F_1 = \sum U_M = U_{M1} + U_{M3}$ немесе $I_1 w_1 = H_1 l_1 + H_3 l_3$.

Магнитті тізбек Тәріздес-электросұлба



8.16-сурет

Екінші контурға $F_2 = \sum U_M = -U_{M2} - U_{M3}$ немесе

$$I_2 w_2 = -H_2 l_2 - H_3 l_3$$

Кирхгофтың екінші заңы жалпы түрде:

$$\sum F = \sum U_M \text{ или } \sum(Iw) = \sum(Hl). \quad (8.28)$$

Тұйықталған контурда МҚК алгебралық жиыны сол контур бөлігіндегі, магнитті кернеулер құлауының алгебралық жиынына тең. Кирхгоф заңы мен толық ток заңы магнитті тізбектерді есептеуде қолданылады. Тармақталмаған магнитті тізбектерді есептеу.

Бірінші нұсқа. Берілген магнитті ағын арқылы МҚК анықтау. Берілгені: тізбектің геометриялық өлшемі, магнитталу қисығы, магнитті ағын. Есептеу тәртібі:

1. Магнитті тізбекте өлшемдері $s_1, s_2, \dots, s_k, \dots; l_1, l_2, \dots, l_k \dots$ бөлшектерді бөліп шығарамыз

2. Берілген магнитті ағын мен бөліктер кесігінен магнитті индукция анықтаймыз: $B_1, B_2, \dots, B_k, \dots$

3. $B(H)$ магниттелу қисығы мен кернеулікті анықтаймыз: $H_1, H_2, \dots, H_k, \dots$

Ауалы(ферромагнитті емес) бөлікте өріс кернеулігі

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 0,8 \cdot 10^6 B_0, \frac{A}{i}$$

4. Кирхговың екінші заңымен контур бөліктерінде магнитті кернеулер құлауының жиынын есептейміз:

$$\sum_{k=1}^n (H_k l_k) = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_k l_k + \dots;$$

Катушкаға керек МҚК-сы осы

$$Iw = \sum_{k=1}^n (H_k l_k).$$

Екінші нұсқа: магнитті ағынды берілген МҚК-анықтау. Берілгені: тізбектің геометриялық өлшемі, магниттелу қисығы, МҚК.

Есептеу тәртібі:

1. Магнитті тізбекті, көлденең кесікті сәйкес аудандарын $s_1, s_2, \dots, s_k, \dots$; және ұзындықтарын $l_1, l_2, \dots, l_k, \dots$ бөліктер бірлігі деп қараймыз.

2. Бір бөліктің магнитті индукциясын жәй алып, басқа бөліктердегі магнитті индукцияны анықтаймыз. Ол үшін мына байланыстылықты қолданамыз:

$$B_1 s_1 = B_2 s_2 = B_3 s_3 = \dots = \Phi.$$

3. Магниттелу қисығы мен тізбектің барлық бөлігіндегі магнитті өріс кернеулігін анықтаймыз.

4. Тізбек бөлігінде магнитті кернеулер құлауын анықтаймыз $H_1 l_1, H_2 l_2, \dots, H_k l_k, \dots$

5. Магнитті кернеулерді қосып кесте тұрғызамыз:

$$\Phi = f\left(\sum_{k=1}^n (H_k l_k)\right).$$

6. Берілген МҚК-бар, тізбек бөлігіндегі магнитті ағынды Φ және магнитті B индукцияны анықтау керек.

Екі МҚК-бар, тармақталған симметриялы емес магнитті тізбекті есептеу

Берілгені: магнитті тізбек геометриялық өлшемін магниттелу қисығын, катушкалар МҚК $F_1 = I_1 w_1$ және $F_2 = I_2 w_2$ (8.16-сурет). Φ_1, Φ_2, Φ_3 магнитті ағындарды анықтау керек.

Есептеу тәртібі:

1. Магнитөткізгіш бөліктеріндегі магнитті ағын бағытын жәй алып, тәріздес электр сұлбасын құрамыз.

2. a мен b түйін арасындағы магнитті кернеуге Кирхгофтың екінші заңымен теңдеу жазамыз:

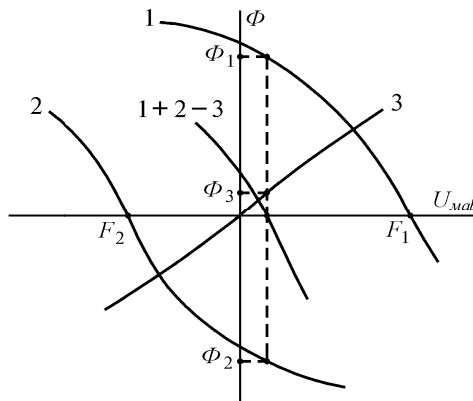
$$\text{сол жақтағы тармаққа } U'_{Mab} = F_1 - U_{M1} = I_1 w_1 - H_1 l_1, \quad (8.29)$$

$$\text{оң жақтағы тармаққа } U''_{Mab} = -F_2 - U_{M2} = -I_2 w_2 - H_2 l_2, \quad (8.30)$$

$$\text{ортадағы тармаққа } U'''_{Mab} = U_{M3} = H_3 l_3. \quad (8.31)$$

3. Магниттелу қисығы шамасындағы магнитті индукция мағынасын жәй алып, оларға тармақтағы магнитті ағындарды анықтау керек, (8.29) ... (8.31) теңдеулер арқылы бір координата графикалық байланыстарды $\Phi_1 = f_1(U_{Mab})$, $\Phi_2 = f_2(U_{Mab})$, $\Phi_3 = f_3(U_{Mab})$ саламыз.

4. Кирхгофтың бірінші заңы бойынша графикалық байланыстарды саламыз $\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = f(U_{Mab})$ және бұл қисықтың абсцисс осімен қиылысқан жеріне тік сызық (перпендикуляр) түсіреміз. Оның ағынның қисығымен қиылысқаны магнитті ағын $\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3$ тудырады. Егер магнитті ағын теріс болса, оның бағыты, алынған бағытқа қарама-қарсы болады. Графикалық шешімі 8.17-суретте.



8.17-сурет

Есептелуін, салып көрсетуге болады $\Phi_1 + \Phi_2 = f(U_{Mab})$ қысық $\Phi_3 = f(U_{Mab})$ пен қыйлысқынша осы нүкте Φ_3 - ағын мағынасы, ал осы нүктеден өтетін тікелей сызықтар басқа қысықтар мен қыйылысқанда Φ_1 және Φ_2 ағындарды береді.

8.3 Электр өрісі және электростатикалық тізбек

8.3.1. Электр өрісін сипаттайтын негізгі шамалар

Электр өрісі электромагнитті өрістің екі жағының біреуінің, электр зарядталған бөлшекке әсер ететін күшін сипаттайды, бөлшек зарядына пропорционалды және оның жылдамдығына бағынышты емес. Қозғалмайтын зарядталған заттар электр өрісі, оларда электр тоғы жоқ болса, электростатикалық өрісі деп аталады. Электростатикалық өріс теориясында Кулон заңы қолданылады: вакуумдегі екі нүктелі заряд бір біріне күшпен әсер етеді, зарядтар көбейтіндісіне тікелей пропорционалды және олардың арақашықтық квадратына кері пропорционалды (аттас зарядтар бір бірінен қашықтайды, ал түрлі аттылар жақындайды):

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \varepsilon_0 R^2}, \quad (8.32)$$

q_1, q_2 – зарядтар, Кл; R – арақашықтығы, м;

$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \approx 8,85 \cdot 10^{-12}, \frac{\Phi}{м}$ – электр тұрақтылық; F – күш, Н.

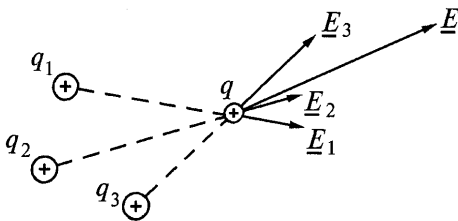
Егерде, зарядтар басқа ортада болса, ортаның абсолютті диэлектрикалық өтімділігін қолданады: $\varepsilon_a = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon$; ε – ортаның қатысты диэлектрикалық өтімділігі.

Электр өрісін кернеулікпен сипаттайды, күштің, бір зарядқа әсер ететін қатынасына тең:

$$E = \frac{F}{q}, \frac{B}{m}. \quad (8.33)$$

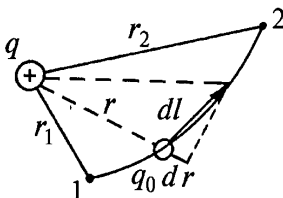
Кулон заңын пайдаланып, нүктелі заряд өрісінің кернеулігін формуламен анықтаймыз: $E = \frac{q}{4\pi \varepsilon_0 R^2}$. (8.34)

Егерде, электр өрісі бір-неше зарядтар мен пайда болса, қорытындылау кернеулігі бөлек құрамалардың векторлар қосындысымен анықталады (8.18-сурет): $\underline{E} = \underline{E}_1 + \underline{E}_2 + \underline{E}_3$.



8.18-сурет

Электр өрісінің бір параметрі, әлеуеті болады, бір зарядтың берілген нүктеден өріс шетіне жылжитын, жұмыс қатынасына тең. Вакуумдағы q_0 зарядтың 1 нүктеден 2 нүктеге жылжуын қарастырамыз (8.19-сурет).



8.19-сурет

dl кесікте жұмыс жасалды

$$dA = \underline{F} d\underline{l} = F \cos \alpha dl = F dR.$$

(8.33) пен (8.34) есепке алып, табамыз:

$$dA = \frac{q}{4\pi \varepsilon_0 r^2} q_0 dR.$$

Онда жұмыс

$$A_{12} = \frac{qq_0}{4\pi \varepsilon_0} \int_1^2 \frac{dr}{r^2} = \frac{q}{4\pi \varepsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Теңдеудің екі жағын q_0 зарядқа бөліп, әлеует алымын табамыз:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi \varepsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (8.35)$$

Ек қашықтағы нүктеге: $r_2 = \infty$; $E_2 = 0$; $\varphi_2 = 0$,
ал зарядтан R қашықтықтағы нүкте әлеуеті

$$\varphi = \frac{q}{4\pi \varepsilon_0 r}. \quad (8.36)$$

Әлеуетті өріс кернеулігі арқылы анықтауға болады:

$$dA = \underline{F} dl = q_0 \underline{E} dl; \quad A_{12} = \int_1^2 \underline{F} dl = q_0 \int_1^2 \underline{E} dl$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q_0} = \int_1^2 \underline{E} dl. \quad (8.37)$$

Тұйықталған контурда заряд жылжығанда электр өрісінде

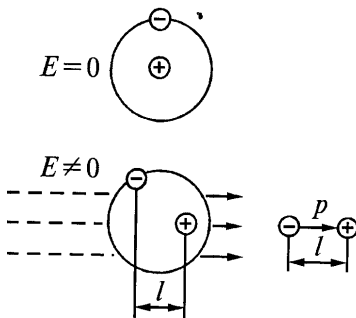
$$\varphi_1 - \varphi_2 = \oint \underline{H} dl = 0.$$

8.3.2. Электр өрісіндегі заттар сипаттамасы

Түрлі ортада, бір заряд қарқындылығы түрлі электр өрісін тудырады. Сондықтан, заттар электр өрісіне әсер етеді. Себебі, заттардың өзінде қосымша зарядтар бар, олар жылжып өз электр өрісін тудырады. Заттардың өріспен өзара әсерінен олар өткізгіш және диэлектрикке бөлінеді. Өткізгіште, сыртқы электр өрісінің әсерінен, бос зарядтар бөлінеді және өткізгіш ішінде қосымша электр өрісі пайда болады, сыртқы өрісті толығымен толықтырады. Өткізгіштегі өрістің қорытындылау кернеулігі нөлге тең өткізгіш заттардағы зарядтардың электр өрісінің әсерінен бөлінуі электростатикалық индукция деп аталады. Бұндай құбылысты түрлі құрылғыларды электростатикалық өрістен қорғау үшін қолданылады.

Диэлектриктердің электр өрісімен өзара әрекетінен, олар полярлық және полярлық емеске бөлінеді. Полярлық емес диэлектрикте байланысты зарядтар бар, сыртқы өріс жоқта электрлі бейтарапты. Оң заряд- ортасында, терісі- сол ортамен шеңберде. Сыртқы электр өрісінің әсерінен зарядтар жылжиды

(8.20-сурет). Диполь пайда болады, электр сәтімен сипатталады:
 $p = ql$, Кл·м.



8.20-сурет

Электр өрісінің әсерімен электрлі байланысты зарядтар жылжуы поляландыру деп аталады. Полярлық диэлектриктерде байланысқан зарядтары бар, электр өрісі пайда болғанда диполи бағытталады оның өз өрісі сыртқыға қарсы. Сондықтан диэлектрикте қорытынды өріс кернеулігі:

$$E = E_{\text{вн}} - E_{\text{п}},$$

$E_{\text{вн}}$ - ішкі электр өрісінің кернеулігі.

Поляризация күшті болған сайын, қорытындылау өріс кернеулігі аз болады, сондықтан заттың диэлектрикалық өтімділігі көбірек. Диэлектрика қасиетін санды бағалау үшін полярланған немесе полярлық қарқындылығы түсінігі қолданылады:

$$\underline{P} = \frac{\sum \underline{p}}{v}$$

Яғни, диполи электр кезеңдер жиынының көлемге қатынасы.

Заттардың полярлану өлшемі: $[P] = \left[\frac{ql}{v} \right] = \frac{\text{Кл} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$.

Заттардың полярлануы теңдеумен беріледі $\underline{P} = \alpha \epsilon_0 \underline{E}$, α – полярлану коэффициенті; ϵ_0 – электр тұрақтылық. Вакуум мен диэлектриктегі электр өрісін және олардың векторлы өзара әрекетін қарастырып, теңдеу жазуға болады:

$$\underline{D} = \varepsilon_0 \underline{E} + \underline{P} = \varepsilon_0 \underline{E} + k\varepsilon_0 \underline{E} = \varepsilon_0 \underline{E}(1+k) = \varepsilon_0 \varepsilon \underline{E},$$

Бұнда $\varepsilon = 1+k$ – ортаның қатынасты диэлектрикалық өтімділігі.

Сонымен, диэлектриктегі электр өрісін жазуда электрлік жылжу түсінігін таптық

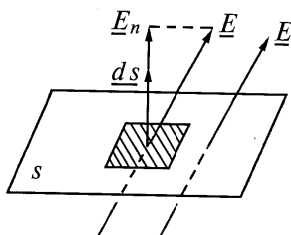
$$\underline{D} = \varepsilon_a \underline{E}, \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}. \quad (8.38)$$

Электрлік жылжу дегеніміз векторлы шама, сол нүктедегі өріс кернеулігінің геометриялық сомасына тең, сол нүктедегі электр тұрақтылығы мен полярлануға көбейтілген. Бұл түсініктің физикалық мәні сыртқы электр өрісінің әсерінен бір ауданға жылжыған зарядтар шамасының санды бағалауы.

8.3.3 Электр өріс кернеулігі тармақтар ағыны. Гаусс теоремасы

Біршама жазықтықтағы электр өрісі кернеулігінің тармақтар ағынын қарастырамыз (8.21-сурет) жәй ағын $d\psi_E = \underline{E} ds$. Толық ағын

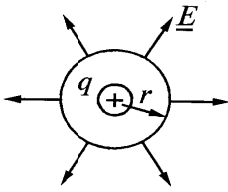
$$\psi_E = \int_S \underline{E} ds, \text{ В} \cdot \text{м}. \quad (8.39)$$



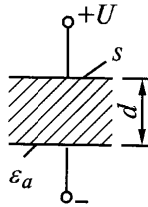
8.21-сурет

Жекеше жағдай қарастырамыз, заряд ішкі тұйықталған сфералы жазықтықта орналасқан (8.22-сурет). (8.39) сәйкес табамыз

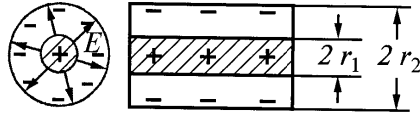
$$\psi_E = \oint \underline{E} ds = E \oint ds = E \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon_a}. \quad (8.40)$$



8.22-сурет



8.23-сурет



8.24-сурет

(8.40) формула Гаусс теоремасын көрсетеді: тұйықталған жазықтықтан өткен электр өріс кернеулігінің тармақ ағыны, сол жазықтық ішіне орналасқан зарядтар жиынының, орта абсолютті диэлектрикалық өтімділігінің қатынасына тең.

8.3.4 Сыйымдылық және электр өрісін есептеуде Гаусс теоремасын пайдалану

Диэлектрикпен бөлінген кез-келген өткізгіштердің (электродтар) электр зарядтарын жинақтайтын және жібермейтін қабілеті бар: $q = CU$. Сыйымдылық деп аталатын C пропорционалды коэффициенті, конструкциялардың зарядта жинақтайтын қабілетін сипаттайды:

$$C = \frac{q}{U}, \Phi \text{ (Фарада)}. \quad (8.41)$$

Заряд пен сыйымдылық, конструкция мөлшері мен диэлектрик қасиетіне бағынышты, құрылғылар сыйымдылығын есептеуін келесі жолмен жүргізеді:

1. (8.39) пен (8.40) оң жақ бөлігін теңестіріп, заряд арқылы электр өрісінің кернеулігін табады:

$$\int_S \underline{E} ds = \frac{q}{\epsilon_a}$$

2. полюс арасындағы кернеуді, өріс кернеулігі арқылы анықтайды ;

3. табылған қатынастан, құрылғы сыйымдылығын есептейтін формула табылады.

Төменде, типті конденсаторлар сыйымдылығы және электр өрісін есептейтін мысалдарды қарастырайық.

Жазық конденсатор өрісі мен сыйымдылығы (8.23-суретте). (8.39) сәйкес, электр өрісінің кернеулігінің тармақтар ағыны:

$\psi_E = Es$. Осы ағын Гаусс теоремасымен $\psi_E = \frac{q}{\varepsilon_a}$. Теңдеудің

оң жағында $E = \frac{U}{d}$ есепке алып, теңестіріп табамыз:

$Es = \frac{U}{d} s = \frac{q}{\varepsilon_a}$. Бұдан жазық конденсатор сыйымдылығы

$$C = \frac{\varepsilon_a S}{d} \quad (8.42)$$

Цилиндрлі конденсатор өрісі мен сыйымдылығы (8.24-суретте).

(8.39) сәйкес, $\psi_E = Es = E2\pi rl$. (8.40) Гаусс теоремасымен

$\psi_E = \frac{q}{\varepsilon_a}$ теңдеудің оң жағын теңестіріп, өріс кернеулігін

табамыз:

$$E = \frac{q}{2\pi\varepsilon_a rl}$$

Электродтар арасындағы кернеу: $U = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \frac{q}{2\pi\varepsilon_a l} \ln \frac{r_2}{r_1}$.

Бұдан жазық конденсатор сыйымдылығы

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_a l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (8.43)$$

Өріс кернеулігі $E = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}}$ (8.44)

(8.44) теңдеуден көруге болады, электр өрісі біркелкі емес. Өрістің ең жоғарғы кернеулігі, конденсатордың ішкі электродының үстінде. Өрістің біркелкі кернеулігін табу үшін, $\varepsilon_a r = \text{const}$ немесе $rl = \text{const}$ болу керек. Сонғы жағдайды орындау жеңілдеу.

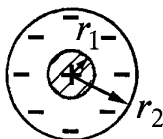
Сферикалы конденсатор өрісі мен сыйымдылығы (8.25 суретте).

Сферикалық конденсатор, осімен біріккен екі шар тәрізді диэлектрикпен бөлінген. Өріс кернеулігі вектор ағыны (8.39)-дан r радиуспен сферикалық жазықтан өтетін $\psi_E = \oint \underline{E} ds = 4\pi r^2 E$.

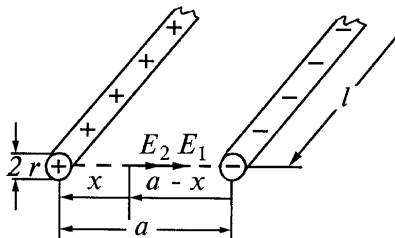
Гаусс теоремасымен $\psi_E = \frac{q}{\varepsilon_a}$ анықталады

Бұл формулалардың оң жағын салыстырып табамыз:

$$E = \frac{q}{4\pi \varepsilon_a R^2}$$



8.25-сурет



8.26-сурет

Конденсатор электродтары арасындағы кернеу

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \frac{q}{4\pi \varepsilon_a} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Бұдан конденсатор сыйымдылығы:

$$C = \frac{4\pi \varepsilon_a r_1 r_2}{r_2 - r_1} \quad (8.45)$$

Жекеше жағдайда $r_2 = \infty$ болса, шар сыйымдылығын табамыз:

$$C_{III} = 4\pi \varepsilon_a r_1 \quad (8.46)$$

Екі сымды ауалы сызық өрісі мен сыйымдылығы

Кез келген нуктеде, сымдар арасындағы электр өрісінің кернеулігі (8.26-сурет) екі сымның электр зарядтарымен пайда болады. Бірінші сымның кернеулігінің тармақтар ағыны

$$\psi_E = \oint \underline{E}_1 ds = E_1 \cdot 2\pi x l. \text{ Гаусс теоремасына сәйкес } \psi_{E1} = \frac{q}{\varepsilon_0}.$$

Бұдан бірінші сым өріс кернеулігі $E_1 = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 l x}$.

Осыған тектес, екінші сымнан сол нүктеде $E_2 = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 l (a-x)}$.

Қорытындылау кернеулігі:

$$E = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 l} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{a-x} \right) \quad (8.47)$$

Өрістің ең көп кернеулігі, сымдардың сыртында пайда болады:

$$E_{\max} = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 l} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{a-r} \right) \quad (8.48)$$

Сымдар арасындағы кернеу :

$$\begin{aligned} U &= \int_r^{a-r} E dx = \int_r^{a-r} \frac{q}{2\pi \epsilon_0 l} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{a-x} \right) dx = \dots = \\ &= \frac{q}{\pi \epsilon_0 l} \ln \frac{a-r}{r} \approx \frac{q}{\pi \epsilon_0 l} \ln \frac{a}{r} \end{aligned}$$

Бұдан сыйымдылық:

$$C = \frac{\pi \epsilon_0 l}{\ln \frac{a-r}{r}} \approx \frac{\pi \epsilon_0 l}{\ln \frac{a}{r}} \quad (8.49)$$

(8.49) есепке алып (8.48) формуласын мына түрде жазамыз:

$$E_{\max} = \frac{U}{2r \ln \frac{a}{r}} \quad (8.50)$$

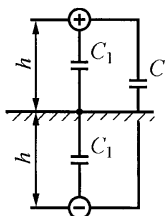
Бір сымды желі сыйымдылығы (сым-жер)

Бөлген шекарадан айнадағы бейнелеуге симметриялы, керісінше знагы бар заряд орналастырады (8.27-сурет). Екі

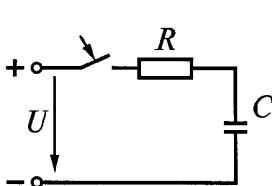
сымды желі моделі пайда болады, оның сыйымдылығы $C = \frac{\pi \varepsilon_0 l}{\ln \frac{2h}{r}}$,

h -жер бетінен сымның биіктігі. Бұл сыйымдылықты, бір ізді жалғасқан екі конденсатор түрінде елестетіп, бір сым желі сыйымдылығын табамыз:

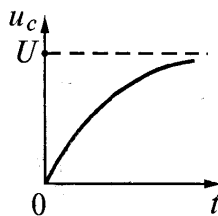
$$C_1 = \frac{2\pi \varepsilon_0 l}{\ln \frac{2h}{r}} \quad (8.51)$$



8.27-сурет



8.28-сурет



8.3.5 Электростатикалық өріс энергиясы

Тұрақты ток көрек көзінен конденсатор зарядының процессін қарастырамыз (8.28-сурет). Кирхгофтың заңы бойынша $U = iR + u_c$.

Бұл теңдікті idt көбейтіп және $i = C \frac{du_c}{dt}$ – есепке алып, табамыз:

$$UC du_c = i^2 R dt + C u_c du_c \text{ немесе } dW_u = dW_R + dW_{\varepsilon}.$$

R , C тізбекке берілген қорек көзінің толық энергиясы:

$$W_u = \int_0^U UC du_c = U^2 C = UQ \quad (8.52)$$

Конденсатордың электр өрісінде сақталған энергия:

$$W_{\varepsilon} = \int_0^U C u_c du_c = \frac{U^2 C}{2} = \frac{Uq}{2} \quad (8.53)$$

Конденсатордың электр өрісінің энергиясы оның сыйымдылығына және кернеу квадратына тікелей пропорционалды. (8.52) мен (8.53) теңдеулерінен, қорек көзінің жарты энергиясы резистормен жылу энергиясына өзгереді:

$$W_R = W_u - W_{\text{э}} = CU^2 - \frac{CU^2}{2} = \frac{CU^2}{2} \quad (8.54)$$

Мөлшерлі электр энергия (тығыздық) толық энергияның көлемге қатынасына тең. Жазық конденсаторға:

$$C = \frac{\varepsilon a^S}{d}, \quad v = sd$$

Бұдан энергияның көлемдік тығыздығы

$$w_{\text{э}} = \frac{W_{\text{э}}}{v} = \frac{\frac{CU^2}{2}}{v} = \frac{\varepsilon_a U^2}{2d^2} = \frac{\varepsilon_a E^2}{2} = \frac{DE}{2}, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3},$$

$$w_{\text{э}} = \frac{\varepsilon_a E^2}{2} = \frac{DE}{2} \quad (8.55)$$

8.3.6 Электростатикалық өрістегі механикалық күштер

Электр өрісі энергия бар болғандықтан, механикалық жұмыс атқарады. Бұл Кулон заңымен дәлелденген және өріс кернеулігін анықтаумен, нүктелі зарядқа өрістің күш арқылы әсерімен, электр өрісіндегі механикалық жұмыстың жалпы түрін қарастырамыз.

1. Энергия формуласынан механикалық күшті анықтау.

Механикалық күшті анықтауда энергия сақтау заңына сүйенеді: dw_u қорек көзінен берілген энергия $dw_{\text{э}}$ өріс энергиясының өзгеруіне жұмсалады және Fdx механикалық жұмыс өзгеруіне. Механикалық күш, өзгертін координат энергиясы туындысына тең:

$$F = - \left. \frac{dW_{\text{э}}}{dx} \right|_{Q=\text{const}} = \left. \frac{dW_{\text{э}}}{dx} \right|_{U=\text{const}}. \quad (8.56)$$

Өріс параметрлары арқылы күшті анықтау үшін (8.29-сурет) зарядталған жазық конденсаторын қарастырамыз. Электродтар dx

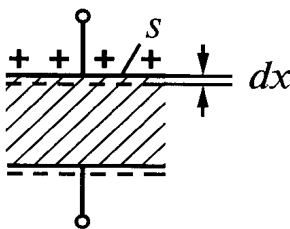
қашықтықа жылжығанда, өріс энергиясының өзгеруі мынадай болады:

$$dW_э = w_э dv ,$$

$$dv = sdx - \text{электр өрісінің көлемінің өзгеруі } w_э = \frac{\varepsilon_a E^2}{2} -$$

энергия тығыздығы. $Fdx = dW_э$, теңестіріп, механикалық күш табамыз:

$$F = \frac{\varepsilon_a E^2}{2} s, H . \quad (8.57)$$



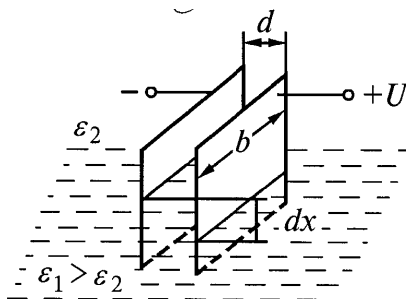
8.29-сурет

Бір жазықтықтағы күштің мөлшерлі мағынасы

$$F_0 = \frac{\varepsilon_a E^2}{2}, \frac{H}{m^2} . \quad (8.58)$$

Сонымен, механикалық күш, электр энергия ағыны тығыздығының ауданға көбейтіндісіне тең.

2. Біртекті емес диэлектригі бар, электр өрісіндегі әсер ететін күштер.



8.30-сурет

Екі диэлектриктің бөлінген шекарасындағы электр өрісінде күш бар, ол диэлектрикті үлкен өтімділігімен өріс аймағын тартуға тырысады.

8.30-суретте ауалы диэлектригі бар катушка көрсетілген, бірен-саран электродтары, үлкен диэлектрикалық өткізгіші бар сұйықтыққа малынған. Электр өрісі күшінің әсерінен, конденсатор ішіндегі сұйықтық деңгейі жоғары, жалпы деңгеймен салыстырғанда. Қорытындысында, жұмыс жасалды:

$$dA = Fdx = F_0 s_0 dx = F_0 b d dx$$

Және электр өрісінің энергиясы өзгерді:

$$dW_{\dot{y}} = \frac{1}{2} U^2 dC = \frac{1}{2} U^2 \frac{\epsilon_0 (\epsilon_1 - \epsilon_2)}{d} b dx.$$

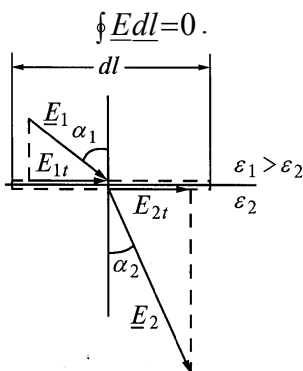
Оң жақтарын теңестіріп, сұйық диэлектрик сыртына әсер ететін мөлшерлі күшті табамыз:

$$F_0 = \frac{\epsilon_0 (\epsilon_1 - \epsilon_2) E^2}{2} = \frac{(D_1 - D_2) E}{2}, \frac{H}{M^2}. \quad (8.59)$$

Тәжірибеде, бұл жағдай техникалық құралдарда қолданылады, сұйықтарды диэлектрикалық өтімділігін өлшеу үшін.

8.3.7 Екі диэлектриктер шекарасындағы электр өрісі

Электр өрісіндегі екі диэлектриктің бөлінген шекарасы (8.31-сурет)



8.31-сурет

Контур биіктігі интегралдауын шексіз аз деп, табамыз $E_{1t} dl - E_{2t} dl = 0$.

Бұдан $E_{1t} = E_{2t}$,

$$E_1 \sin \alpha_1 = E_2 \sin \alpha_2. \quad (8.60)$$

Екі диэлектриктің бөлінетін шекарасында өріс кернеулігінің сүйкелетін құрамалары тең. Диэлектрик шекарасындағы электрлік жылжу тармақтар ағынын талдау үшін (8.32-сурет) теңдікті пайдаланамыз.

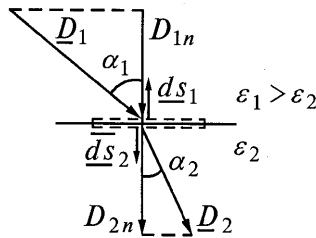
$$\oint D ds = 0$$

Немесе

$$\begin{aligned} \underline{D}_1 ds_1 + \underline{D}_2 ds_2 &= 0, \\ D_{1n} ds_1 \cos 180^\circ + D_{2n} ds_2 &= 0 \end{aligned}$$

$ds_1 = ds_2$ теңдікті есепке алып, табамыз: $D_{1n} = D_{2n}$;
 $\varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n}$;

$$\varepsilon_1 E_1 \cos \alpha_1 = \varepsilon_2 E_2 \cos \alpha_2. \quad (8.61)$$



8.32-сурет

Диэлектриктер бөлінген жазығында бос зарядтар жоқ болса, электрлік жылжу тармақтар перпендикулярлы құрамалары тең, ал өріс кернеулігінің тармақтарының дұрыс құрамасы диэлектрикалық өтімділікке кері пропорционалды. (8.60), (8.61) бөліп, электр өрісі кернеулігінің желі сыну заңын табамыз:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}. \quad (8.62)$$

8.3.8 Электростатикалық тізбектер және тұрақты ток тізбегімен олардың ұқсастығы

Электростатикалық тізбек дегеніміз – тұрақты ЭҚК қорек көзі, конденсатор және резисторы бар тізбектер. Тұрақты ток электр тізбегі мен электростатикалық тізбек арасында ұқсастық бар: токқа электр заряды ал тармақтар өтімділігіне сыйымдылық сәйкес. Электр тізбегімен ұқсастығы, Ом заңымен электростатикалық тізбегіндегі түрі мынадай:

$$q = CU. \quad (8.63)$$

Кирхгофтың бірінші заңы:

$$\sum q = 0. \quad (8.64)$$

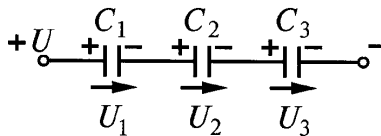
Кирхгофтың екінші заңы: $\sum E = \sum \frac{q}{C}$. (8.65)

8.3.9 Электростатикалық тізбектерді өзгерту

1. Жалғас қосылған конденсаторлар (8.33-сурет). Жалғас қосылғанда олардың электр зарядтары бірдей дейміз: $q_1 = q_2 = q_3 = q$. Кирхгофтың екінші заңы бойынша: $U = U_1 + U_2 + U_3$. (8.63) есепке алып, бұл теңдікті мына түрде

жазамыз: $\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$.

Бұдан $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$. (8.66)



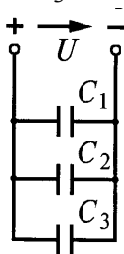
8.33-сурет

Конденсатордағы кернеулер таралуы олардың сыйымдылығына кері пропорционалды.

2. Конденсаторларды қатарластырып қосу (8.34-сурет) конденсаторлар қатарласып қосылғанда оларда кернеулер тең:

$U_1 = U_2 = U_3 = U$, ал электр зарядтары олардың сыйымдылығына пропорционалды, яғни:

$$q_1 = C_1 U; q_2 = C_2 U; q_3 = C_3 U.$$



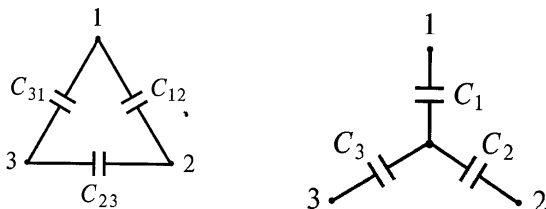
8.34-сурет

Кирхгофтың бірінші заңы бойынша жалпы заряд барлық зарядтар сомасына тең: $q = q_1 + q_2 + q_3$ немесе

$$CU = C_1 U + C_2 U + C_3 U. \text{ Бұдан эквиваленті сыйымдылық}$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3. \quad (8.67)$$

3. Үшбұрышты, эквиваленті жұлдызға және керісінше өзгерту (8.35-сурет)



8.35-сурет

Кедергі үшбұрышын, эквиваленті жұлдызға өзгерту формуласы белгілі:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3} \text{ және т.б.}$$

Сыйымдылық пен өтімділік арасындағы ұқсастықты пайдаланып, сыйымдылық үшбұрышын эквиваленті жұлдызға өзгерту үшін, формула табамыз:

$$\frac{1}{C_1} = \frac{\frac{1}{C_{12}} \frac{1}{C_{13}}}{\frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C_{23}} + \frac{1}{C_{13}}} \text{ және т.б.} \quad (8.68)$$

Осыған ұқсас, жұлдызды эквиваленті үшбұрышқа өзгерту формуласын табамыз. Электр тізбекке:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3} \text{ және т.б.}$$

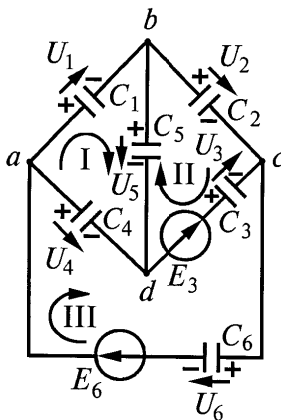
Электростатикалық тізбекке:

$$C_{12} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2 + C_3} \text{ және т.б.} \quad (8.69)$$

8.3.10 Электростатикалық тізбектер есептеу әдістері

Электр және электростатикалық тізбектер ұқсастығы және Ом заңы мен Кирхгоф заңының әсері, белгілі есептеу әдістерді қолдануға мүмкіндік жасайды. Бұл кезде, есептеудің бастапқы көрсеткіштері, қорек көзі мен конденсатор сыйымдылық ЭҚК. Есептеу қорытындысында, конденсатордағы зарядтар мен кернеулер таралуын табады.

(8.36-суреттегі) сұлбадағы мысал есептеу әдісін қарастырайық.



8.36-сурет

1. Кирхгоф заңы бойынша.

Теңдеулер жүйесін құрастыру үшін, конденсатордағы зарядтар полярлығын схема тармақтарындағы және контурдағы аралау бағытын жәй аламыз. Кирхгофтың бірінші заңы бойынша теңдеулер құрамыз, олардың саны, түйін санынан бірге аз болады:

$$\text{түйін } a : q_1 + q_4 - q_6 = 0; \text{ түйін } b : -q_1 + q_2 + q_5 = 0;$$

$$\text{түйін } c : q_6 - q_2 - q_3 = 0.$$

Кирхгофтың екінші заңы бойынша контурларға теңдеулер құрамыз:

$$\text{abda} : \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_5}{C_5} - \frac{q_4}{C_4} = 0; \text{ bcdb} : \frac{q_2}{C_2} - \frac{q_3}{C_3} - \frac{q_5}{C_5} = -E_3;$$

$$\text{adca} : \frac{q_3}{C_3} + \frac{q_4}{C_4} + \frac{q_6}{C_6} = E_3 + E_6.$$

Теңдеулерді біріктірін есептеу, белгісіз зарядтар $q_1 \dots q_6$ береді. Егерде заряд теріс болса, оның шындық полярлығы алғанға қарама-қарсы болады.

Ом заңы бойынша, конденсатордағы кернеуді табамыз:

$$U_1 = \frac{q_1}{C_1}, U_2 = \frac{q_2}{C_2} \text{ және т.б.}$$

2. Контурлы заряд әдісі.

Контурлы зарядтар q_I, q_{II}, q_{III} белгісіз деп аламыз, саны тәуелсіз контурлар санына тең. Аралау бағыттын таңдап, Кирхгофтың екінші заңы бойынша теңдеулер құрамыз:

$$\text{контур } abda : q_I \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_4} + \frac{1}{C_5} \right) - q_{II} \frac{1}{C_5} - q_{III} \frac{1}{C_4} = 0,$$

$$\text{контур } bcdb : q_{II} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_5} \right) - q_I \frac{1}{C_5} - q_{III} \frac{1}{C_3} = -E_3,$$

$$\text{контур } adca : q_{III} \left(\frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} + \frac{1}{C_6} \right) - q_I \frac{1}{C_4} - q_{II} \frac{1}{C_3} = E_3 + E_6.$$

Конденсатордағы зарядтар полярлығын жәй таңдап, оларды контурлы зарядтар арқылы табамыз: $q_1 = q_I$; $q_2 = q_{II}$; $q_5 = q_I - q_{II}$; $q_3 = q_{III} - q_{II}$; $q_4 = q_{III} - q_I$; $q_6 = q_{III}$

3. Түйінді әлеуеттер әдісі.

Түйіндер әлеуеттерін белгісіз деп аламыз, біреуін нөлді дейміз, мысалы $\varphi_d = 0$. Тендеулер жүйесін құрамыз:

$$\begin{aligned} \varphi_a(C_1 + C_4 + C_6) - \varphi_b C_1 - \varphi_c C_6 &= E_6 C_6; \\ \varphi_b(C_1 + C_2 + C_5) - \varphi_a C_1 - \varphi_c C_2 &= 0; \\ \varphi_c(C_2 + C_3 + C_6) - \varphi_a C_6 - \varphi_b C_2 &= -E_6 C_6 + E_3 C_3. \end{aligned}$$

Тендеулердің біріктіріп есептеуі φ_a , φ_b , φ_c потенциалдарды береді, конденсатордағы кернеулер:

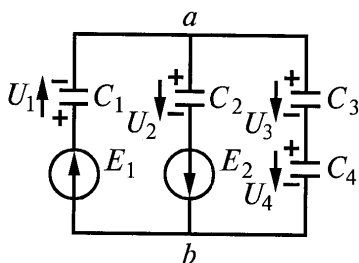
$U_1 = \varphi_a - \varphi_b$; $U_2 = \varphi_b - \varphi_c$; $U_3 = \varphi_d - \varphi_c + E_3$ және т.б.

Белгілі кернеулер мен сыйымдылықтар арқылы конденсаторлар зарядтарын табамыз: $q_1 = C_1 U_1$; $q_2 = C_2 U_1$ және т.б.

4. Түйінді кернеу әдісі.

Екі түйін болса қолданылады, (8.37-суреттегі) сұлба. $\varphi_b = 0$ тең деп, тендеу жазамыз:

$$\varphi_a(C_1 + C_2 + C_{34}) = E_1 C_1 - E_2 C_2.$$



8.37 сурет

$$\text{Бұдан түйінді кернеу } U_{ab} = \varphi_a = \frac{\sum(EC)}{\sum C} = \frac{E_1 C_1 - E_2 C_2}{C_1 + C_2 + C_{34}},$$

$$C_{34} = \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4}.$$

Конденсатордың әр тармағындағы зарядтар полярлігін жәй тандап алып, зарядтарды анықтаймыз:

$$q_1 = (E_1 - U_{ab})C_1; \quad q_2 = (E_2 + U_{ab})C_2; \quad q_3 = Q_4 = U_{ab}C_3.$$

Конденсаторлар кернеулері:

$$U_1 = E_1 - U_{ab} \text{ немесе } U_1 = \frac{q_1}{C_1}, \quad U_2 = E_2 + U_{ab} \text{ немесе}$$

$$U_2 = \frac{q_2}{C_2}, \quad U_3 = \frac{q_3}{C_3}, \quad U_4 = \frac{q_4}{C_4}.$$

8.3.11 Өткізгіш ортадағы тұрақты тоқтың электр өрісі

Дифференциалды формадағы Ом, Кирхгоф және Джоуль-Ленц заңдары электр өрісінің әсерімен, көлемді өткізгіш ортада, бос зарядтар жылжиды. Δl ұзындығы мен ΔS кесігі бар біршама бөліктегі кернеу:

$$U = \int_1^2 \underline{E} dl = E \Delta l.$$

Ом заңымен бейтарап формада $U = IR$.

$$I = \delta \cdot \Delta S \text{ және } R = \frac{\Delta l}{\gamma \Delta S} \text{ есепке алып, тендіктің оң жағын}$$

$$\text{теңестіріп, тоқ тығыздығын табамыз } \underline{\delta} = \gamma \underline{E} \quad (8.70)$$

γ - мөлшлерлі өткізгіштік, $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$.

(8.70) формула, дифференциалды формадағы Ом заңын көрсетеді. Егерде өткізгіш ортада басқа да ЭҚК қорек көзі болса, өрісті қорытындылау кернеулігі

$\underline{E} + \underline{E}_{\text{шет}}$, онда

$$\delta = \gamma (\underline{E} + \underline{E}_{\text{шет}}), \quad (8.71)$$

Бұл дифференциалды формадағы жинақтап қорытылған Ом заңы.

(8.71) ден дифференциалды формадағы Кирхгофтың екінші заңы формуласын табуға болады. Қарастырып жатқан өткізгіш ортасы көлемінен $I_{\text{кір}} = I_{\text{шығ}} = I$ тоғы өтеді дейміз, оны мына түрде жазамыз:

$$\oint \underline{\delta} \underline{ds} = 0$$

Көлемге бөліп, шегін табамыз:

$$\lim_{v \rightarrow 0} \oint \underline{\delta} \underline{ds} = 0 \text{ или } \operatorname{div} \underline{\delta} = 0. \quad (8.72)$$

Бұл – дифференциалды формадағы Кирхофтың бірінші заңы. Өткізгіш ортадағы Джоуль-Ленц заңын келесі амалмен табуға болады. Тұрақты тоқ тізбегінің қуатын жазамыз:

$$P = I^2 R.$$

$$I = \delta \cdot \Delta s, \quad R = \frac{\Delta l}{\gamma \Delta s}, \quad v = \Delta l \cdot \Delta s \text{ – есепке алып, табамыз:}$$

$$W_0 = \frac{I^2 R}{v} = \gamma E^2; \quad W_0 = \gamma E^2, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}. \quad (8.73)$$

8.3.12 Тоқтың бір өтімділігі бар ортадан басқа өтімділігі бар ортаға өтуі

Екі орта шекарасындағы (8.38-сурет) шексіз кішкентай контурды қарастырамыз. Электр өрісінің кернеулігі:

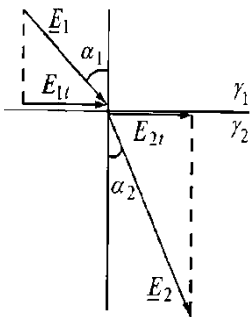
$$\oint \underline{E} \underline{dl} = 0.$$

Қарастырып жатқан контурға

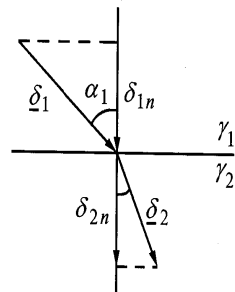
$$E_{1t} dl - E_{2t} dl = 0; \quad E_{1t} = E_{2t};$$

$$E_1 \sin \alpha_1 = E_2 \sin \alpha_2. \quad (8.74)$$

Екі орта шекарасындағы шексіз кішкентай көлемді қарастырамыз



8.38-сурет



8.39-сурет

Тоқ тығыздығы: $\oint \underline{\delta} dl = 0$.

Қарастырып жатқан көлемге:

$-\delta_{1n} \cdot \Delta s + \delta_{2n} \cdot \Delta s = 0$. $\delta_{1n} = \delta_{2n}$ болғанда

$$\gamma_1 E_1 \cos \alpha_1 = \gamma_2 E_2 \cos \alpha_2. \quad (8.75)$$

(8.74) (8.75) бөліп, тоқ тығыздық желінің сыну жағдайын табамыз:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}. \quad (8.76)$$

$\gamma_1 \gg \gamma_2$ болса, $\alpha_2 \approx 0$. Мысалы, тоқтың металды жерге тұйықтағыштан ыдырағанда, жерде жерге тұйықтағыштың кез келген нүктесінде тоқтың тығыздық желісі, оның бетіне тікелей (перпендикуляр) бағытталған.

8.3.13 Өтімділігі бар ортадағы электр өрісі мен электростатикалық өріс арасындағы ұқсастық

Өтімділігі бар ортадағы электр өрісінің және электростатикалық өрісінің түрлі жаратылысына қарамастан олардың арасында ұқсастық бар.

Электростатикалық өріс	Өтімділігі бар ортадағы электр өрісі
\underline{E}	\underline{E}
$\underline{D} = \varepsilon_a \underline{E}$	$\underline{\delta} = \gamma \underline{E}$
$\psi_D = \int \frac{D ds}{s}$	$I = \int \frac{\delta ds}{s}$
$E_{1t} = E_{2t}$	$E_{1t} = E_{2t}$
$D_{1n} = D_{2n}$	$\delta_{1n} = \delta_{2n}$

Бұл ұқсастық электр өрісін есептеу мен зерттеуде қолданылады. Өтімділігі бар ортадағы өтімділік және диэлектриктегі сол нүктелер арасындағы сыйымдылықтың аралық қатынасын қарастырамыз.

$$\text{Өткізгіштілік } g = \frac{I}{R} = \frac{I}{U} = \frac{\int \frac{\delta ds}{2}}{\int \frac{Edl}{l}} = \frac{\gamma \int \frac{Eds}{s}}{\int \frac{Edl}{l}}.$$

$$\text{Сыйымдылық } C = \frac{q}{U} = \frac{\varepsilon_a \int \frac{Eds}{s}}{\int \frac{Edl}{l}}.$$

Өткізгіштілікте сыйымдылыққа бөліп, табамыз

$$\frac{g}{C} = \frac{\gamma}{\varepsilon_a}. \quad (8.77)$$

Құрылғылар сыйымдылығының белгілі формуласын қолданып, өтімділік формуласын жазуға болады. Ол үшін сыйымдылық формуласында ε_a -ны γ -ға ауыстырамыз, мысалы:

1) Жазық конденсаторға

$$C = \frac{\varepsilon_a s}{d}, \Phi; g = \frac{\gamma s}{d}, \text{Сим};$$

2) цилиндр түріндегі конденсаторға

$$C = \frac{2\pi \varepsilon_a l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \Phi; g = \frac{2\pi \gamma l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \text{Сим};$$

3) сферикалық конденсаторға

$$C = \frac{4\pi \varepsilon_a r_1 r_2}{r_2 - r_1}, \Phi; g = \frac{4\pi \gamma r_1 r_2}{r_2 - r_1}, \text{Сим};$$

4) шар түріндегі конденсаторға

$$C = 4\pi \varepsilon_a r, \Phi; g = 4\pi \gamma r, \text{Сим};$$

5) екі сымды желіге

$$C = \frac{\pi \varepsilon_a l}{\ln \frac{a-r}{r}}, \Phi; g = \frac{\pi \gamma l}{\ln \frac{d-r}{r}}, \text{Сим}.$$

8.3.14 Өтімділігі бар ортадағы және жетілмеген диэлектриктегі электр өрісін есептеу мысалдары

1-мысал. Коаксиалды кабель ішкі сым диаметрі 10 мм және сыртқы қабыршақ диаметрі 20 мм өтімділік оқшаулығы

$$\gamma = 10^{-8} \frac{\text{Сим}}{\text{м}}.$$

1 км кабель ұзындығына оқшаулық кедергісін анықтау керек. Есептелуі. Кабель цилиндрлі түрдегі конденсаторға ұқсас,

оның сыйымдылығын формуламен есептейміз :
$$C = \frac{2\pi \varepsilon_a l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}.$$

1 км ұзындықты кабелдің оқшаулық өтімділігі :

$$g = \frac{2\pi \gamma l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi \cdot 10^{-8} \cdot 1000}{\ln \frac{10}{5}} = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ Сим}.$$

Оқшаулық кедергісі
$$R = \frac{1}{g} = \frac{1}{0,9 \cdot 10^{-4}} = 11000 \text{ Ом}.$$

2 мысал. Екі жапсарла өзек диаметрлері 10 км, ұзындығы 1м, бір бірінен арақашықтығы 20 см, өтімділігі $\gamma = 0,03 \frac{\text{Сим}}{\text{м}}$. Суға

малынған. Кернеуі 110В қорек - көзінен пайдаланатын тоқ пен қуатты анықтау.

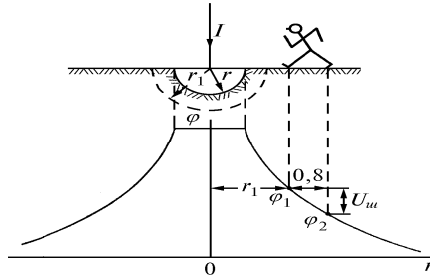
Есептелуі: екі сымды желіге ұқсас, өзек арасындағы өтімділік :

$$g = \frac{\pi \gamma l}{\ln \frac{a-r}{r}} = \frac{\pi \cdot 0,03 \cdot 1}{\ln \frac{200-5}{5}} = 0,025 \text{ Сим}.$$

Тоқ
$$I = Ug = 110 \cdot 0,025 = 2,8 \text{ А}.$$

Қуат
$$P = UI = 110 \cdot 2,8 = 308 \text{ Вт}.$$

3-мысал: r - радиусты жалғыз жартылай орталы жерге тұйықталғыш (8.40-сурет) кедергісін, ағылу кернеуін, жер бетінде әлеуеттің таралуын және адымды кернеуін анықтау керек.



8.40-сурет

Есептелуі: жарты шар сыйымдылығы $C = 2\pi \epsilon_a r$.

Жерге тұйықталғыш өтімділігі $g = 2\pi\gamma r$.

$$\text{Ағу кедергісі } R_p = \frac{1}{g} = \frac{1}{2\pi\gamma r}.$$

$$\text{Ағу кернеуі } U_p = IR_p = \frac{I}{2\pi\gamma r}.$$

Жерге тұйықталғыштан, r_1 қашықтықтағы ток тығыздығы

$$\delta = \frac{I}{2\pi r_1^2}.$$

Сол нүктедегі өріс кернеулігі

$$E = \frac{\delta}{\gamma} = \frac{I}{2\pi\gamma r_1^2}.$$

Жерге тұйықталғыш пен сол нүкте арасындағы кернеу

$$U = \varphi_R - \varphi_r = \int_r^{r_1} E dr = \frac{I}{2\pi\gamma} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right).$$

Адымды кернеуі (адым 0,8)

$$U_{III} = \int_{r_1}^{r_1+0,8} E dr = \frac{I}{2\pi\gamma} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1+0,8} \right).$$

Жер бетіндегі әлеуеттің таралуы:

$$\varphi = \frac{I}{2\pi\gamma r_1} = U_p \frac{r}{r_1}.$$

8.4 Өзгермелі электромагнитті өріс

8.4.1 Толық электр тоғы және оның тығыздығы

Өзгермелі электромагнитті ток дегеніміз – электр және магнитті өрісінің уақытымен өзара байланысты бірігуі. Оның қасиетін қарастыру үшін «толық электр тоғы мен оның тығыздығы» деген түсініктерді білу керек. Жалпы жағдайда, электр тоғы дегеніміз – зарядтардың бағытталған жылжуы. Токтың бірнеше түрлері бар. Өтімділік тоғы – өткізгішті ортадағы бос электр зарядтарының электр өрісінің әсерінен жылжуы.

Оның тығыздығы өріс кернеулігіне пропорционалды:

$$\underline{\delta} = \gamma \underline{E}$$

Өтімділік ток, ауданына байланысты тығыздықтың интегралды функциясы:

$$I_{\text{тура}} = \int_S \underline{\delta} ds.$$

Тасу тоғы – вакуумда немесе өткізгішті емес ортадағы электр өрісінің әсерінен бос зарядтардың жылжуы.

Оның тығыздығы: $\underline{\delta}_{\text{айнымалы}} = \rho \underline{v}$,

ρ – зарядтардың көлемді тығыздығы;

\underline{v} – зарядтардың жылжу жылдамдығы

$$\text{тасу тоғы } I_{\text{пер}} = \int_S \underline{\delta}_{\text{пер}} ds.$$

Поляризация тоғы – поляризация кезіндегі, диэлектриктегі байланысты зарядтар жылжуы. Оның тығыздығы:

$$\delta_{\text{толық}} = \frac{\partial P}{\partial t}.$$

Вакуумдағы жылжитын ток – электр өрісінің уақытымен өзгертін ток. Оның тығыздығы:

$$\underline{\delta}_0 = \frac{\partial \underline{D}_0}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial \underline{E}}{\partial t}.$$

Вакуумдағы полярлау тоқтары мен жылжыған токтар қосындысы диэлектриктегі жылжитын тоқты шығарады. Оның тығыздығы:

$$\frac{\delta}{\text{см}} = \frac{\partial D}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \underline{E} + \underline{P}) = \frac{\partial D}{\partial t} \underline{0} + \frac{\partial \underline{P}}{\partial t} = \delta_{-0} + \delta_{\text{пол}}$$

$$\text{Жылжитын ток } i_{\text{см}} = \int_S \underline{\delta}_{\text{см}} \underline{ds}.$$

Толық ток - кез келген тұйықталған жазықтықта:

$$I_{\text{толық}} = I_{\text{айнымалы}} + I_{\text{ж}} + I_{\text{тура}} = 0$$

$$\text{Немесе: } i_{\text{толық}} = \oint_S \underline{\delta}_{\text{толық}} \underline{ds}$$

$$\text{Оның тығыздығы: } \underline{\delta}_{\text{толық}} = \underline{\delta}_{\text{айнымалы}} + \underline{\delta}_{\text{ж}} + \underline{\delta}_{\text{тура}} = 0$$

Бұл формулалар толық ток желісінің үздіксіз қағидатын көрсетеді: ток желісінің басы да, аяғы да жоқ. Токтың жалпы тізбегінде толық ток құрамасының әсер ететін шекарасын көрсетуге болады. Конденсаторы бар тізбекте ток өтімділік желісі, конденсатор электродында үзіледі, бірақ олар жылжытын ток желісімен жалғасады. Бұл токтарды не біріктіреді? Кез келген токтың негізгі қасиеті – магнит өрісін қоздыру қабілеттілігі.

8.4.2 Электромагнитті өріс тендеуі. Максвелл тендеуі

Электромагнит өрісін, Максвелл тендеуі мен Умова-Пойтинг теоремасының көмегімен жазады.

1. Максвеллдің бірінші тендеуі.

Максвеллдің бірінші тендеуі жалпы түрде келесі амалмен жазылады:

$$\text{rot} \underline{H} = \underline{\delta}_{\text{толық}} \quad (8.78)$$

Магнитті өріс кернеулігі тармақ роторы, сол нүктедегі толық ток тығыздығының тармағына тең.

Толық ток құрамаларын ескеріп, бірінші өтімділік ортада

$$\underline{\delta}_{\text{толық}} = \underline{\delta} = \gamma \underline{E}; \quad \text{rot} \underline{H} = \gamma \underline{E};$$

$$\text{Вакуум } \underline{\delta}_{\text{мол}} = \underline{\delta}_0 = \varepsilon_0 \frac{\partial \underline{E}}{\partial t}; \quad \text{rot} \underline{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \underline{E}}{\partial t};$$

Диэлектрикалық ортада тұрақты диэлектрикалық өтімділігі бар:

$$\underline{\delta}_{\text{мол}} = \underline{\delta} + \underline{\delta}_{\text{см}} = \gamma \underline{E} + \varepsilon_a \frac{\partial \underline{E}}{\partial t};$$

$$\text{rot} \underline{H} = \gamma \underline{E} + \varepsilon_a \frac{\partial \underline{E}}{\partial t}$$

Бірінші теңдеудің, сол жағында Н электр өрісінің параметрі, ал оң жағында Е электр өрісінің параметрі. Олар өзара байланысты. Теңдеудің физикалық мәні мынада, магнитті өріс өтімділік тоқпен қоздырылса, уақытымен өзгерілетін электр өрісінде қоздырылады.

Максвелдің бірінші теңдеуі дифференциалды формадағы тоқтың толық заңын көрсетеді. (8.78) \underline{ds} -ке көбейтіп және S-пен интегралдап, дәлелдеуге болады:

$$\text{Сол бөлігі} - \int_S \text{rot} \underline{H} \underline{ds} = \int_S \underline{\delta}_{\text{тол}} \underline{ds}.$$

$$\text{Оң бөлігі} - \int_S \text{rot} \underline{H} \underline{ds} = \oint_l \underline{H} \underline{dl},$$

$$\int_S \underline{\delta}_{\text{тол}} \underline{ds} = \sum I = i_{\text{пр}} + i_{\text{см}}$$

Интегралды формадағы толық тоқ заңы:

$$\oint_l \underline{H} \underline{dl} = \sum I$$

Е мен Н тармақтар арасында байланыс орнатуға және кесігімен таралатын тоқтарды сипаттауға мүмкіндік бермейді. Максвелдың бірінші заңы бұл проблеманы шешеді. Интегралды формада толық тоқ заңынан бұған өту математикалық операциялар арқылы болады:

$$\lim_{\Delta S \rightarrow 0} \left| \frac{\oint \underline{H} \underline{dl}}{\Delta S} \right| = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta i}{\Delta S} \right|$$

Немесе

$$\underline{\delta}_{\text{толық}} = \text{rot} \underline{H} = \underline{\delta}_{\text{полн}},$$

$\text{rot} \underline{H}$ – өрістің құйынды тармағы.

Егер $\text{rot} \underline{H} \neq 0$, магнитті күш желісі тұйықталса, өрісте құйынды мінез болады.

Өзгермелі электр өрісі арқылы пайда болатын магнитті өріс, құйынды өріс болады.

2. Максвелдің екінші теңдеуі

$$\text{rot} \underline{E} = - \frac{\partial \underline{B}}{\partial t}. \quad (8.79)$$

$B = \mu_a H$ есепке алып, табамыз:

$$\text{rot} \underline{E} = -\mu_a \frac{\partial \underline{H}}{\partial t}.$$

Максвелдің екінші теңдеуі мынаны дәлелдейді: электр өрісін тек электр зарядтары ғана емес, уақытымен өзгеретін магнитті өрісте қоздырады. Бұндай электр өрісінде құйынды мінез, олардың күш желісі өз-өзінен тұйықталады.

Екінші теңдеу электромагнитті индукция заңының дифференциалды формада жазылуы. Дәлелдеу үшін екінші теңдеу \underline{ds} -ке көбейтіп және S-пен интегралдаймыз:

$$\int_S \text{rot} \underline{E} \underline{ds} = \int_S - \frac{\partial \underline{B}}{\partial t} \underline{ds}.$$

Стокс теоремасымен

$$\int_S \text{rot} \underline{E} \underline{ds} = \oint_l \underline{E} \underline{dl}; \int_S - \frac{\partial \underline{B}}{\partial t} \underline{ds} = - \frac{\partial}{\partial t} \int \underline{B} \underline{ds} = - \frac{\partial \Phi}{\partial t}.$$

Қорытындысында интегралды формадағы электромагнитті индукция заңын табамыз.

$$\oint \underline{E} \underline{dl} = - \frac{\partial \Phi}{\partial t};$$

3. Магнитті ағынның үздіксіз принципі. Кез келген тұйықталған жазықтықта магнитті ағын нөлге тең:

$$\Phi = \int_S \underline{B} \, ds = 0$$

Теңдеудің екі жағын көлем нөлге бағытталғанда бөлсек, дифференциалды формадағы жазба табамыз:

$$\lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\int_S \underline{B} \, ds}{\Delta v} = 0$$

Теңдеудің сол жағы дивергенция деп аталады немесе \underline{B} векторының айырмашылығы:

$$\operatorname{div} \underline{B} = 0 \text{ или } \operatorname{div} \underline{H} = 0. \quad (8.80)$$

Ұқсас электр тоғының үздіксіз принципі жазылады:

$$\operatorname{div} \underline{\delta} = 0 \quad (8.81)$$

Нөлге теңдігі, магнитті өріс желі мен тоғы қарастырып жатқан көлемнен өтетінін білдіреді, онда кездеспейді де, жабылмайды да, олар үздіксіз. Бұл формулалар Максвелдің бірінші заңы салдарынан.

4. Электромагнитті өрістің төртінші теңдеуі.

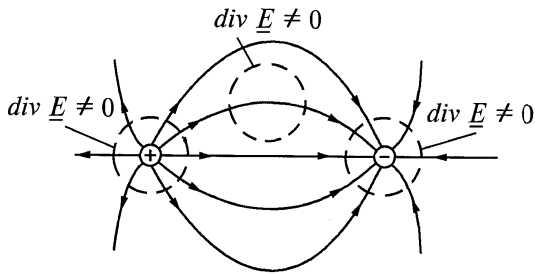
Электр өрісінің қорек көзін электр зарядтары деп мақұлдайтын Гаусс теоремасының дифференциалды формасы. Көлем нөлге тырысқан кездегі, Гаусс теоремасы интегралды формадағы шегін анықтап табамыз:

$$\lim_{\Delta v \rightarrow 0} \left| \frac{\int_S \underline{E} \, ds}{\Delta v} \right| = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta q}{\varepsilon_a \Delta v} \right|$$

Бұл $\operatorname{div} \underline{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_a}$ береді

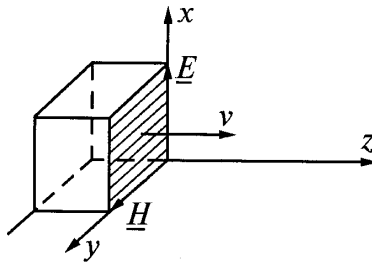
$$\text{Немесе } \operatorname{div} \underline{D} = \rho. \quad (8.82)$$

(8.41-суретте) көрсетілген, оң заряды бар көлемде, электр өрісінің кернеулігінің желісі таралады, ал теріс заряды бар көлемде зарядтар қосылады.



(8.41-сурет)

Табылған формула Максвелдың екінші теңдеуінің салдары.
5. Умова – Пойтинг теоремасы.



8.42-сурет

Умова-Пойтинг теоремасы өрістегі энергетикалық байланыстарды жазады, санды мөлшерді және қуат ағыны жүріс бағытын ескіріп (8.42-сурет) dt уақытта, s ауданынан, E мен H тармақтар жазықтығына перпендикулярлы, $dW = w_0 s c dt$, энергиясы өтеді

Онда $w_0 = w_y + w_z = \frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2}$ - энергия көлемді

ТЫҒЫЗДЫҒЫ

$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_a \epsilon_a}}$ - толқының таратылу жылдамдығы

$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{M_a}{H_a}}$ ескеріп, жазамыз: $W_0 = \frac{EH}{C} s dt$

$$\text{Онда } dW = \frac{EH}{c} sdt$$

$$\text{Энергия тығыздығы } \Pi = \frac{dW}{sdt} = EH.$$

Π, E, H үш есе координат жүйесіндегі елестетуге болады: егер де \underline{E} тармағын x осімен бағыттаса, \underline{H} - y осімен жіберсе, $\underline{\Pi}$ тармағы, z осімен бағытталады. $\underline{\Pi}$ тармағын Пойтинг тармағы деп атайды және жазады $\underline{\Pi} = [\underline{E} \underline{H}]$.

Ол E және H векторлармен оң жүрісті жүйе құрады, яғни бұраманы E деп K бағытына аз бұрышпен айналдырып, бұраманың қозғалу бағытымен беттесетін Π тармақ бағытын табамыз.

Энергия ағынының толық қуаты, Пойтинг тармақтар ағынына тең, жазықтықтан өтіп, сол көлемді шектейді

$$P = -\oint_S \underline{\Pi} \underline{ds} \quad (8.83)$$

(8.83) формуладан, сол көлемдегі қуатты анықтауға болады.

Тармақтар көбейтіндісі алдындағы минус белгісінің, дұрыс мағынасын көрсетеді. Егер электромагнитті өріс уақытымен өзгермесе, Умова-Пойтинг теоремасын мына түрде жазамыз.

$$-\oint_S \underline{n} \underline{ds} = \int_V \gamma E^2 dv \quad (8.84)$$

Бұл, Джоуль-Ленц заңына сәйкес энергияны жылу түрінде бөліп шығарады. Егер де, өріс уақытымен өзгерсе, Пойтинг тармақ ағыны

$$-\oint_S \underline{\Pi} \underline{ds} = \int_V \gamma E^2 dv + \frac{\partial}{\partial t} \int_V \left(\frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2} \right) dv \quad (8.85)$$

Екінші қосындысы – қуат, электромагнитті өріс энергияны көбейтуге жұмсалады.

6. Кешенді формадағы Максвелл теңдеуі.

Егер E мен H синусаидалды заңмен өзгерсе, Максвелл тендеуін кешенді формада жазуға болады.

$$\operatorname{rot} \underline{H} = \gamma \underline{E} + j\omega \varepsilon_a \underline{E}; \quad \operatorname{rot} \underline{E} = -j\omega \mu_a \underline{H}; \quad \operatorname{div} \underline{B} = 0; \\ \operatorname{div} \underline{D} = \rho.$$

8.4.8 Диэлектриктегі өзгермелі электромагнитті өріс

Идеалды диэлектрикте ток кернеулегі жоқ, оның параметрлері:

$$\gamma = 0; \quad \varepsilon = \text{const}; \quad \mu = \text{const}.$$

Сондықтан Максвелл тендеуінің түрі:

$$\operatorname{rot} \underline{H} = \varepsilon_a \frac{\partial \underline{E}}{\partial t}; \quad \operatorname{rot} \underline{E} = -\mu_a \frac{\partial \underline{H}}{\partial t};$$

$$\operatorname{div} \underline{B} = 0 \text{ немесе } \operatorname{div} \underline{H} = 0; \quad \operatorname{div} \underline{D} = \rho \text{ немесе } \operatorname{div} \underline{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_a}$$

Осы тендеулер кешенді түрде:

$$\operatorname{rot} \underline{H} = j\omega \varepsilon_a \underline{E}; \quad \operatorname{rot} \underline{E} = -j\omega \mu_a \underline{H}; \quad \operatorname{div} \underline{H} = 0;$$

$$\operatorname{div} \underline{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_a}.$$

Диэлектриктегі электромагнитті өріс қасиеттерін талдау үшін тік бұрышты координат жүйесіне тармақтар роторын орнатамыз:

$$\operatorname{rot} \underline{A} = \begin{vmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix} = \\ \underline{i} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + \underline{j} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \underline{k} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) = \\ = \operatorname{rot}_x \underline{A} + \operatorname{rot}_y \underline{A} + \operatorname{rot}_z \underline{A}.$$

Сол координат жүйесінде Максвеллдің бірінші және екінші тендеулерін жазамыз:

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = j\omega \varepsilon_a E_x; \quad \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega \varepsilon_a E_y;$$

$$\frac{\partial \underline{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \underline{H}_x}{\partial y} = j\omega \varepsilon_a \underline{E}_z; \quad (8.86)$$

$$\frac{\partial \underline{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \underline{E}_y}{\partial z} = -j\omega \mu_a \underline{H}_x; \quad \frac{\partial \underline{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial x} = -j\omega \mu_a \underline{H}_y;$$

$$\frac{\partial \underline{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \underline{E}_x}{\partial y} = -j\omega \mu_a \underline{H}_z. \quad (8.87)$$

Егер электромагнитті өріс z координат бойына таралса, E мен H векторлар x пен y координаттарға бағынышты емес, сол остердегі олардың көбейтіндісі нөлге тең:

$$\frac{\partial \underline{E}}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial \underline{E}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \underline{H}}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial \underline{H}}{\partial y} = 0. \quad (8.88)$$

(8.86) мен (8.87) ескеріп, табамыз:

$$\underline{E}_z = 0; \quad \underline{H}_z = 0. \quad (8.89)$$

Бұдан диэлектриктегі электромагнитті өрісінің бірінші қасиеті: E мен H тармақтары жазықтықта орналасқан, толқынның кең таралған бағытына перпендикулярлы, яғни электромагнитті өріс толқындары көлденең.

E мен H тармақтар өзара орналасуын білу үшін, E тармақты x осімен біріктіреміз, яғни $\underline{E} = E_x$ және $\underline{E}_y = 0$. Онда $\underline{H}_x = 0$ табамыз. Ол E мен H тармақтардың өзара перпендикулярлы екенін көрсетеді.

Электромагнитті толқындар таратылу жылдамдығын анықтау үшін (8.86) мен (8.87) қарастырамыз. Белгілі қасиеттерді ескеріп, табамыз:

$$-\frac{\partial \underline{H}}{\partial z} = j\omega \varepsilon_a \underline{E}; \quad (8.90)$$

$$\frac{\partial \underline{E}}{\partial z} = -j\omega \mu_a \underline{H}. \quad (8.91)$$

(8.90) мен (8.91) E -ге қатысты біріктіріп есептесек, табамыз:

$$\frac{\partial^2 \underline{E}}{\partial z^2} = -\omega^2 \mu_a \varepsilon_a \underline{E}. \quad (8.92)$$

(8.92) жекеше есептесе, мінездемеленген теңдеу түрі

$$p^2 = -\omega^2 \mu_a \varepsilon_a.$$

Оның түбірі:

$$p_{1,2} = \pm j\omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} \quad (8.93)$$

немесе

$$p_{1,2} = \pm(\alpha + j\beta), \quad (8.94)$$

α - өшу коэффициенті

β - фаза коэффициенті

(8.93) пен (8.94) салыстырып, тұжырымдаймыз, мінсіз диэлектрикте электромагнитті толқын таралуының фазалы жылдамдығы $c = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu_a \varepsilon_a}}$

Ортаның диэлектрикті және магнитті қасиетіне байланысты. Электромагнитті толқын ұзындығы $\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{c}{f}$.

(8.92) теңдеуді жалпы есептеумен, табамыз:

$$\underline{E} = \underline{A}_1 e^{p_1 z} + \underline{A}_2 e^{p_2 z}. \quad (8.95)$$

(8.95) пен (8.91) магнитті өріс кернеулігіне қатысты есептеуден табатынымыз:

$$\underline{H} = -\frac{\underline{A}_1}{\sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}} e^{p_1 z} + \frac{\underline{A}_2}{\sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}} e^{p_2 z}. \quad (8.96)$$

Онда тікелей толқындар:

$$\underline{E} = \underline{A}_2 e^{p_2 z} = \underline{A}_2 e^{-j\omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} z};$$

$$\underline{H} = \frac{\underline{A}_2}{\sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}} e^{p_2 z} = \frac{\underline{A}_2}{\sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}} e^{-j\omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} z}.$$

Бұдан толқынды кедергі:

$$\underline{Z}_r = \frac{\underline{E}}{\underline{H}} = \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}, \quad (8.97)$$

Яғни, бұл затты. Бұл қорек көзінен қашықтағы бөлікте электр және магнитті өріс кернеулігінің бір фазада болатынын білдіреді. (8.97) табамыз:

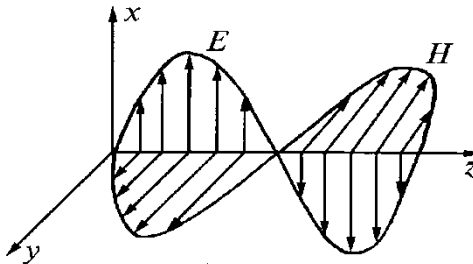
$$\frac{\varepsilon_a E^2}{2} = \frac{\mu_a H^2}{2},$$

Яғни, электр және магнитті өріс энергиясы көлемдік тығыздығы тең (8.95) (8.96) теңдеулерден, кернеуліктің лездік мағынасын жазуға болады:

$$E = \sqrt{2} A_1 \sin\left(\omega t + \frac{\omega}{c} z\right) + \sqrt{2} A_2 \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c} z\right);$$

$$H = \sqrt{2} \frac{A_1}{Z_B} \sin\left(\omega t + \frac{\omega}{c} z\right) + \sqrt{2} \frac{A_2}{Z_B} \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c} z\right).$$

E мен H кеңістіктегі бейнелеуі (8.43-суретте) көрсетілген



8.43-сурет

8.4.4 Жоғалуы бар диэлектриктегі өзгермелі электромагнитті өріс

Жоғалуы бар жетілмеген диэлектрикте мөлшерлі өтімділігі нөлге тең емес, Максвелл теңдеуі мына түрде болады:

$$\text{rot} \underline{H} = \gamma \underline{E} + j\omega \varepsilon_a \underline{E}; \quad \text{rot} \underline{E} = -j\omega \mu_a \underline{H}; \quad \text{div} \underline{H} = 0; \quad \text{div} \underline{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_a}.$$

Мінсіз диэлектриктен өзгешілігі - тоқ тығыздығында жылжитын тоқ құрамасынан басқа өткізгіш тоғы бар:

$$\underline{\delta} = \underline{\delta}_{\text{пр}} + \underline{\delta}_{\text{см}} = \gamma \underline{E} + j\omega \varepsilon_0 \underline{\varepsilon}_{\text{пр}} \underline{E}. \quad (8.98)$$

Немесе

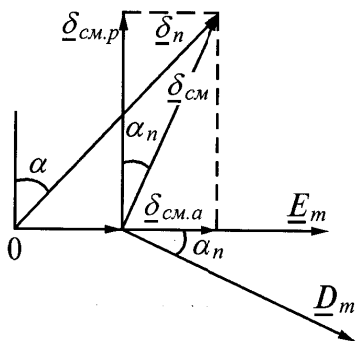
$$\underline{\delta} = (\gamma + j\omega \varepsilon_0 \underline{\varepsilon}_{\text{пр}}) \underline{E} = \underline{\gamma}_0 \underline{E}, \quad (8.99)$$

$\underline{\gamma}_0$ – кешенді электрлік өтімділік және

$$\underline{\delta} = j\omega \varepsilon_0 \left(\underline{\varepsilon}_{\text{пр}} - \frac{j\gamma}{\omega \varepsilon_0} \right) \underline{E} = j\omega \varepsilon_0 \underline{\varepsilon} \underline{E}, \quad (8.100)$$

Бұнда $\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}_{\text{пр}} - \frac{j\gamma}{\omega \varepsilon_0} = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon'(1 - jtg\alpha)$.

(8.99) және (8.100) формуладағы, $\underline{\varepsilon}$ - толық кешенді диэлектрикалы өтімділік, ал $tg\alpha = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ -ті диэлектриктегі толық бұрыш жоғалу тангенсі. (8.99) бен (8.100) салыстырып табамыз:
 $\underline{\gamma}_0 = j\omega \varepsilon_0 \underline{\varepsilon}$



8.44-сурет

(8.44-суретте), (8.98) формулаға сәйкес тоқ тығыздығының тармақты диаграммасы берілген. Бұнда: тоқ өтімділік тығыздығы $\underline{\delta} = \gamma \underline{E}$, тоқ жылжуының тығыздығы $\underline{\delta}_{\text{см}} = j\omega \varepsilon_0 \underline{\varepsilon} \underline{E}$, активті

құрамасы бар $\underline{\delta}_{\text{см}} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon' \text{tg} \alpha \underline{E}$ және реактивті құрамалары бар $\underline{\delta}_{\text{см.р}} = j \omega \varepsilon_0 \varepsilon' \underline{E}$.

Диаграммадан көруге болады, α бұрышы α_n бұрышынан көп, себебі жоғалу толық бұрышы, жылу энергиясын ескереді, өтімділік және полярлау тоқтарының өзгермелі электр өрісінде өтуіне

$$\underline{S}_0 = \underline{E} \underline{\delta}_n = \underline{\gamma} E^2 = \omega \varepsilon_0 \varepsilon' \text{tg} \alpha E^2 - \omega \varepsilon_0 \varepsilon' E^2 = p_0 - j q_0$$

$$\underline{S}_0 = \underline{E} \underline{\delta}_n = \underline{\gamma} E^2 = \omega \varepsilon_0 \varepsilon' \text{tg} \alpha E^2 - \omega \varepsilon_0 \varepsilon' E^2 = p_0 - j q_0$$

катыстылығы. Бір көлемдегі толық қуат кешені.

Бұл қуаттың затты бөлігі жылуға өзгеретін активті қуат болады:

$$p_0 = \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 = 55,5 \cdot 10^{-12} \varepsilon'' f E^2$$

Немесе

$$p_0 = \omega \varepsilon_0 \varepsilon' \text{tg} \alpha E^2 = 55,5 \cdot 10^{-12} \varepsilon' \text{tg} \alpha f E^2.$$

Мұнда, бұрынырақ өрістің кернеулігінің амплитудалы мағынасы қолданылған.

Жетілмеген диэлектриктегі электромагнитті толқын параметрлері:

Таратылу коэффициенті

$$\underline{\gamma} = \alpha \pm j \beta = \sqrt{j \omega \mu_a (\gamma + j \omega \varepsilon_a)};$$

Өшу коэффициенті

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha} - 1 \right)};$$

Фаза коэффициенті

$$\beta = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{\gamma^2}{\omega^2 \varepsilon_a^2} + 1} - 1 \right)};$$

Немесе

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} + 1 \right)}$$

Толқынды кедергі

$$\underline{Z}_B = Z_B e^{j\varphi_B} = \frac{j\omega \mu_a}{\underline{\gamma}};$$

Толқын ұзындығы

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{c}{f};$$

Фазалы жылдамдық

$$c = \frac{\omega}{\beta} = \lambda f.$$

8.4.5 Өткізгіш ортадағы өзгермелі электромагнитті өріс

Өткізгіш ортада жылжымалы тоқты ескермеуге болады. Онда Максвелл теңдеуінің түрі мынадай:

$$\operatorname{rot} \underline{H} = \underline{\gamma} \underline{E}; \operatorname{rot} \underline{E} = -j\omega \mu_a \underline{H}; \operatorname{div} \underline{H} = 0; \operatorname{div} \underline{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_a}.$$

Бұл теңдеулерді біріктіріп есептеу магнитті өріс кернеулігіне қатысты, тармақтарды координаттың декартты жүйесіне қойсақ, табамыз:

$$\frac{\partial^2 \underline{H}}{\partial z^2} = j\omega \mu_a \underline{\gamma} \underline{H}.$$

Сипаттайтын теңдеулерді есептеу:

$$p^2 = j\omega^2 \mu_a \underline{\gamma};$$

Түбірі:

$$p_{1,2} = \pm \sqrt{j\omega \mu_a \underline{\gamma}}.$$

Сызықты теңдеуді жалпы есептеу.

$$\underline{H} = \underline{A}_1 e^{p_1 z} + \underline{A}_2 e^{p_2 z}.$$

$p_1 > 0$, балғандықтан, $\underline{A}_1 = 0$, $z = 0$ шекаралық жағдайды ескеріп

$$\underline{A}_2 = \underline{H}(0) = \underline{H} e^{j\psi}.$$

Онда

$$\underline{H} = H_0 e^{j\psi} e^{p_2 z}$$

$$p_2 = \sqrt{j\omega\mu_a\gamma} = \sqrt{\frac{\omega\mu_a\gamma}{2}} + j\sqrt{\frac{\omega\mu_a\gamma}{2}} = \alpha + j\beta$$

Бұдан көретініміз, өшу және фаза коэффициенттері тең:

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu_a\gamma}{2}}$$

Магнитті өріс кернеулігінің түрі:

$$\underline{H} = H_0 e^{j\psi} e^{-\alpha z} z e^{-j\beta z}$$

Оның лездік мағынасы

$$H = \sqrt{2} H_0 e^{-\alpha z} \sin(\omega t + \psi - \beta z)$$

Электр өрісінің кернеулігі:

$$\underline{E} = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial H}{\partial z} = \sqrt{\frac{\omega\mu_a}{\gamma}} H_0 e^{-\alpha z} z e^{j\left(\varphi + \frac{\pi}{4} - \beta z\right)}$$

Оның лездік мағынасы:

$$e = \sqrt{2} \sqrt{\frac{\omega\mu_a}{\gamma}} H_0 e^{-\alpha z} \sin(\omega t + \psi + 45^\circ - \beta z)$$

Қорытынды:

1. Диэлектриктен өзгешілігі, өткізгіш ортадағы өріс кернеулігі ортаның тереңдігіне экспоненциалды заңмен азаяды.

2. Кернеуліктің бастапқы фазасы z координатта өзгереді, ал электр өрісінің кернеулігі кез келген нүктеде фаза бойынша магнитті өріс кернеулігінен озады.

3. λ толқын ұзындығында, оның фазасы өзгереді

$$\beta z = \beta \lambda = \beta \frac{2\pi}{\beta} = 2\pi$$

Өткізгіш ортадағы электромагнитті толқын параметрлері:

$$\text{Толқынды кедергі: } \underline{Z}_B = \sqrt{\frac{\omega\mu_a}{\gamma}} e^{j\frac{\pi}{4}}$$

$$\text{Толқын ұзындығы } \lambda = 2\sqrt{\frac{\pi}{f\mu_a\gamma}};$$

Толқынның таралуының фазалы жылдамдығы

$$c = 2\sqrt{\frac{f\pi}{\mu_a\gamma}};$$

Кіру тереңдігі:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_a \gamma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_a \gamma}}.$$

$z = \sigma$ тереңдікте, электр және магнитті өрістегі кернеулік амплитудасы бетінен $e = 2,72$, есе азаяды. $z = \lambda$ тереңдікте, кернеулік азаяды $e^{-\alpha z} = e^{-\alpha \lambda} = e^{-2\pi} = \frac{1}{e^{6,28}} = \frac{1}{534}$, яғни 534 есе.

Тәжірибе бойынша өткізгіш ортаға өтетін толқын, толқын ұзындығының жартысынан аз .

Бақылау сұрақтары

1. Электрлік ығысу немесе электрлік индукция дегеніміз не? Формуласы қандай?
2. Электростатикалық өріс кернеулігін түсіндіріңіз және оның формуласын жазыңыз.
3. Пуассон және Лапласың теңдеулерін жазыңыз және осы теңдеудің физикалық мәнін түсіндіріңіз.
4. Электростатикалық өрістегі шекаралық шарттарды айтыңыз.
5. Екі сымды желілердің өрісін қалай есептейді?
6. Электр өрісіндегі Максвелл формулаларының бірінші және екінші тобыларының формулаларын жазыңыз.
7. Ом және Кирхгофтің екінші заңдарының формулаларын келтіріңіз.

8. Джоуль-Ленц заңы дифференциал түрі.
9. Толық ток заңдардың дифференциалды және интерралды түрлерін жазыңыз.
10. Магнит өрісінің вектор әлеуеті.
11. Вектр потенциалы үшін Пуассон теңдеуі.
12. Био-Савер-Лаплас заңы дегеніміз не?
13. Магнит өрісіндегі Максвеллдің бірінші және екінші теңдеулері.
14. Электромагнит өрістің теңдеулердің толық жүйесі.
15. Умов-Пойнтинг теориясының лездік мәндері.
16. Кешенді түрдегі Умов-Пойнтинг теориясы.
17. Өткізгіш ортаға арналған Максвеллдің теңдеулері.

ТЕСТ СҰРАҚТАРЫ

1. Реактивті қуат?

- A) Энергияның қайтымды түрі
- B) Энергияның қайтымсыз түрі
- C) Механикалық түрі
- D) Жылу энергиясы
- E) Дұрыс жауап жоқ

2. Контур дегеніміз не?

- A) Тұйықталған жол
- B) Түйіндердің қосылған нүктесі
- C) Тізбек бөлігі
- D) Тармақтардың қосылған нүктесі
- E) Екі түйінді қосатын тармақ

3. Әрқайсысының кедергісі 10 Ом, бес резистор қатар жалғанған электр тізбегінің балама кедергісін анықтаңыз.

- A) 2 Ом
- B) 1 Ом
- C) 4 Ом
- D) 6 Ом
- E) 3 Ом

4. Желілік сым дегеніміз не?

- A) Генератор мен жүктемені қосатын сым
- B) Нөлдік нүктемен жүктеменің нөлдік нүктесін қосатын сым
- C) Фазалар арасындағы сым
- D) Дұрыс жауап жоқ
- E) Бәрі дұрыс

5. Электр өрісінің энергиясының формуласы?

- A) $W = \frac{LI^2}{2}$
- B) $W = \frac{CU^2}{2}$

- C) $X_C = 1/\omega * c$
- D) $B_C = Wc$
- E) $U = I * Z$

6. Катушкалар тоғы сәйкес қысқыштары арқылы бағытас болса, онда олар қалай аталады?

- A) Тізбектей
- B) Сәйкес
- C) Параллель
- D) Сәйкес және қатар
- E) Тізбектей және қатар

7. R кедергілері тең үш резистор үшбұрыш сұлбасымен қосылған. Жұлдыз сұлбасына балама түрлендіргеннен кейін, жұлдыз "сәулелерінің" кедергілері неге тең болады?

- A) R
- B) R/2
- C) 2R
- D) 3 R
- E) R/3

8. Кернеу шығыны дегеніміз не?

- A) Кернеулердің геометриялық айырымы
- B) Кернеулердің қосындысы
- C) Дұрыс жауап жоқ
- D) Бәрі дұрыс

9. Токтың өзгеру заңдылығы $i = 14.1 \sin(314t + 45^\circ)$ А. Оның T периодының мәнін анықтаңыз.

- A) 0,1 мс
- B) 10 мс
- C) 20 мс
- D) 5 мс
- E) 15 мс

10. Сыйымдылық кедергінің өлшем бірлігі.

- A) Фарад
- B) Ом
- C) Генри
- D) Вольт
- E) Ватт

11. Сыйымдылығы $C=100\text{МКФ}$ конденсаторлы кернеу $u=50\sin(1000t+45^\circ)\text{В}$ заңдылығымен өзгереді.

Конденсатор арқылы ағатын токтың өзгеру заңдылығын анықтаңыз

- A) $I=5\sin(1000t+45^\circ)\text{А}$
- B) $I=5\sin(1000t+60^\circ)\text{А}$
- C) $I=5\sin(1000t-135^\circ)\text{А}$
- D) $I=4,5\sin(1000t-135^\circ)\text{А}$
- E) $I=4,5\sin(1000t+0^\circ)\text{А}$

12. Тізбектің ұштарының арасындағы кернеу $u=141\sin(314t+60^\circ)\text{В}$.

Ал тармақталған бөлігіндегі ток $i=7,07\sin(314t+30^\circ)\text{А}$. Тізбектің Q реактив қуатын анықтаңыз.

- A) 433 Вар
- B) 866 Вар
- C) 600 Вар
- D) 500 Вар
- E) 400 Вар

13. Әр қайсының экк-сі 5 В, ішкі кедергісі 0,5 Ом төрт бір типті электр энергиясы көздері қатар жалғанған. Осы батареяның қысқа тұйықталу режимі кезіндегі кернеуін анықтаңыз.

- A) 10 А
- B) 20 А
- C) 7,5 А
- D) 25 А
- E) 15 В

14. $R_{ab}=3$ Ом, $R_{bc}=2$ Ом, $R_{ca}=5$ Ом, кедергілері үшбұрыш сұлбасымен жалғанған. Балама түрлендіруден кейін кездегілері R_a , R_b , R_c жұлдыз сұлбасы алынды. R_a кедергісін анықтаңыз.

- A) 1,5 Ом
- B) 2,5 Ом
- C) 5 Ом
- D) 3 Ом
- E) 0,6 Ом

15. $R_{ab}=3$ Ом, $R_{bc}=2$ Ом, $R_{ca}=5$ Ом, кедергілері үшбұрыш сұлбасымен жалғанған. Балама түрлендіруден кейін кездегілері R_a , R_b , R_c жұлдыз сұлбасы алынды. R_b кедергісін анықтаңыз.

- A) 1,5 Ом
- B) 2,5 Ом
- C) 5 Ом
- D) 3 Ом
- E) 0,6 Ом

16. $R_{ab}=3$ Ом, $R_{bc}=2$ Ом, $R_{ca}=5$ Ом, кедергілері үшбұрыш сұлбасымен жалғанған. Балама түрлендіруден кейін кездегілері R_a , R_b , R_c жұлдыз сұлбасы алынды. R_c кедергісін анықтаңыз.

- A) 1,5 Ом
- B) 2,5 Ом
- C) 5 Ом
- D) 3 Ом
- E) 0,6 Ом

17. $R_a=3$ Ом, $R_b=2$ Ом, $R_c=5$ Ом, кедергілері жұлдыз сұлбасымен жалғанған. Балама түрлендіруден кейінгі кездегілері R_{ab} , R_{bc} , R_{cf} үшбұрыш сұлбасы алынды. R_{ab} кедергісін анықтаңыз.

- A) 9 Ом
- B) 25 Ом

- C) 5 Ом
- D) 13 Ом
- E) 12 Ом

18. $R_a=3$ Ом, $R_b=2$ Ом, $R_c=5$ Ом, кедергілері жұлдыз сұлбасымен жалғанған. Балама түрлендіруден кейінгі кездегілері R_{ab} , R_{bc} , R_{cf} үшбұрыш сұлбасы алынды. R_{bc} кедергісін анықтаңыз.

- A) 9 Ом
- B) 25 Ом
- C) 5 Ом
- D) 13 Ом
- E) 12 Ом

19. R кедергілері тең үш резистор үшбұрыш сұлбасымен қосылған. Жұлдыз сұлбасына балама түрлендіргеннен кейін жұлдыз "сәулелерінің" кедергілері неге тең болады?

- A) R
- B) $R/2$
- C) $2R$
- D) $3R$
- E) $R/3$

20. R кедергілері тең үш резистор жұлдыз сұлбасымен қосылған. Үшбұрыш сұлбасына балама түрлендіргеннен кейін үшбұрыш қабырғаларының кедергілері неге тең болады?

- A) R
- B) $R/2$
- C) $2R$
- D) $3R$
- E) $R/3$

21. Токтың өзгеру заңдылығы $i=14.1 \sin(314t+45^\circ)$ А. Оның T периодының мәнін анықтаңыз.

- A) 0,1 мс

- B) 10 мс
- C) 20 мс
- D) 5 мс
- E) 15 мс

22. Токтың өзгеру заңдылығы $i=14.1 \sin(314t+45^\circ)$ А. Оның f жиілігінің мәнін анықтаңыз.

- A) 100 Гц
- B) 50 Гц
- C) 25 Гц
- D) 40 Гц
- E) 150 Гц

23. Токтың өзгеру заңдылығы $i=14.1 \sin(314t+45^\circ)$ А. Оның I әсерлік мәнін анықтаңыз.

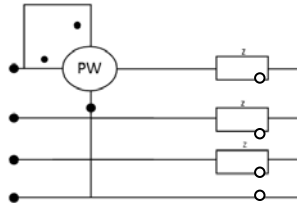
- A) 10 А
- B) 8 А
- C) 5 А
- D) 7 А
- E) 14,1 А

24. Үшбұрыш сұлбасы бойынша жалғанған симметриялы үш фазалы тұтынушы фазасының кедергісі $Z_1=24$ Ом. Басқа симметриялы тұтынушы жұлдызша сұлбасы бойынша жалғанған және сол торапқа қосылған. Егер, екі тұтынушылардың желілік тоқтары бірдей болғаны белгілі болса, екінші тұтынушының фаза Z_2 кедергісі қандай болу керек?

- A) $Z_2 = 6$ Ом
- B) $Z_2 = 8$ Ом
- C) $Z_2 = 24$ Ом
- D) $Z_2 = 7$ Ом
- E) $Z_2 = 9$ Ом

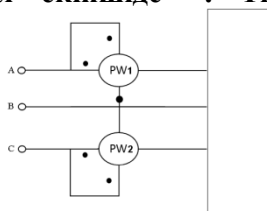
25. Егер ваттметрдің көрсетуі $P_w = 500$ Вт тең болған кезде, симметриялы тізбектің активті қуатының мәнін анықтаңыз.

- A) 500 Вт
- B) 1500 Вт
- C) 1000 Вт
- D) 3000 Вт
- E) 4000 Вт



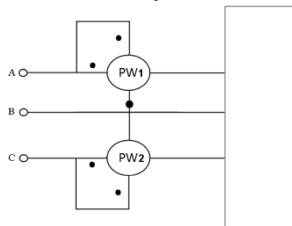
26. Үш фазалы үш сымды торапқа қосылған ваттметрлердің көрсетулері $P_{w1} = 500$ Вт, $P_{w2} = 200$ Вт тең. Полярлықтарын ауыстырып қосқыштарының белгілері: бірінші ваттметрде +, ал екіншіде -. Тізбекті активті анықтаңыз.

- B) 200 Вт
- C) 700 Вт
- D) 300 Вт
- E) 400 Вт



27. Үш фазалы үш сымды торапқа қосылған ваттметрлердің көрсетулері $P_{w1} = 500$ Вт, $P_{w2} = 200$ Вт тең. Екі ваттметрдің полярлықтарын ауыстырып қосқыштарының белгісі +. Тізбектің активті қуатын анықтаңыз.

- A) 500 Вт
- B) 200 Вт
- C) 700 Вт
- D) 300 Вт
- E) 400 Вт



28. Жалпақ рауышта синусоидалы токпен жаратылатын магнит өрісінің индукция векторы қалай бағытталған?

- A) оның жазықтығына параллель
- B) оның жазықтығына перпендикулярлы
- C) оның бағыты токтың бастапқы фазасына байланысты
- D) 45° бұрышында
- E) оның бағыты өз бетімен болуы мүмкін

29. Торапқа екі симметриялы емес үш фазалы және екі бір фазалы қабылдағыштары жалғану керек. Қоректену көзі симметриялы, оның желілік кернеуі $U_{жк} = 380 \text{ В}$, үш фазалы қабылдағыштардың фазалық кернеулері: $U_{\phi_1} = 220 \text{ В}$, $U_{\phi_2} = 380 \text{ В}$, бір фазалы қабылдағыштардың номинал кернеулері: $U_1 = 220 \text{ В}$, $U_2 = 380 \text{ В}$. Осы қабылдағыштар қандай сұлбалармен жалғанатындығын анықтаңыз.

- А) үш фазалы біріншісі «жұлдызша» сұлбасымен
- В) үш фазалы екіншісі «жұлдызша» сұлбасымен
- С) бір фазалы екіншісі тораптың желілік сымдарының біреуіне және бейтарап сымға
- Д) бір фазалы біріншісі екі желілік сымдарға
- Е) үш фазалы біріншісі бейтарап сыммен «жұлдызша» сұлбасымен

30. Торапқа екі симметриялы емес үш фазалы және екі бір фазалы қабылдағыштары жалғану керек. Қоректену көзі симметриялы, оның желілік кернеуі $U_{жк} = 380 \text{ В}$, үш фазалы қабылдағыштардың фазалық кернеулері: $U_{\phi_1} = 220 \text{ В}$, $U_{\phi_2} = 380 \text{ В}$, бір фазалы қабылдағыштардың номинал кернеулері: $U_1 = 220 \text{ В}$, $U_2 = 380 \text{ В}$. Осы қабылдағыштардың қандай сұлбалармен жалғанатындығын анықтаңыз.

- А) үш фазалы біріншісі «үшбұрыш» сұлбасымен
- В) үш фазалы екіншісі «үшбұрыш» сұлбасымен
- С) бір фазалы екіншісі тораптың желілік сымдарының біреуіне және бейтарап сымға
- Д) бір фазалы біріншісі екі желілік сымдарға
- Е) үш фазалы біріншісі бейтарап сыммен «жұлдызша» сұлбасымен

31. Торапқа екі симметриялы емес үш фазалы және екі бір фазалы қабылдағыштары жалғану керек. Қоректену көзі симметриялы, оның желілік кернеуі $U_{жк} = 380 \text{ В}$, үш фазалы қабылдағыштардың фазалық кернеулері: $U_{\phi_1} = 220 \text{ В}$, $U_{\phi_2} = 380 \text{ В}$, бір фазалы қабылдағыштардың номинал кернеулері: $U_1 = 220 \text{ В}$, $U_2 = 380 \text{ В}$. Осы қабылдағыштардың қандай сұлбалармен жалғанатындығын анықтаңыз.

- А) үш фазалы біріншісі «үшбұрыш» сұлбасымен
- В) үш фазалы екіншісі «жұлдызша» сұлбасымен

- C) бір фазалы біріншісі екі желілік сымдарға
- D) бір фазалы екіншісі екі желілік сымдарға
- E) үш фазалы біріншісі «жұлдызша» сұлбасымен

32. Торапқа екі симметриялы емес үш фазалы және екі бір фазалы қабылдағыштары жалғану керек. Қоректену көзі симметриялы, оның желілік кернеуі $U_{жк} = 380 \text{ В}$, үш фазалы қабылдағыштардың фазалық кернеулері: $U_{\phi_1} = 220 \text{ В}$, $U_{\phi_2} = 380 \text{ В}$, бір фазалы қабылдағыштардың номинал кернеулері: $U_1 = 220 \text{ В}$, $U_2 = 380 \text{ В}$. Осы қабылдағыштардың қандай сұлбалармен жалғанатындығын анықтаңыз.

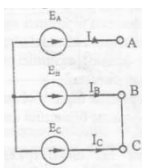
- A) үш фазалы біріншісі «үшбұрыш» сұлбасымен
- B) үш фазалы екіншісі «жұлдызша» сұлбасымен
- C) бір фазалы біріншісі тораптың желілік сымдарының біреуіне және бейтарап сымға
- D) бір фазалы екіншісі тораптың желілік сымдарының біреуіне және бейтарап сымға
- E) үш фазалы біріншісі «жұлдызша» сұлбасымен

33. Үш фазалы токтардың жүйесінен жаратылған, магнит өрісінің айналу жиілігі неге тәуелді.

- A) тек қана орауыштар токтарының жиілігінен
- B) орамалардың полюс жұптарының санынан және токтардың жиілігінен
- C) токтардың амплитудасынан
- D) кернеулердің бастапқы фазаларынан
- E) орауыштардың геометриялық өлшемдерінен

34. Бос жүріс режимінде жұмыс істейтін үш фазалы генераторда В және С фазаларында фазааралық қысқа тұйықталу орын алды. А фазасындағы ток нөлге, ал В және С фазаларында – 150 А тең. Құрылған I_A , I_B , I_C , симметриялы емес векторлардың жүйесінде фазалардың нөлдік реттілігі тогының құраушысы тең:

- A) 120 А
- B) 0 А
- C) 173 А
- D) 450 А
- E) 50 А



35. Симметриялы емес үш фазалы жүйенің фазалық кернеулердің әрекеттік мәндерінің белгілі кешендері бойынша: $\dot{U}_A = 210 \text{ В}$; $\dot{U}_B = 0$; $\dot{U}_C = 0$; тура реттілік кернеуінің \dot{U}_{A1} кешенін анықтаңыз.

- A) 110 В
- B) 210 В
- C) 173 В
- D) 70 В
- E) 0 В

36. Симметриялы емес үш фазалы жүйенің фазалық кернеулердің әрекеттік мәндерінің белгілі кешендері бойынша: $\dot{U}_A = 210 \text{ В}$; $\dot{U}_B = 0$; $\dot{U}_C = 0$; кері реттілік кернеуінің \dot{U}_{A2} кешенін анықтаңыз.

- A) 110 В
- B) 210 В
- C) 173 В
- D) 70 В
- E) 0 В

37. Симметриялы емес үш фазалы жүйенің фазалық кернеулердің әрекеттік мәндерінің белгілі кешендері бойынша: $\dot{U}_A = 210 \text{ В}$; $\dot{U}_B = 0$; $\dot{U}_C = 0$; кері реттілік кернеуінің \dot{U}_0 кешенін анықтаңыз.

- A) 110 В
- B) 210 В
- C) 173 В
- D) 70 В
- E) 0 В

38. Симметриялы құраушылардың берілген кешендері бойынша: $\dot{U}_{A1} = 70 \text{ В}$; $\dot{U}_{A2} = 70 \text{ В}$; $\dot{U}_0 = 70 \text{ В}$; симметриялы емес үш фазалы жүйенің \dot{U}_A кернеуін анықтаңыз.

- A) 110 В
- B) 210 В
- C) 173 В
- D) 70 В
- E) 0 В

39. Симметриялы құраушылардың берілген кешендері бойынша : $\dot{U}_{A1} = 70 \text{ В}$; $\dot{U}_{A2} = 70 \text{ В}$; $\dot{U}_0 = 70 \text{ В}$; симметриялы емес үш фазалы жүйенің \dot{U}_B кернеуін анықтаңыз.

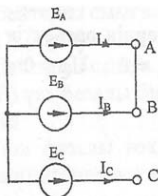
- A) 110 В
- B) 210 В
- C) 173 В
- D) 70 В
- E) 0 В

40. Симметриялы құраушылардың берілген кешендері бойынша: $\dot{U}_{A1} = 70 \text{ В}$; $\dot{U}_{A2} = 70 \text{ В}$; $\dot{U}_0 = 70 \text{ В}$; симметриялы емес үш фазалы жүйенің \dot{U}_C кернеуін анықтаңыз.

- A) 110 В
- B) 210 В
- C) 173 В
- D) 70 В
- E) 0 В

41. Бос жүріс режимінде жұмыс істейтін үш фазалы генераторда В және С фаза аралық қысқа тұйықталуы орын алды. С фазасындағы ток нөлге, ал А және В фазаларында – 150 А тең. Құрылған I_A, I_B, I_C симметриялы емес векторлардың жүйесінде фазалардың нөлдік реттілігі тоғының құраушысы тең:

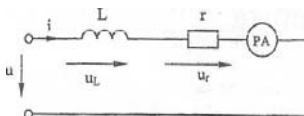
- A) 120 А
- B) 0 А
- C) 173 А
- D) 450 А
- E) 50 А



42. Сызықты электр тізбекке $u(t) = 60 + 100\sqrt{2} \sin 2 \omega t$ периодты синусоидалы кернеу берілген, бірінші гармониканың тоқтарына тізбектің кедергілерінің мәндері: $r = 6 \text{ Ом}$, $X_{L(1)} = 4 \text{ Ом}$, жүйесі магнитті электрлік амперметрдің көрсетуін анықтаңыз.

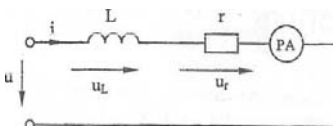
- A) 5 А

- B) 10 A
- C) 6 A
- D) 4,1 A
- E) 20 A



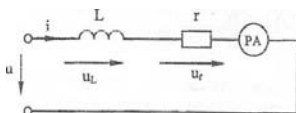
43. Сызықты электр тізбекке $u(t) = 60 + 100\sqrt{2} \sin 2 \omega t$ периодты синусоидалы кернеу берілген, бірінші гармониканың тоқтарына тізбектің кедергілерінің мәндері: $r = 6 \text{ Ом}$, $X_{L(1)} = 4 \text{ Ом}$, жүйесі электромагниттік амперметрдің көрсетуін анықтаңыз.

- A) 5 A
- B) 10 A
- C) 6 A
- D) 14,1 A
- E) 20 A



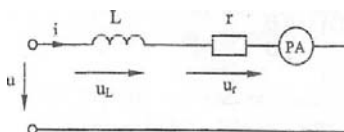
44. Сызықты электр тізбекке $u(t) = 60 + 100\sqrt{2} \sin 2 \omega t$ периодты синусоидалы кернеу берілген, бірінші гармониканың тоқтарына тізбектің кедергілерінің мәндері: $r = 6 \text{ Ом}$, $X_{L(1)} = 4 \text{ Ом}$, жүйесі электродинамикалық амперметрдің көрсетуін анықтаңыз.

- A) 5 A
- B) 10 A
- C) 6 A
- D) 14,1 A
- E) 20 A



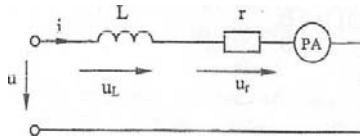
45. Сызықты электр тізбекке $u(t) = 60 + 100\sqrt{2} \sin 2 \omega t$ периодты синусоидалы кернеу берілген, бірінші гармониканың тоқтарына тізбектің кедергілерінің мәндері: $r = 6 \text{ Ом}$, $X_{L(1)} = 4 \text{ Ом}$, жүйесі ферродинамикалық амперметрдің көрсетуін анықтаңыз.

- A) 5 A
- B) 10 A
- C) 6 A
- D) 14,1 A
- E) 20 A



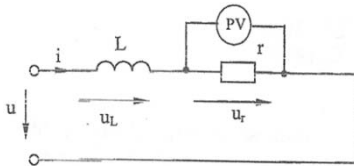
46. Сызықты электр тізбекке $u(t) = 60 + 100\sqrt{2} \sin 2 \omega t$ периодты синусоидалы кернеу берілген, бірінші гармониканың тоқтарына тізбектің кедергілерінің мәндері: $r = 6 \text{ Ом}$, $X_{L(1)} = 4 \text{ Ом}$, жүйесі жылулық амперметрдің көрсетуін анықтаңыз.

- A) 5 A
- B) 10 A
- C) 6 A
- D) 14,1 A
- E) 20 A



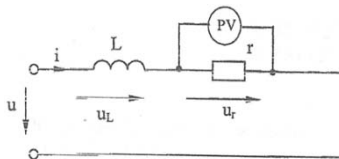
47. Сызықты электр тізбекке $u(t) = 60 + 100\sqrt{2} \sin 2 \omega t$ периодты синусоидалы кернеу берілген, бірінші гармониканың тоқтарына тізбектің кедергілерінің мәндері: $r = 6 \text{ Ом}$, $X_{L(1)} = 4 \text{ Ом}$, жүйесі ферродинамикалық вольтметрдің көрсетуін анықтаңыз.

- A) 84,6 B
- B) 100 B
- C) 80 B
- D) 150 B
- E) 141 B



48. Сызықты электр тізбекке $u(t) = 60 + 100\sqrt{2} \sin 2 \omega t$ периодты синусоидалы кернеу берілген, бірінші гармониканың тоқтарына тізбектің кедергілерінің мәндері: $r = 6 \text{ Ом}$, $X_{L(1)} = 4 \text{ Ом}$, жүйесі магнитоэлектрлік вольтметрдің көрсетуін анықтаңыз.

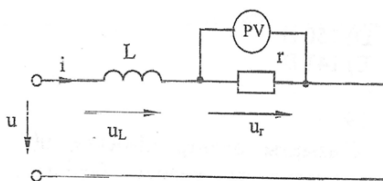
- A) 60 B
- B) 100 B
- C) 80 B
- D) 150 B
- E) 141 B



49. Сызықты электр тізбекке $u(t) = 60 + 100\sqrt{2} \sin 2 \omega t$ периодты синусоидалы кернеу берілген, бірінші гармониканың тоқтарына тізбектің кедергілерінің мәндері: $r = 6 \text{ Ом}$, $X_{L(1)} = 4 \text{ Ом}$, жүйесі электромагниттік вольтметрдің көрсетуін анықтаңыз.

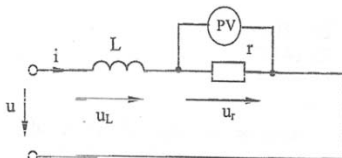
- A) 84,6 B

- B) 100 В
- C) 80 В
- D) 150 В
- E) 141 В



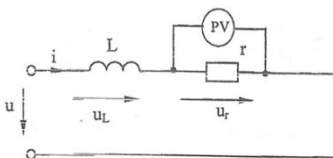
50. Сызықты электр тізбекке $u(t) = 60 + 100\sqrt{2} \sin 2 \omega t$ периодты синусоидалы кернеу берілген, бірінші гармониканың тоқтарына тізбектің кедергілерінің мәндері: $r = 6 \text{ Ом}$, $X_{L(1)} = 4 \text{ Ом}$, жүйесі жылулық вольтметрдің көрсетуін анықтаңыз.

- A) 60 В
- B) 84,6 В
- C) 80 В
- D) 150 В
- E) 141 В



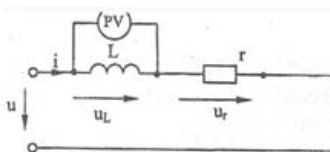
51. Сызықты электр тізбекке $u(t) = 60 + 100\sqrt{2} \sin 2 \omega t$ периодты синусоидалы кернеу берілген, бірінші гармониканың тоқтарына тізбектің кедергілерінің мәндері: $r = 6 \text{ Ом}$, $X_{L(1)} = 4 \text{ Ом}$, жүйесі электромагниттік вольтметрдің көрсетуін анықтаңыз.

- A) 60 В
- B) 84,6 В
- C) 80 В
- D) 150 В
- E) 141 В



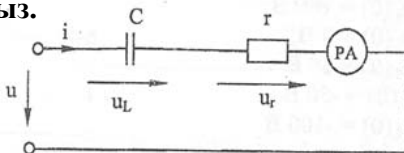
52. Сызықты электр тізбекке $u(t) = 60 + 100\sqrt{2} \sin 2 \omega t$ периодты синусоидалы кернеу берілген, бірінші гармониканың тоқтарына тізбектің кедергілерінің мәндері: $r = 6 \text{ Ом}$, $X_{L(1)} = 4 \text{ Ом}$, жүйесі магнитоэлектрлік вольтметрдің көрсетуін анықтаңыз.

- A) 60 В
- B) 84,6 В
- C) 80 В
- D) 150 В
- E) 0 В



53. Сзықты электр тізбекке $u(t) = 60 + 100\sqrt{2} \sin 2 \omega t$ периодты синусоидалы кернеу берілген, бірінші гармониканың тоқтарына тізбектің кедергілерінің мәндері: $r = 6 \text{ Ом}$, $X_{C(1)} = 4 \text{ Ом}$, жүйесі жылулық амперметрдің көрсетуін анықтаңыз.

- A) 5 А
- B) 10 А
- C) 6 А
- D) 14,1 А
- E) 20 А



54. Симметриялы үш фазалы тізбектердегі, периодты синусоидалы емес тоқтың реттігі $k = 3m$ тең, мұнда m кез келген оң сан, гармоникалық құраушылары жүйелерді құрайды:

- A) тура реттіліктің
- B) кері реттіліктің
- C) нөлдік реттіліктің
- D) тура және нөлдік реттіліктердің
- E) тура және кері реттіліктердің

55. Симметриялы үш фазалы тізбектердегі, периодты синусоидалы емес тоқтың реттігі $k = 3m + 1$ тең, мұнда m кез келген оң сан, гармоникалық құраушылары жүйелерді құрайды:

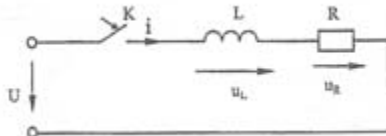
- A) тура реттіліктің
- B) кері реттіліктің
- C) нөлдік реттіліктің
- D) тура және нөлдік реттіліктердің
- E) тура және кері реттіліктердің

56. Симметриялы үш фазалы тізбектердегі, периодты синусоидалы емес тоқтың реттілігі $k = 3m + 2$ тең, мұнда m кез келген оң сан, гармоникалық құраушылары жүйелерді құрайды:

- A) тура реттіліктің
- B) кері реттіліктің
- C) нөлдік реттіліктің
- D) тура және нөлдік реттіліктердің
- E) тура және кері реттіліктердің

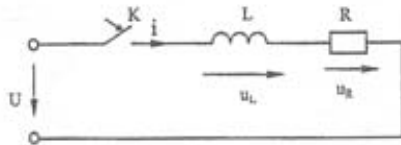
57. Параметрлері $U = 100 \text{ В}$, $R = 100 \text{ Ом}$, $L = 0,1 \text{ Гн}$ тұрақты тоқтың тізбегіндегі, тікелей коммутациядан кейінгі кедергідегі $u_R(0)$ кернеудің мәнін анықтаңыз.

- A) $u_R(0) = 100 \text{ В}$
- B) $u_R(0) = 0 \text{ В}$
- C) $u_R(0) = 50 \text{ В}$
- D) $u_R(0) = -50 \text{ В}$
- E) $u_R(0) = -100 \text{ В}$



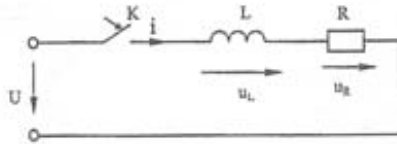
58. Параметрлері $U = 100 \text{ В}$, $R = 100 \text{ Ом}$, $L = 0,1 \text{ Гн}$ тұрақты тоқтың тізбегіндегі, тікелей коммутациядан кейінгі индуктивтіліктегі $u_L(0)$ кернеудің мәнін анықтаңыз.

- A) $u_L(0) = 100 \text{ В}$
- B) $u_L(0) = 0 \text{ В}$
- C) $u_L(0) = 50 \text{ В}$
- D) $u_L(0) = -50 \text{ В}$
- E) $u_L(0) = -100 \text{ В}$



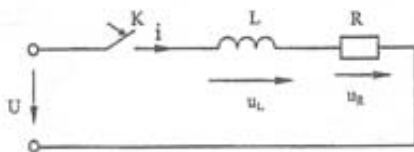
59. Параметрлері $U = 100 \text{ В}$, $R = 100 \text{ Ом}$, $L = 0,1 \text{ Гн}$ тұрақты тоқтың тізбегіндегі, тікелей коммутациядан кейінгі $i(0)$ кернеудің мәнін анықтаңыз.

- A) $i(0) = -1 \text{ А}$
- B) $i(0) = 1 \text{ А}$
- C) $i(0) = 0$
- D) $i(0) = 0,2 \text{ А}$
- E) $i(0) = -0,2 \text{ А}$



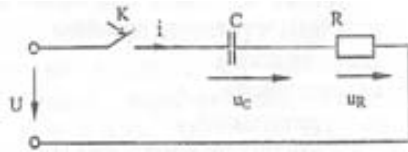
60. Параметрлері $U = 100 \text{ В}$, $R = 100 \text{ Ом}$, $C = 100 \text{ мкФ}$, $u_C(-0)=0$ тұрақты тоқтың тізбегіндегі, тікелей коммутациядан кейінгі сыйымдылықтағы $u_C(0)$ кернеудің мәнін анықтаңыз.

- A) $u_C(0) = 100 \text{ В}$
- B) $u_C(0) = 0 \text{ В}$
- C) $u_C(0) = 50 \text{ В}$
- D) $u_C(0) = -50 \text{ В}$
- E) $u_C(0) = -100 \text{ В}$



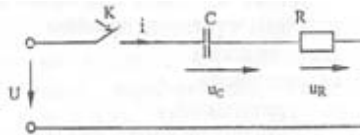
61. Параметрлері $U = 100 \text{ В}$, $R = 100 \text{ Ом}$, $C = 100 \text{ мкФ}$, $u_C(-0) = 0$ тұрақты тоқтың тізбегіндегі, тікелей коммутациядан кейінгі кедергідегі $u_R(0)$ кернеудің мәнін анықтаңыз.

- A) $u_R(0) = 100 \text{ В}$
- B) $u_R(0) = 0 \text{ В}$
- C) $u_R(0) = 50 \text{ В}$
- D) $u_R(0) = -50 \text{ В}$
- E) $u_R(0) = -100 \text{ В}$



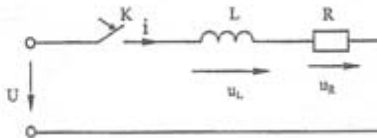
62. Параметрлері $U = 100 \text{ В}$, $R = 100 \text{ Ом}$, $C = 100 \text{ мкФ}$, $u_C(-0) = 0$ тұрақты тоқтың тізбегіндегі, тікелей коммутациядан кейінгі $i(0)$ кернеудің мәнін анықтаңыз.

- A) $i(0) = 1 \text{ А}$
- B) $i(0) = 0$
- C) $i(0) = -1 \text{ А}$
- D) $i(0) = 0,5 \text{ А}$
- E) $i(0) = -0,5 \text{ А}$



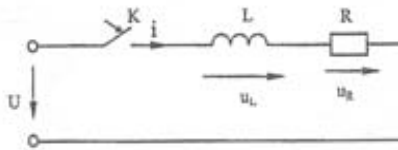
63. Параметрлері $u = 141\sin(1000t + 45^\circ) \text{ В}$, $R = 100 \text{ Ом}$, $L = 0,1 \text{ Гн}$ синусоидалы тоқтың тізбегіндегі, тікелей коммутациядан кейінгі кедергідегі $u_R(0)$ кернеудің мәнін анықтаңыз.

- A) $u_R(0) = 100 \text{ В}$
- B) $u_R(0) = 0 \text{ В}$
- C) $u_R(0) = 50 \text{ В}$
- D) $u_R(0) = -50 \text{ В}$
- E) $u_R(0) = -100 \text{ В}$



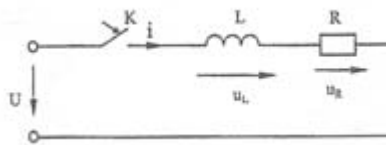
64. Параметрлері $u = 141\sin(1000t + 45^\circ) \text{ В}$, $R = 100 \text{ Ом}$, $L = 0,1 \text{ Гн}$ синусоидалы тоқтың тізбегіндегі, тікелей индуктивтіліктегі кейінгі кедергідегі $u_L(0)$ кернеудің мәнін анықтаңыз.

- A) $u_L(0) = 100 \text{ В}$
- B) $u_L(0) = 0 \text{ В}$
- C) $u_L(0) = 141 \text{ В}$
- D) $u_L(0) = -50 \text{ В}$
- E) $u_L(0) = -100 \text{ В}$



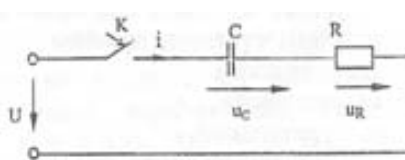
65. Параметрлер $iu = 141\sin(1000t + 45^\circ)$ В, $R = 100$ Ом, $L = 0,1$ Гн синусоидалы тоқтың тізбегіндегі, тікелей коммутациядан кейінгі $i(0)$ тоқтың мәнін анықтаңыз.

- A) $i(0) = 1$ А
- B) $i(0) = 0$ А
- C) $i(0) = -1$ А
- D) $i(0) = 0,5$ А
- E) $i(0) = -0,5$ А



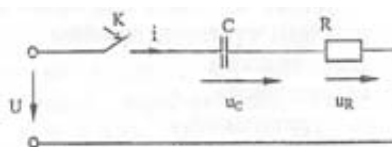
66. Параметрлері $u = 141\sin(1000t + 45^\circ)$ В, $R = 100$ Ом, $C = 100$ мкФ $u_C(0)=0$ синусоидалы тоқтың тізбегіндегі, тікелей коммутациядан кейінгі $i(0)$ тоқтың мәнін анықтаңыз.

- A) $i(0) = 1.41$ А
- B) $i(0) = 0$ А
- C) $i(0) = -1$ А
- D) $i(0) = 0,5$ А
- E) $i(0) = 1$ А



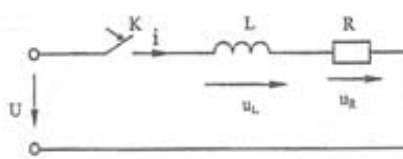
67. Параметрлері $u = 141\sin(1000t + 45^\circ)$ В, $R = 100$ Ом, $C = 100$ мкФ $u_C(0)=0$ синусоидалы тоқтың тізбегіндегі, тікелей сыйымдылықтағы $u_C(0)$ тоқтың мәнін анықтаңыз.

- A) $u_C(0) = 100$ В
- B) $u_C(0) = 0$ В
- C) $u_C(0) = 50$ В
- D) $u_C(0) = -50$ В
- E) $u_C(0) = -100$ В



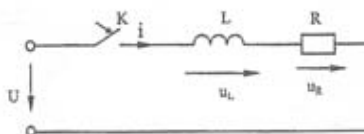
68. Параметрлері $U = 100$ В, $R = 100$ Ом, $L = 0,1$ Гн тұрақты тоқтың тізбегінде, $i(t)$ өтпелі тоқты анықтаңыз.

- A) $i = 1 - e^{-1000t}$ А
- B) $i = e^{-1000t}$ А
- C) $i = 1 - e^{-100t}$ А
- D) $i = 2 + e^{1000t}$ А
- E) $i = e^{1000t}$ А



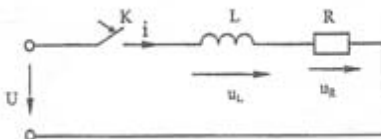
69. Параметрлері $U = 100$ В, $R = 100$ Ом, $L = 0,1$ Гн тұрақты тоқтың тізбегіндегі, $u_R(t)$ өтпелі тоқты анықтаңыз.

- A) $u_R = 100 - 100e^{-1000t}$ В
- B) $u_R = 100 e^{-1000t} 100e^{-1000t}$ В
- C) $u_L = -100e^{-100t}$ В
- D) $u_R = 200 - 100 e^{1000t}$ В
- E) $u_R = 100 e^{1000t}$ В



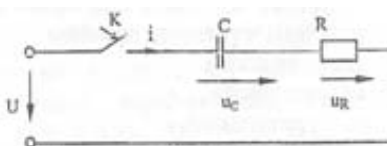
70. Параметрлері $U = 100$ В, $R = 100$ Ом, $L = 0,1$ Гн тұрақты тоқтың тізбегіндегі, $u_L(t)$ өтпелі тоқты анықтаңыз.

- A) $u_L = 100 - 100e^{-1000t}$ В
- B) $u_L = 100 e^{-1000t}$ В
- C) $u_L = -100e^{-100t}$ В
- D) $u_L = 200 - 100 e^{1000t}$ В
- E) $u_L = 100 e^{1000t}$ В



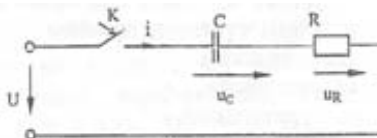
71. Параметрлері $U=100$ В, $R=100$ Ом, $C=100$ мкФ, $u_C(-0)=0$ тұрақты тоқтың тізбегіндегі, $i(t)$ өтпелі тоқты анықтаңыз.

- A) $i = 1 - e^{-1000t}$ А
- B) $i = e^{-1000t}$ А
- C) $i = 1 - e^{-100t}$ А
- D) $i = 2 + e^{1000t}$ А
- E) $i = e^{1000t}$ А



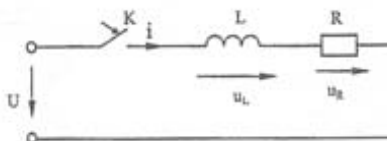
72. Параметрлері $U=100$ В, $R=100$ Ом, $C=100$ мкФ, $u_C(-0)=0$ тұрақты тоқтың тізбегіндегі, $u_R(t)$ өтпелі тоқты анықтаңыз.

- A) $u_R = 100 - 100e^{-1000t}$ В
- B) $u_R = 100 e^{-1000t}$ В
- C) $u_R = 100 - 100e^{-100t}$ В
- D) $u_R = 200 - 100 e^{1000t}$ В
- E) $u_R = 100 e^{1000t}$ В



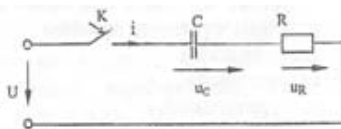
73. Параметрлері $U=100$ В, $R=100$ Ом, $C=100$ мкФ, $u_C(-0)=0$ тұрақты тоқтың тізбегіндегі, $u_C(t)$ өтпелі тоқты анықтаңыз.

- A) $u_C = 100 - 100e^{-1000t}$ В
- B) $u_C = 100 e^{-1000t}$ В
- C) $u_C = 100 - 100e^{-100t}$ В
- D) $u_C = 200 - 100 e^{1000t}$ В
- E) $u_C = 100 e^{1000t}$ В



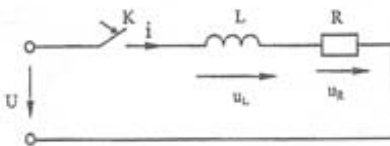
74. Тұрақты тоқтың тізбегі үшін тоқтың $I(p)$ операторлық кескінін анықтаңыз.

- A) $I(p) = \frac{U}{p(R+pL)}$
 B) $I(p) = -\frac{LU}{p(R+pL)}$
 C) $I(p) = \frac{pU}{(R+pL)}$
 D) $I(p) = \frac{U}{2R+pL}$
 E) $I(p) = \frac{U}{R+pL}$



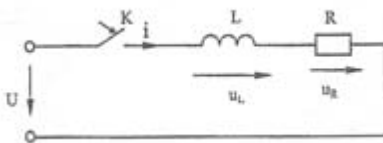
75. Тұрақты тоқтың тізбегі үшін тоқтың $U_R(p)$ кернеудің операторлық кескінін анықтаңыз.

- A) $U_R(p) = \frac{UR}{p(R+pL)}$
 B) $U_R(p) = -\frac{UR}{p(R+pL)}$
 C) $U_R(p) = \frac{UR}{R+pL}$
 D) $U_R(p) = \frac{U}{R+pL}$
 E) $U_R(p) = \frac{UL}{(2R+pL)}$



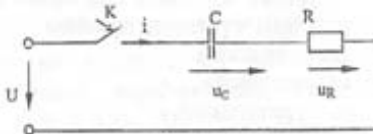
76. Тұрақты тоқтың тізбегі үшін тоқтың $U_L(p)$ кернеудің операторлық кескінін анықтаңыз.

- A) $U_L(p) = \frac{UL}{R+pL}$
 B) $U_L(p) = -\frac{UL}{R+pL}$
 C) $U_L(p) = \frac{UR}{R+pL}$
 D) $U_L(p) = \frac{U}{R+pL}$
 E) $U_L(p) = \frac{UL}{R+pL}$



77. Егер $u_C(-0)=0$ болған кезде, тұрақты тоқтың тізбегі үшін тоқтың $I(p)$ операторлық кескінін анықтаңыз.

- A) $I(p) = -\frac{UC}{pRC+1}$
 B) $I(p) = \frac{UC}{pRC+1}$
 C) $I(p) = \frac{U}{pRC+1}$



$$D) I(p) = \frac{U}{RC+1}$$

$$E) I(p) = \frac{U}{pRC+1}$$

78. Егер $u_C(-0)=0$ болған кезде, тұрақты токтың тізбегі үшін кедергідегі кернеудің $U_R(p)$ операторлық кескінін анықтаңыз.

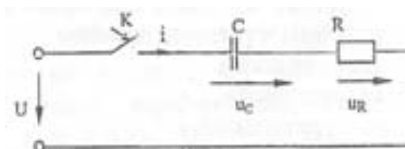
$$A) U_R(p) = -\frac{URC}{pRC+1}$$

$$B) U_R(p) = \frac{URC}{pRC+1}$$

$$C) U_R(p) = \frac{UR}{pRC+1}$$

$$D) U_R(p) = \frac{UR}{RC+1}$$

$$E) U_R(p) = \frac{U}{pRC+1}$$



79. Егер $u_C(-0)=0$ болған кезде, тұрақты токтың тізбегі үшін сыйымдылықтағы кернеудің $U_C(p)$ операторлық кескінін анықтаңыз.

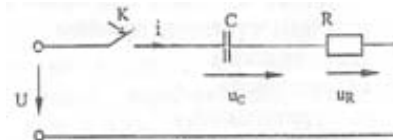
$$A) U_C(p) = -\frac{U}{p(pRC+1)}$$

$$B) U_C(p) = \frac{U}{p(pRC+1)}$$

$$C) U_C(p) = \frac{UR}{pRC+1}$$

$$D) U_C(p) = \frac{UR}{p(pRC+1)}$$

$$E) U_C(p) = \frac{U}{pRC+1}$$



80. Сызықты емес элементтердің вольтамперлік сипаттамалары: $i_1=au+bu^3$; $i_2=3au$. Кернеудің u қандай мәнінде элементтердің r_d динамикалық кедергілері бірдей болады?

$$A) \sqrt{\frac{a}{b}}$$

$$B) 0$$

$$C) \sqrt{\frac{a}{2b}}$$

$$D) \frac{2u}{b}$$

$$E) \sqrt{\frac{2a}{3b}}$$

81. Сызықты емес элементтердің вольтамперлік сипаттамалары: $i_1=au+bu^3$; $i_2=3au$. Кернеудің u қандай мәнінде элементтердің r_{CT} статикалық кедергілері бірдей болады?

$$A) \sqrt{\frac{2a}{b}}$$

$$B) 0$$

$$C) \sqrt{\frac{a}{2b}}$$

$$D) \frac{2u}{b}$$

$$E) \sqrt{\frac{2a}{3b}}$$

82. Сызықты емес элементтің вольтамперлік сипаттамасы: $i_1 = au + bu^3$ тендеуімен өрнектеледі. $u=0$ кернеуіндегі r_{CT} статикалық кедергісін анықтаңыз.

$$A) \frac{1}{a^2}$$

$$B) \frac{1}{a}$$

$$C) a + 3b$$

$$D) a$$

$$E) \frac{1}{a+3b}$$

83. Сызықты емес элементтің вольтамперлік сипаттамасы $i = u + bu^2$ тендеуімен өрнектеледі. $u=1V$ кернеуіндегі r_{CT} статикалық кедергісін анықтаңыз.

$$A) \frac{1}{a^2}$$

$$B) \frac{1}{a}$$

$$C) a + 3b$$

$$D) a$$

$$E) \frac{1}{1+b}$$

84. Сзықты емес элементтің вольтамперлік сипаттамасы $i=au + bu^3$ тендеуімен өрнектеледі. $u=0$ кернеуіндегі r_d динамикалық кедергісін анықтаңыз.

- A) $\frac{1}{a^2}$
- B) $\frac{1}{a}$
- C) $a + 3b$
- D) a
- E) $\frac{1}{a+b}$

85. Сзықты емес элементтің вольтамперлік сипаттамасы $i=au+bu^2$ тендеуімен өрнектеледі. $u=1В$ кернеуіндегі $r_{ст}$ статикалық кедергісін анықтаңыз.

- A) $\frac{1}{a^2}$
- B) $\frac{1}{a}$
- C) $a + 3b$
- D) a
- E) $\frac{1}{a+b}$

86. Сзықты емес элементтің вольтамперлік сипаттамасы $i=au+bu^3$ тендеуімен өрнектеледі. $u=1В$ кернеуіндегі r_d динамикалық кедергісін анықтаңыз.

- A) $\frac{1}{a^2}$
- B) $\frac{1}{a+3b}$
- C) $a + 3b$
- D) a
- E) $\frac{1}{a}$

87. Сзықты емес элементтің вольтамперлік сипаттамасы $i=2u+u^3$ тендеуімен өрнектеледі. $u=1В$ кернеуіндегі r_d динамикалық кедергісін анықтаңыз.

- A) 1/5 Ом
- B) 1/3 Ом
- C) 2 Ом
- D) 5 Ом
- E) 1/4 Ом

88. Сызықты емес элементтің вольтамперлік сипаттамасы $i=2u+u^3$ тендеуімен өрнектеледі. $u=1\text{В}$ кернеуіндегі $r_{\text{СТ}}$ статикалық кедергісін анықтаңыз.

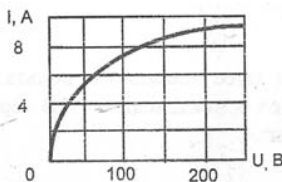
- A) 1/5 Ом
- B) 1/3 Ом
- C) 2 Ом
- D) 5 Ом
- E) 1/4 Ом

89. Сызықты емес элементтің вольтамперлік сипаттамасы $i=2u+u^3$ тендеуімен өрнектеледі. $u=0\text{В}$ кернеуіндегі $r_{\text{СТ}}$ статикалық кедергісін анықтаңыз.

- A) 1/5 Ом
- B) 1/3 Ом
- C) 2 Ом
- D) 5 Ом
- E) 1/2 Ом

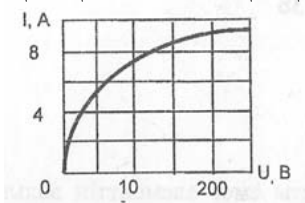
90. Вольт-амперлік сипаттамасы кестеде көрсетілген екі бірдей кедергісі бірізді жалғанған. Тізбекке $U=250\text{ В}$ кернеуі берілген. I жалпы тоқтың мәнін анықтаңыз.

- A) $I = 7\text{A}$
- B) $I = 14\text{A}$
- C) $I = 12\text{A}$
- D) $I = 8\text{A}$
- E) $I = 10\text{A}$



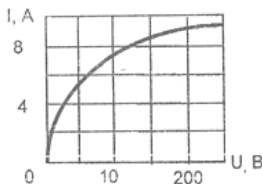
91. Вольт-амперлік сипаттамасы кестеде көрсетілген екі бірдей кедергісі қатар жалғанған. Тізбекке $U=125\text{В}$ кернеуі берілген. I жалпы тоқтың мәнін анықтаңыз.

- A) $I = 7\text{A}$
- B) $I = 14\text{A}$
- C) $I = 16\text{A}$
- D) $I = 8\text{A}$
- E) $I = 10\text{A}$



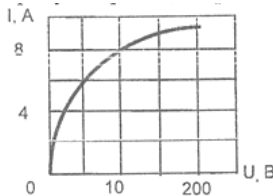
92. Вольт-амперлік сипаттамасы кестеде көрсетілген екі бірдей кедергісі қатар жалғанған. Тізбекке $U=125\text{В}$ кернеуі берілген. Бірінші элемент тоғының мәнін анықтаңыз.

- A) $I_1 = 7\text{А}$
- B) $I_1 = 14\text{А}$
- C) $I_1 = 16\text{А}$
- D) $I_1 = 8\text{А}$
- E) $I_1 = 10\text{А}$



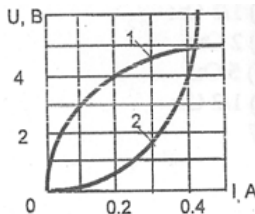
93. Вольт-амперлік сипаттамасы кестеде көрсетілген екі бірдей кедергісі қатар жалғанған. Тізбекке $U=100\text{В}$ кернеуі берілген. Бірінші элемент тоғының мәнін анықтаңыз.

- A) $I_1 = 7\text{А}$
- B) $I_1 = 14\text{А}$
- C) $I_1 = 16\text{А}$
- D) $I_1 = 8\text{А}$
- E) $I_1 = 10\text{А}$



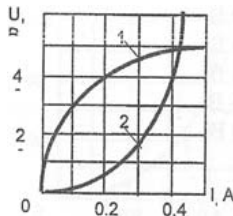
94. Екі сызықты емес кедергілері (1 және 2) қатар жалғанған. Олардың вольт-амперлік сипаттамалары және бірінші элементтегі ток $I_1 = 0,2\text{ А}$ берілген. Екінші элементтің I_2 тоғын анықтаңыз.

- A) 0.4 A
- B) 0.5 A
- C) 0.3 A
- D) 0.1 A
- E) 0.6 A



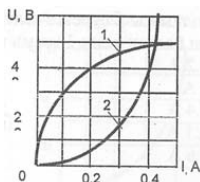
95. Екі сызықты емес кедергілері (1 және 2) қатар жалғанған. Олардың вольт-амперлік сипаттамалары және екінші элементтің тоғы $I_2 = 0,4\text{ А}$ берілген. Бірінші элементтің I_1 тоғын анықтаңыз.

- A) 0.4 A
- B) 0.5 A
- C) 0.3 A
- D) 0.2 A
- E) 0.6 A



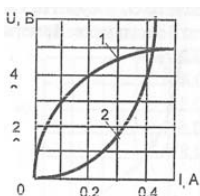
96. Екі сызықты емес кедергілері (1 және 2) қатар жалғанған. Олардың вольт-амперлік сипаттамалары және екінші элементтің тоғы $I_2 = 0,4$ А берілген. I жалпы тоғының шамасын анықтаңыз.

- A) 0.4 A
- B) 0.5 A
- C) 0.3 A
- D) 0.1 A
- E) 0.6 A



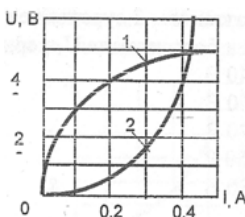
97. Екі сызықты емес кедергілері (1 және 2) параллель жалғанған. Олардың вольт-амперлік сипаттамалары және екінші элементтің тоғы $I_1 = 0,2$ А берілген. I жалпы тоғының шамасын анықтаңыз.

- A) 0.4 A
- B) 0.5 A
- C) 0.3 A
- D) 0.1 A
- E) 0.6 A



98. Екі сызықты емес кедергілері (1 және 2) қатар жалғанған. Олардың вольт-амперлік сипаттамалары және екінші элементтің тоғы $I_1 = 0,2$ А берілген. Тізбектің қысқыштарындағы U кернеудің шамасын анықтаңыз.

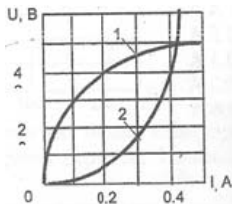
- A) 40 B
- B) 20 B
- C) 30 B
- D) 25 B
- E) 10 B



99. Екі сызықты емес кедергілері (1 және 2) қатар жалғанған. Олардың вольт-амперлік сипаттамалары және екінші элементтің тоғы $I_2 = 0,4$ А берілген. Тізбектің қысқыштарындағы U кернеудің шамасын анықтаңыз.

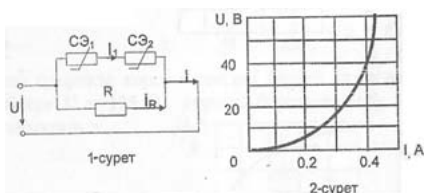
- A) 40 B
- B) 20 B

- C) 30 В
- D) 25 В
- E) 10 В



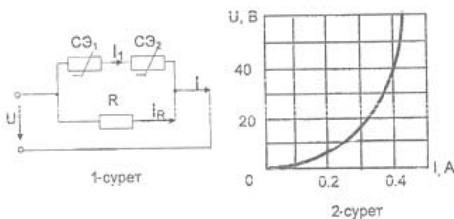
100. Екі бірдей СЭ1, СЭ2 сызықты емес элементтер мен $R=100$ Ом сызықты кедергінің жалғану сұлбасы 1-суретте келтірілген. СЭ-тің вольт-амперлік сипаттамасы 2-суретте келтірілген. Егер сызықты кедергідегі ток $I_R = 0,8$ А тең болған кезде I тоғын анықтаңыз.

- A) 1.2 А
- B) 1 А
- C) 1.4 А
- D) 1.1 А
- E) 1.6 А



101. Екі бірдей СЭ1, СЭ2 сызықты емес элементтер мен $R=100$ Ом сызықты кедергінің жалғану сұлбасы 1-суретте келтірілген. СЭ-тің вольт-амперлік сипаттамасы 2-суретте келтірілген. Егер сызықты кедергідегі ток $I_R = 0,8$ А тең болған кезде I тоғын анықтаңыз.

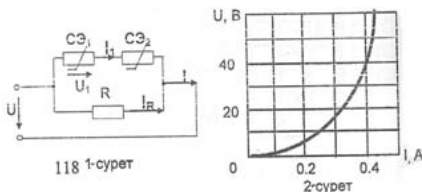
- A) 0.2 А
- B) 0.4 А
- C) 0.3 А
- D) 0.6 А
- E) 0.8 А



102. Екі бірдей СЭ1, СЭ2 сызықты емес элементтер мен $R=100$ Ом сызықты кедергінің жалғану сұлбасы 1-суретте келтірілген. СЭ-тің вольт-амперлік сипаттамасы 2-суретте келтірілген. Егер сызықты кедергідегі ток $I_r = 0,8$ А тең болған кезде U_I кернеуін анықтаңыз.

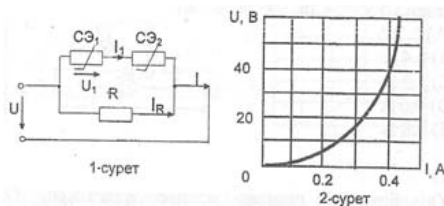
- A) 40 В
- B) 60 В

- C) 20 В
- D) 80 В
- E) 30 В



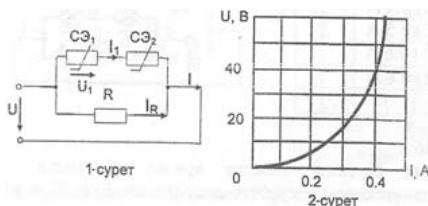
103. Екі бірдей СЭ1, СЭ2 сызықты емес элементтермен $R=100$ Ом сызықты кедергінің жалғану сұлбасы 1-суретте келтірілген. СЭ-тің вольт-амперлік сипаттамасы 2-суретте келтірілген. Егер сызықты кедергідегі ток $I_R=0,8$ А тең болған кезде U кернеуін анықтаңыз.

- A) 40 В
- B) 60 В
- C) 20 В
- D) 80 В
- E) 30 В



104. Екі бірдей СЭ1, СЭ2 сызықты емес элементтермен $R=100$ Ом сызықты кедергінің жалғану сұлбасы 1-суретте келтірілген. СЭ-тің вольт-амперлік сипаттамасы 2-суретте келтірілген. Егер ток $I_1 = 0,4$ А тең болған кезде U кернеуін анықтаңыз.

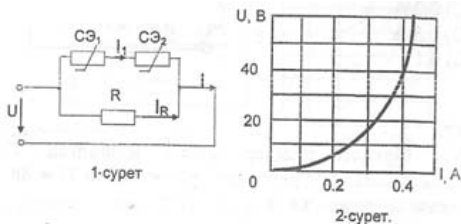
- A) 40 В
- B) 60 В
- C) 20 В
- D) 80 В
- E) 30 В



105. Екі бірдей СЭ1, СЭ2 сызықты емес элементтермен $R=100$ Ом сызықты кедергінің жалғану сұлбасы 1-суретте келтірілген. СЭ-тің вольт-амперлік сипаттамасы 2-суретте келтірілген. Егер сызықты емес кедергідегі тоғы $I_1=0,4$ А тең болған кезде I_R тоғын анықтаңыз.

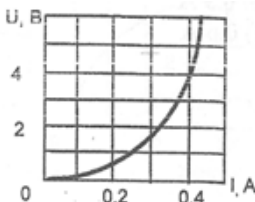
- A) 1.2 А
- B) 0.4 А
- C) 0.5 А

- D) 0.6 A
E) 0.8 A



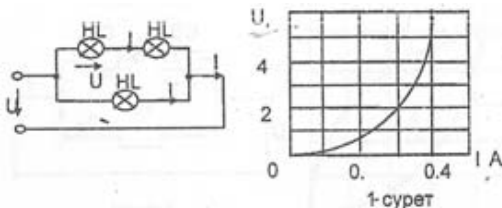
106. Вольт-амперлік сипаттамасы 1-суретте көрсетілген қыздыру шамымен $R=100$ Ом тең сызықты кедергісі бірізді жалғанған. Тізбектің қысқыштарындағы U кернеудің қандай мәнінде шамдағы кернеу кедергідегі кернеуге тең болады.

- A) 40 В
B) 60 В
C) 20 В
D) 80 В
E) 90 В



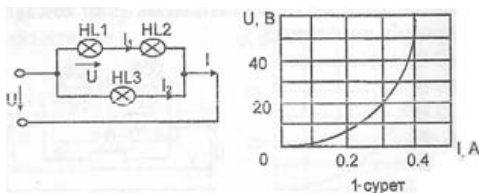
107. Үш біртекті шамдар аралас жалғанған. Олардың вольт-амперлік сипаттамасы 1-суретте келтірілген. Берілген кернеу $U=40$ В тең болған кезде тізбектің тармақталмаған бөлігіндегі I тоғын анықтаңыз.

- A) 0.7 A
B) 0.4 A
C) 0.5 A
D) 0.6 A
E) 0.8 A



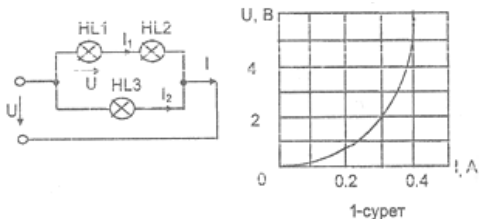
108. Үш біртекті шамдар аралас жалғанған. Олардың вольт-амперлік сипаттамасы 1-суретте келтірілген. Егер $U_1=20$ В тең болған кезде тізбектің тармақталмаған бөлігіндегі I тоғын анықтаңыз.

- A) 0.7 A
B) 0.4 A
C) 0.5 A
D) 0.6 A
E) 0.8 A



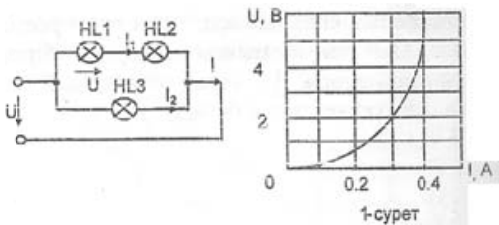
109. Үш біртекті шамдар аралас жалғанған. Олардың вольт-амперлік сипаттамасы 1-суретте келтірілген. Егер $U=40$ В тең болған кезде тоғын анықтаңыз.

- A) 0.5 A
- B) 0.4 A
- C) 0.2 A
- D) 0.3 A
- E) 0.1 A



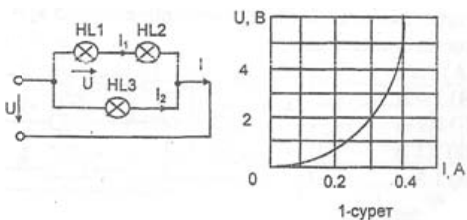
110. Үш біртекті шамдар аралас жалғанған. Олардың вольт-амперлік сипаттамасы 1-суретте келтірілген. Егер $U=40$ В тең болған кезде тоғын анықтаңыз.

- A) 0.5 A
- B) 0.4 A
- C) 0.2 A
- D) 0.3 A
- E) 0.6 A



111. Үш біртекті шамдар аралас жалғанған. Олардың вольт-амперлік сипаттамасы 1-суретте келтірілген. Егер $U=40$ В тең болған кезде кернеуін анықтаңыз.

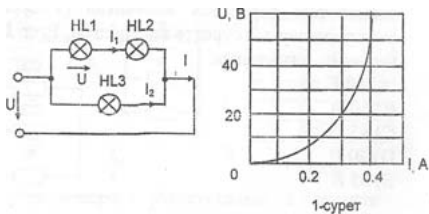
- A) 40 В
- B) 30 В
- C) 20 В
- D) 25 В
- E) 15 В



112. Үш біртекті шамдар аралас жалғанған. Олардың вольт-амперлік сипаттамасы 1-суретте келтірілген. Егер $U_1=20$ В тең болған кезде U кернеуін анықтаңыз.

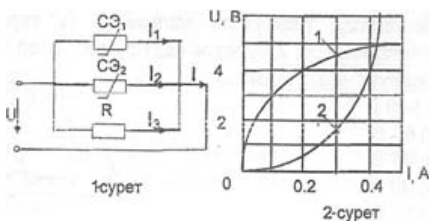
- A) 40 В
- B) 30 В

- C) 45 В
- D) 50 В
- E) 35 В



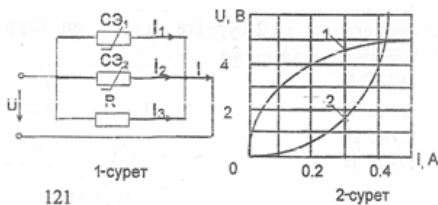
113. $R=100$ Ом сызықты кедергісі мен СЭ1 және СЭ2 сызықты емес элементтері параллель жалғанған (1-сурет). Олардың вольт-амперлік сипаттамалары 2-суретте келтірілген. Егер $I_3=0.4$ А тең болған кезде I тоғын анықтаңыз.

- A) 1.5 А
- B) 1.4 А
- C) 0.9 А
- D) 1.1 А
- E) 1 А



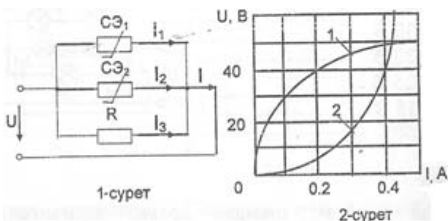
114. $R=100$ Ом сызықты кедергісі мен СЭ1 және СЭ2 сызықты емес элементтері параллель жалғанған (1-сурет). Олардың вольт-амперлік сипаттамалары 2-суретте келтірілген. Егер $I_2=0.4$ А тең болған кезде I тоғын анықтаңыз.

- A) 1.5 А
- B) 1.4 А
- C) 0.9 А
- D) 1.1 А
- E) 1 А



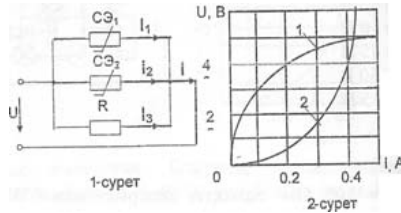
115. $R = 100$ Ом сызықты кедергісі мен СЭ1 және СЭ2 сызықты емес элементтері параллель жалғанған (1-сурет). Олардың вольт-амперлік сипаттамалары 2-суретте келтірілген. Егер $I_1=0.2$ А тең болған кезде I тоғын анықтаңыз.

- A) 1.5 А
- B) 1.4 А
- C) 0.9 А
- D) 1.1 А
- E) 1 А



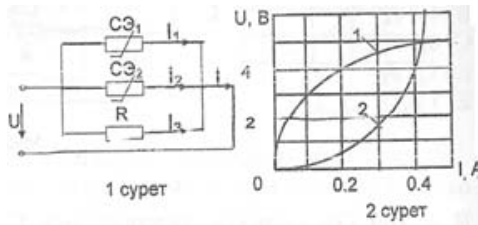
116. $R = 100$ Ом сызқты кедергісі мен $CЭ1$ және $CЭ2$ сызқты емес элементтері параллель жалғанған (1-сурет). Олардың вольтамперлік сипаттамалары 2-суретте келтірілген. Егер $I_1 = 0.2$ А тең болған кезде U кернеуін анықтаңыз.

- A) 40 В
- B) 60 В
- C) 45 В
- D) 20 В
- E) 35 В



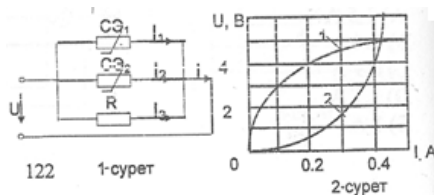
117. $R=100$ Ом сызқты кедергісі мен $CЭ1$ және $CЭ2$ сызқты емес элементтері параллель жалғанған (1-сурет). Олардың вольтамперлік сипаттамалары 2-суретте келтірілген. Егер $I_2 = 0.4$ А тең болған кезде U кернеуін анықтаңыз.

- A) 40 В
- B) 60 В
- C) 45 В
- D) 20 В
- E) 35 В



118. $R = 100$ Ом сызқты кедергісі мен $CЭ1$ және $CЭ2$ сызқты емес элементтері параллель жалғанған (1-сурет). Олардың вольтамперлік сипаттамалары 2-суретте келтірілген. Егер $I_3 = 0.4$ А тең болған кезде U кернеуін анықтаңыз.

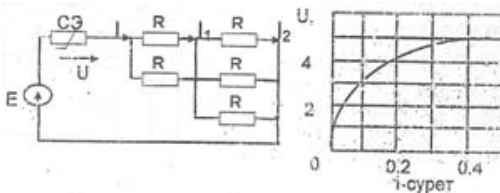
- A) 40 В
- B) 60 В
- C) 45 В
- D) 20 В
- E) 35 В



119. Сызқты емес элементтің вольтамперлің сипаттамасы 1-суретте келтірілген. Егер $E=40$ В, $R=12$ Ом тең болған кезде балама генератор тәсілі бойынша I тоғын анықтаңыз.

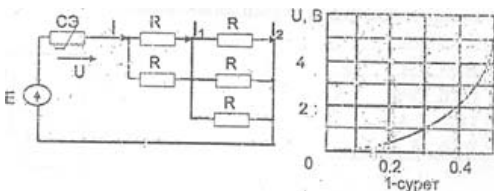
- A) 0.05 А

- B) 0.1 A
- C) 0.15 A
- D) 0.2 A
- E) 0.25 A



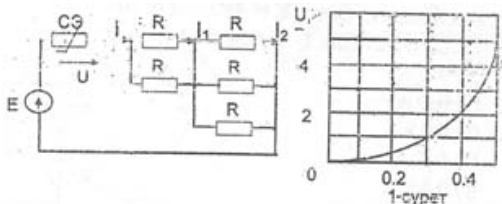
120. Сызықты емес элементтің вольтамперлің сипаттамасы 1 суретте келтірілген. Егер $E=40\text{ В}$, $R=12\text{ Ом}$ тең болған кезде балама генератор тәсілі бойынша I_1 тоғын анықтаңыз.

- A) 0.9 A
- B) 0.5 A
- C) 0.25 A
- D) 0.4 A
- E) 0.15 A



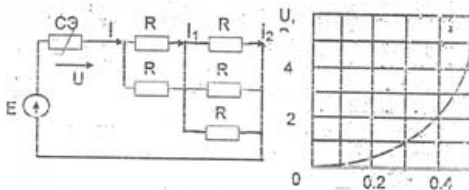
121. Сызықты емес элементтің вольтампердің сипаттамасы 1 суретте келтірілген. Егер $E = 40\text{ В}$, $R = 12\text{ Ом}$ тең болған кезде балама генератор тәсілі бойынша I_1 тоғын анықтаңыз.

- A) 0.1 A
- B) 0.3 A
- C) 0.25 A
- D) 0.4 A
- E) 0.15 A



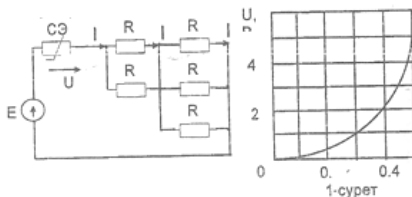
122. Сызықты емес элементтің вольтампердің сипаттамасы 1-суретте келтірілген. Егер $E = 40\text{ В}$, $R = 12\text{ Ом}$ тең болған кезде балама генератор тәсілі бойынша I_2 тоғын анықтаңыз.

- A) 0.1 A
- B) 0.2 A
- C) 0.25 A
- D) 0.3 A
- E) 0.15 A



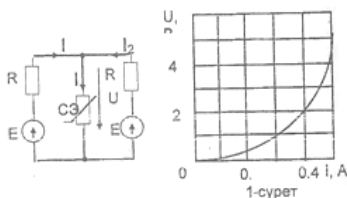
123. Сызықты емес элементтің вольтампердің сипаттама-сы 1-суретте келтірілген. Егер $E = 40 \text{ В}$, $R = 12 \text{ Ом}$ тең болған кезде балама генератор тәсілі бойынша U кернеуін анықтаңыз.

- A) 30 В
- B) 20 В
- C) 55 В
- D) 10 В
- E) 5 В



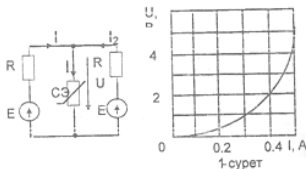
124. Сызықты емес элементтің вольтампердің сипаттама-сы 1-суретте келтірілген. Егер $E = 40 \text{ В}$, $R = 20 \text{ Ом}$ тең болған кезде балама генератор тәсілі бойынша I тоғын анықтаңыз.

- A) 0.1 А
- B) 0.2 А
- C) 0.15 А
- D) 0.3 А
- E) 0.15 А



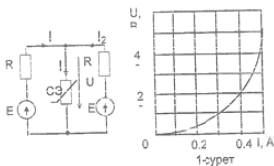
125. Сызықты емес элементтің вольтампердің сипатта-масы 1-суретте келтірілген. Егер $E = 40 \text{ В}$, $R = 20 \text{ Ом}$ тең болған кезде балама генератор тәсілі бойынша I_2 тоғын анықтаңыз.

- A) 0.1 А
- B) 0.2 А
- C) 0.25 А
- D) 0.3 А
- E) 0.15 А



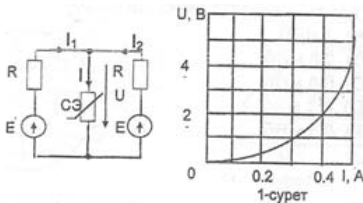
126. Сызықты емес элементтің вольтампердің сипаттама-сы 1-суретте келтірілген. Егер $E = 40 \text{ В}$, $R = 20 \text{ Ом}$ тең болған кезде балама генератор тәсілі бойынша I тоғын анықтаңыз.

- A) 0.1 А
- B) 0.2 А
- C) 0.25 А
- D) 0.3 А
- E) 0.15 А



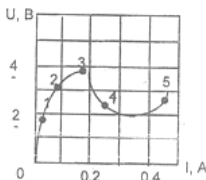
127. Сызықты емес элементтің вольтампердің сипаттамасы 1-суретте келтірілген. Егер $E = 40 \text{ В}$, $R = 20 \text{ Ом}$ тең болған кезде балама генератор тәсілі бойынша U кернеуін анықтаңыз.

- A) 30 В
- B) 20 В
- C) 55 В
- D) 10 В
- E) 5 В



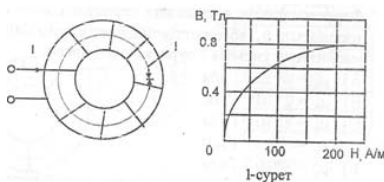
128. Сызықты емес элементтің берілген вольтамперлік сипаттамасының қай нүктесінде динамикалық кедергісі < 0 болады.

- A) 1
- B) 2
- C) 3
- D) 4
- E) 5



129. Ферромагниттік өзекшедегі индукция $B = 0.8 \text{ Тл}$ тең болған кезде тороидтың орауышындағы I тоғын анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1-суретте келтірілген, $I = 10 \text{ см}$, $w = 200 \text{ орам}$.

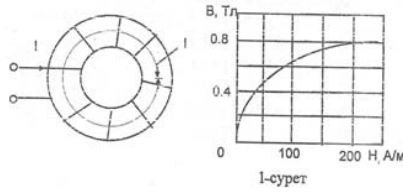
- A) 0.1 А
- B) 0.2
- C) 0.4 А
- D) 0.3
- E) 0.05 А



130. Ферромагниттік өзекшедегі кернеулігі $H = 200 \text{ А/м}$ тең болған кезде тороидтың орауышындағы I тоғын анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1-суретте келтірілген, $I = 10 \text{ см}$, $w = 200 \text{ орам}$.

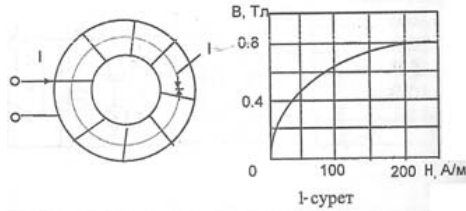
- A) 0.1 А

- B) 0.2
- C) 0.4 A
- D) 0.3
- E) 0.05 A



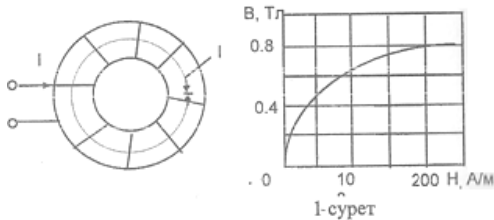
131. Ферромагниттік өзекшедегі индукция $B = 0.8$ Тл тең болған кезде тороидтың Φ магниттік ағынын анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1-суретте келтірілген, тороидтың қимасы $s = 10 \text{ см}^2$.

- A) 1 мВб
- B) 0.8 мВб
- C) 0.4 мВб
- D) 0.3 мВб
- E) 0.5 мВб



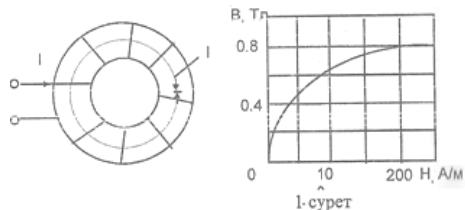
132. Ферромагниттік өзекшедегі кернеулігі $H = 200$ А/м тең болған кезде тороидтың Φ магниттік ағынын анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1-суретте келтірілген, тороидтың қимасы $s = 10 \text{ см}^2$.

- A) 1 мВб
- B) 0.8 мВб
- C) 0.4 мВб
- D) 0.3 мВб
- E) 0.5 мВб



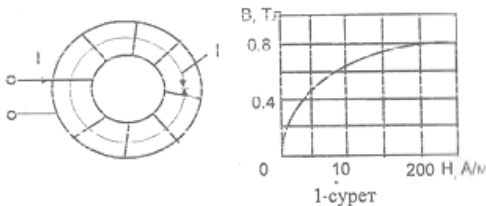
133. Ферромагниттік өзекшедегі кернеулігі $H = 200$ А/м тең болған кезде тороидтың μ_a абсолюттік магниттік өтімділігін анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1-суретте келтірілген.

- A) $\mu_a = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/м}$
- B) $\mu_a = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/м}$
- C) $\mu_a = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/м}$
- D) $\mu_a = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/м}$
- E) $\mu_a = 8 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/м}$



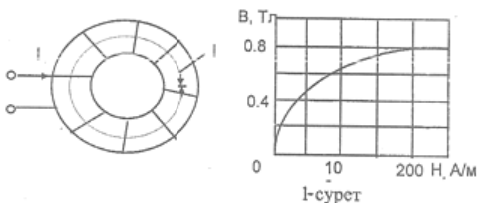
134. Ферромагниттік өзекшедегі индукция $B = 0.8$ Тл тең болған кезде тороидтың абсолюттік магниттік өтімділігін анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1 суретте келтірілген.

- A) $\mu_a = 4 \cdot 10^{-3}$ ГН/м
- B) $\mu_a = 2 \cdot 10^{-3}$ ГН/м
- C) $\mu_a = 1 \cdot 10^{-3}$ ГН/м
- D) $\mu_a = 3 \cdot 10^{-3}$ ГН/м
- E) $\mu_a = 8 \cdot 10^{-3}$ ГН/м



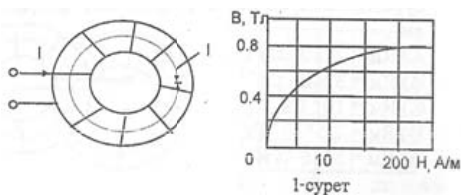
135. Ферромагниттік өзекшедегі индукция $B = 0.8$ Тл тең болған кезде тороидтың μ салыстырмалы магниттік өтімділігін анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1-суретте келтірілген.

- A) $\mu = 10^4 / \pi$
- B) $\mu = 2 \cdot 10^4 / \pi$
- C) $\mu = 3 \cdot 10^4 / \pi$
- D) $\mu = 5 \cdot 10^4 / \pi$
- E) $\mu = 4 \cdot 10^4 / \pi$



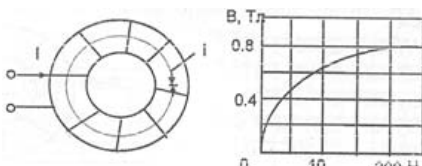
136. Орауыштағы ток $I = 0.1$ А тең болған кезде тороидтың Φ магниттік ағынын анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1-суретте келтірілген, $I = 10$ см, $w = 200$ орам, тороидтың қимасы $s = 10$ см².

- A) 1 мВб
- B) 0.8 мВб
- C) 0.4 мВб
- D) 0.3 мВб
- E) 0.5 мВб



137. Орауыштағы ток $I = 0.1$ А тең болған кезде тороидтың B магнит өрісінің индукциясын анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1 суретте келтірілген, $I = 10$ см, $w = 200$ орам, тороидтың қимасы $s = 10$.

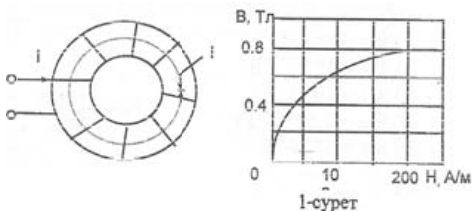
- A) $B = 0.9$ Тл



- B) $B = 0.6$ Тл
- C) $B = 0.5$ Тл
- D) $B = 0.45$ Тл
- E) $B = 0.8$ Тл

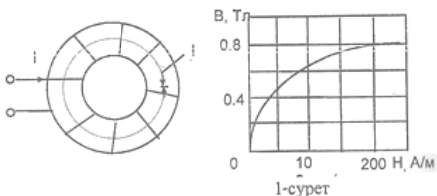
138. Орауыштағы ток $I = 0.1$ А тең болған кезде тороидтың H магнит өрісінің кернеулігін анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1-суретте келтірілген, $I = 10$ см, $w = 200$ орам, тороидтың қимасы $s = 10$ см².

- A) $H = 100$ А/м
- B) $H = 500$ А/м
- C) $H = 400$ А/м
- D) $H = 200$ А/м
- E) $H = 300$ А/м



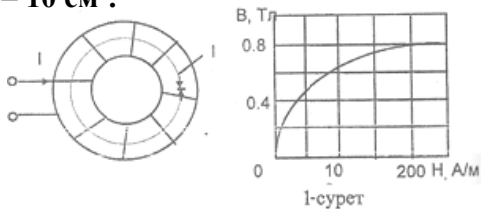
139. Орауыштағы ток $I = 0.1$ А тең болған кезде тороидтың R_M магниттік кедергісін анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1-суретте келтірілген, $I = 10$ см, $w = 200$ орам, тороидтың қимасы $s = 10$ см².

- A) $R_M = 2 \cdot 10^4$ Гн⁻¹
- B) $R_M = 3 \cdot 10^4$ Гн⁻¹
- C) $R_M = 10^4$ Гн⁻¹
- D) $R_M = 2,5 \cdot 10^4$ Гн⁻¹
- E) $R_M = 5 \cdot 10^4$ Гн⁻¹



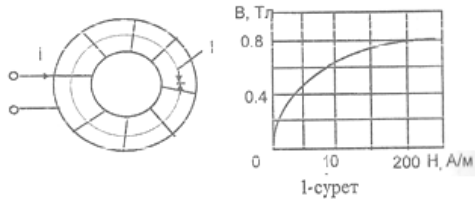
140. Өзекшедегі индукция $B = 0.8$ Тл тең болған кезде тороидтың R_M магниттік кедергісін анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1 суретте келтірілген, $I = 10$ см, $w = 200$ орам, тороидтың қимасы $s = 10$ см².

- A) $R_M = 2 \cdot 10^4$ Гн⁻¹
- B) $R_M = 3 \cdot 10^4$ Гн⁻¹
- C) $R_M = 10^4$ Гн⁻¹
- D) $R_M = 2,5 \cdot 10^4$ Гн⁻¹
- E) $R_M = 5 \cdot 10^4$ Гн⁻¹



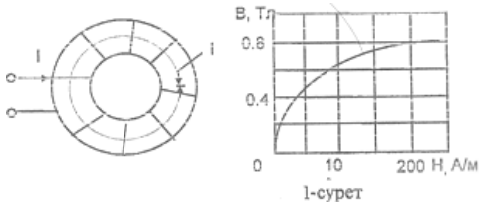
141. Өзекшедегі кернеулігі $H = 200$ А/м тең болған кезде тороидтың R_M магниттік кедергісін анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1-суретте келтірілген, $I = 10$ см, $w = 200$ орам, тороидтың қимасы $s = 10$ см².

- A) $R_M = 2 \cdot 10^4 \text{ Гн}^{-1}$
- B) $R_M = 3 \cdot 10^4 \text{ Гн}^{-1}$
- C) $R_M = 10^4 \text{ Гн}^{-1}$
- D) $R_M = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Гн}^{-1}$
- E) $R_M = 5 \cdot 10^4 \text{ Гн}^{-1}$



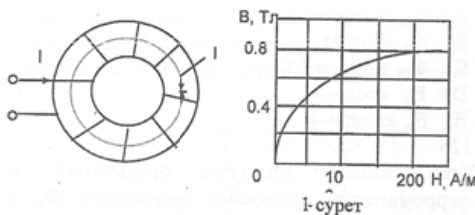
142. Өзекшедегі магниттік ағыны $\Phi = 8 \cdot 10^{-4}$ Вб тең болған кезде тороидтың R_M магниттік кедергісін анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1 суретте келтірілген, $I = 10$ см, $w = 200$ орам, тороидтың қимасы $s = 10$ см².

- A) $R_M = 2 \cdot 10^4 \text{ Гн}^{-1}$
- B) $R_M = 3 \cdot 10^4 \text{ Гн}^{-1}$
- C) $R_M = 10^4 \text{ Гн}^{-1}$
- D) $R_M = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Гн}^{-1}$
- E) $R_M = 5 \cdot 10^4 \text{ Гн}^{-1}$



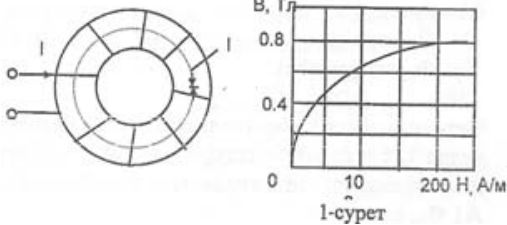
143. Өзекшедегі магниттік ағыны $\Phi = 8 \cdot 10^{-4}$ Вб тең болған кезде орауыштың L индуктивтілігін анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1 суретте келтірілген, $I = 10$ см, $w = 200$ орам, тороидтың қимасы $s = 10$ см².

- A) $L = 1.6 \text{ Гн}$
- B) $L = 1.2 \text{ Гн}$
- C) $L = 2.0 \text{ Гн}$
- D) $L = 0.6 \text{ Гн}$
- E) $L = 0.8 \text{ Гн}$



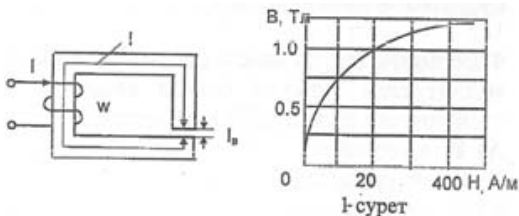
144. Орауыштағы ток $I = 0.1$ А тең болған кезде орауыштың ψ ағын ілінісін анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1-суретте келтірілген, $I = 10$ см, $w = 200$ орам, тороидтың қимасы $s = 10$ см².

- A) $\psi = 0,2 \text{ Вб}$
- B) $\psi = 0,14 \text{ Вб}$
- C) $\psi = 0,15 \text{ Вб}$
- D) $\psi = 0,12 \text{ Вб}$
- E) $\psi = 0,16 \text{ Вб}$



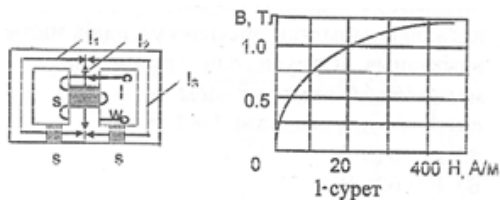
145. Өзекшедегі магниттік ағыны $\Phi = 8 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$ тең болған кезде орауыштағы I токтың мәнін анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1-суретте келтірілген, $I_B = 1 \text{ мм}$, $w = 1000$ орам, магнитөткізгіштің қимасы $s = 10 \text{ см}^2$.

- A) $I = 1 \text{ А}$
- B) $I = 1.2 \text{ А}$
- C) $I = 1.5 \text{ А}$
- D) $I = 2 \text{ А}$
- E) $I = 0.8 \text{ А}$



146. Екінші оқтаушадағы индукция $B_2 = 1 \text{ Тл}$ тең болған кезде магниттік тізбегінің орауышындағы I токтың мәнін анықтаңыз. Өзекшенің магниттелу қисығы 1-суретте келтірілген. Магнит өткізгіштің өлшемдері: $l_1 = l_3 = 1 \text{ м}$, $l_2 = 0.5 \text{ м}$, магнит өткізгіштің қимасы $s_1 = s_3 = 10 \text{ см}^2$, $s_2 = 20 \text{ см}^2$, орамдар саны $w = 1000$.

- A) $I = 0.3 \text{ А}$
- B) $I = 0.5 \text{ А}$
- C) $I = 0.4 \text{ А}$
- D) $I = 0.2 \text{ А}$
- E) $I = 0.6 \text{ А}$



147. Егер жиілігі өзгерусіз орауыштың кернеуін өсірген кезде ферромагниттік өзекшелі орауыштың Φ_m магниттік ағынымен ЭҚК амплитудалары қалай өзгереді?

- A) E_m өзгермейді
- B) Φ_m азаяды
- C) Φ_m өзгермейді

- D) E_m өседі
- E) E_m азаяды

148. Егер жиілігі өзгерусіз орауыштың кернеуін өсірген кезде ферромагниттік өзекшелі орауыштың Φ_m магниттік ағынымен $P_{ст}$ болаттағы шығындардың амплитудалары қалай өзгереді?

- A) $P_{ст}$ өзгермейді
- B) Φ_m азаяды
- C) Φ_m өседі
- D) $P_{ст}$ азаяды
- E) Φ_m өзгермейді

149. Ферромагниттік өзекшелі орауышка берілген кернеу және жиілігі өскен кезде $U/f = const$ болады. Сонда Φ_m магниттік ағыны мен $P_{ст}$ болаттағы шығындардың амплитудалары қалай өзгереді?

- A) Φ_m азаяды
- B) Φ_m өседі
- C) $P_{ст}$ өседі
- D) $P_{ст}$ азаяды
- E) $P_{ст}$ өзгермейді

150. Ферромагниттік өзекшелі орауышка берілген кернеудің f жиілігі оның амплитудасы тұрақты болған кезде екі есе азайтылған. Сонда P_r гистерезисқа шығындар қалай өзгереді.

- A) P_r өзгермейді
- B) P_r екі есе өседі
- C) P_r төрт есе өседі
- D) P_r екі есе азаяды
- E) P_r үш есе өседі

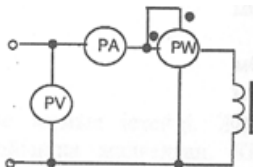
151. Жиілігі $f = 100$ Гц, магниттік индукцияның амплитудалық мәні $B_m = 1$ Тл синусоидалы тоқтың тізбегіндегі ферромагниттік өзекшелі мінсіз орауыштың өздік индукция ЭҚК-нің әрекеттік мәнін анықтаңыз. Орауыштың параметрлері: орамдар саны $w = 100$, магнит өткізгіштің

қимасы $s = 100 \text{ см}^2$, орташа магниттік күштік сызығының ұзындығы $l = 1 \text{ м}$.

- A) $E = 212 \text{ В}$
- B) $E = 626 \text{ В}$
- C) $E = 402 \text{ В}$
- D) $E = 220 \text{ В}$
- E) $E = 440 \text{ В}$

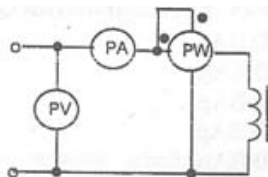
152. Ауа саңылауысыз ферромагнитті көзекшелі индуктивтілік орауышы жиілігі $f = 50 \text{ Гц}$ синусоидалы кернеу көзіне қосылған. Аспаптардың көрсетулері: $I = 1 \text{ А}$, $U = 100 \text{ В}$, $P_w = 10 \text{ Вт}$. Орауыштың r активті кедергісін анықтаңыз.

- A) 5 Ом
- B) 10
- C) 15 Ом
- D) 1 Ом
- E) 2.5 Ом



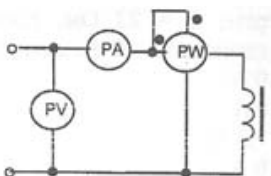
153. Ауа саңылауысыз ферромагнитті көзекшелі индуктивтілік орауышы жиілігі $f = 50 \text{ Гц}$ синусоидалы кернеу көзіне қосылған. Аспаптардың көрсетулері: $I = 1 \text{ А}$, $U = 100 \text{ В}$, $P_w = 10 \text{ Вт}$. Орауыштың Z толық кедергісін анықтаңыз.

- A) 50 Ом
- B) 20
- C) 150 Ом
- D) 100 Ом
- E) 50 Ом



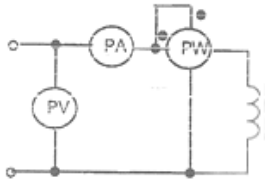
154. Ауа саңылауысыз ферромагниттік өзекшелі индуктивтілік орауышы жиілігі $f = 50 \text{ Гц}$ синусоидалы кернеу көзіне қосылған. Аспаптардың көрсетулері: $I = 1 \text{ А}$, $U = 100 \text{ В}$, $P_w = 10 \text{ Вт}$. Орауыштың x индуктивті кедергісін анықтаңыз.

- A) 50 Ом
- B) 100
- C) 99.5 Ом
- D) 60 Ом
- E) 90 Ом



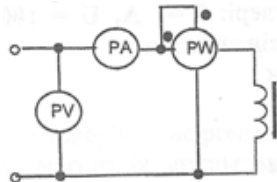
155. Ауа саңылауысыз ферромагниттік өзекшелі индуктивтілік орауышы жиілігі $f = 50$ Гц синусоидалы кернеу көзіне қосылған. Аспаптардың көрсетулері: $I = 1$ А, $U = 100$ В, $P_w = 10$ Вт. Орауыш мысының кедергісі $r_M = 2$ Ом, сейілу кедергісі $X_s = 2$ Ом. Негізгі магниттік ағынының өздік индукцияның ЭҚК сиппатайтын орауыштың бірізді алмастыру сұлбасының индуктивті кедергісін анықтаңыз.

- A) 50 Ом
- B) 100
- C) 99.5 Ом
- D) 60 Ом
- E) 90 Ом



156. Ауа саңылауысыз ферромагниттік өзекшелі индуктивтілік орауышы жиілігі $f = 50$ Гц синусоидалы кернеу көзіне қосылған. Аспаптардың көрсетулері: $I = 1$ А, $U = 100$ В, $P_w = 10$ Вт. Орауыш мысының кедергісі $r_M = 2$ Ом, сейілу кедергісі $X_s = 2$ Ом. Болаттағы шығындарды сипаттайтын орауыштың бірізді алмастыру сұлбасының r_0 активті кедергісін анықтаңыз.

- A) 50 Ом
- B) 10
- C) 9 Ом
- D) 8 Ом
- E) 7 Ом



157. Үш фазалы тізбек симметриялы режимде жұмыс істейді. Жүктеме бейтарап сымсыз жұлдызша сұлбасы бойынша жалғанған. Көздегі фазасының кернеуі $U_\phi = 220$ В, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 22$ Ом. Активті-сыйымдылықтық жүктеменің қуат коэффициенті $\cos \phi = 0.8$ Ом. Қабылдағыштың Q реактивті қуатының мәнін анықтаңыз.

- A) 3600 ВАр
- B) 5280 ВАр

- C) 3960 ВАр
- D) 1320 ВАр
- E) 3960 ВАр

158. Үш фазалы тізбек симметриялы режімде жұмыс істейді. Жүктеме бейтарап сыммен $Z_n = 0$ жұлдызша сұлбасы бойынша жалғанған. Көздегі фазасының кернеуі $U_\phi = 220$ В, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 22$ Ом. Қабылдағыштың А фазасы үзілгеннен кейін, қабылдағыштың В фазасы тоғының мәнін анықтаңыз.

- A) 30 А
- B) 20 А
- C) 17.3 А
- D) 10 А
- E) 5 А

159. Үш фазалы тізбек симметриялы режімде жұмыс істейді. Жүктеме бейтарап сыммен $Z_n = 0$ жұлдызша сұлбасы бойынша жалғанған. Көздегі фазасының кернеуі $U_\phi = 220$ В, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 22$ Ом. Қабылдағыштың А фазасы үзілгеннен кейін, бейтарап сым тоғының мәнін анықтаңыз.

- A) 30 А
- B) 20 А
- C) 17.3 А
- D) 10 А
- E) 5 А

160. Үш фазалы тізбек симметриялы режімде жұмыс істейді. Жүктеме бейтарап сымсыз жұлдызша сұлбасы бойынша жалғанған. Көздегі фазасының кернеуі $U_\phi = 220$ В, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 10$ Ом. Қабылдағыштың А фазасы үзілгеннен кейін, қабылдағыштың В фазасы тоғының мәнін анықтаңыз.

- B) 20 А
- C) 17.3 А
- D) 10 А
- E) 19 А

161. Үш фазалы тізбек симметриялы режимде жұмыс істейді. Жүктеме бейтарап сымсыз жұлдызша сұлбасы бойынша жалғанған. Көздегі фазасының кернеуі $U_{\phi} = 220 \text{ В}$, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 10 \text{ Ом}$. Қабылдағыштың А фазасы үзілгеннен кейін, қабылдағыштың А фазасы тоғының мәнін анықтаңыз.

- A) 30 А
- B) 20 А
- C) 17.3 А
- D) 10 А
- E) 0 А

162. Үш фазалы тізбек симметриялы режимде жұмыс істейді. Жүктеме бейтарап сымсыз жұлдызша сұлбасы бойынша жалғанған. Көздегі фазасының кернеуі $U_{\phi} = 220 \text{ В}$, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 10 \text{ Ом}$. Қабылдағыштың А фазасы үзілгеннен кейін, қабылдағыштың С фазасы тоғының мәнін анықтаңыз.

- A) 30 А
- B) 20 А
- C) 17.3 А
- D) 19 А
- E) 0 А

163. Үш фазалы тізбек симметриялы режимде жұмыс істейді. Жүктеме бейтарап сымсыз жұлдызша сұлбасы бойынша жалғанған. Көздегі фазасының кернеуі $U_{\phi} = 220 \text{ В}$, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 10 \text{ Ом}$. Қабылдағыштың А фазасы қысқа тұйықталғаннан кейін, қабылдағыштың А фазасы тоғының мәнін анықтаңыз.

- A) 30 А
- B) 20 А
- C) 17.3 А
- D) 10 А
- E) 19 А

164. Үш фазалы тізбек симметриялы режимде жұмыс істейді. Жүктеме бейтарап сымсыз жұлдызша сұлбасы

бойынша жалғанған. Көздегі фазасының кернеуі $U_{\phi} = 220 \text{ В}$, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 10 \text{ Ом}$. Қабылдағыштың А фазасы қысқа тұйықталғаннан кейін, қабылдағыштың В фазасы тоғының мәнін анықтаңыз.

- A) 38 А
- B) 20 А
- C) 17.3 А
- D) 10 А
- E) 19 А

165. Үш фазалы тізбек симметриялы режимде жұмыс істейді. Жүктеме бейтарап сымсыз жұлдызша сұлбасы бойынша жалғанған. Көздегі фазасының кернеуі $U_{\phi} = 220 \text{ В}$, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 10 \text{ Ом}$. Қабылдағыштың А фазасы қысқа тұйықталғаннан кейін, қабылдағыштың С фазасы тоғының мәнін анықтаңыз.

- A) 38 А
- B) 20 А
- C) 17.3 А
- D) 10 А
- E) 19 А

166. Үш фазалы тізбек симметриялы режимде жұмыс істейді. Жүктеме бейтарап сымсыз жұлдызша сұлбасы бойынша жалғанған. Көздегі фазасының кернеуі $U_{\phi} = 220 \text{ В}$, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 10 \text{ Ом}$. Қабылдағыштың А фазасы қысқа тұйықталғаннан кейін, қабылдағыштың С фазасы кернеуінің мәнін анықтаңыз.

- A) 220 В
- B) 190 В
- C) 380 В
- D) 127 В
- E) 0 В

167. Үш фазалы тізбек симметриялы режимде жұмыс істейді. Жүктеме бейтарап сымсыз жұлдызша сұлбасы бойынша жалғанған. Көздегі фазасының кернеуі $U_{\phi} = 220 \text{ В}$, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 10 \text{ Ом}$.

Қабылдағыштың А фазасы қысқа тұйықталғаннан кейін, қабылдағыштың А фазасы кернеуінің мәнін анықтаңыз.

- A) 220 В
- B) 190 В
- C) 380 В
- D) 127 В
- E) 0 В

168. Үш фазалы тізбек симметриялы режимде жұмыс істейді. Жүктеме бейтарап сымсыз жұлдызша сұлбасы бойынша жалғанған. Көздегі фазасының кернеуі $U_{\phi} = 220$ В, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 10$ Ом. Қабылдағыштың А фазасы қысқа тұйықталғаннан кейін, қабылдағыштың В фазасы кернеуінің мәнін анықтаңыз.

- A) 300 В
- B) 200 В
- C) 173 В
- D) 190 В
- E) 220 В

169. Үш фазалы тізбек симметриялы режимде жұмыс істейді. Жүктеме үшбұрыш сұлбасы бойынша жалғанған. Тораптың желілік кернеуі $U_{ж} = 380$ В, желілік тоғы $I_a = 17,3$ А. Қабылдағыш фазасының z толық кедергісінің мәнін анықтаңыз.

- A) 20 Ом
- B) 18 Ом
- C) 17.3 Ом
- D) 15 Ом
- E) 38 Ом

170. Үш фазалы тізбек симметриялы режимде жұмыс істейді. Жүктеме үшбұрыш сұлбасы бойынша жалғанған. Тораптың желілік кернеуі $U_{ж} = 380$ В, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 38$ Ом. ав фазасы үзілген кезде I_a желілік тоғының мәнін анықтаңыз.

- A) 5,0 А
- B) 18 А
- C) 17,3 А

D) 15 A

E) 10 A

171. Үш фазалы тізбек симметриялы режимде жұмыс істейді. Жүктеме үшбұрыш сұлбасы бойынша жалғанған. Тораптың желілік кернеуі $U_{ж} = 380$ В, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 38$ Ом. ав фазасы үзілген кезде I_B желілік тоғының мәнін анықтаңыз.

A) 5,0 A

B) 18 A

C) 17,3 A

D) 15 A

E) 10 A

172. Үш фазалы тізбек симметриялы режимде жұмыс істейді. Жүктеме үшбұрыш сұлбасы бойынша жалғанған. Тораптың желілік кернеуі $U_{ж} = 380$ В, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 38$ Ом. ав фазасы үзілген кезде I_C желілік тоғының мәнін анықтаңыз.

A) 5,0 A

B) 18 A

C) 17,3 A

D) 15 A

E) 10 A

173. Үш фазалы тізбек симметриялы режимде жұмыс істейді. Жүктеме үшбұрыш сұлбасы бойынша жалғанған. Тораптың желілік кернеуі $U_{ж} = 380$ В, қабылдағыш фазасының толық кедергісі $z = 38$ Ом. В желілік сымы үзілген кезде I_B желілік тоғының мәнін анықтаңыз.

A) 12 A

B) 18 A

C) 17,3 A

D) 0 A

E) 10 A

Тестердің жауабы

№ теста	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Жауабы	A	C	A	A	B	C	C	A	C	A	C	A	B	A	E
№ теста	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Жауабы	A	A	D	E	D	C	B	A	B	B	D	C	B	E	B
№ теста	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Жауабы	D	D	B	E	D	D	D	B	E	E	E	B	D	D	D
№ теста	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Жауабы	D	A	A	A	B	C	E	B	C	A	B	B	A	C	B
№ теста	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
Жауабы	A	A	B	A	B	E	B	C	A	B	B	B	A	A	A
№ теста	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Жауабы	A	B	B	B	E	A	B	E	B	E	B	A	B	E	D
№ теста	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
Жауабы	C	D	D	A	D	E	E	A	A	A	B	A	D	D	E
№ теста	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
Жауабы	D	A	A	D	B	C	A	E	E	E	A	A	A	B	B
№ теста	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135
Жауабы	E	A	A	C	C	D	D	D	A	A	B	B	A	A	A
№ теста	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
Жауабы	B	B	D	D	D	D	D	A	E	A	A	D	C	C	D
№ теста	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165
Жауабы	E	D	D	C	C	D	C	D	D	E	E	D	A	C	C
№ теста	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
Жауабы	C	E	D	E	E	E	C	A							

Пайдаланған әдебиеттер тізімі:

1. А. Н. Горбунов, И. Т. Туганбаев, В. И. Загинайлов, А. С. Знаев, А. В. Кравцов, И. Я. Редько Теоритические основы электротехники. – Астана «ЭВЕРО» 2012.
2. А. Н. Горбунов, И. Т. Туганбаев, В. И. Загинайлов, А. С. Знаев, А. В. Кравцов, И. Я. Редько Электротехника и электроника. – Астана: ЭВЕРО, 2012.
3. А. Қ. Ахметов, Т. А. Қабақова «Электротехниканың теориялық негіздері». 2004, 512 б. – Астана: «Ақмола полиграфия».
4. Ж. Х. Амиров, И. Т. Туганбаев «Электротехниканың теориялық негіздері» ЖШС «Техника сервис», 2007, Ақтөбе.
5. С. Балабатыров, Н. Қожасбаев, А. Балабатыров «Электротехниканың теориялық негіздері». Оқулық, «Ғылым», 2001, 295 б.
6. С. Балабатыров, Теоретическая основа электротехники 2010, «Бастау», 254б., Алматы
7. А. А. Бессонов, «Теоретическая основа электротехники». Москва, «Высшая школа» 1990
8. А. Н. Горбунов, И. Д. Кабанов, И. Я. Редько «Теоретическая основа электротехники». Челябинск, 1998
9. З. Т. Түркебаева, А. К. Оразбекова, «Электротехниканың теориялық негіздері». I бөлім. 2011 ж. 122 б. КазАТУ полиграфиясы, Астана.
10. З. Т. Түркебаева, А. К. Оразбекова, «Электротехниканың теориялық негіздері». II бөлім, 2011ж. 120б. КазАТУ баспаханасы, Астана
11. Б. И. Братель. «Курс лекций по ТОЭ». часть I, 226 ст (2009), часть II 2009, 115 ст. Часть III 2009, 128 ст. Астана, КазАТУ.
12. А. И. Горбунов, И. Т. Туганбаев, И. Я. Редько, В. И. Загинайлов, А. С. Знаев, А. В. Кравцов. «Электротехника и электроника». «Эверо», Алматы, 2012.

МАЗМУНЫ

Алғы сөз	3
Кіріспе	5
Түсініктемелер	8

БІРІНШІ БӨЛІМ

I ТАРАУ

1. Тұрақты тоқ сызықты электр тізбегі	11
Электр тізбегін сипаттайтын негізгі шамалар	11
1.1.1 Электр өрісінің кернеулігі	11
1.1.2 Электр әлеуеті және кернеу	12
1.1.3 Электр тоғы. Тоқ тығыздығы	14
1.2 Электр тізбек элементтері	15
1.3 Ом заңы	18
1.4 ЭҚК қорек көзі және тоқ қорек көзі	21
1.5. ЭҚК-сы бар тізбек саласының Ом заңы	25
1.6 Әлеует диаграммасы	26
1.7. Электр энергиясы және электр қуаты	28
1.7.1 Электр энергиясы	–
1.7.2 Электр қуаты	29
1.7.3 Энергия қорек көзінің пайдалы әрекет коэффициенті (ПӘК)	30
1.7.4 Электр тізбектегі энергетикалық баланс	31
1.8 Кирхгоф заңдары	31
1.9 Кирхгофтың тендеулер әдісімен электр тізбегін есептеу	32
1.10 Сызықты электр схемаларын түрлендіру	34
1.10.1 Резисторларды тізбектеп қосу	34
1.10.2 Резисторларды қатар қосу	36
1.10.3 Аралас қосылған резисторлар	38
1.10.4 Кедергі үшбұрышын эквивалентті жұлдызға және керісінше айналдыру әдісі	39
1.10.5 Электр энергия қорек көзінің тізбектеліп қосылуы	41
1.10.6 Қатар (қатарластырып) қосылған қорек көздер	42
1.11. Пропорционалды шама әдісі	42
1.12 Контурлы тоқтар әдісі	44
1.13 Түйінді әлеуеттер әдісі	47
1.14 Түйінді кернеу (екі түйін) әдісі	51
1.15 Теңестіру қағидаты	53
1.16 Өзара қасиеті	56
1.17 Кірме және өзара өткізгіш тармақтары. Кірме кедергілері	58
1.18 Өтем теоремасы	60

1.19 Активті екіұштық теоремасы.	
Эквивалентті генератор әдісі.....	61
1.19.1. Активті және пассивті екіұштық.....	61
1.19.2 Активті екіұштық теоремасы	61
1.19.3 Баламалы генератор әдісі.....	64
Бақылау сұрақтары	66

II ТАРАУ

2. Сызықты электр тізбегіндегі синусоидалды ток	68
2.1 Жалпы мәлімет.....	68
2.1.1 Синусоидалды ток пен кернеудің амплитудасы және фазасы	68
2.1.2 Синусоидалды ЭҚК алу	70
2.1.3 Синусоидалды токтың әрекетілігі және орташа мәні	72
2.1.4 Синусоидалды шаманың векторлы көрінісі.	
Вектор диаграммасы	74
2.2 Синусоидалды ток тізбектегі резистор, индуктивті катушка және конденсатор	76
2.2.1 Синусоидалды ток тізбегіндегі резистор.....	77
2.2.2 Синусоидалды ток тізбегіндегі индуктивті катушка	78
2.2.3 Синусоидалды ток тізбегіндегі конденсатор	80
2.3 Синусоидалды ток тізбегін векторлы диаграмма арқылы талдау.....	82
2.3.1 Резистор және индуктивті катушкасы бар тізбек.....	82
2.3.2 Резистор мен конденсаторы бар электр тізбегі.....	84
2.3.3 Резисторды катушка мен конденсаторды тізбектеп қосу	86
2.3.4 Синусоидалды токтың тармақталмаған тізбегі.....	87
2.3.5 Резисторды, катушка мен конденсаторды қатар қосу.....	89
2.3.6 Синусоидалды ток тізбегінің қуаты.....	94
2.3.7 Синусоидалды токты сызықты электр тізбегіндегі түрлендіру.....	97
2.3.8 Түрлендіру әдісінен тармақталған айнымалы ток тізбегін есептеу.....	98
2.4 Синусоидалды ток тізбегін есептеудің кешенді әдісі	102
2.4.1 Кешенді жазықтықтағы синусоидалды шамаларды векторлы суреттеу.....	102
2.4.2 Кешенді түрдегі Ом және Кирхгоф заңдары.....	105
2.4.3 Кешенді түрдегі қуаттар	109
2.4.4 Қуат теңгерімі. Қуаттың ваттметрмен өлшенуі.....	110
2.4.5 Кешенді әдіспен синусоидалды ток тізбегін есептеу.....	112

2.5 Электр тізбегіндегі резонанс	119
2.5.1 Кернеу резонансы	119
2.5.2 Тізбектелген контурдың жиілік сипаттамалары	121
2.5.3 Тоқ резонансы	123
2.5.4 Синусоидалды тоқ тізбегінде қуат коэффициентін жоғарылату	125
2.6 Өзара индуктивті электр тізбегі	127
2.6.1 Жалпы мәлімет	127
2.6.2 Өзара индукция ЭҚК	128
2.6.3 Индуктивті байланысты екі катушканың тізбектеліп қосылуы ...	131
2.6.4 Өзара индуктивтікті эксперименталды жолымен анықтау	133
2.6.5 Индуктивті байланысты катушкалардың жапсарлас қосылуы	134
2.6.6 Күрделі индуктивті байланысқан тізбегін есептеу	137
2.6.7 Индуктивті байланысты эквивалентті ауыстыру	138
2.6.8 Ауа трансформаторы	139
2.7 Төртұшты	143
2.7.1 Төртұшты түсінігі. Негізгі теңдеулер	143
2.7.2 Төртұштының Т-тәрізді алмастыру схемасы	144
2.7.3 Төртұштының П-тәрізді алмастыру схемасы	146
2.7.4 Төртұшты коэффициенттерін тәжірибелі түрде анықтау	147
2.7.4.1 Бос жүріс тәжірибесі. Алдыңғы қысқыш жағынан Қоректенгенде	147
2.7.4.2 Алдыңғы қысқыш жағынан қоректенгендегі қысқа тұйықталу тәжірибесі	148
2.7.4.3 Екінші қысқыштан қоректенгендегі бос жүріс тәжірибесі	148
2.7.4.4 Екінші қысқыштан қоректенгендегі қысқа тұйықталу тәжірибесі	149
2.7.5 Төртұшты бос жүрісі мен қысқа тұйықталуы	149
2.7.6 Кез келген жүктемедегі төртұшты кірме кедергісі	150
Бақылау сұрақтары	151

III ТАРАУ

3 Үш фазалы тізбектер	154
3.1 Жалпы мәлімет	154
3.1.1 Үш фазалы жүйелер. Үш фазалы синхронды генератор	154
3.1.2 Үш фазалы тізбекті қосу сұлбасы	157
3.2 Үш фазалы тізбектің симметриялы жұмыс режимі	160

3.2.1 Жүктемені жұлдыз түрінде қосқандағы симметриялық режімі	160
3.2.2 Жүктемені үш бұрышты қосқандағы симметриялық режімі	162
3.2.3 Симметриялы үш фазалы жүйе қуаты	164
3.2.4 Күрделі үш фазалы тізбектің симметриялы режімін есептеу	166
3.3 Үш фазалы тізбектің симметриялы емес режімін есептеу	167
3.3.1 Жұлдыз түрінде бейтарап сыммен қосу	168
3.3.2 Бейтарап сымсыз жұлдыз түрінде қосу	170
3.3.3 Жүктемені үшбұрышты қосу	171
3.3.4 Симметриялы емес үш фазалы жүйелер қуаты	171
3.4 Тармақталған үш фазалы тізбек. Өзгерту және есептеу	172
3.4.1 Бірнеше қабылдағышы бар жұлдызша түрінде қосылған үш фазалы тізбек	173
3.4.2 Симметриялы емес жұлдызша және үшбұрышты қосылған қабылдағышы бар үш фазалы тізбек	174
3.4.3 Бір фазалы және үш фазалы қабылдағыштары бар үш фазалы тізбек	176
3.5 Үш фазалы тізбектегі активті қуатты өлшеу	178
3.5.1 Симметриялы жүктемедегі активті қуатты өлшеу	178
3.5.2 Симметриялы емес жүктемедегі активті қуатты өлшеу	179
3.5.3 Қосылған жүктеме реактивті қуатын өлшеу	181
3.6 Үш фазалы тізбектің топографиялық диаграммасы	182
3.6.1 Жұлдыз түрде қосылған және жұлдыз бейтарап сыммен қосылған үш фазалы тізбек векторлы диаграммасы	183
3.6.2 Жұлдызша және үшбұрыш түрінде қосылған векторлы диаграммалар	184
3.6.3 Сызықты сым үзілгендегі жұлдызша түрде қосылған үш фазалы симметриялы тізбектің векторлы диаграммасы	185
3.6.4. Бір фазалы қысқа тұйықталғандағы бейтарап сымсыз жұлдыз түрінде қосылған векторлы диаграмма	186
3.7 Айналмалы магнитті өріс	187
3.7.1 Дірілдегіш магнитті өріс	187
3.7.2 Айналмалы магнитті өрісін жасау	189
3.7.3 Үш фазалы асинхронды қозғалтқыштың іс-әрекет қағидаты	192
3.7.4 Бір фазалы асинхронды қозғалтқыштың іс-әрекет қағидаты	193

3.8 Симметриялы құрамалар әдісі.....	194
3.8.1 Үш фазалы векторлар жүйесіндегі симметриялы құрамалар	194
3.8.2 Симметриялы құраманы эксперименталды әдіспен өлшеу	198
3.8.3 Симметриялы құрама арқылы қуатты анықтау	202
3.8 Үш фазалы тізбекті симметриялы құрамдас әдісімен есептеу	204
3.8.1 Түрлі жалғасқан тоқтың үш фазалы симметриялы тізбектегі кедергісі	204
3.8.2 Симметриялы үш фазалы тізбек тоқтарын анықтау.....	206
3.9.3 Симметриялы кернеу жүйесі көрек көзіндегі симметриялы емес тізбекті есептеу	209
Бақылау сұрақтары	220

IV ТАРАУ

4 Электр тізбектегі өтпелі процестер.....	221
4.1 Жалпы мәлімет.....	221
4.1.1 Коммутация заңдары.....	223
4.1.2 Өтпелі және еркін үдерістер.....	225
4.1.3 Өтпелі үдерісті есептеу әдістерінің ерекшеліктері	227
4.2 Өтпелі үдерісті классикалық әдіспен есептеу.....	228
4.2.1 Есептеу қағидаты.....	228
4.2.2 R, L тізбегіндегі өтпелі үдерістер R, L тізбегіндегі қысқа тұйықталу	229
4.2.3 R, C тізбектегі өтпелі үдеріс	235
4.3 Тармақталған тізбектегі R, L, C өтпелі үдерістер.....	242
4.3.1 Еркін құрамалардың дифференциалды теңдеулері.....	242
4.3.2 R, L, C тізбегіндегі конденсатордың апериодикалық разряды	242
4.3.3 R, L, C тізбегіндегі шекті апериодикалық разряд.....	244
4.3.3 R, L, C тізбектегі конденсатордың периодикалық (тербеліс) разряды	245
4.3.4 R, L, C тізбегін тұрақты кернеуге қосу	247
4.4 Тармақталған тізбектегі өтпелі үдерістерді есептеу	249
4.4.1 Есептеу ерекшелігі	249
4.4.2 Үшінші дәрежелі дифференциалды теңдеудің жалпы шешімі	250
4.4.3 Интегралдау тұрақтылықтарын анықтау ерекшелігі.....	250
4.4.4 Есептеу үлгісі	251
4.5 Өтпелі үдерісті операторлы әдіспен есептеу	258

4.5.1 Операторлы әдіс түсінігі	
Лапласстың тікелей және керісінше өзгертілуі	258
4.5.2 Жай функцияларды бейнелеу	258
4.5.3 Операторлы формадағы Ом заңы.....	260
4.5.4 Операторлы формадағы Кирхгоф заңдары	261
4.5.5 Операторлы әдіспен есептеу жалғасы	262
4.6 Өтпелі үдерістерді жиілік әдіспен есептеу.....	269
4.6.1 Жалпы мәлімет.	
Фурьенің тікелей және керісінше өзгертуі.....	269
4.6.2 Кейбір функциялар жиілік спектрі	270
4.6.3 Жиілік спектрлері үшін Ом және Кирхгоф заңдары	273
4.6.4 Жиілік әдіспен есептеу тәртібі.	
(Фурьенің интеграл әдісі)	273
4.6.5 Жиілік әдіспен есептеуге мысалдар.....	274
4.7 Дюамели интегралы арқылы өтпелі үдерісті есептеу	277
4.7.1 Жалпы мәлімет.....	277
4.7.2 Дюамели интегралының жазу формасы	278
4.7.3 Дюамель интегралы арқылы	
өтпелі үдерісті есептеу тәртібі	279
4.7.4 Дюамель интегралы арқылы мысалдарды есептеу.....	280
4.7.5 Түйіншік теоремасы	283
Бақылау сұрақтары	285

V ТАРАУ

5 Синусоидалды емес тоқ тізбегі	286
5.1 Айнымалы тоқтардың синусоидалды	
формадан өзгешелігінің себептері	286
5.2 Синусоидалды емес функцияларды Фурьенің тригонометриялық	
қатарына ыдырату	288
5.3 Синусоидалды емес функция симметриясы	289
5.4 Фурье қатарының гармоникасын	
графоаналитикалық әдіспен табу	291
5.5 Синусоидалды емес тоқ пен кернеудің модуль бойынша нақты	
және орташа мағынасы	293
5.6 Синусоидалды емес кезекті функциялар формасын сипаттайтын	
коэффициенттер.....	295
5.7 Синусоидалды емес тоқтың тізбек қуаты.....	296
5.8 Синусоидалды емес тоқтың электр тізбегін есептеу.....	299
5.9 Үш фазалы тізбектегі жоғарғы гармоникалар	304
Бақылау сұрақтары	308

VI ТАРАУ

6 Сызықты емес электр тізбегі	310
6.1 Жалпы мәлімет.....	310
6.2 Тұрақты тоқтағы сызықты емес электр тізбектің есебі	313
6.2.1 Сызықты емес тізбекті графикалық есептеу	313
6.2.2 Сызықты емес тізбекті аналитикалық есептеу	321
6.2.3 Сызықты емес тізбекті линеаризация әдісімен есептеу	323
6.2.4 Сызықты емес тізбекті итерациондық әдіспен есептеу	325
6.2.5 Сызықты емес элементтер сипаттамасы	325
6.3 Ферромагнитті элементтері бар ауыспалы тоқтың сызықты емес электр тізбегі	329
6.3.1 Сызықты емес индуктивті элементтер	329
6.3.2 Ауыспалы магнит өрісіндегі ферромагнитті материалдардың негізгі қасиеттері	330
6.3.3 Тоқ қисығының формасына гистерезистің әсері	332
6.3.4 Ферромагнитті магнит өткізгіші бар катушканың векторлы диаграммасы және алмастыру сұлбасы	333
6.3.5 Кернеу феррорезонансы.....	337
6.3.6 Токтар феррорезонансы	339
6.3.7 Кернеудің жәй феррорезонансты стабилизаторы.....	341
6.3.8 Ферромагнитті магнит өткізгіші бар трансформатор	342
6.3.9 Сызықты емес индуктивті элементтерді тәжірибелік мысалда пайдалану. Қуаттың магнитті күшейткіші	348
Бақылау сұрақтары	351

VII ТАРАУ

7. Параметрлері таратылған электр тізбектері.....	353
7.1 Жалпы мәлімет.....	353
7.2 Біртекті екі сымды желінің дифференциалды теңдеулері.....	353
7.3 Кешенді түрдегі біртекті желілер теңдеулері	355
7.4 Гиперболикалық түріндегі біртекті желі теңдеулері.....	356
7.5 Желі кернеу мен тоқтың лездік мағынасындағы теңдеуі	358
7.6 Біртекті желі параметрлері және олардың желі сипаттамасы мен қасиетіне әсер етуі.....	359
7.7 Төртұшты тәрізді біртекті желі	360
7.8 Таратылған параметрлері бар тізбектің өтпелі процесі	361
7.8.1 Біртекті желі дифференциалды теңдеуінің жалпы есептелуі	361

7.8.2 Параметрлері таратылған желідегі толқынды үдерісін зерттейтін алмастыру сұлбасы	362
7.8.3 Тік бұрышты майданы бар толқынның активті элементпен көп бейнеленуі.....	368
7.9 Электр сүзгіші.....	369
7.9.1 Сүзгіш жіктелімі мен мағынасы.....	369
7.9.2 Сүзгіш теңдеулері. Сүзгіштік қасиетін бағалау.....	369
Бақылау сұрақтары.....	371

VIII ТАРАУ

8 Электромагнитті өріс	373
8.1 Электромагнитті өрісті анықтау.....	373
8.2 Магнитті өріс және магнитті тізбек	373
8.2.1 Магнитті өрісін сипаттайтын негізгі шамалар.....	373
8.2.2 Ферромагнитті материалдар және олардың магнитті қасиеттері.....	376
8.2.3 Толық тоқ заңы және магнитті өрісін есептеуде оны қолдану.....	377
8.2.4 Био-Савар заңы және оны пайдалану мысалдары.....	380
8.2.5 Екі орта шекарасындағы магнитті өріс	383
8.2.6 Магнитті өріс энергиясы.....	384
8.2.7 Магнитті өрістегі механикалық күш.....	386
8.2.8 Магнитті тізбектер. Негізгі заңдар және есептеу әдістері.....	390
8.3 Электр өрісі және электростатикалық тізбек.....	394
8.3.1 Электр өрісін сипаттайтын негізгі шамалар	394
8.3.2 Электр өрісіндегі заттар сипаттамасы	396
8.3.3 Электр өріс кернеулігі тармақтар ағыны. Гаусс теоремасы	398
8.3.4 Сыйымдылық және электр өрісін есептеуде Гаусс теоремасын пайдалану.....	399
8.3.5 Электростатикалық өріс энергиясы	403
8.3.6 Электростатикалық өрістегі механикалық күштер	404
8.3.7 Екі диэлектриктер шекарасындағы электр өрісі.....	406
8.3.8 Электростатикалық тізбектер және тұрақты тоқ тізбегімен олардың ұқсастығы.....	408
8.3.9 Электростатикалық тізбектерді өзгерту	408
8.3.10 Электростатикалық тізбектер есептеу әдістері.....	410
8.3.11 Өткізгіш ортадағы тұрақты тоқтың электр өрісі	413
8.3.12 Тоқтың бір өтімділігі бар ортадан басқа өтімділігі бар ортаға өтуі.....	414

8.3.13 Өтімділігі бар ортадағы электр өрісі мен электростатикалық өріс арасындағы ұқсастық.....	415
8.3.14 Өтімділігі бар ортадағы және жетілмеген диэлектриктегі электр өрісін есептеу мысалдары.....	417
8.4 Өзгермелі электромагнитті өріс	419
8.4.1 Толық электр тоғы және оның тығыздығы	419
8.4.2 Электромагнитті өріс теңдеуі. Максвелл теңдеуі.....	420
8.4.8 Диэлектриктегі өзгермелі электромагнитті өріс.....	426
8.4.4 Жоғалуы бар диэлектриктегі өзгермелі электромагнитті өріс	429
8.4.5 Өткізгіш ортадағы өзгермелі электромагнитті өріс	432
Бақылау сұрақтары	434
Тест сұрақтары	436
Тестердің жауабы.....	484
Пайдаланған әдебиеттер тізімі.....	485

ПӘНДІК НҮСҚАУ

А

Активті кедергі
Активті өткізгіш
Активті қуат - екіұшты, төртұшты
Ампер
Амплитуда – амплитуда коэффициенті; тоқтың кешенді амплитудасы
Анализ
Апериодты үдеріс
Асинхронды қозғалтқыш

Ә

Әдіс – тізбекті өзгерту, өткізгіштер, салу, кешенді, түйіндегі кернеу, эквивалентті генератор(активті екі үш)

Б

Бағыт – ЭҚК, электр тоғы, кернеу, магнит айналу өрісінің бағыттары
Баланс – қуаттардың балансы
Бос жүріс

В

Ватт
Ваттметр – тізбекке қосылуы, үш фазалы тізбекке қосылуы
Вебер
Вектор диаграммасы
Вектор, вектор диаграммасы, айналмалы вектор, поинтинг вектор
Вольт – ампер сипаттамасы

Г

Гармоника – жоғарғы гармоника, бірінші гармоника, нөлдік гармоника, үш фазалы гармоника генератор
Герц
Гисторейзис тұзағы
Гисторейзис – магнитті, электрлік

Д

Джоуль
Диод
Дроссель

Диэлектрик диаграмма – әлеует

Е

Екі түйіндік әдісі

Ереже – оң қол ережесі, сол қол ережесі, жұлдызша қосу ережесі, үшбұрышты қосу ережесі

Еркін ауытқу

Есептеу – үш фазалы симметриялы тізбекті есептеу, үш фазалы симметриялы тізбектеу

Ж

Жүйе – тоқтың тура реттілік жүйесі, тоқтың кері реттілік жүйесі, тоқтың нөлдік жүйесі

Жүктеме – қиыстыру желі жүктемесі, симметриялы жүктеме, симметриялы емес жүктеме

Жоғарғы гармоника

З

Ампер заңы

Ом заңы

Джоуль-Ленц заңы

Киргхоф заңы

Ленц заңы

Кешен түріндегі Кирхгоф заңдары

Толық тоқ заңдары

Электрмагниттік индукция заңы

И

Индуктив – тізбекті индуктив, өзара индуктив, Соленоид индуктивы

Индукция – магнит индукциясы, магнитэлектрлік индукция, электрмагниттік индукция, өзара индукция

К

Катушка

Катушка индуктиві

Кедергі

Кернеу – мінсіз кернеу, желілік, фазалы, магнит, реактивті, түйіндік

Кернеулік – магнитөріс, электрөріс

Классикалық әдіспен ауыспалы үдеріс шешу

Конденсатор, төртұшты конденсатор

Коммутация

Контур, индуктивті байланысты контур

Коэффициент, өшу коэффициенті, пайдалы әсер коэффициенті, форма коэффициенті, қуат коэффициенті, төртұшты коэффициенттер

Қ

Қорек көзі – ЭҚК

Қоректену көзі

Қуат – активті, реактивті, толық, кешенді түрдегі, лездік, симметриялы емес жүктеме

М

Магнитқозғалтқыш күш

Материал – диамагнитты, магнитты, ферромагнитты, парамагнитты

О

Орам – орамның қарама-қарсы қосылуы, үйлесімді қосылуы

Ө

Өзара ұқсастық

Өріс – магнит, айналмалы, үш фазалы, электрлік,вихр, тура реттелік, кері реттелік, нөлдік өріс Өткізгіш – индуктивты, комплексті, өзара,сиымдылық, өзімдік өткізгіш

П

Потенциал – электр потенциалы

Потенциал диаграммасы

Процесс – ауыспалы, өтпелі, орнықты, классикалы, опера-торлы әдіс

Р

Режім – динамикалық, қысқа тұйықты, номиналды, статикалық, үйлесімді, бос жүру

Резонанс – кернеу, тоқ

С

Сипаттама – вебер-ампер, вольт-ампер, сыртқы тоқ көзі, сыртқы энергия көзі сипаттамасы

Символ

Сызықты элемент

Сызықты емес элемент

Сүзгілер – төменгі жиілікті, жоғарғы жиілікті, жолақты, бөгелетін, к-типті, м-типті

Т

Тәжірибе – бос жүріс, қысқа тұйықталған

Гаус Максвелл теоремасы

Тесла

Теңдеу – контур, түйіндік, магнит өріс электр балансы, төрт полюстің теңдеуі

Толқын – кері, тура, қайтару, тұрақты, құлайтын толқын

Ток – контур, айнымалы, синусоидалы, толық, активті, бос жүріс, ығыстыру, фазалы, жүйелі, тұрақты ток

Трансформатор – екі орамды, ферромагнитты өзекшесіз, ауа трансформаторы

Түйіндік – өлшеуіш, электр тізбегі

Тізбек – магнит өріс, электр, біртекті, біртекті емес, күрделі, сызықты, сызықты емес тізбек

У

Уақыт – кешігу уақыты

Ф

Фаза – бастапқы, қабылдағыштың фазалы кернеуі, қабылдағыштың фазалы топтары, фазалы жылдамдық

Феррорезонанс – кернеу, ток феррорезонансы

Фурье – қатарлардың жазылу формасы

Ұ

Ұқсастық – операторлық, кешенді теңдеулердің ұқсастығы

Ү

Үшбұрыш – кедергілер, өткізгіштер, қуаттар үшбұрышы

Үйлесімді – орамдардың қосылуы

Ш

Шұра

Шәкіл

Ы. ТУҒАНБАЕВ

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКАНЫҢ
ТЕОРИЯЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ**

Оқулық

Компьютерде беттеген **Ақылова А.Т.**

Басуға 07.12.2012 ж. қол қойылды. Пішіні $60 \times 90^{1/16}$.

Баспа табағы 31,18. Шартты баспа табағы 23,7.

Есептік баспа табағы 28,9. Офсеттік басылым.

Таралымы 1400 дана. Тапсырыс №3/127-12.

«Экономика» баспасы» ЖШС

050063, Алматы қаласы, Сайын көшесі, 81-үй

ISBN 978-601-225-454-9

