

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ
МИНИСТРЛІГІ**

**Қ. А. ЯСАУИ АТЫНДАҒЫ ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ҚАЗАҚ - ТҮРІК
УНИВЕРСИТЕТІ**

ӘОЖ -621.4., 623.382

Қолжазба құқығында

Бекболатов Алимжан Берикбаевич

**КҮШТІК ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫҢ ЕСЕПТІК ПРОЦЕДУРАЛАРЫН
АЛГОРИТМДЕУ**

6M071800 – ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАСЫ мамандығы бойынша электр
энергетика ғылымдарының магистрі академиялық дәреже алу үшін магистрлік
диссертация

ТҮРКІСТАН 2015

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ
МИНИСТРЛІГІ
Қ.А.ЯСАУИ АТЫНДАҒЫ ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ҚАЗАҚ-ТҮРІК
УНИВЕРСИТЕТІ**

Қорғауға жіберілді:

Электр инженерия кафедрасының
меңгерушісі техн.ғ.к., доцент

_____ Айтжанов Н.М.
« _____ » _____ 2015ж.

Магистрлік диссертация

**КҮШТІК ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫҢ ЕСЕПТІК ПРОЦЕДУРАЛАРЫН
АЛГОРИТМДЕУ**

Мамандығы: 6М060200 – ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКА

Магистрант _____ Бекболатов А.Б.
(қолы) (аты-жөні, тегі)

Ғылыми жетекшісі,
т.ғ. докторы _____ Рустамов Н.Т.
(қолы) (аты-жөні, тегі)

МАЗМҰНЫ

КІРІСПЕ	5
I ТАРАУ. КҮШТІК ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫҢ ЖҰМЫС ІСТЕУ ПРОЦЕССИНІҢ АНАЛИТИКАЛЫҚ КӨРІНІСІ	7
1.1. Трансформаторлардың жұмыс істеу принципі мен конструкциясы...	7
1.2. Трансформатор кернеулерінің теңдеуі.....	15
1.3. Магнит қозғағыш күштер мен тоқтардың теңдеулері.....	18
1.4. Келтірілген трансформатордың орын басу сұлбасы мен екінші ораманың параметрлерін келтіру және векторлық диаграммасы.....	22
1.5. Үш фазалы тоқты түрлендіру мен үш фазалы трансформатордың орамаларын жалғау сұлбасы.....	26
1.6. Келтірілген трансформатордың орын басу сұлбасы мен екінші орамаға келтірілген параметрлер.....	21
1.7. Трансформатордың векторлық диаграммасы.....	24
1.8. Үш фазалы тоқты түрлендіру мен үш фазалы трансформаторлардың орамаларын жалғау сұлбасы.....	26
II ТАРАУ. ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫҢ ОРЫН БАСУ СҰЛБАЛАРЫ	33
2.1 Трансформаторлардың орын басу сұлбаларының параметрлерін тәжірибелі түрде анықтау.....	33
2.2. Трансформатордың қарапайым векторлық диаграммасы.....	40
2.3. Трансформатордың сыртқы сипаттамасы.....	41
2.4. Трансформатордың ПӘК мен және шығындары.....	44
2.5. Орамаларды жалғау топтамалары.....	47
III ТАРАУ. ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫ ЕСЕПТЕУ АЛГОРИТМІ БОЙЫНША ТӘЖІРИБЕЛІК БӨЛІМ	52
2.1. Күштік трансформаторларды есептеу процедураларын алгоритмдеу. Delphi Borland программасында күштік трансформаторларды есептеу процедурасының құрылуы.....	52
2.2. Күштік трансформаторды есептеу программасы. 3D Max программасында күштік трансформаторлардың конструкциясы және жобалау кезінде есептеу алгоритмінің процедураларының құрылуы.....	55
ҚОРЫТЫНДЫ	69
ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ	70

АНДАТПА

Диссертациялық жұмыста күштік трансформаторлардың жинау алды есеп процедурасы туралы аналитикалық және бейнелік мәліметтер қарастырылып, бұл процедураның өте күрделі процедура екендігі көрсетілген. Сонымен қатар есеп процедурасына жеңілдету алгоритмдік әдістері жасалған. Бұл программалық әдіс күштік трансформаторларды жобалау кезінде туындайтын есеп қиыншылықтарын жеңілдетіп, тәжірибеде көрсетеді. Есептеудің реттілік алгоритмдары 3D кеңістігінде қарастырылып, ұсынылған алгоритмнің дәлдігін көрсетеді.

Жобаланған есептеу процедурасы алдымен Delphi программасында есептелгеннен соң бұл процедура 3D Max программасында комплекс арқылы бейнелі түрде түсіндіріледі. Бұл диссертация жұмысының нәтижелерін тек қана трансформатор заводының конструкторлық бөлімінде ғана емес, сонымен қатар оқу процессінде электрондық оқулық ретінде қолдануға болады.

АННОТАЦИЯ

В диссертационной работе рассмотрены аналитические и визуальные данные сложных расчетных процедур для конструкционной сборки силовых трансформаторов. В связи с этим, разработан упрощенный алгоритмический метод расчетных процедур. Этот программный метод дает возможность облегчить сложность расчетов на практике, возникающая при проектировании силовых трансформаторов. Порядковые алгоритмы расчета, выполненные этим программным методом, рассматриваются в пространстве 3D и доказывают точность расчетов.

Проектируемая расчетная процедура сначала рассчитана на программном языке Delphi, после того она комплексно представлена в вербальном виде с помощью программы 3D Max.

Полученные результаты можно использовать не только в конструкторском отделении трансформаторного завода, но и как электронный учебник в учебном процессе.

ANNOTATION

In the dissertation work there are taken up analytical and verbal accesses of complexity calculation procedures for construction of power transformers. In addition, there is reviewed an algorithmic method for calculated procedures. The algorithmic method gives us chance to simplify complexity of calculations in a practice, which arises in projecting power transformers. Ordinal algorithms of calculation are shown in the 3D space, thereafter proven accuracy of calculations.

Calculated procedure at the beginning of the work is performed in the program Delphi, then presented through verbal view. As a result, this can be used not only in a construction department a transformer plant and as electronic textbook in educational process.

ONLY YZUJIN

АНЫҚТАМАЛАР

Осы магистрлік диссертацияда сәйкес анықтамалары бар келесі терминдер пайдаланылды:

Delphi бағдарламалау жүйесі – бүгінгі күнде бағдарламаларды жасауға арналған кең қолданылатын жүйелердің бірі болып табылады. Бұл программаның аты Кориноф бұғазының ежелгі грек қаласы Дельфы атымен байланысты. Оның құрамындағы саймандар мен компоненттердің көмегімен бағдарламалар жобалары құрастырылады.

Autodesk 3D Max – Autodesk компаниясымен өңделіп шыққан екі және үш өлшемді графиканы жасау мен сол графикалардың анимациясын қарастыратын профессионалды көп функциялы жүйелі программа.

Macromedia Flash – web технологиясы мен мультимедиялық презентацияларды орындайтын мультимедиялық платформалық программа. Macromedia Flash программасы видео мен аудиобасылымдарды жасап шығуда және ойындардың анимациясын орындауда қолданылады.

БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

X1	–	трансформатор түрі
MT	–	майлы трансформатор
ҚТ	–	құрғақ трансформатор
X2	–	трансформатордың жасалу түрі
ЖК	–	жоғары кернеу
ТК	–	төменгі кернеу
Y/Y_H	–	жұлдызша және жұлдызша нөлдік өткізгішімен
Δ/Y_H	–	үшбұрышша және жұлдызша нөлдік өткізгішімен
Y/Z_H	–	үшбұрышша және зигзаг нөлдік өткізгішімен
Y/Δ	–	жұлдызша және үшбұрышша
Δ/Y	–	үшбұрышша және жұлдызша
ҮТ	–	үш фазалы трансформатор
БТ	–	бір фазалы трансформатор
ТКТО	–	төменгі кернеудің таратылма орамасы
ЖКТО	–	жоғары кернеудің таратылма орамасы
БЖР	–	бос жүріс режимі
НТ	–	номиналды тоқ
НК	–	номиналды кернеу
НҚ	–	номиналды қуат
ҚТТ	–	қысқа тұйықталу тоғы
БЖК	–	бос жүріс кернеуі
ҚТ	–	құйынды тоқтар
ЖКР	–	жүктеме кезде кернеуді реттеу
3D Max	–	үш өлшемді кеңістік

Delphi	–	графикалық программа
Interface	–	Delphi платформасы
Macromedia	–	екі өлшемді кеңістік
Flash		

Оқу үлгісін

КІРІСПЕ

Жұмыстың өзектілігі. Жапы электр энергиясындағы сұрақтарды шешу үшін әрқашан негізгі үш мәселе қозғалып отырады: электр энергиясын өндіру, сол өндірілген энергияны тарату сосын оны тұтыну. Осы электр энергиясын тарату үшін күштік трансформаторлар қосалқы станцияларда айнымалы тоқтың кернеуінің бір мәнін айнымалы тоқтың кернеуінің басқа мәніне өзгерту мақсатында қолданылады.

Қазіргі заманғы трансформаторлар әр түрлі конструктивті элементтерден тұрады: магнит өзекшесінен, орамалардан, бактен. Трансформатордың активті бөлігін магнит өзекшесіне орнатылатын стержінмен жабдықталатын орама құрайды, ал қалған элементтері қосымша бөліктері болып есептеледі

Трансформаторларды өндіріске шығару үшін ең алдыменен оны жобалау керек. Бұл процедура өте күрделі және көп уақытты талап етеді. Мысалы, трансформатордың бос жүріс режимінде трансформация коэффициентін бағалау үшін алдын – ала берілген кіріс және шығыс кернеулерін туындататын бірінші және екінші орамдардың орам сандарын есептеуге тура келеді. Тағы да бұл трансформатордың ферромагниттік пластинкаларының ауданы және олардың гистерезистік қасиеттерін есептеуге тура келеді. Бұл есеп процедураларының нәтижесі өндіріске шығарылатын трансформатордың сапасына тікелей әсер етеді.

Сондықтан осы есеп процедураларын нақты және оперативті қамтамасыз ету сапалы трансформаторларды өндіруге себеп болады. Осы айтқанымыздан көрініп тұрғандай трансформаторлардың параметрларын есептеу процедурасын автоматтандыру өте тиымды нәтиже береді. Осы айтқандарымызды қортындылай келе магистрлік диссертацияның тақырыбы өте өзекті екендігі көреміз.

Зерттеудің мақсаты. Трансформатор өндіретін өндіріс орындарында трансформаторларды жобалау проблемасы өте күрделі, сондықтан бұл жұмыстың мақсаты есеп процедураларын жеңілдетіп бейне түрде жобалаушыларға жеткізу болып саналады. Бұл мақсатқа жету үшін төмендегі мәселелерді шешуге тура келді:

- күштік трансформатордың есептерінің алгоритімін құру;
- есептеуді Borland Dilph программалау тілінде орындау;
- Borland Dilph программалау тілінде трансформатордың параметрлерінің мәндерін есептеу арқылы уақыт тиімділігін арттыру;
- есептеулер нәтижесінде шыққан мәндер бойынша сол есептелген трансформатордың конструкцияларын реттілікпен жинақталу анимациясын 3D Max дизайнерлеу программасында көрсету;
- дизайнерлік программалау бойынша жасалатын анимациялық көріністі оқу құралы ретінде пайдалануға қол жеткізу.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы. Өндіріске шығаратын трансформаторлардың барлық 100 – ден астам параметрларының есептеу процедурасының алгоритмдеу диссертацияның негізгі жаңалығы болып саналады. Осы алгоритмдерді 3D кеңістігінде бейнелі (вербалды) түрде

жобалаушыларға ұсыну диссертациялық жұмыстың кейінгі жаңалығы болып саналады. Диссертациялық жұмыстың соңғы жаңалығы жобалау процедурасының оперативтік дайындауы болып, мұның салдары өндіріске шығарылатын трансформаторлардың сапасын көтеру болады.

Зерттеу нәтижелерінің ғылыми және тәжірибелік маңыздылығы. Уақыт өте трансформаторлардың шығынын азайту мақсатында жасалып жатқан есептеулер жаңа трансформаторлар түрін табуға септігін тигізеді. Осы есептеулер үшін жасалған программалық комплекс оқу процедурасына және өндірістің КБ – ларына электрондық оқулық ретінде пайдаланса болады.

Магистрлік диссертация жұмысының құрылымы мен көлемі. Диссертация кіріспеден, екі тараудан, қорытынды және пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыс негізгі мәтін парағында 71 бетте баяндалып, 9 сурет және 7 кестемен сипатталған. 63 әдебиет көзі қолданылған.

Негізгі сөздердің тізбесі: күштік трансформатор, трансформаторлардың есебі, алгоритмдер, программалау тілі.

Жарияланымдар туралы мәліметтер.

Магистрлік диссертацияның негізгі мазмұны төмендегі тізімдегі 2 баспа жұмысында Болгария мемлекетінде жарық көрген.

1. Algorithmization of Calculated Procedures of Power Transformers // Болгария ВСУ Черноризец Храбър Университет. – 2014. Е – Journal VFU., ISSN 1313-7514. Формите на собственост като детерминанти на планирането и регулирането – The forms of ownership as determinants of planning and regulation (in Bulgarian).

2. Program for the calculation of power transformer // Болгария ВСУ Черноризец Храбър Университет. – 2014. Е – Journal VFU., ISSN 1313-7514. Формите на собственост като детерминанти на планирането и регулирането – The forms of ownership as determinants of planning and regulation (in Bulgarian).

I ТАРАУ. КҮШТІК ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫҢ ЖҰМЫС ІСТЕУ ПРОЦЕССИНІҢ АНАЛИТИКАЛЫҚ КӨРІНІСІ

Кіріспе

Трансформаторлар деп екі (немесе одан да көп) индуктивті байланысқан орамалардан тұратын және де айнымалы токтың бірінші жүйесін (бірінші) тікелей электромагниттік индукцияның пайда болуы арқылы айнымалы токтың басқа (екінші) жүйесіне өзгертетін электромагниттік құрылғыны айтамыз[42].

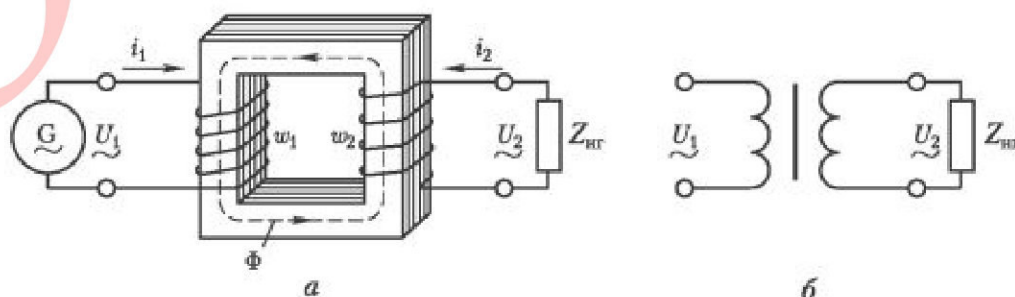
Айнымалы токтың екінші жүйесі оның бірінші жүйесінен кез – келген параметрлерімен: кернеу және ток мәні, фазалар саны, жиілігімен және кернеудің (токтың) қисық сызықты формасымен ерекшеленеді. Электротехникалық қондырғыларда көбінесе қолданылатын, энергетикалық жүйеде электр энергияны таратуда кернеу мен токтың мәнін өзгертетін күштік трансформаторлар қорданылады. Мұнда фазалар саны, кернеудің (токтың) қисық сызықты формасы және жиілік өзгеріссіз қалады

Пайдалану мақсатына қарай трансформаторлар жалпы және арнайы болып бөлінеді. Жалпы мақсаттағы күштік трансформаторлар: тарату желілерінде, әр түрлі электр қондырғыларда керекті кернеуді алу үшін қолданылажы. Арнайы мақсаттағы трансформаторларға: пештік және дәнекерлік, автоматика құрылғыларындағы (пик – трансформаторлары, импульстік, жиілік арттырғыш), өлшеуіш және сынақ жасауға арналған трансформаторлар.

1.1. Трансформаторлардың жұмыс істеу принципі мен конструкциясы

Қазіргі заманғы трансформаторлар әр түрлі конструктивті элементтерден тұрады: магнит өзекшесінен, орамалардан, бактен. Трансформатордың активті бөлігін магнит өзекшесіне орнатылатын стержінмен жабдықталатын орама құрайды, ал қалған элементтері қосымша бөліктері болып есептеледі.

Қарапайым трансформаторлар ферромагниттік материалдан жасалатын магнит өзегінен тұрады және магнит стержініне орналасқан екі орамадан тұрады (сурет 1.1.1, а). Бірінші орама кернеуі U_1 айнымалы токтың Γ қорек көзіне жалғанады



Сұлба 1.1.1. Электромагниттік (а) және принципалды (б)

ал екінші орама тұтынушыға Z_n жалғанады.

Бірінші ораманы айнымалы тоқ қорек көзіне қосқан кезде магнит өзекшесінде айнымалы магнит ағынын Φ пайда болдыратын осы орама арқылы i_1 тоғы өтеді. Бұл ағым магнит өзекшесінде тұйықталып екі (бірінші және екінші) ораманың бойымен жүріп сосын осы екі орамада ЭҚК тудырады:

Бірінші орамадағы өздік индукцияның ЭҚК

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.1.1)$$

Екінші орамадағы өздік индукцияның ЭҚК

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.1.2)$$

мұнда w_1 және w_2 – трансформатордың бірінші және екінші орамаларындағы орам саны [43].

Z_n жүктемесін трансформатордың екінші орамасының шығыс ұштарына жалғаған кезде e_2 ЭҚК әсерінен осы орама торабында i_2 тоғы пайда болып, ал осы екінші ораманың ұштарында U_2 кернеуі пайда болады [57].

Жоғарлатқыш трансформаторларда $U_2 > U_1$ ал төмендеткіш трансформаторларда $U_1 < U_2$. (1.1.1) және (1.1.2) орамаларда туындайтын ЭҚК e_1 және e_2 бір – бірінен айырмашылығы тек әр түрлі орам сандарының w_1 және w_2 болуында екені көрініп тұр.

Жоғары кернеу торабына жалғанатын трансформатор орамасын жоғары кернеулі ЖК орама деп; ал төменгі кернеу торабына жалғанатын трансформатор орамасын төменгі кернеулі ТК орама деп айтады.

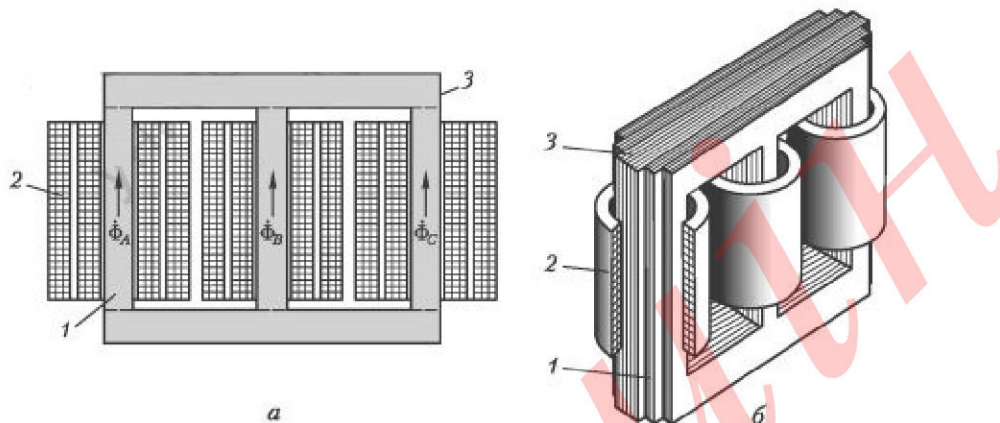
Трансформатор – айнымалы тоқ аппараты. Егер оның бірінші орамасын тұрақты тоқ көзіне қоссақ, онда трансформатордың магнит өзекшесінде болатын магнит ағымы шамасы жағынан да бағыты ($d\Phi/dt=0$) бойынша да тұрақты болады, сол себептен трансформатор орамаларында ЭҚК туындамайды, сондықтан да бірінші тораптан электр энергиясы екінші торапқа берілмейді.

Трансформаторлардың жіктелуі:

- салқындату жүйесі бойынша – ауамен (құрғақ трансформаторлар) және маймен (май трансформаторлары) салқындату;
- фазалап саны бойынша – бір және үш фазалы;
- магнит өзекшесінің формасы бойынша – стержінді, брондық, броностержіндік және торидалді;
- ораманың саны бойынша фазаға – екі орамалы, көп орамалы.

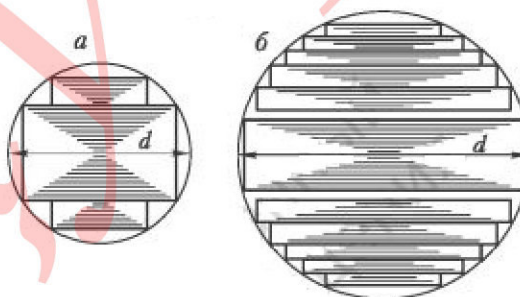
Магнит өзекшесі – бұл екі функция орындайды: біріншісі ол трансформатордың негізгі магнит ағымын тұйықтайтын магниттік байланысты құрайды; екіншісі ол ораманың қайталама қосқыштардың шығыстарының орнатылуы мен бекітілуіне негіз болады. Магнит өзекшесі бірінің үстіне бірі

жанасу (шихтілеу) конструкциясы бойынша орындалатын қалыңдығы $0,27 \div 0,5$ екі жағынын қапталатын оқшаулама пленкасымен жасалатын стальдан тұрады. Магнит өзекшесінің мұндай конструкциясы айнымалы магнит ағымы бойынша туындайтын құйын тоқтарын шектеу арқылы трансформаторда энергия шығыны шамасын азайтуға алып барады.



Сурет 1.1.2. Орамасымен бірге стержін типтегі магнит өзекшесі

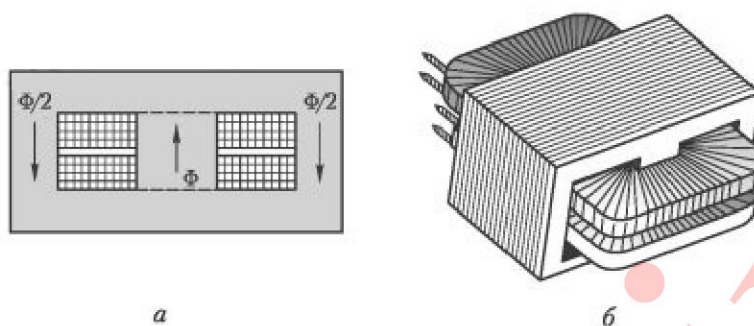
Стержін типтегі магнит өзекшесінде (сурет 1.1.2) стержіндер вертикалды орналасады, ол стержіндерге асты мен үстінен ярмалармен 3 тұйықталатын орамалар 2 орнатылады. Әр стержінге өзіне тиесілі фазасы бойынша орамалар орнатылады: соңғы екі стержінде – Φ_A және Φ_C ағымдары, ал ортаңғы стержінде Φ_B . Стержіндер диаметрі d (сурет 1.1.3) шеңбер секілді болып келетін сатылы қима бойынша жиналады.



Сурет 1.1.3. Стержін қимасының формасы:
а – аз және орташа қуаттағы трансформаторлар,
б – жоғары қуаттағы трансформаторлар

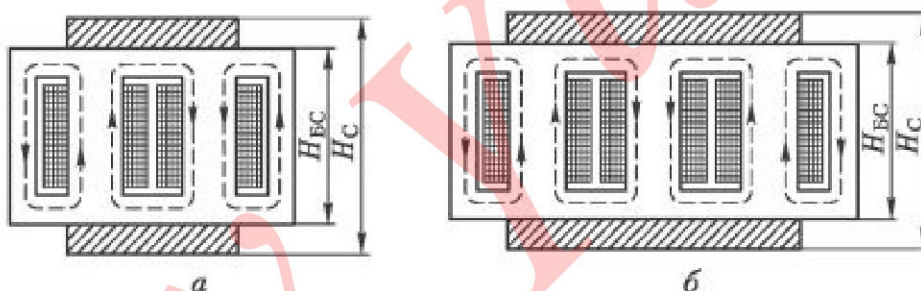
Брондық типтегі магнит өзекшесі орамаларды (сурет 1.1.4) жеке қаптайтын стержіндер мен ярмалардан тұрады. Брондық типтегі магнит өзекшесінде магнит ағымы стержінде ярмалардың магнит ағымынан екі есе көп болады, себебі әр ярманың қимасы стержін қимасынан екі есе аз болады. Магнит өзекшесін дайындау технологиясының қиын болуына байланысты

брондық типтегі магнит өзекшесін пайдалану көп қолданыс таппаған, оларды тек аз қуатты күштік трансформаторларда қолданады (радиотрансформаторлар)



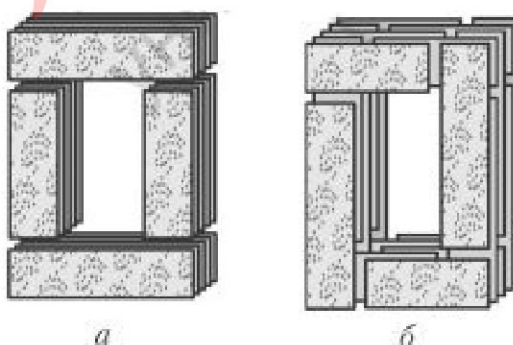
Сурет 1.1.4. Брондық типтегі бір фазалы трансформатор
а – құрылысы, б – сыртқы көрінісі

Жоғары қуаттағы трансформаторларға броностержіндік (сурет 1.1.5) магнит өзекшесін пайдаланады. Жасау барысында электр техникалық стальдың шығыны көп болады, бірақ магнит өзекшесінің биіктігін ($H_{БС} < H_C$) кішірейтуге мүмкіндік береді, яғни трансформатордың да биіктігі кішірейеді.



Сурет 1.1.5. Броностержінді трансформаторлардың магнит өзекшелегі

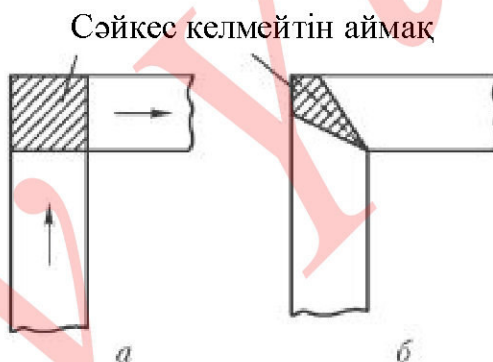
Стержіндік магнит өзекшесін жасау үшін стержіндер мен ярмаларды бір – бірімен біріктіру қажет, ол үшін бірінің үстіне бірі жанасу (шихтілеу) конструкциясы мен бірлестіру конструкциясы қолданылады [14].



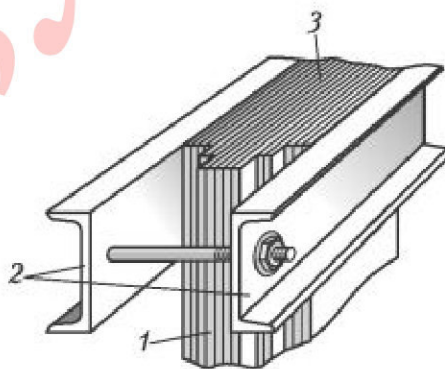
Сурет 1.1.6. Магнит өзекшелерін бірлестіру (а) және шихтілеу (б) конструкциялары

Бірлестіру конструкциясында (сурет 1.1.6, а) стержіндер мен ярма жеке – жеке жиналады, сосын стержінге ораманы орнықтырады, одан соң құйынды тоқтарды азайту мақсатында бірлесетін элементтер арасына оқшаулағыш қаптамаларын алдын – ала қойып, стержіндер мен ярмалардың листтерін бірін бірі жабатындай етіп астыңғы және төменгі ярмаларды орнатады. Екі ярманы орнатқан соң барлық конструкцияны престейді және вертикальді шпилькамен тартып тастайды [22].

Күштік трансформаторлардың магнит өзекшелерін шихтілеу конструкциясы (сурет 1.1.6, б) стержіндер мен ярмаларды қабат – қабат етіп жинақтайды. Жалпы қабат 2 – 3 листті құрайды. Қазіргі таңда күштік трансформаторларын электр техникалық қорытпалы сталдан жасайды. Оның магниттік қасиеті жанама бойынша жиналатын листтерден қарағанда листтердің жылжымалы түрде жинақталған формасында көп болады. Сол үшін шихтеу конструкциясында листтің бұрылу бұрышы 90° болғандықтан “сәйкес келмейтін аймақ” пайда болады. Осы аймақтарда магниттік кедергі мен магнит шығыны өсуі байқалады. Бұл құбылысты төмендету мақсатында шихтілеуге кетік көрінісін беретін пластиналар қолданылады. Бұл жағдайда тікелей (сурет 1.1.7, а) біріктірілудің орнына қиғаш (сурет 1.1.7, б) біріктіріледі, бұл дегеніміз “сәйкес келмейтін аймақты” азайтады.



Сурет 1.1.7. Тікелей (а) және қиғаш (б) біріктіргендегі сәйкес келмейтін аймақ

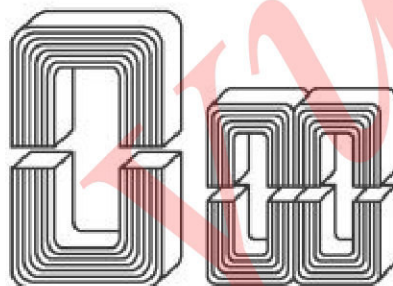


Сурет 1.1.8. Ярманы престау

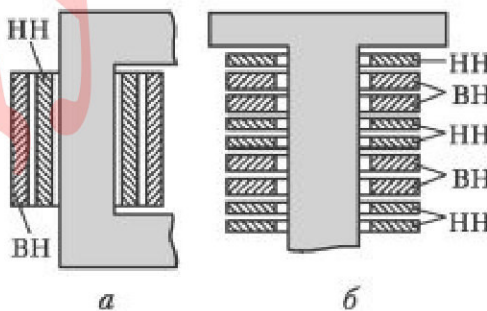
Магнит өзекшесі ажырап кетпес үшін оны стальдан жасалатын сымдармен қысып тастайды. Ярмаларды 3 престоу және стержіндерді 3 біріктіру үшін стержіндердің (сурет 1.1.8) соңына қойылатын ярмалы балкаларын 2 қолданады.

Трансформатордың жұмыс істеу барысында метал бөліктерінің арасында оқшауланған аралықтарды тесіп өтуі мүмкін болатын потенциалдар айырымының әсерін болдырмау үшін магнит өзегінің қатырып бекітуге арналған детальдарын міндетті түрде жерлейді (жерге жалғайды). Жерлеу магниттік ленталардың бірінші соңын магнит өзекшесінің стальды пластиналарының арасына жалғанумен, ал екінші соңын ярмалы балкаларының соңғы жағына жалғануымен жүзеге асады [17].

Төмен қуатты (көбінесе 1 кВА аспайтын) трансформаторлардың магнит өзекшелерін жіңішке ленталы электротехникалық қорытпалы стальды орау арқылы дайындайды. Мұндай магнит өзекшелерін бөлік – бөлік (сурет 1.1.9) етіп дайындайды, ал арасына орамаларды салған соң бір – біріне жанастырып, оларды арнайы хамутпен тартып құрастырады.



Сурет 1.1.9. Бөлініп жасалатын ленталы магнит өзекшесі



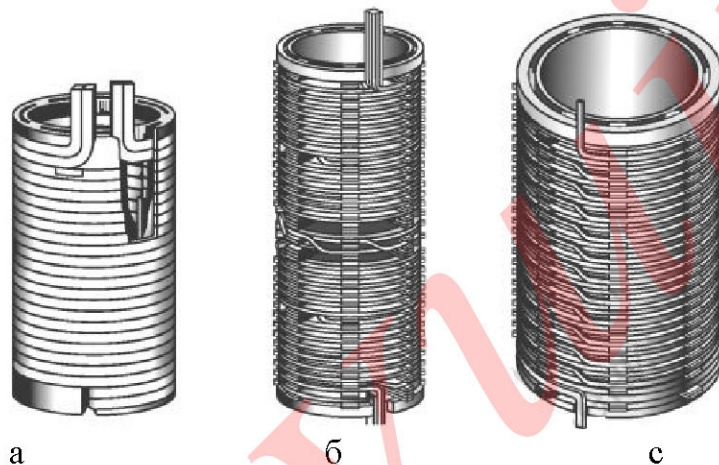
Сурет 1.1.10. Трансформатордың концентрлік және дискілік түрдегі орамалары

Орамалар. Иірілген мақталықағазды жіппен немесе кабельді қағазбен оқшауланатын тікбұрышты немесе дөңгелек қимадағы сымдардан (өткізгіштерден) орташа және жоғары қуатты трансформаторлардың орамалары дайындалады. Орамалардың стержінде өзара орналасуына байланысты концентрлік және дискілік түрдегі орамалар болып бөлінеді. Концентрлік

орамаларды цилиндр түрінде жасайды, стержіннің ортасына орнатады: стержінге жақын етіп ТК ораманы сосын оның сыртына ЖК ораманы орнатады (сурет 1.1.10, а).

Дискілік орамаларды ТК мен ЖК орамаларын бөлек – бөлек секция түрінде жасап, стержінге бірінен соң бірі орналасатындай етіп дайындайды (сурет 1.1.10, б). Дискілік орамалар арнайы түрдегі трансформаторларға қолданылады, негізінде олардың қолданысы аз.

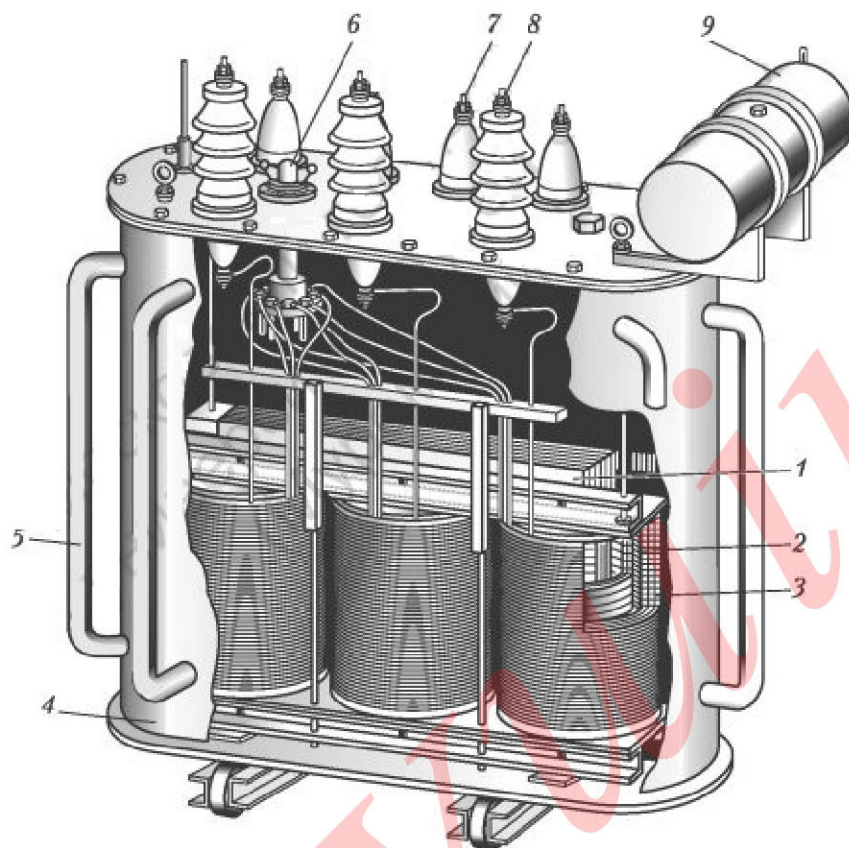
Конструкциялануына байланысты концентрлік орамалар: 1) цилиндрдік – номиналды тоғы 800 А дейінгі ТК орамаларға тік бұрышты қимадағы (сурет 1.1.11., а) өткізгіштің болатын бір немесе екі қабатты орма пайдаланылады.



Сурет 1.1.11. Концентрлік ораманың конструкциясы

2) винттік бір және көп жүрісті орамалар – оларды көптеген тік бұрышты қимадағы параллельді сымдардан дайындайды. Мұнда орамдар бір немесе көп жүрісі болатын винттік сызық (сурет 1.1.11, б) бойынша оралады. 3) үздіксіз орамалар (сурет 1.1.11, в) спираль бойынша “үздіксіз” оралған және бір бірімен пайкасыз байланысқан бөлек – бөлек дискті орамалардан (секциялар) тұрады.

Маймен суыту жүйесінде трансформаторларда магнит өзекшесі орамалармен бірге бакта орналасады, бактын іші трансформатор майымен толтырылады (сурет 1.1.13). Орамалар 2 және 3 трансформатор багіне құйылатын трансформатор майында орналасады, осы трансформатор майы орамалар мен магнит өзекшесіндегі 7 қызуды өзіне сіңіріп, оның ауадан қарағанда жылу өтімділігі жоғары болуына байланысты жылуды бактың 4 қабырғасы және радиатор 5 арқылы қоршаған ортаға тез өткізіп отырады. Майдың ауадан қарағанда электрлік қатандығы жоғары болғандықтан жоғары кернеулі трансформаторларда қолданыс тапқан, сондықтан бір қуаттағы майлы трансформаторлардың габариті мен салмағы сол қуаттағы құрғақ трансформаторлардан қарағанда әлде қайда кіші [13].



Сурет 1.1.13. Маймен суытылатын трансформатор құрылысы

Температура өзгерген кезде, май көлемін компенсация жасау үшін, майдың ауамен байланысуына байланысты оның ылғалдануы мен тотығуын болдырмас үшін “кеңейткіш” 9 қолданылады. Ол бактың қақпағында орналасады, цилиндрлік сосуд түрінде болады. Температураның өзгеруіне байланысты май деңгейінің өзгеруі майға толтырылған бакте емес атмосферамен байланысқан “кеңейткіште” болады.

Трансформатор жұмыс істеу процесі кезінде көп газдардың бөлінуі мүмкін, оның салдары бактың ішіндігі қысымды арттырып жібереді, сол себептен бактың бұзылуын алдын – алу үшін қуаты 1000 кВА және одан да жоғары трансформаторлардың қақпағына құбыр орнатады. Құбырдың төменгі жағы бакпен, ал жоғары жағы шыны дискпен қатырылған фланецпен жанасады. Бакте қысым қауіпсіз қысымнан жоғарлаған сәтте, шыны диск сынады сосын газдар ауаға шығады.

Майлы трансформаторда бак пен кеңейткішті байланыстыратын құбырға газ релесі орнатылады. Трансформаторда көп газдар бөлінсе (мысалы, ораманың орамдар арасында қысқа тұйықталу болған кезде), газ релесі іске қосылып, ажыратқыштың басқару тізбегінің контактісін тұйықтайды, сосын ажыратқыш трансформаторды тораптан ажыратады. Трансформатордың орамаларын сыртқы тізбекпен жалғауға 7 және 8 кірістерін қолданамыз. Майлы трансформатор кірістеріне жалпы өтпелі фарфорлы оқшауламалар қолданылады. Қосалқы станция аумағында трансформаторды жылжыту

мақсатында бактын астында арба орнатылады. Бактың қақпасында кернеу – кайта қосқышының бұрамасы 6 орнатылған.

Трансформатордың құрамы оның номиналды параметрлермен анықталады: 1) номиналды бірінші сызықты кернеу $U_{1\text{НОМ}}$ В, кВ; 2) номиналды екінші сызықты кернеу $U_{2\text{НОМ}}$ (жүктеме жалғанбай тұрған кездегі екінші ораманың ұштарындағы кернеу) В, кВ; 3) бірінші $I_{1\text{НОМ}}$ және екінші $I_{2\text{НОМ}}$, А орамалардағы номиналды сызықты тоқтар; 4) номиналды толық қуат $S_{\text{НОМ}}$, кВА; (бір фазалы трансформаторға, $S_{\text{НОМ}} = U_{1\text{НОМ}} \cdot I_{1\text{НОМ}}$ үш фазалы трансформаторға $S_{\text{НОМ}} = \sqrt{3} \cdot U_{1\text{НОМ}} \cdot I_{1\text{НОМ}}$).

Номиналды сызықты тоқ трансформатордың номиналды қуаты бойынша анықталады: үш фазалы трансформаторлар үшін:

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{НОМ}}}; \quad I_{2\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{НОМ}}}; \quad (1.1.3)$$

мұндағы $S_{\text{НОМ}}$ үш фазалы трансформатордың номиналды қуаты, кВА.

Кез келген трансформатор айнымалы тоқ торабына белгілі бір жиілікте қосылуы қарастырылған. Өзіміздің елімізде трансформаторлар $f=50$ Гц жиілікке арналып құрастырылады, ал кей мемлекеттерде жиілік $f=60$ боп келеді.

1.2. Трансформатор кернеулерінің теңдеуі

Негізгі магнит ағымы Φ трансформатордың магнит өзекшесінде орамалардың ω_1 және ω_2 орамдары (сурет 1.1) бойынша жүріп, сол орамаларда [27]. ЭҚК [1.1.1 және 1.1.2 формулалары] туындатады:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (1.2.1)$$

Егер магнит ағымын уақыт бойынша синусойдалы функция ретінде қарастырсақ, онда:

$$\Phi = \Phi_{\text{маx}} \sin \omega t, \quad (1.2.2)$$

мұндағы $\Phi_{\text{маx}}$ – ағынның максималды мәні.

Онда (1.2.2) ЭҚК e_1 қойып, сосын дифференциалдап:

$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_{\text{маx}} \cos \omega t, \quad (1.2.3)$$

бірақ $\cos \omega t = -\sin(\omega t - 2/\pi)$ онда,

$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_{\text{маx}} \sin(\omega t - \frac{2}{\pi}), \quad (1.2.4)$$

аналогты түрде,

$$e_2 = -\omega w_2 \Phi_{\max} \sin(\omega t - \frac{2}{\pi}), \quad (1.2.5)$$

(1.2.4 және 1.2.5) көретініміз e_1 және e_2 ЭҚК фаза бойынша магнит ағымынан $2/\pi$ бұрышқа қалады. ЭҚК максималды мәні:

$$E_{1\max} = \omega w_2 \Phi_{\max}. \quad (1.2.6)$$

$E_{1\max} \sqrt{2}$ бөліп сосын $\omega = 2\pi f$ орнына қойсақ ЭҚК (В) лездік мәнін аламыз:

$$E_1 = \frac{E_{1\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot w_1 f \Phi_{\max} = 4,44 w_1 f \Phi_{\max} \quad (1.2.7)$$

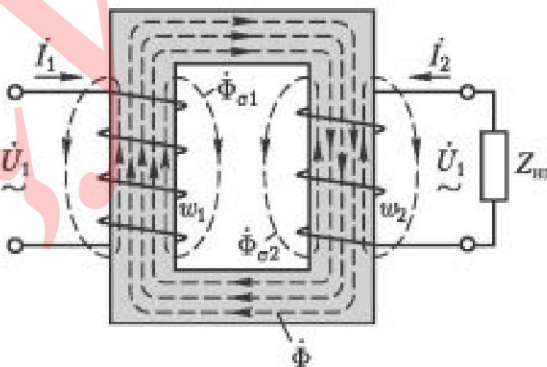
Аналогты түрде ЭҚК екінші орама үшін:

$$E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_{\max}. \quad (1.2.8)$$

Жоғары кернеудің ЭҚК төменгі кернеудің ЭҚК қатынасын трансформация коэффициенті деп аталады:

$$k = \frac{E_1}{E_2}; \quad (1.2.9)$$

Практикалық есептеулерде трансформация коэффициентін жобамен ЖК мен ТК орамаларының қатынасына тең деп алынады: $k \approx U_{1\text{ном}}/U_{2\text{ном}}$



Сурет 1.2.1. Бір фазалы трансформатордағы магнит ағымы

Трансформатор орамаларындағы I_1 және I_2 тоқтары негізгі магнит ағымы Φ маңайында шашыранды $\Phi_{\sigma 1}$ және $\Phi_{\sigma 2}$ магнит ағымдарын (сурет 1.2.1), оның әрқайсысы тек өзіндегі ораманың орамдарымен жанасады да, сол орамада шашыранды ЭҚК индукциялайды. Бірінші және екінші орамаларда бұл ЭҚК :

$$e_{01} = -L_{01} \left(\frac{di_1}{dt} \right); \quad e_{02} = -L_{02} \left(\frac{di_2}{dt} \right), \quad (1.2.10)$$

мұндағы L_{01} және L_{02} - шашырау индуктивтілігі:

Шашыранды ЭҚК әсерлік мәндері сәйкесінше орамдардың тоқтарына пропорционалды:

$$\dot{E}_{01} = -j_1 x_1; \quad \dot{E}_{02} = -j_2 x_2, \quad (1.2.11)$$

мұндағы x_1 және x_2 – сәйкесінше бірінші және екінші орамалардағы шашыранды индуктивтік кедергі, Ом (бұл көріністегі минус белгісі шашырынды ЭҚК реактивті болуын айтады). Сондықтан да трансформатор орамалардың әрқайсысында екі ЭҚК: ЭҚК негізгі ағымнан Φ және ЭҚК шашыранды ағымнан (бірінші орамадағы Φ_{01} және екінші орамадағы Φ_{02}).

Бірінші ораманың активті кедергісіндегі кернеудің төмендеуін ескеріп, кернеуі U_1 торабына жалғанған трансформатордың бірінші тізбегі үшін Кирхгофтың екінші заңы бойынша кернеу теңдеуін:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{E}_{01} = I_1 r_1. \quad (1.2.12)$$

(1.2.11) мәнін \dot{E}_{01} – қойып, трансформатордың бірінші тізбегі үшін мынадай теңдік:

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + jI_1 x_1 + I_1 r_1. \quad (1.2.13)$$

Жалпы кернеудің индуктивті $jI_1 x_1$ және $I_1 r_1$ активті түрде түсуі соншалықты жоғары емес, сондықтан жобамен трансформаторға келтірілген кернеуді \dot{U}_1 ЭҚК \dot{E}_1 теңестірсек болады:

$$\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1). \quad (1.2.14)$$

Кедергісі Z_H жүктемеге тұйықталған трансформатордың екінші тізбегі үшін:

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{02} = I_2 r_2 + I_2 Z_H \quad (1.2.15)$$

мұндағы r_2 – екінші орамадағы активті кедергі. $I_2 Z_H$ жүктемесіндегі кернеудің түсуі трансформатордың екінші орамасының ұштарындағы кернеу мәнін көрсетеді:

$$I_2 Z_H = U_2. \quad (1.2.16)$$

ЭҚК аналогты теңдеу (1.2.15) аналогты түрде бірінші тізбекке (1.13) келтіреміз. Бұл үшін (1.2.11) және (1.2.16) ескере отырып трансформатордың екінші орамасы үшін кернеу теңдеуін:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - I_2 r_2 = \dot{I}_2 Z_H. \quad (1.17)$$

Бұдан көретініміз жүктелген трансформатордың шығысындағы кернеу екінші ораманың түсу кернеуінің мәні бойынша екінші ораманың ЭҚК – нен қарағанда өзгеше болады [33].

1.3. Магнит қозғағыш күштер мен тоқтардың теңдеулері

Қарастырамыз бос жүріс режимінде жұмыс істейді (сурет 1.3.1, а), оның бірінші орамасының қысқыштарына U_1 кернеуін береміз, ал екінші орамасын ажыратулы күйде қоямыз ($I_2 = 0$). Осындай жағдайларда бірінші орамадағы I_0 тоғын бос жүріс тоғы деп атаймыз.

Осы тоқ арқылы пайда болатын магнит қозғалтқыш күш трансформатордың магнит өзекшесінде максималды мәні төменде келтірілген негізгі магнит ағымын тудырады:

$$\Phi_{\max} = \frac{\sqrt{2} I_0 w_1}{R_M}, \quad (1.3.1)$$

мұндағы R_M - магнит өзекшесінің магниттік кедергісі.

Жүктемеге Z_H (сурет 1.3.1, б) екінші ораманы тұйықтаған кезде сол орамада I_2 тоғы пайда болады. Сондықтан бірінші орамадағы тоқ I_1 – тоғының мәнәне дейін жетеді:

МҚК $I_1 w_1$ және $I_2 w_2$ әсерінен Φ_{\max} ағымы пайда болады:

$$\Phi_{\max} = \frac{\sqrt{2}}{R_M} (I_1 w_1 + I_2 w_2), \quad (1.3.2)$$

(1.2.7) арқылы осы ағымды анықтауға болады:

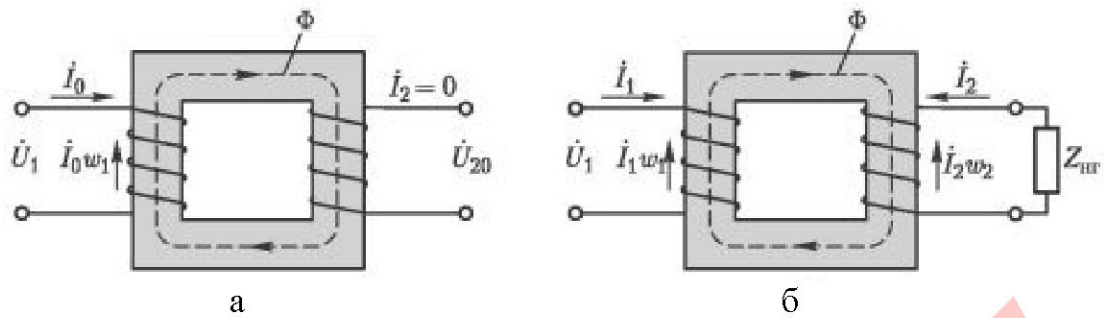
$$\Phi_{\max} = \frac{E_1}{4,44 w_1 f}, \quad (1.3.3)$$

мынадай етіп $\dot{U} \approx (-\dot{E})$, қарастырған:

$$\Phi_{\max} \approx \frac{U_1}{4,44 f w_1}, \quad (1.3.4)$$

(1.3.4) негізгі магнит ағымының Φ мәні трансформатор жүктемесіне тәуелді емес, сондай – ақ U_1 өзгермеген [26].

$\Phi = \text{const}$ жағдайында (1.3.1) жіне (1.3.2) формулаларын теңестіру қабылданған:



Сурет 1.3.1. Бір фазалы трансформатордағы бос жүріс (а) және жүктеме (б) режимдері

$$\frac{\sqrt{2}}{R_M} \dot{I}_0 w_1 = \frac{\sqrt{2}}{R_M} (\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2) \quad (1.3.5)$$

трансформатордың МҚК теңдеуін аламыз:

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2. \quad (1.3.6)$$

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1 + (-\dot{I}_2 w_2). \quad (1.3.7)$$

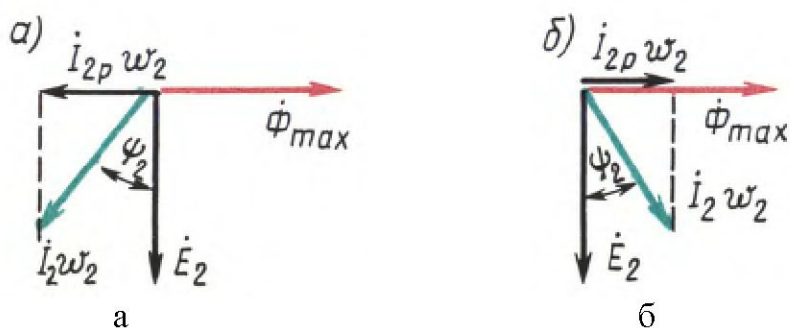
$\dot{I}_0 w_1$ – бөлігі трансформатордың магнит өзекшесінде негізгі магнит ағымын туындатады, ал $-\dot{I}_2 w_2$ – екінші ораманың $\dot{I}_2 w_2$ МҚК теңестіреді [16].

Активті – индуктивті жүктемеде $Z_{шт} = r_{шт} + jx_{шт}$ – болған кезде жүктеме тоғы I_2 фаза бойынша екінші орамадағы ЭҚК E_2 – ден ψ_2 бұрышына қалады, МҚК өзінің реактивті (индуктивті) бөлігі $\dot{I}_{2p} w_2$ – мен трансформатордың магнит өзекшесінде магнитсізделген әсерді көрсетеді:

$$\dot{I}_{2p} w_2 = \dot{I}_2 w_2 \sin \psi_2, \quad (1.3.8)$$

мұндағы $\dot{I}_{2p} = \dot{I}_2 \sin \psi_2$ – жүктеме тоғының реактивті бөлігі.

Сурет 1.16, а трансформатордың активті – индуктивті жағдайдағы МҚК векторлық диаграммасы көрсетілген. Диаграммада ЭҚК \dot{E}_2 векторы негізгі магнит ағымынан $\dot{\Phi}_{max}$ векторынан фаза бойынша 90° – қа қалады, ал екінші орама $\dot{I}_2 w_2$ МҚК векторы фаза бойынша ЭҚК \dot{E}_2 – ден бұрыш ψ_2 – ге қалады (сурет 1.3.2, а).



Сурет 1.3.2. Активті – индуктивті (а) және активті сыйымдылықты (б) жүктемелердегі МҚК векторлық диаграммалары.

Осы диаграммадан көретініміз екінші орамадағы $I_{2p}w_2$ МҚК реактивті (индуктивті) бөлігі негізгі магнит ағымымен $\dot{\Phi}_{max}$ қарама – қарсы фазада болады және де трансформатордың магнит өзекшесіне магнитсізделетін әсер көрсетеді.

Трансформаторды номиналды мән аралығында жүктеп, сосын оның жұмыс істеуін байқап көрсек, негізгі магнит ағымы болмашы өзгеретінін байқаймыз және оның мәнін $\Phi = const$ деп алуға әбден болады. Бұлай болатын себебі екінші орамадағы МҚК реактивті бөлігі I_2w_2 магнит өзекшесінде бірінші орамадағы МҚК компенсациялау арқылы магнитсізделетін әсерін көрсетеді:

$$(-I_2w_2) = I_1w_1 - I_0w_1. \tag{1.3.9}$$

Трансформатордың жүктемесі өзгерген кезде I_2 екінші орамадағы МҚК I_2w_2 өзгереді, ал бұл сәйкесінше бірінші орамадағы I_1w_1 МҚК өзінің екінші бөлігі $-I_2w_2$ есебінен өзгеруіне алып келеді. Бос жүрістегі I_0w_1 МҚК келетін болсақ, ол трансформатор өзекшесінде негізгі магнит ағымын $\Phi \approx const$ тудыруға жеткілікті болады және мәні өзгеріссіз қалады.

Трансформатор активті – сыйымдылық жүктеме $Z_H = r_H - jx_H$ болған кезде жүктемедегі ток I_2 фаза бойынша ψ_2 бұрышына озады, ал екінші ораманың реактивті (сыйымдылық) бөлігі $I_{2p}w_2$ МҚК негізгі магнит ағымымен $\dot{\Phi}_{max}$ фаза бойынша сәйкес келеді және ол трансформатордың магнит өзекшесін магниттейді (сурет 1.3.2, б). Осындай жағдайда активті – индуктивтік жүктемедегідей бірінші орамадағы МҚК $-I_2w_2 = I_1w_1 - I_0w_1$ екінші орамадағы МҚК I_2w_2 теңестіреді.

Тендеу (1.3.6) w_1 орам сандарына бөліп, нәтижесінде алатынымыз:

$$I_0 = I_1 + \frac{I_2w_2}{w_1}, \quad \text{немесе} \quad I_0 = I_1 + I'_2, \tag{1.3.10}$$

мұндағы $I'_2 = \frac{I_2w_2}{w_1}$ – бірінші ораманың орамдар санына келтірілген

жүктеме тоғы.

Басқаша айтқанда, тоқ (екінші тоқ) орамадағы w_1 орамдар санымен, екінші орамадағы w_2 тоқ I_2 МҚК пайда болдыртатындай, дәл сондай МҚК пайда болады:

$$\dot{I}'_2 w_1 = I_2 \left(\frac{w_2}{w_1} \right) w_1 = I_2 w_2. \quad (1.3.11)$$

(1.3.10) теңдеуін өзгерту арқылы трансформатордың тоқтарының теңдеуін аламыз:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \quad (1.3.12)$$

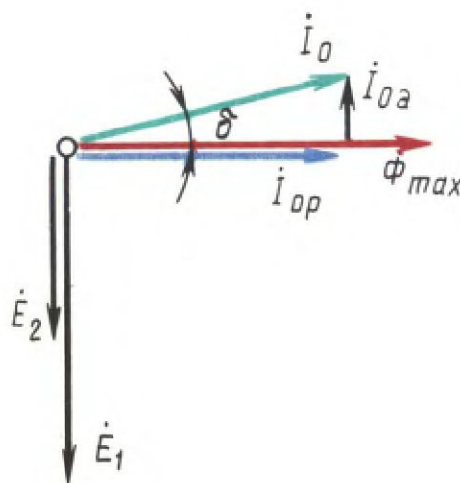
Бұл теңдеуден көретініміз бірінші \dot{I}_1 тоғын екі бөліктің қосындысы ретінде қарастыруға болады: магнит өзекшесінде негізгі магнит ағымын Φ тудыратын, МҚК $I_0 w_1$ болдыртатын I_0 бөлігі мен МҚК $I'_2 w_1$ пайда қыла отырып трансформатордың екінші орамасындағы $I_2 w_2$ МҚК компенсация (теңестіріп) жасайтын I'_2 бөлігі [11].

Негізгі магнит ағымы айнымалы болғандықтан, трансформатордың магнит өзекшесі асқын магниттеледі. Осының салдарынан, электр техникалық стальдың пластиналарында айнымалы магнит ағымымен пайда болатын гистерезис пен құйынды тоқтар трансформатордың магнит өзекшесінде магнит шығындарының болуына алып келеді. Магниттік шығындар қуаты активті бос жүріс тоғы (б.ж) бөлігіне эквивалент. Сол себептен б.т. тоғы екі бөлікті иеленеді: магниттелетін тоқты көрсететін реактивті I_{0p} , магниттік шығындармен байланысты активті I_{0a} :

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}. \quad (1.3.13)$$

Б.ж тоқтың активті бөлігі көп емес және I_0 0,10 аспайды, сол себептен б.ж. тоғына белгілі бір әсерін тигізе қоймайды.

Сурет 1.1.3, б.ж тоғы \dot{I}_0 мен оның бөлімдері \dot{I}_{0a} мен \dot{I}_{0p} келтірілген векторлық диаграммасы көрсетілген. Негізгі магнит ағымы Φ_{\max} векторы фаза бойынша \dot{I}_0 тоғынан бұрышына δ қалады және де оны магнит шығындарының бұрышы деп атайды. Б.ж. активті тоғының \dot{I}_{0a} өсуімен осы бұрыш та өседі және трансформатор өзекшесіндегі магнит шығынының көп болуына алып барады.



Сурет 1.3.3. Бос жүріс тоғын бөліктерге тарқатылуы

Жоғары және орташа қуатты трансформаторларда б.ж. тоқ күші номиналды бірінші тоқтың 2 – 10% құрайды. Сол себептен номиналға жақын жүктемеде I_0 – ескермей және (1.3.9) теңдеуін өзгерте отырып, алатынымыз:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}. \tag{1.3.14}$$

Трансформатор орамаларындағы тоқтар орамдар санына кері пропорционалды: аз орамдар санымен болатын орамада тоқ көп, ал көп болатын орамдар санымен болатын орамада тоқ аз [8].

1.4. Келтірілген трансформатордың орын басу сұлбасы мен екінші ораманың параметрлерін келтіру және векторлық диаграммасы

Трансформация коэффициенті $k = w_1/w_2$ шынайы трансформатор орнына эквивалентті трансформатор $k = w_1/w'_2 = 1$, мұнда $w'_2 = w_1$. Мұндай трансформаторды келтірілген трансформатор деп атайды. Бірақ екінші орама параметрлерін келтіру, оның энергетикалық көрсеткіштерінде көрінбіу керек: келтірілген трансформатордың барлық қуаттары мен екінші орамасындағы фазалық ығысулары шынайы трансформаторлардағыдай болып қалмауы керек.

Шынайы трансформатордың екінші орамасындағы электр магниттік қуат:

$$E_1 I_1 = E'_2 I'_2. \tag{1.4.1}$$

(1.4.1) теңдеуіне келтірілген екінші тоқты $I'_2 = I_2 w_2/w_1$ қойып, келтірілген екінші ЭҚК:

$$E'_2 = \frac{I_2}{I'_2} E_2 = \frac{I_2 w_1}{I_2 w_2} E_2 = E_2 \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.4.2)$$

$U_2 I_2 \approx U'_2 I'_2$, екінші ораманың келтірілген кернеуі:

$$U'_2 \approx U_2 \left(\frac{w_1}{w_2} \right). \quad (1.4.3)$$

Екінші орамадағы активті кедергідегі шығын теңдігінің шарты бойынша $I_2^2 = I'^2_2 r'_2$. Келтірілген активті кедергіні табамыз:

$$r'_2 = r_2 \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 = r_2 \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2. \quad (1.4.4)$$

Екінші ораманың келтірілген шашыранды келтірілген индуктивті кедергісі реактивті қуаттар теңдеуінің шарты бойынша анықтайды:

$$x'_2 = x_2 \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2. \quad (1.4.5)$$

Трансформатордың екінші орамасының келтірілген толық кедергісі:

$$Z'_2 = r'_2 + jx'_2 = (r_2 + jx_2) \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 = Z_2 \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2. \quad (1.4.6)$$

Екінші ораманың шығыстырына қосылған жүктеменің толық кедергісін (1.4.6) аналогиясы бойынша анықтаймыз:

$$Z'_H = Z_H \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2. \quad (1.4.7)$$

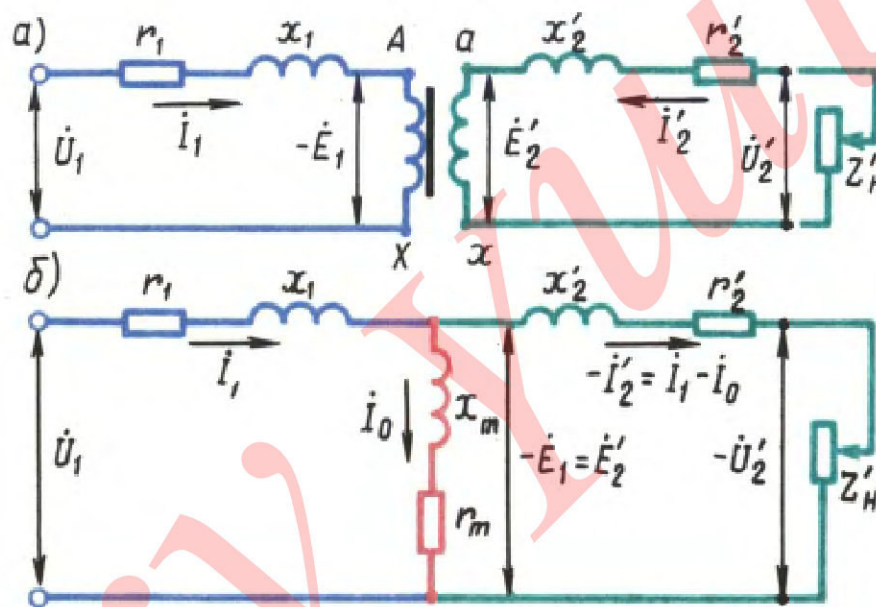
Келтірілген трансформатор кернеулері мен тоқтарының теңдеулері:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 Z_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1 \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2 + \dot{I}'_2 r'_2; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \end{aligned} \quad (1.4.8)$$

Бұл теңдеулер жүктеменің б.ж. режимінен номиналды мәніне дейінгі барлық диапазондағы трансформатор параметрлері аралығындағы аналогиялық байланысты көрсетеді [29].

Трансформаторларды есептеу мен электр магниттік процестерді зерттеуді оңайлату үшін келтірілген трансформатордың орын басу сұлбасы қолданылады. Сурет 1.4.1, а келтірілген трансформатордың эквивалентті сұлбасы келтірілген. Алдында айтылғандай, келтірілген трансформаторда $k = 1$, сол себептен

$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$. Қортындысында А және а тоқтары, X және x нүктелері сұлбада бірдей потенциалдарда болады, яғни бұл потенциалдар келтірілген трансформатордың Т – сыйпатындағы орынбасу сұлбасында көрсетілген тоқтарды электрлік байланыстырады (сурет 1.4.1, б). трансформатордың электрлік орынбасу сұлбасында тізбектер арасындағы магниттік байланыс электрлік байланысқа өзгертілген. Келтірілген трансформатордың орынбасу сұлбасы келтірілген трансформатордың ЭҚК мен тоқтарының теңбеулерін қанағаттандырады (1.4.8) және үш тармақтың жиынтығын көрсетеді: бірінші – $Z_1 = r_1 + jx_1$ кедергімен және \dot{I}_1 тоқпен; магниттелетін - $Z_m = r_m + jx_m$ және \dot{I}_0 тоғымен; екінші – екі кедергімен: өзіндік екінші тармақтың кедергісі $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$ мен жүктеме кедергісі $Z'_H = r'_H \pm jx'_H$ және \dot{I}'_2 тоғымен. Орынбасу сұлбасында жүктеме кедергісі Z'_H өзгеруімен трансформатордың жұмыс істеу режимдерінің бәрі орындалады.



Сурет 1.4.1. Келтірілген трансформатордың эквивалентті (а) сұлбасы мен орынбасу сұлбасы (б)

Магниттелу тармағының параметрлері $Z_m = r_m + jx_m$ б.т. анықталады. орын басу сұлбасының барлық параметрлері Z'_H қоспағанда берілген трансформатор үшін тұрақты және б.ж. пен қ.з. бойынша анықталады.

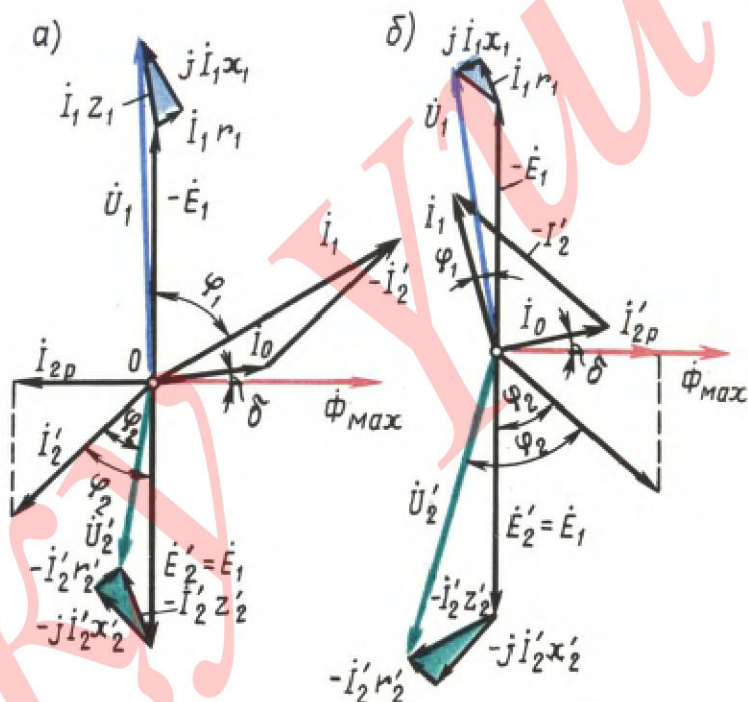
Келтірілген трансформатордың кернеулері мен тоқтардың негізгі теңдеулерінің (1.4.8) орынбасу сұлбасын қолдана отырып, тоқтардың, ЭҚК және кернеулер арасындағы фазалық ығысу мен қатынасын көрсететін трансформатордың векторлық диаграммасын құрамыз. Векторлық диаграмма – келтірілген трансформатордың негізгі теңдеулерінің (1.4.8) графикалық көрінісі.

Диаграмманы (сурет 1.4.2, а) салу негізгі магнит ағымының максималды мәнінің векторынан бастылады $\Phi_{\max} = E_1 / (4,44fw_1)$ [38].

I_0 векторы фаза бойынша ағым Φ_{max} векторынан бұрыш δ озады, ал ЭҚК E_1 және E'_2 бұл вектордан 90° бұрышқа қалады. [тең. (1.2.4) және (1.2.5)]. Сосын I'_2 векторын саламыз. E'_2 I'_2 арасындағы ығысу фазасының бұрышын анықтау үшін жүктеменің сипатын білу керек. Трансформатордың жүктемесін активті – индуктивті деп алатын болсақ, онда тоқ I'_2 векторы E'_2 векторынан мынадай бұрышқа қалады:

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 + x'_H}{r'_2 + r'_H}, \quad (1.4.9)$$

Екінші кернеудің U'_2 векторын тұрғызу үшін ЭҚК E'_2 векторынан кұлайтын кернеудің $jI'_2x'_2$ мен $jI'_2r'_2$ векторын аламыз. E'_2 векторының соңынан I'_2 тоғы бағытымен перпендикуляр түсіреміз және онда $jI'_2x'_2$ векторының астына түсіреміз.



Сурет 1.4.2. Активті – индуктивті(а) және активті – сыйымдылықты (б) жүктемелердегі трансформатордың векторлық диаграммалыры.

Сосын O нүктесінен фаза бойынша I'_2 тоғынан бұрышы $\psi_2 = \arctg(x'_H/r'_H)$ озатын $U'_2 = E'_2 - I'_2Z'_2$ векторын жүргіземіз.

Бірінші тоқты векторлық қосынды етіп тұрғызамыз: $I_1 = I_0 + (-I'_2)$. I_0 векторының соңынан $-I'_2$ векторын I'_2 – на қарама – қарсы етіп жүргіземіз. $U_1 = -E_1 + jI_1x_1 + I_1r_1$ векторын саламыз. I_1Z_1 векторының соңын O нүктесімен қосып, фаза бойынша тоқ I_1 векторынан бұрыш φ_1 – ге озатын U_1 векторын аламыз.

Кейде трансформатордың диаграммасын орамалардығы ЭҚК анықтау мақсатында салады. Бұл жағдайда берілетін параметрлер екінші ораманыкі болады: U_2 , I_2 және $\cos\varphi_2$. w_1/w_2 біле отырып \dot{U}'_2 және \dot{I}'_2 анықтайды, сосын бұрыш φ_2 астына екеуін салады. Екінші орамадағы векторлық \dot{U}'_2 кернеу мен түсу кернеуінің қосындысы арқылы ЭҚК векторын $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$ аламыз:

$$\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + j\dot{I}'_2 x'_2 + \dot{I}'_2 r'_2. \quad (1.4.10)$$

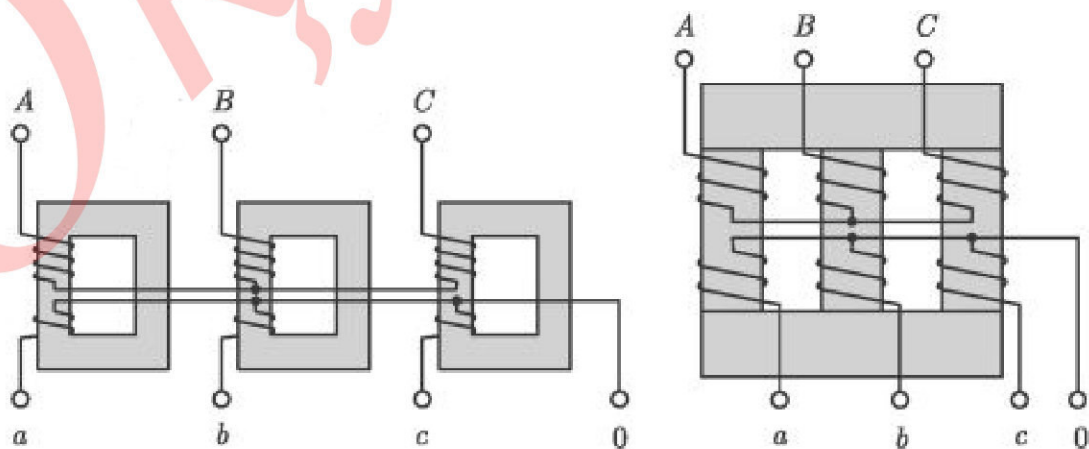
Активті – сыйымдылықты жүктемеде трансформатордың векторлық диаграммасы 1.19, б. көрсетілген көріністегідей болады. Диаграмманы салу алдындағыдай болады, бірақ көрінісінде біршама өзгерістер болады. Мұндай жағдайда \dot{I}'_2 тоғы фаза бойынша ЭҚК \dot{E}'_2 мынадай бұрышқа озады:

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 + x'_H}{r'_2 + r'_H}, \quad (1.4.11)$$

Жүктеменің белгілі сыйымдылықты бөлігінде жүктеменің сыйымдылық кедергі бөлігіндегі кернеудің түсуі мен екінші орамадағы шашыранды кернеудің индуктивті түсуі бір – бірін компенсация жасап отырады. Қортындысында кернеу \dot{U}'_2 ЭҚК \dot{E}'_2 қарағанда көп боланы. Одан басқа, екінші тоқтың $\dot{I}'_{p2} = \dot{I}'_2 \sin\psi_2$ реактивті (озатын) реактивті бөлігі фаза бойынша б.ж. тоғының реактивті бөлігімен сәйкес келеді, және де трансформатордың магнит өзекшесінде магниттелу әсерін көрсетеді [44].

1.5. Үш фазалы тоқты түрлендіру мен үш фазалы трансформатордың орамаларын жалғау сұлбасы.

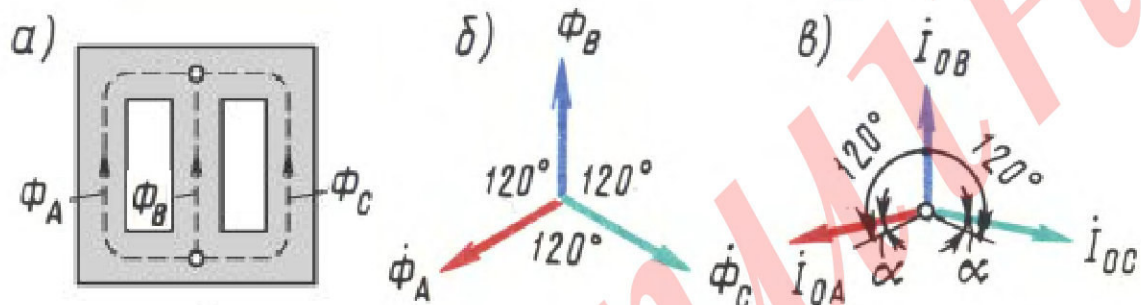
Үш фазалы кернеу жүйесін түрлендіру трансформатор тобына (сурет 1.5.1, а) байланысқан бір фазалы үш трансформатор арқылы болады.



Сурет 1.5.1. Трансформатор тобы (а) және үшфазалы трансформатор (б)

60 000 кВА дейінгі қондырғыларда әдетте екі жағынан байланыстырылатын стержінде орнатылатын орамалары бар үш фазалы трансформаторларды қолданамыз. Бірақ магнит өзекшесі симметриялы болмайды: ортасындағы фазаның Φ_B магнит ағымының кедергісі екі шетіндегі екі фазаларының Φ_A және Φ_C (сурет 1.5.2, а) магнит ағымының кедергісінен аз болады.

Үш фазалы трансформатордың бірінші орамаларына кернеулердің \dot{U}_A , \dot{U}_B және \dot{U}_C симметриялы жүйесі орындалатындай трансформатордың магнит өзекшесінде осындай симметриялық жүйеде (сурет 121, б) болатын магнит ағымдары $\dot{\Phi}_A$, $\dot{\Phi}_B$ және $\dot{\Phi}_C$ туындайды.



Сурет 1.5.2. Үш стержінді магнит өзекшесі мен векторлық диаграммасы

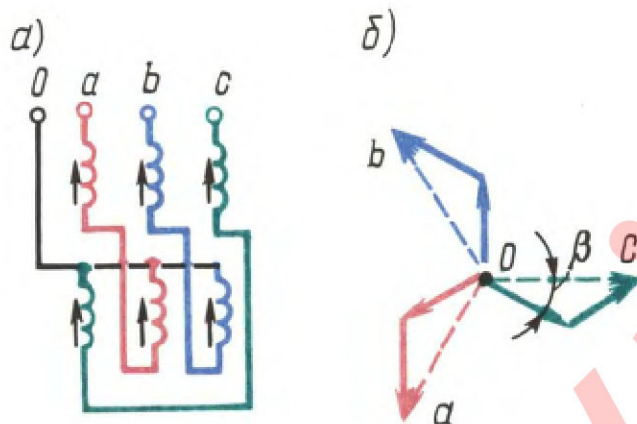
Бірақ, магнит өзекшесінің магнитті симметриялы болмауына байланысты жеке фаза орамаларындағы магниттелетін тоқтар бірдей емес: екі шеттегі фазалардың (\dot{I}_{OA} және \dot{I}_{OC}) орамаларындағы магниттелетін тоқтар ортадағы фазаның \dot{I}_{OB} орамасының магниттелу тоғынан қарағанда көп. Сол себептен трансформаторға келтірілген үш фазалы кернеудің симметриялы жүйесінде б.ж. тоқтары симметриялы емес жүйені (сурет 1.5.2, в) құрайды [42].

Үш стержінді магнит өзекшесінің симметриялы емес магниттігін және шеткі фазалардың магниттік кедергілерін азайту үшін, ярманың қимасын стержіндердің қимасынан қарағанда 10 – 15% - жоғары етіп дайындайды. Үш стержінді трансформаторда б.ж. симметриялы емес тоқтары практика жүзінде трансформатордың жұмыс кезінде байқалмайды, сондай – ақ тіптен көп емес жүктемеде тоқтардың I_A , I_B және I_C әр түрлі мәндерде болуы байқалмайды.

Үш фазалы трансформаторлардың орамалары келесі сұлбалар бойынша жалғау қарастырылған: жұлдызша; нөлдік өткізгішімен болатын жұлдызша; үш бұрышша; нөлдік шығысымен болатын зигзак. Трансформатордың орамаларының жалғау сұлбасын бөлшек ретінде көрсетеміз, бөлімінде ЖК орамасының жалғау сұлбасы, ал бөлімінде ТК орамаларының жалғау сұлбасы көрсетіледі. Мысалы, Y/Δ бұл дегеніміз – ЖК жұлдызшада жалғанған, ал ТК үшбұрышта жалғанған.

Зигзак етіп жалғау тек қана арнайы трансформаторларда ғана қолданылады, мысалы түзеткіш құрылғыларында пайдаланылатын трансформаторларда қолданылады. ТК орамасының әр фазасын екі бөлікке бөліп жалғайды және оларды әр түрлі стержінге орнатады. Фазалық ораманың бір бөлігінің соңы осы ораманың басқа стержінде (сурет 1.5.3, а) орналасқан

басқа бөлігінің соңына жалғасатындай етіп орамалардың көрсетілген бөліктерін байланыстырады. Зигзат етіп жалғаған кезде орамалардың жеке бөліктерінің ЭҚК геометриялық түрде есептеді (сурет 1.5.3, б).



Сурет 1.5.3. Орамаларды зигзак түрінде жалғау

Трансформаторлардың орамаларының шығыстарын келесідей белгілейді: ЖК орамаларын – соңғы X, Y, Z сәйкес келетін орамалардың басы A, B, C; ТК орамаларын – соңғы x, y, z сәйкес келетін орамалардың басы a, b, c;

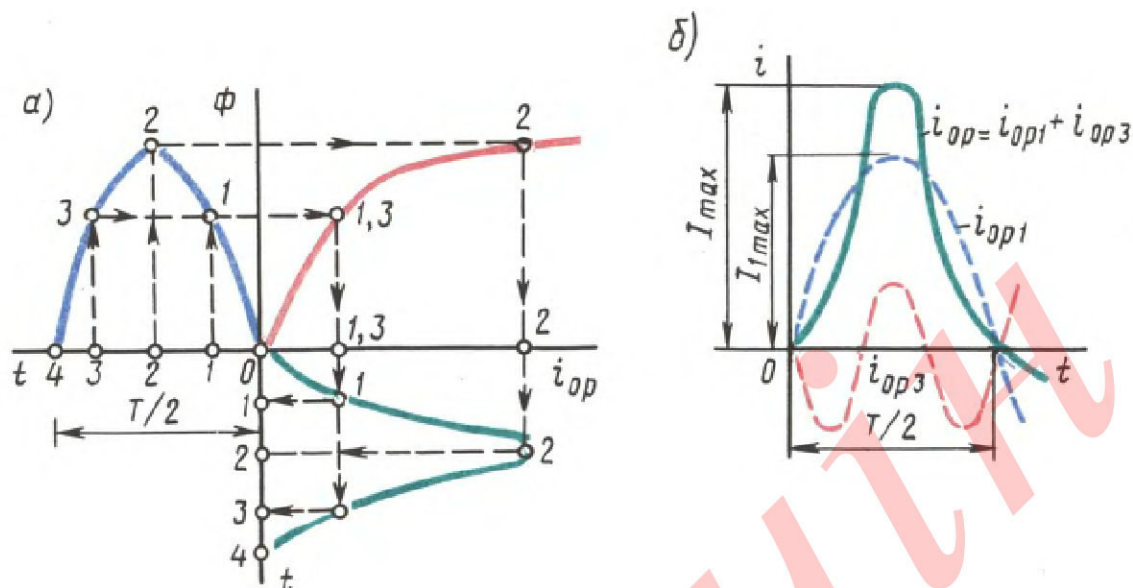
Орамаларды жұлдызша жалғаған кезде сызықтық кернеу фазалық кернеуден ($U_L = \sqrt{3} U_\phi$) қарағанда көп, ал орамаларды үшбұрыштап жалғаған кезде сызықтық кернеу фазалық кернеуге ($U_L = U_\phi$) тең.

Үш фазалы трансформатордың сызықтық кернеулерінің қатынастары келесідегідей анықталады:

Орамаларды жалғау сұлбасы	YY	Δ/Y	Δ/Δ	Y/ Δ
Сызықтық кернеулердің қатынасы	w_1/w_2	$w_1/(\sqrt{3}w_2)$	w_1/w_2	$\sqrt{3}w_1/w_2$

а) Трансформаторлардың магнит өзекшелерінің магниттелу кезіндегі құбылыстары

Трансформатордың бірінші орамасына синусоидалы кернеу пайда болды дейік, сондықтан магнит өзекшесінің ағымы да синусоидалы болады: $\Phi = \Phi_{max} \sin \omega t$. Бірақ, трансформатордың магнит ағымының қанығуы магниттелу тоғына пропорционалды емес, сол себепті синусоидалы ағымда Φ магниттелетін ток i синусоидалы болмайды. Осы токтың $i_{op} = f(t)$ қисық сызықты формасын табу үшін магнит өзекшесінің магниттелу $\Phi = f(i_{op})$ қисық сызығын және өзгеру ағымның $\Phi = f(t)$ графигін қолданамыз [41].



Сурет 1.5.4. магниттелу тоғының (а) графигі мен оны (б) бөліктерге жатқызылуы

Магниттелу тоғы $i_{op} = f(t)$ графигі сурет 1.5.4, а берілген. Мұнда үстінгі сол жақ квадратта синусоидалы қисық $\Phi = f(t)$, ал үстінгі оң жақ квадратта магнит өзекшесінің материалының магниттелу қисығы $\Phi = f(i_{op})$. Оң жақ төменгі квадратта орналасқан магниттелу тоғы $i_{op} = f(t)$ графигін алу үшін келесідей істейміз. $\Phi = f(t)$ графигінен 1, 2, 3, осыларды қисық магниттелуге проекциясын түсіреді және магнит ағымының таңдалған мәнімен сәйкес келетін магниттелетін токтың мәнін анықтайды. Сосын 1, 2, 3, нүктелері арқылы i_{op} осіне вертикальды сызықтар жүргізеді де магниттелу тоғы $i_{op} = f(t)$ қисығының геометриялық орнын аламыз. Салынғаннан белгілі болғаны синусоидалды қисығы формасында $\Phi = f(t)$ магниттелетін ток пик түріндегі формасын қабылдайды. Графигін салуды жеңілдету мақсатында бұл жағдайда гистерезис есептелуінсіз салынатын магниттелу қисығын $\Phi = f(i_{op})$ пайдаланамыз.

Синусоидалды емес қисықтық тоғын i_{op} синусоидалды бөліктеріне бөліп қойғаннан кейін (сурет 1.5.4, б) керетіміз, бұл токта негізгі (бірінші) i_{op1} гармоникадан басқа i_{op3} гармоника анық көрсетілген.

Жоғары қорытпа стальды өзекшелі трансформаторда индукция $B = 1,4$ Тл болған кезде үшінші гармоника шамамен магниттелетін тоғының негізгі гармоникасының 30% құрайды. Айтылған тек б. ж. тоғының реактивті бөлігіне қатысты және де активті бөлігі i_{0a} де синусоидалы. I_{0a} жалпы 10% аспайды. I_0 қарағанда $i_0 = f(t)$ б. ж. тоғының сызығы $i_{op} = f(t)$ қарағанда ерекшеленбейді.

б) Бос жүріс режимінде орамаларды жалғау сұлбасырың үш фазалы трансформаторлардың жұмысына әсері

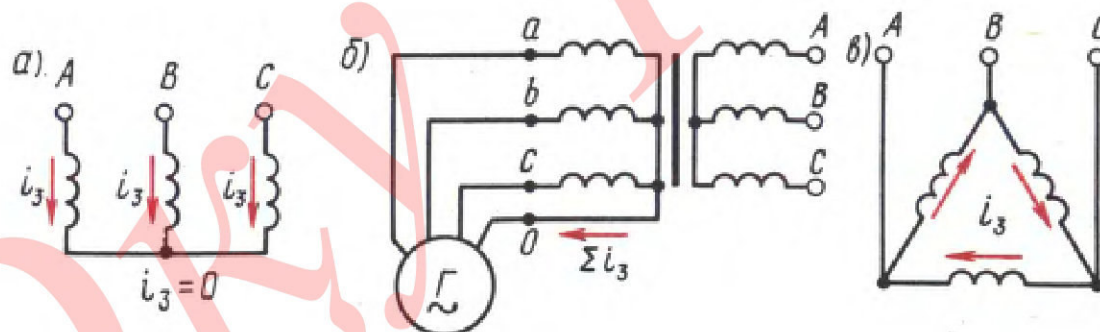
Үш фазалы жүйеде үшінші гармоника тоқтары теңдеулері:

$$\begin{aligned} i_{A3} &= I_{3\max} \sin 3\omega t; \\ i_{B3} &= I_{3\max} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{3\max} \sin 3\omega t; \\ i_{C3} &= I_{3\max} \sin 3(\omega t + 120^\circ) = I_{3\max} \sin 3\omega t; \end{aligned} \quad (1.5.1)$$

көретініміз, уақыттың кез – келген моментінде осы тоқтар фаза бойынша сәйкес келеді және де бағыттары да бірдей. Бұл қортынды тоқтың барлық гармоникасына тарайды, олар қысқа үшеуі, – 3, 9, 15, және т.б. Бұл үш фазалы тоқты түрлендіру барысында өзекшелердің магниттелуі процесіне әсер етеді.

Үш фазалы трансформаторлардың бос жүріс режимінің маңыздылығын орамаларды жалғау сұлбаларының біршама түрлері үшін қарастырайық.

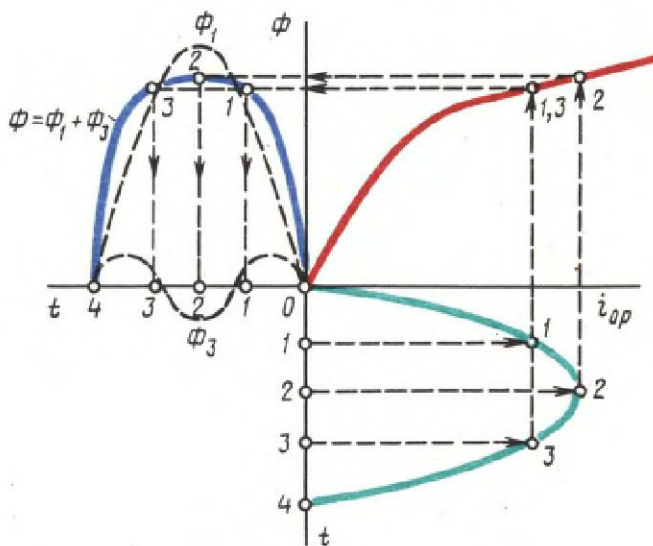
Y/Y₀ жалғау. Егер кернеу нөлсіз шығысы жоқ жұлдызша жалғанған орама жағынан (сурет 1.5.5, а) берілетін болса, онда үшінші гармоникадағы тоқтар барлық үш фазада фаза бойынша сәйкес келе отырып нөлге тең болады. Қортындысында үшінші және қысқа үш гармоникада бір – бірін компенсация жасайды және трансформатордың магниттелу тоғы синусойдалды болады, бірақ анық көрсетілген үшінші гармоника Φ_3 ағымымен (сурет 1.5.4) магнит өзекшесіндегі магниттелетін ағым синусойдалды болмайды. Үшінші гармоникадағы ағымдар фаза бойынша сәйкес келгендіктен үш стержінді магнит өзекшесінде тұйықталмайды сонымен қоса олар қарсы бағытталған.



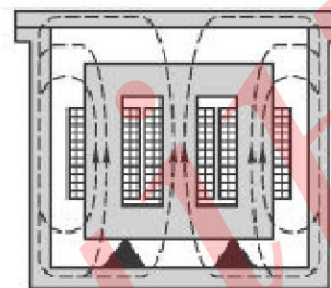
Сурет 1.5.5. орамаларды жалғаудың әр түрлі сұлбалары үшін үшінші гармоника тоқтардың бағыттары.

Ауа (май) және бактың металдық қабырғасы арқылы осы ағымдар тұйықталады (сурет 1.5.7). Үлкен магниттік кедергі ағымның Φ_3 шамасын бәсеңдетеді, сондықтан Φ_3 ағымдарымен фазалық орамаларда туындайтын үшінші гармоникадағы ЭҚК жоғары емес және негізгі гармоникадан 5 – 7 % жоғарламайды. Тәжірибеде Φ_3 ағымы бак қабырғасында осы ағыммен туындайтын құйынды тоқтардың шығындары деп есептеледі. Мысалы, магнит өзекшесінің стержінінде индукция 1,4 Тл болған кезде, бактағы құйын

тоқтарының шығындары 10 % құрайды, ал 1,6 Тл индукцияда осы шығындар 50 – 60 % дейін жетеді.



Сурет 1.5.6. Магниттелетін тоқтың синусоидалды түріндегі магнит ағымының графигі



Сурет 1.5.7. Үш стержінді магнит өзекшесінде үшінші гармоникада магнит ағымдарының тұйықталу жолдары

Үш және бір фазалы трансформаторлардан (сурет 1.5.1, а) тұратын трансформатор тобы кезінде бөлек фазаның магнит өзекшелері магнитті байланыспағандықтан барлық үш фазаның үшінші гармоникасындағы магниттік ағымдар кедергісіз тұйықталады (әр фазаның ағымы өзінің магнит өзекшесінде тұйықталады). Сондықтан Φ_3 ағымының мәні Φ_1 - ден қарағанда 15 – 20% жетеді.

Негізгі гармоникадан басқа Φ_1 тағы Φ_3 үшінші гармоникадан тұратын синусоидалды магнит ағымы Φ ;

$$\Phi = \Phi_1 \sin \omega t + \Phi_3 \sin 3\omega t \tag{1.5.2}$$

фаза орамаларына синусоидалды еме ЭҚК берсек:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = \omega w \Phi_1 \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) + 3\omega w \Phi_3 \sin \left(3\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = e_1 + e_3 \tag{1.5.3}$$

Ораманың фазалы ЭҚК амплитудалы мәнін сонымен қоса оның әсерлік мәнін (сурет 1.5.8) бірден арттыратын ЭҚК e_3 пайда болуына Φ_3 магнит ағынының 3ω жиілігінің көбеюі себеп болады. Бұл орамалардың электрлік оқшауламасына назар жағдай тудырады.

Трансформатор топтамасындағы үшінші гармоникадағы ЭҚК амплитудасы негізгі гармониканың амплитудасынан қарағанда 45 – 65% жетеді. Сызықты ЭҚК (кернеулер) синусоидалды болып қалады және олар үшінші гармоникадан тұрмайды, ЭҚК e_{3A} , e_{3B} және e_{3C} фазалары фаза бойынша сәйкес

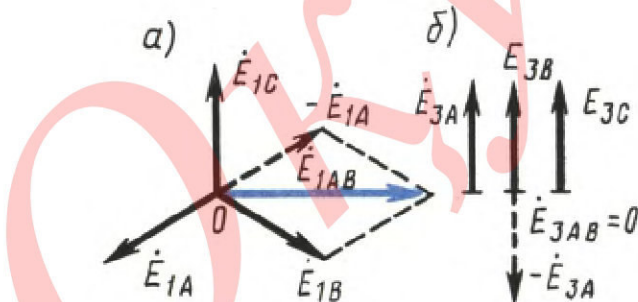
келе отырып, орама жұлдызша жалғанған кезде, бұлар сызықты ЭҚК пайда қылмайды. Бұның себебі бұлай түсіндіріледі; ораманы жұлдызша жалғаған кезде, сызықтық ЭҚК фазалық ЭҚК айырмасы ретінде қарастырылады. Сондықтан, негізгі гармоника үшін (сурет 1.5.9, а) сызықты ЭҚК:

$$\dot{E}_{1AB} = -\dot{E}_{1A} + \dot{E}_{1B} = \sqrt{3} \dot{E}_{1A}.$$

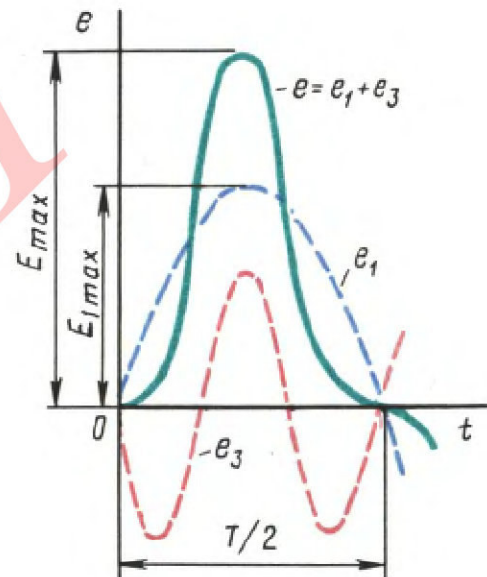
Үшінші және қысқа үш гармониктердегі сызықты ЭҚК айтатын болсақ, осы гармониктердегі (сурет 1.5.9,б) фаза бойынша сәйкес келетін фазалық ЭҚК аламыз:

$$\dot{E}_{3AB} = \dot{E}_{3B} - \dot{E}_{3A} = 0.$$

Егер трансформатордың бірінші орамасы ТК орамасы болып табылып, оның нөлдік шығысы генератордың нөлдік шығысына (сурет 1.5.5, б) жалғанған болса, онда магниттелетін тоқтар үшінші гармониканы құрайды. Бұл тоқтар фаза бойынша сәйкес келеді [тең. (1.5.1)], сондықтан олар трансформатордан генераторға бағытталған болады немесе керісінше. Z_{i3} тең болатын тоқ нөлдік өткізгіш арқылы өтеді. Мұнда трансформатордың магнит ағымы мен ЭҚК фазаларды синусоидалды болады.



Сурет 1.5.9. Үш фазалы трансформатордың негізгі (а) және үшінші (б) гармониктерінің ЭҚК векторлық диаграммалары



Сурет 1.5.8. Трансформатор тобы Y/Y болып жалғанған кездегі ЭҚК графикалық формасы

Трансформатордың бір жерінде (ТК немесе ЖК) орамалар үшбұрыша жалғанған. Бұл жалғау сұлбалары көбінесе керек емес. Айталық, трансформатордың бірінші орамалары үшбұрыш ретінде жалғанған. Онда

үшбұрышша жалғанған (сурет 1.5.5, в) фазалық орамалардадың тұйық контурында үшінші гармоника тоғы үзілісіз тұйықталып отырады. Бірақ егер магниттелетін тоқ үшінші гармоникада болса онда стержіндердегі магнит ағымдары, сәйкесінше және фазалардағы ЭҚК практикалық түрде синусоидалды.

Егер трансформатордың екінші орамалары үшбұрышша жалғанып, ал біріншілері – жұлдызша жалғанса, онда екінші орамаларға берілген үшінші гармоника ЭҚК үшбұрышты тұйықталған контурда үшінші гармоника тоғын пайда қылады. Бұл тоқ магнит өзекшесінде магниттелетін тоққа қарсы параллельді бағытталған Φ_{13} (Ленц заңдылығы бойынша) үшінші гармоника Φ_{23} магнит ағымдарын тудырады. Қортындысында үшінші гармониканың қортынды ағымы $\dot{\Phi}_{рез 3} = \dot{\Phi}_{13} + \dot{\Phi}_{23}$ белгілі мәнге түседі және практикалық түрде трансформатордың құрамына әсер етпейді [15].

II ТАРАУ. Трансформаторлардың орын басу сұлбалары

2.1 Трансформаторлардың орын басу сұлбаларының параметрлерін тәжірибелі түрде анықтау

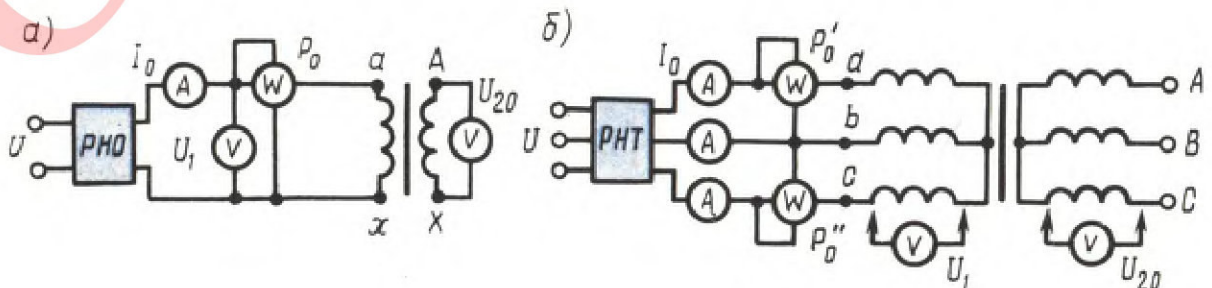
Бөлімде 1.1.2 алынған электрлік орын басу сұлбасы (сурет 1.4.1, б) кез – келген режимде трансформатор құрамын дәлдікпен зеріттеуге мүмкіндік береді. Сипаттамасын анықтау үшін осы сұлбаны қолдану 50 кВА қуатындағы трансформаторлар үшін жоғары практикалық мәнге ие және мұндай трансформаторларды жүктемесіз зерттеу тәсілі біршама қиындықтармен байланысты: электр энергиясының өнімсіз шығынымен, үлкен қосымша қымбат жүктемелік құрылғының керек болуымен.

Орын басу сұлбасының параметрлері $Z_1 = r_1 + jx_1$; $Z_m = r_m + jx_m$; $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$ (трансформаторларды есептеу процессінде) есептеу немесе тәжірибе жолымен қарастыру мүмкін болады. Төменде трансформатордың орын басу сұлбасы параметрлері реттілікпен анықтау тәжірибелі түрінде көрсетіледі. Мақсаты бос жүріс (б.ж) тәжірибесі мен қысқа тұйықталу (к.т) тәжірибесін жүргізу.

Бос жүріс тәжірибесі. Бос жүріс деп екінші орама тұйықталмаған (жүктемеге жалғанбаған) кезінде трансформатордың жұмыс режимін айтамыз. ($z_n = \infty$, $I_2 = 0$). бұл жағдайда тоқтар (1.4.8) мен кернеулердің теңдеулеті мынадай болады:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -(\dot{E}_1) + j\dot{I}_0 x_1 + \dot{I}_0 r_1; \\ \dot{U}'_{20} &= \dot{E}'_2; \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_0 \end{aligned} \quad (2.1.1)$$

Трансформатор бос жүріс кезінде жұмыс істеп тұрған кезде пайдалы қуат нөлге тең, б.ж. P_0 режимінде трансформатордың кірісіндегі қуат магнит өзекшесіндегі магниттік шығынға P_m (магнит өзекшесін қайта магниттелуіне жұмсалатын шығын мен құйынды тоқтар) жұмсалады және тек бірінші мыс орамасының $I_0^2 r_1$ электрлік шығындар (орама арқылы тоқ өткенде оның қызуының шығыны). $I_{1\text{ном}}$ қарағанда 2 – 10% аспайтын I_0 тоғының жоғары емес мәнінде $I_0^2 r_1$ ескермеуге болады және б.ж. қуаты өзіне магнит өзекшесінің стальнойда магниттік шығын қуатын көрсетеді. Сондықтан трансформатордың магниттік шығындарын бос жүріс шығындары деп қабылдайды [51].



Сурет 2.1.1. бір фазалы (а) үш фазалы (б) трансформаторлардың б.ж. тәжірибесінің сұлбасы.

Бір фазалы трансформатордың б.ж. тәжірибесін сурет 2.1.1, а бойынша келтіреді. Сұлбаға жалғанған өлшеуіш приборлар тікелей бірінші орамаға берілген U_1 кернеуді; екінші ораманың шығыстарындағы кернеуді U_{20} ; б.ж. қуатын P_0 және б.ж. тоғын I_0 өлшеуге мүмкіндік береді [7].

Трансформатордың бірінші орамасына кернеуді көбінесе бір фазалы кернеу реттеуіші БКР арқылы береді, ол кернеудің 0 – ден $1,15U_{1ном}$ – ға дейін баяу өсуіне мүмкіндік береді. Осы кезде б.ж. тоғының шамалас бірдей интервалдары арқылы приборлардың көрсеткіштерін алады, ал сосын б.ж. сипаттамаларын құрады; б.ж. I_0 тоғының б.ж. P_0 қуатына тәуелділігі мен қуат коэффициенті б.ж. $\cos\varphi_0$ бірінші кернеуге U_1 тәуелділігін анықтайды.

Үш фазалы трансформатор бос жүріс тәжірибесінде U_1 кернеуі үшін үш фазалы кернеу реттеуішін ТКР (сурет 2.1.1, б) қондырады. Үш фазада тоқ пен кернеудің орташа фазалық мәні бойынша б.ж. сипаттамаларын құрады:

$$I_0 = (I_{0a} + I_{0b} + I_{0c})/3 \quad (2.1.2)$$

$$U_1 = (U_{1a} + U_{1b} + U_{1c})/3; \quad (2.1.3)$$

Бір фазалы трансформатордың қуат коэффициенті:

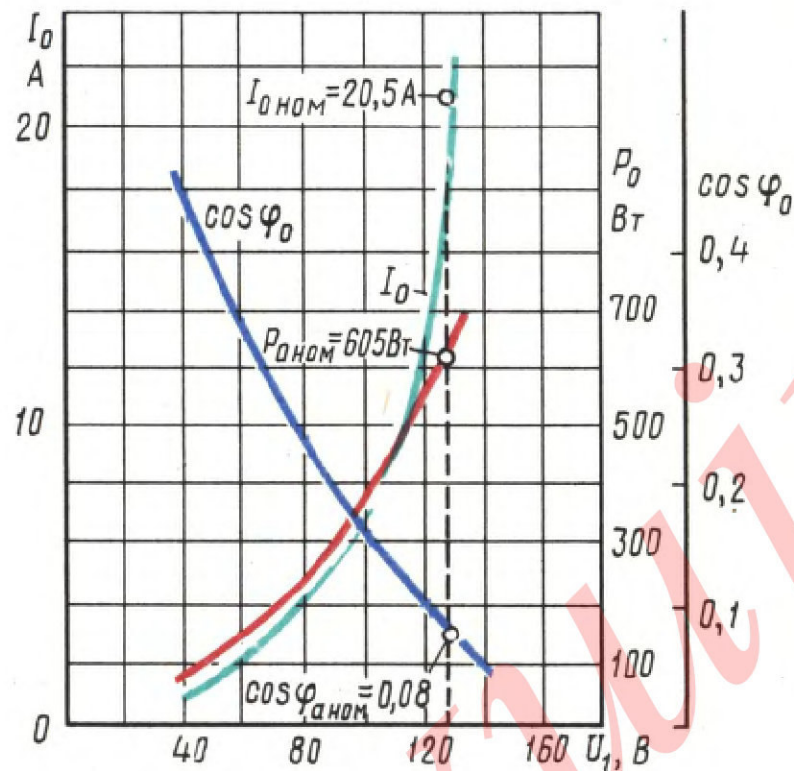
$$\cos\varphi_0 = \frac{P'_0 + P''_0}{3U_1I_0} = \frac{P_0}{3U_1I_0}, \quad (2.1.4)$$

мұнда P'_0 және P''_0 – бір фазалы ватметрлердің көрсеткіштері; U_1 және I_0 – тоқ пен кернеудің фазалық мәндері.

Осы б.ж. тәжірибесімен анықтауға болады: трансформация коэффициентін $k = U_1/U_{20} = w_1/w_2$; $U_{1ном}$ болған кезде б.ж. тоғы (бірінші тоқтың номиналды мәнінде процент бойынша);

$$i_0 = (I_{0ном}/I_{1ном})100; \quad (2.1.5)$$

және де б.ж. P_0 шығыны кезінде.



Сурет 2.1.2. Трансформатордың б.ж. сипаттамалары

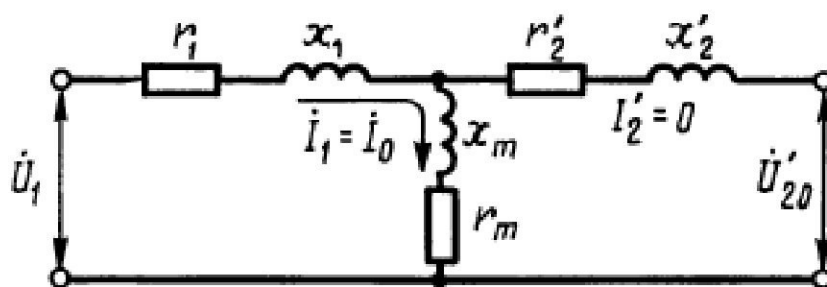
Үш фазалы трансформаторда фазалардағы б.ж. тоқтары бірдей емес және симметриялы емес жүйені құрайды, сондықтан сурет 2.1.1, б да көрсетілген бойынша P_0 қуатын екі ваттметрмен өлшеу керек болады. Б.ж. режимінде орын басу сұлбасының бірінші тармағындағы кернеудің түсуі $i_0(r_1 + jx_1)$ (сурет 2.1.3) қателік жібермей, жоғары шаманы қамтымай отырып, магниттелу тармағының параметрлері үшін келесі есептеулерді қарастыра аламыз:

$$z_m = \frac{U_1}{I_0}; \tag{2.1.6}$$

$$r_m = z_m \cos \varphi_0; \tag{2.1.7}$$

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2}; \tag{2.1.8}$$

Жалпы қолданысқа негізделген орташа және жоғары қуатты күштік трансформаторларда бірінші кернеудегі б.ж. тоғы $i_0 = 10 \div 0,6\%$ аралығында болады. Бірінші кернеу $U_{1ном}$ мәнімен сәйкес келетін бос жүріс $i_{0ном}$ тоғы және б.ж. қуаты $P_{0ном}$ мәні каталогте берілген трансформатор типінің параметрлері мәнінен асады, бұл дегеніміз сол трансформатордың дұрыс еместігін айтады.



Сурет 2.1.3. Б.ж. режиміндегі трансформатордың орын басу сұлбасы

Қысқа тұйықталу тәжірибесі. Трансформатордың қысқа тұйықталуы – екінші орама қысқа тұйықталған ($z_n = 0$) кезде екінші кернеу $U_2 = 0$ болатын режим. Эксплуатацияда трансформатордың екінші орамасына номиналды кернеу $U_{1ном}$ берген кезде қысқа тұйықталу апатты режим болып табылады және трансформаторға үлкен қауіп тигізеді.

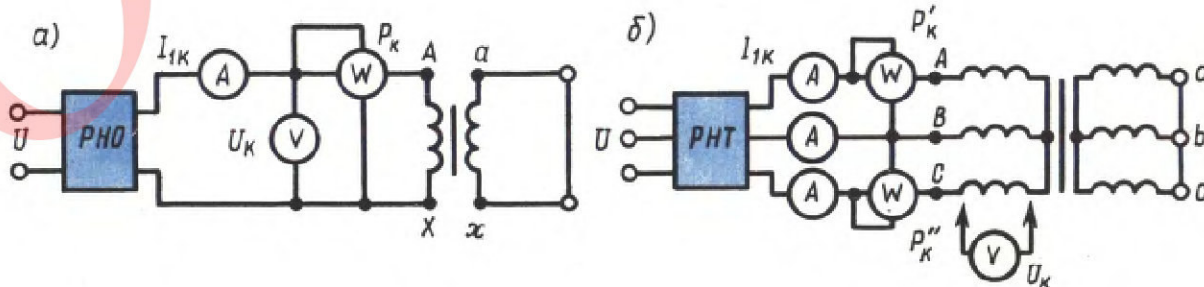
Қ.т. тәжірибесінде бір фазалы трансформатордың төменгі кернеу орамасын қысқа тұйықтайды (сурет 2.1.4, а), ал жоғары кернеу орамасына төменгі кернеуді кернеу реттегішпен ОКР бірте – бірте жоғарлата отырып $U_{кном}$ біршама мәніне жіткізе отырып береді. Трансформатордың орамаларында тұйықталу кезінде қ.т. тоқтары орамалардағы бірінші ($I_{1к} = I_{1ном}$) және екінші $I_{2к} = I_{2ном}$ тоқтың номиналды мәніне тең болады. Осыдан приборлардың көрсеткіштерін алады, қ.т. тоғы $I_{1к}$ қ.т. қуаты P_k және қуат коэффициенті $\cos \varphi_k$ қ.т. кернеуінен U_k (сурет 2.1.5) тәуелділік сипаттамаларын алады. Үш фазалы трансформатор үшін сурет 2.1.4, б сұлбасын келтіреміз, қ.т. кернеуі және қ.т. тоғы мәндерін үш фаза аралығы ретінде анықтайды:

$$U_k = (U_{кА} + U_{кВ} + U_{кС})/3; \tag{2.1.9}$$

$$I_{1к} = (I_{кА} + I_{кВ} + I_{кС})/3 \tag{2.1.10}$$

қ.т. тәжірибесі кезіндегі қуат коэффициенті:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{3U_k I_{1к}}. \tag{2.1.11}$$



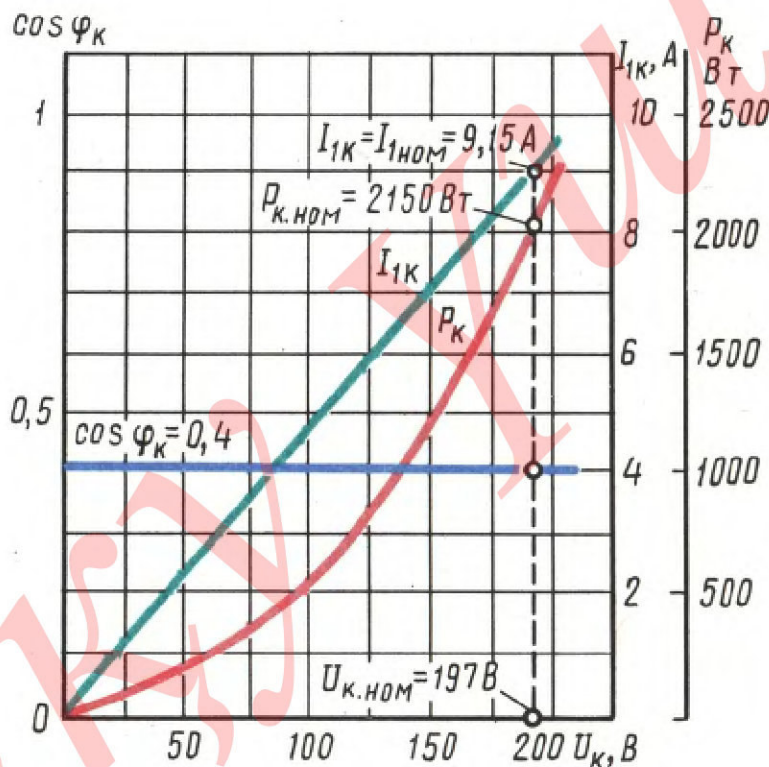
Сурет 2.1.4. бір фазалы және үш фазалы трансформаторлардың қ.т. тәжірибесінің сұлбасы

Үш фазалы трансформатордың активті қуатын екі ваттметр тәсілімен өлшейді. Сондықтан қ.т. қуаты

$$P_K = P'_K + P''_K \quad (2.1.12)$$

P'_K және P''_K бір фазалы ваттметрлердің көрсеткіштері. түйықталу кезінде трансформатор орамаларындағы кернеу, тоқтар осы тәжірибеде номиналды мәндеріне тең болуын қысқа түйықталыу номиналды кернеуі деп айтады және оны % ретінде көрсетеді

$$u_K = \frac{U_K}{U_{1НОМ}} 100. \quad (2.1.13)$$



Сурет 2.1.5. Трансформатордың қ.т. сипаттамалары

Күштік трансформаторларда $U_{1НОМ}$ қарағанда $u_K = 5 \div 10\%$. (1.3.3 және 1.3.4) теңдеулерінен көретініміз трансформатордың магнит өзекшесіндегі магнит ағымы бірінші кернеуге U_1 пропорционалды. Бірақ осы кернеу қ.т. тәжірибесінде $U_{1НОМ}$ 10% аспайтын мәнінде болады, мұндай үлкен емес шаманы магнит ағымы құрайды. Мұндай магнит ағымын болдыру үшін аз магниттеуші ток талап етіледі, яғни оның мәнін ескермейміз. Бұл жағдайда тоқтар теңдеуі (1.3.12) келесідей болады:

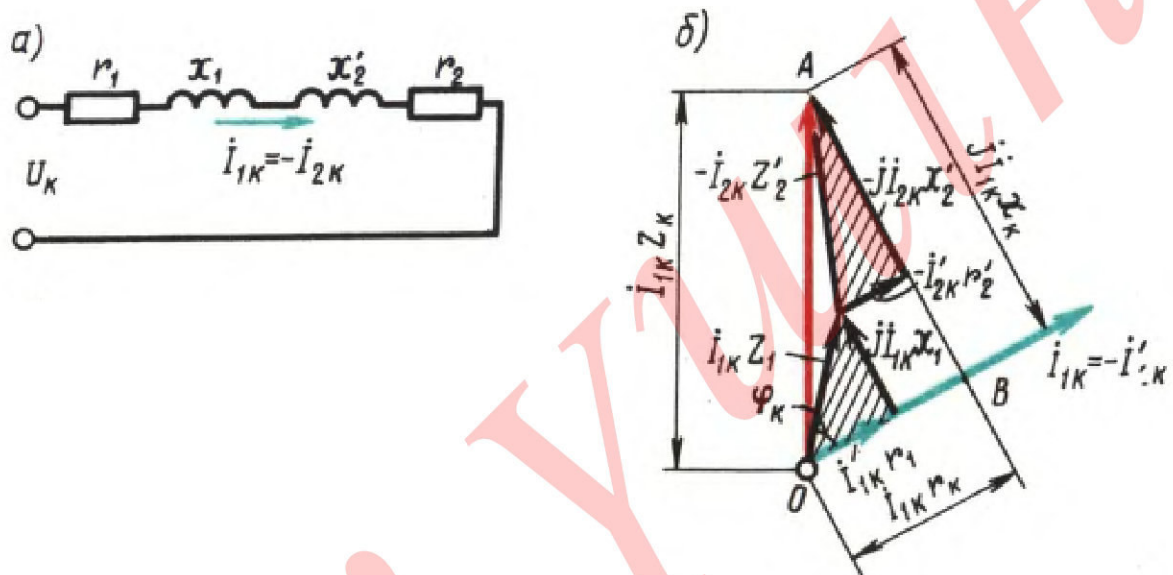
$$\dot{I}_{1K} = -\dot{I}'_{2K} \quad (2.1.14)$$

ал қ.т. тәжірибесі үшін трансформатордың орын басу сұлбасы магниттелі тармағынан тұрмайды (сурет 2.1.6, а). Осы орын басу сұлбасының кернеуінің мынадай теңдеуін жазуға болады:

$$\dot{U}_K = \dot{I}_{1K}(r_1 + r'_2) + j\dot{I}_{1K}(x_1 + x'_2). \quad (2.1.15)$$

немесе

$$\dot{U}_K = \dot{I}_{1K}r_K + j\dot{I}_{1K}x_K = \dot{I}_{1K}Z_K. \quad (2.1.16)$$



Сурет 2.1.6. Қ.т. режиміндегі трансформатордың орын басу сұлбасы (а) мен векторлық диаграммасы (б)

Мұнда қ.т. тәжірибесі кезіндегі трансформатордың кедергісі:

$$Z_K = r_K + jx_K, \quad (2.1.17)$$

мұндағы, r_K және x_K – қ.т. кедергісінің Z_K активті және реактивті бөліктері. Тоқ (2.1.14) және кернеу (2.1.15) теңбеулерін пайдалана отырып трансформатордың қ.т. тәжірибесінің векторлық диаграммасын саламыз (сурет 2.1.6, б). бұл диаграмманы салу қ.т. кернеуінің $\dot{U}_K = \dot{I}_{1K}Z_K$ векторын салудан бастау алады. Сонымен қатар φ_K бұрышымен \dot{U}_K бұрышына қ.т. $\dot{I}_{1K} = -\dot{I}_{2K}$ тоғын жүргіземіз. Бірінші орамадағы $\dot{I}_{1K}r_1$ және $\dot{I}_{1K}x_1$ кернеуінің түсуін, екінше орамадағы $-\dot{I}'_{2K}r'_2$ және $-\dot{I}'_{2K}x'_2$ кернеуінің түсуін сала отырып тік бұрышты АОВ үш бұрышын саламыз, мұны қысқа тұйықталу үш бұрышы деп атаймыз. Осы үш бұрыш:

$$OB = \dot{I}_{1K}r_1 + \dot{I}'_{2K}x'_2 = \dot{I}_{1K}r_K = \dot{U}_{Ka}; \quad (2.1.19)$$

$$BA = \dot{I}_{1K}jx_1 + j\dot{I}'_{2K}x'_2 = \dot{I}_{1K}jx_K = \dot{U}_{Kp}; \quad (2.1.20)$$

$$OA = I_{1K} Z_K = U_K; \quad (2.1.21)$$

мұнда:

$$U_K = \sqrt{U_{Ka}^2 + U_{Kp}^2}, \quad (2.1.22)$$

мұнда U_{Ka} және U_{Kp} – қ.т. кернеуінің В активті және реактивті бөліктері.

Қ.т. тәжірибесі кезінде орын басу сұлбасының толық, активті, индуктивті кедергілері:

$$Z_K = \frac{U_K}{I_{1K}}; \quad (2.1.23)$$

$$r_K = Z_K \cos \varphi_K; \quad (2.1.24)$$

$$x_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}. \quad (2.1.25)$$

P_K қуатының, r_K және Z_K кедергілерінің, қуат коэффициентінің $\cos \varphi_K$ және қ.т. кернеуінің u_K мәндерін орамалардың жұмыс температурасына $+75^\circ$ келтірсек:

$$r_{K75} = r_K [1 + \alpha(15^\circ - \theta_1)]; \quad (2.1.26)$$

$$Z_{K75} = \sqrt{r_{K75}^2 + x_{K75}^2}; \quad (2.1.27)$$

$$\cos \varphi_{K75} = \frac{r_{K75}}{Z_{K75}}; \quad (2.1.28)$$

$$u_{K75} = \frac{I_{1K} Z_{K75}}{U_{1ном}}; \quad (2.1.29)$$

мұнда $r_K - \theta_1$ температурасындағы қ.т. активті кедергісі; $\alpha = 0,004$ – мыс пен алюминийдің температура коэффициенті.

Қ.т. тәжірибесі кезінде негізгі ағым Φ_{max} нормалы бірінші кернеудегі мәнінен қарағанда аз ғана пайызды құрайды, сол себептен осы ағыммен пайда болатын шығындарды ескермесек болады. Сондықтан қ.т. тәжірибесінде трансформатор қоректенетін қуат P_K толығымен трансформатордың орамалырындағы шығындарды жабуға кетеді:

$$P_K = I_{1K}^2 r_1 + I_{1K}^2 r'_2 = I_{1K}^2 r_K.$$

Қ.т. қуатын орамалардың жұмыс температурасын $+75^\circ$ келтіртіреміз:

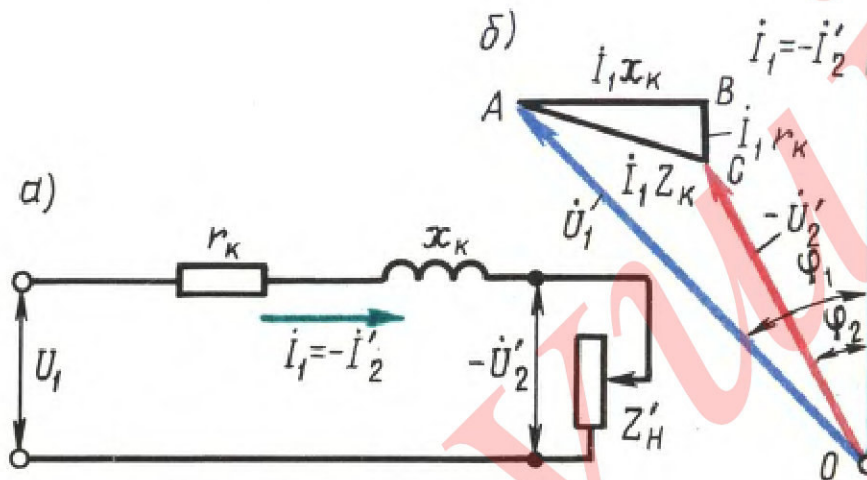
$$P_{K75} = 3I_{1K}^2 r_{K75}. \quad (2.1.30)$$

2.2. Трансформатордың қарапайым векторлық диаграммасы

Жүктелген трансформатордың векторлық диаграммасы (сурет 2.2.1) трансформатордың параметрлері қатынастарын көрсетеді. Қиындық тудыратына байланысты бұл диаграмма тәжірибелік есептеулерде

қолданылмайды. Диаграмманы оңайлату мақсатында және номиналды мәнге жақын жүктемеде жұмыс істеп тұрған трансформаторларда қ.т. тоғын ескермейді және мынадай деп қарастырады $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2$. Осы жағдайдан шыққан қате толық рұқсат, себебі I_0 салыстырғанда I_1 және I'_2 тоқтарымен үлкен емес. Трансформатордың бұл орын басу сұлбасы қарапайымдатылған түрде болады, магниттелу тармағы болмайды және келесі бөліктерден тұрады $r_k = r_1 + r'_2$ және $x_k = x_1 + x'_2$ (сурет 2.2.1, а), мұнда тік бұрышты үшбұрыш ABC қ.т. үшбұрыш түрінде болады:

$$BC = \dot{I}_1 r_k; \quad CA = \dot{I}_1 z_k; \quad AB = \dot{I}_1 x_k.$$

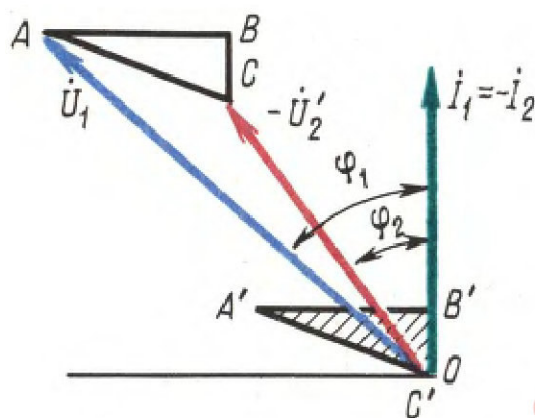


Сурет 2.2.1. Орын басу сұлбасының қарапайымдатылған түрі (а) және трансформатордың векторлық диаграммасы (б)

Кернеудің $U_{1ном}$, тоқтың $I_{1ном}$, қуат коэффициентінің $\cos \varphi_{2ном}$ және қ.т.

U_k , U_{ka} , U_{kr} берілген мәндерімен трансформатордың қарапайымдатылған векторлық диаграммасын салады.

Қарапайымдатылған векторлық диаграмманы салу ретті келесідегідей (сурет 2.2.2). Ордината осіне ток $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2$ векторын салады, сосын φ_2 бұрышына кернеу $-\dot{U}'_2$ векторын салады. Нүкте C' координаттың бастапқы нүктесімен келетіндей етіп қ.т. үшбұрышын $A'B'C'$ салады, ал $C'V'$ катесін ординатаның осімен сәйкес келетіндей етіп салады. Сосын вектордың C' нүктесі вектордың $-\dot{U}'_2$ соңғы нүктесімен бірге жылжыта отырып, бір жағын үшбұрышқа берілгеніндей $A'B'C'$ етіп қалдыра отырып, үшбұрыштың орнын ауыстырамыз. Содан ABC үшбұрышын аламыз. Осылай салып болған соң координаттың 0 нүктесінен бірінші (фазалы) \dot{U}_1 кернеуін жүргіземіз және бірінші ток \dot{I}_1 пен бірінші кернеудің \dot{U}_1 арасындағы фазалық ығысу бұрышын φ_1 анықтаймыз [19].



Сурет 2.2.2. Қарапайымдатылған векторлық диаграмманы салу

2.3. Трансформатордың сыртқы сипаттамасы.

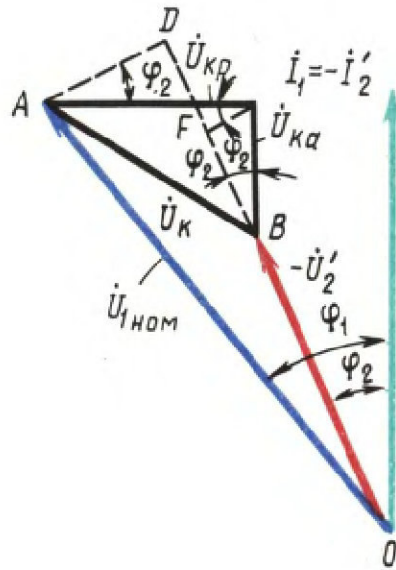
Жүктеменің өзгеріп тұруына байланысты оның екінше кернеуі U'_2 өзгереді. Мұны трансформатордың қарапайымдатылған орын басу сұлбасынан байқаймыз (сурет 2.2.1) $\dot{U}'_2 = \dot{U}_{1\text{ном}} - \dot{I}_1 Z_k$.

Жүктеменің б.ж. номиналды жүктемеге дейін өсуі кезінде трансформатордың екінші орамасының өзгеруі трансформатордың маңызды сипаттамасы болып табылады және былай анықталады:

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{U_{1\text{ном}} - U'_2}{U_{1\text{ном}}} \cdot 100. \quad (2.3.1)$$

$\Delta U_{\text{ном}}$ анықтау үшін қарапайымдатылған векторлы диаграмманы қолдана отырып анықтаймыз. Оған және де қосымша өзгерістер енгіземіз (сурет 2.3.1). $-U'_2$ векторына А нүктесінен перпендикуляр түсіріп D нүктесін аламыз. Мұнда $BD = U_{1\text{ном}} - U'_2 = BD = BF + FD$, мұнда $BF = U_{\text{ка}} \cos \varphi_2$; $FD = U_{\text{кр}} \sin \varphi_2$, онда:

$$U_{1\text{ном}} - U'_2 = U_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}} \sin \varphi_2, \quad (2.3.2)$$



Сурет 2.3.1. Формула шығуға келтірілген сұлба

Екінші кернеудің өзгеруі (2.3.1) және (2.3.2) қосқанда мынадай түрде болады:

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{(U_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}} \sin \varphi_2) 100}{U_{1\text{ном}}} \quad (2.3.3)$$

$(U_{\text{ка}}/U_{1\text{ном}})100 = u_{\text{ка}}$ $(U_{\text{кр}}/U_{1\text{ном}})100 = u_{\text{кр}}$ осылай белгілейміз, сонда жүктеменің жоғарлаған кезінде трансформатордың екінші кернеуінің өзгеруі мынадай болады:

$$\Delta U_{\text{ном}} = u_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + u_{\text{кр}} \sin \varphi_2 \quad (2.3.4)$$

Теңдеу (2.3.4) тек трансформатор нормалды жүктемеде жұмыс істеп тұрған кезде екінші ораманың өзгеруін анықтауға мүмкіндік береді. ал егер кез – келген жүктемеде екінші кернеудің өзгеруін анықтау керек болса онда (1.70) теңдеуіне қосымша жүктемедегі тоқтар мәндерінің қатынасын көрсететін жүктеме коэффициентін енгіземіз :

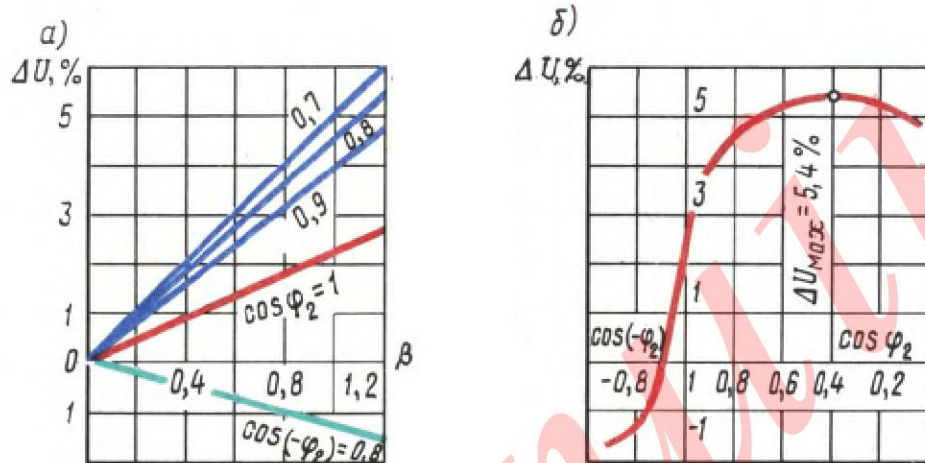
$$\Delta U = \beta(u_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + u_{\text{кр}} \sin \varphi_2). \quad (2.3.5)$$

Теңдеу (2.3.4) көретініміз екінші кернеудің ΔU өзгеруі тек қана трансформатор жүктемесі шамасына β ғана емес қатар осы жүктеменің сипатына φ_2 да байланысты болады екен.

Сурет 2.3.2, а көрсетілгені $\cos \varphi_2 = \text{const}$ болған кезде $\Delta U = f(\beta)$ тәуелділігін көрсетеді, сурет 2.3.2, б – график $\Delta U = f(\cos \varphi_2) \beta = \text{const}$ болған кезде. Осы графиктерде ΔU теріс мәндері трансформатордың сиымдылық жүктемеде жұмыс істеген кезінде б.ж. режимінен кернеудің жүктемелік режимге өткен кезіндегі сол кернеудің өсуімен сәйкес келетін формулаларды иелене отырып $u_{\text{ка}} = u_{\text{к}} \cos \varphi_2$, $u_{\text{кр}} + u_{\text{к}} \sin \varphi_2$ кез – келген жүктемеде екінші кернеудің өзгеруінің есептелуін табу үшін мына формуланы аламыз:

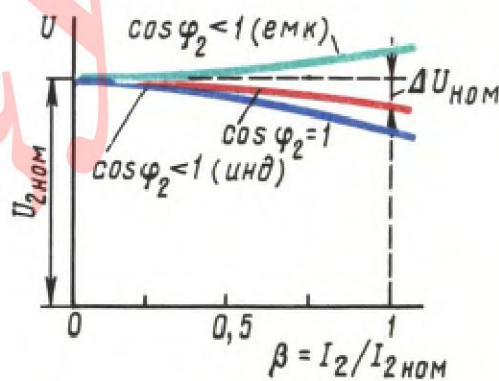
$$\Delta U = \beta u_k (\cos \varphi_k \cos \varphi_2 + \sin \varphi_k \sin \varphi_2) = \beta u_k \cos (\varphi_k - \varphi_2). \quad (2.3.6)$$

Теңдеу (2.3.6) алатынымыз, кернеудің көбірек өзгерітін мәні $\Delta U = u_k$ фазалық бұрыштардың ығысуында $\cos(\varphi_k - \varphi_2) = 1$ болған кезінде орын алады.



Сурет 2.3.2 Жүктеме шамасына тәуелді ΔU (а) және үш фазалы (б) трансформатордың жүктеме қуатының коэффициенті (100 кВА, 6,3/0,22 кВ, $u_k = 5,4\%$, $\cos \varphi_k = 0,4$)

Трансформатордың екінші кернеуінің U_2 жүктемеге I_2 тәуелділігі сыртқы сипаттамасы деп аталады. Трансформатор жүктемесінің сипаттамасына ($\cos \varphi_k$) трансформатордың сыртқы сипаттамасына (сурет 2.3.3) байланысты. Теңдеу (2.3.2) β және $\cos \varphi_k$ әр түрлі мәндері бойынша трансформатордың сипаттамасын салуға болады [13].



Сурет 2.3.3. трансформатордың сыртқы сипаттамасы.

2.4. Трансформатордың ПӘК мен және шығындары

Электр энергиясын түрлендіру барысында энергияның бөлігі трансформатордың шығынын жабуға кетеді. Трансформатордағы шығындар электрлік және магниттік шығындар деп бөлінеді.

Электрлік шығындар. Электр тоғының трансформатордың орамалары арқылы өткен кезде сол трансформатордың орамаларының қызуынан пайда болатын шығындар болып табылады. Тоқтың квадратына электрлік шығынның қуаты тура пропорционалды және бірінші $P_{\Sigma 1}$, екінші $P_{\Sigma 2}$ орамалардың электрлік шығындарының суммасы ретінде анықталады:

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} = mI_1^2 r_1 + mI_2^2 r_2' \quad (2.4.1)$$

мұнда m – трансформатордың фазалар саны (бір фазалы трансформатор үшін $m = 1$, үш фазалы үшін $m = 3$).

Трансформаторды проектилеген кезде электрлік шығындардың шамаын (2.4.1) теңдеуі арқылы анықтайды, ал трансформаторды құрастыру кезінде бұл шығындарды орамалардың номиналды тоқтарында $P_{к ном}$ қ.т. қуаттын өлшеу арқылы тәжірибелік жолмен анықтайды:

$$P_{\Sigma} = \beta_1^2 P_{к ном}, \quad (2.4.2)$$

мұнда β – жүктеме коэффициенті [19].

Электрлік шығындар трансформатордың жүктемесіне байлынысты болғандықтан ол шығындар айнымалы (2.4.1) деп аталады.

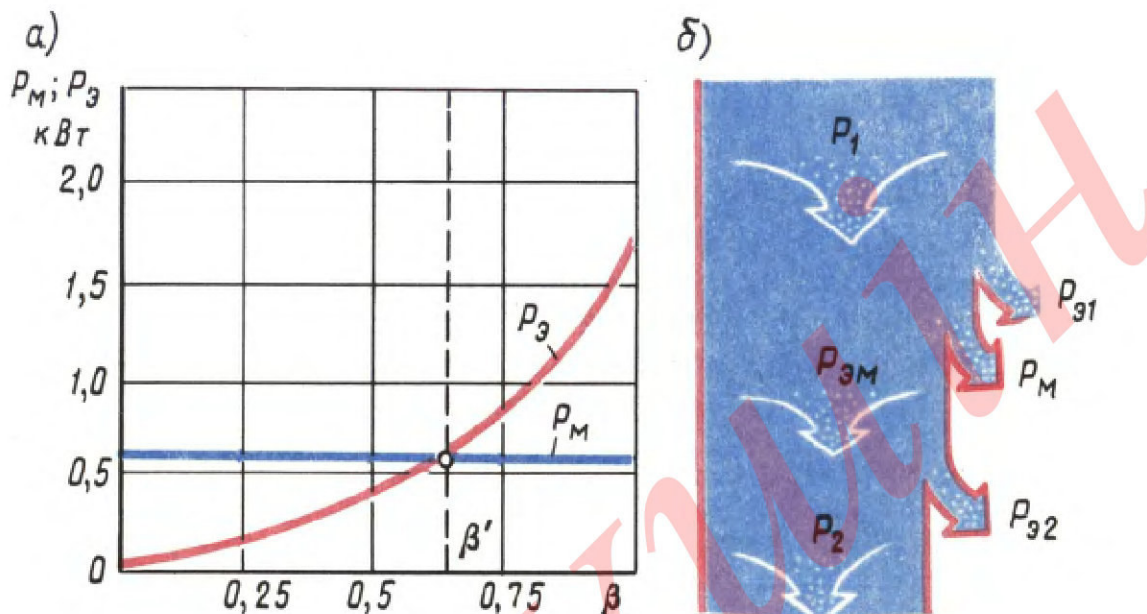
Магниттік шығындар. Магниттік шығындар трансформаторлардың магнит өзекшелерінде болады. Айнымалы магниттік өрістің системетикалық түрде арық магниттелуінен осы шығындар болады. Осындай артық магниттелі магнит өзекшесінде екі шығынды тудырады: магнит өзекшесінің ферромагниттік материалында қалған магнетизмді жоюға байланысты болатын гистерезис шығыны P_r , және магнит өзекшесінің пластинасында айнымалы магнит ағымында туындайтын $P_{вт}$ құйынды тоқтардың шығыны [6].

$$P_m = P_r + P_{вт}. \quad (2.4.3)$$

Трансформатордың магниттік шығындарды азайту мақсатында магнит өзекшесін магнитті – жұмсақ ферромагниттік материал – жіңішке пластиналардан тұратын электр техникалық стальдан жасайды. Сосын магнит өзекшесін екі жағын жіңішке пленкалы лакпен лактау арқылы оқшауланған жіңішке пластиналарды бір – біріне шихтілеу арқылы пакеттер жасап, сосын жинастырамыз.

Гистерезистің магниттік шығындары магнит өзекшесінің артық магниттелуінің жиілігіне, айнымалы тоқтың жиілігіне ($P_r \equiv f$) тура пропорционалды, ал құйынды тоқтардың магниттік шығындары осы жиіліктің квадратына пропорционалды ($P_{вт} \equiv f^2$). Суммарлы магниттік шығындарды тоқ

жиілігіне мынадай деңгейде 1,3 пропорционал деп аламыз $P_M \equiv f^{1,3}$. Магнит шығынының шамасы магнит өзекшесінің ярмалары мен стержіндеріндегі магниттік индукцияға да тәуелді ($P_M \equiv B^2$). Бірінші кернеудің тұрақты ($U_1 = \text{const}$) болған мәнінде магниттік шығын тұрақты, яғни трансформатордың жүктемесіне тәуелді болмайды (сурет 1.40, а).



Сурет 2.4.1. трансформатор шығынының оның жүктемесіне тәуелділігі (а) және трансформатордың энергетикалық диаграммасы (б)

Магниттік индукциясының 1,0; 1,5 немесе 1,7 Тл мәнін және артық магниттелудегі 50Гц жиіліктегі 1кг жіңішке электр техникалық стальдардан болатын нақты магнит шығынының $P_{уд}$ мәні бойынша трансформаторды проектилеген кезде магниттік шығындарды анықтайды:

$$P_M = P_{уд} \left(\frac{B}{B_x} \right)^2 \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} \cdot G, \quad (2.4.5)$$

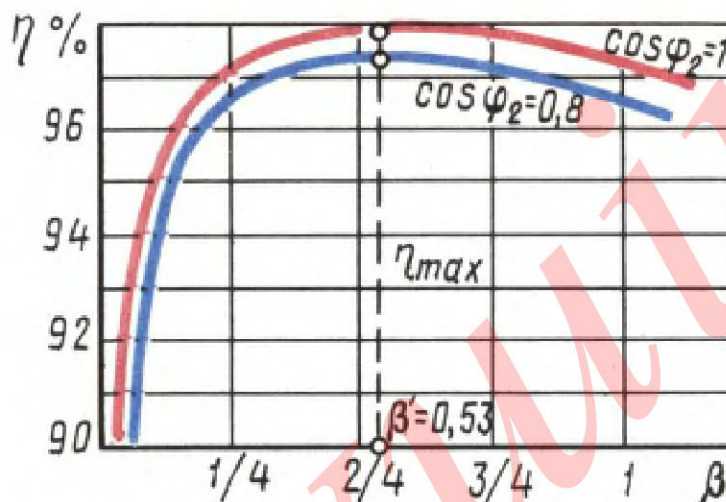
мұнда B – трансформатордың магнит өзекшесінің ярмасындағы немесе стержініндегі магнит индукциясының фактикалық мәні, Тл; B_x – магнит шығынының нақты мәніне сәйкес келетін магнит индукциясы, мысалы – $B_x = 1,0$ немесе 1,5 Тл; G – магнит өзекшесінің ярмасының немесе стержінің массасы, кг.

Нақты магниттік шығын мемлекеттік стандарттарда жіңішке электртехникалық сталь үшін мәндері беріледі. Мысалы, 3411 маркасындағы қалыңдығы 0,5 мм сталь үшін нақты магниттік шығындар $P_{1,5/50} = 2,45$ Вт/кг.

Трансформаторды жасау барысында магниттік шығындарды номиналды бірінші кернеудегі $P_{оном}$ б.ж. қуатын өлшеу арқылы тәжірибелік жолмен анықтайды [41].

Сондықтан трансформатордың бірінші орамасына тораптан түсетін активті P_1 қуат осы орамадағы $P_{\Sigma 1}$ электрлік шығындарға жұмсалады. Айнымалы магнит ағымы трансформатордың магнит өзекшесінде магниттік

шығындар P_m шығындарын тудырады. Бұдан кейін қалатын қуат электр магниттік қуат деп аталады $P_{эм} = P_1 - P_{э1} - P_m$, екінші орамаға беріледі, осы орамада бұл электрлік шығындарға жұмсалады $P_{э2}$. Трансформатордың жүктемесіне түсетін активті қуат, $P_2 = P_1 - \sum P$, мұнда $\sum P = P_{э1} + P_m + P_{э2}$ – трансформатордың суммарлы шығындары. Трансформатордың жұмыс процессінде болатын барлық шығындар (сурет 2.4.1, б) көрсетілген.



Сурет 2.4.2. трансформатордың ПӘК мен жүктеме арасындағы тәуелділік графигі

Трансформатордың пайдалы әсер коэффициенті екінші орама шығысындағы активті қуаттың P_2 (пайдалы қуат) бірінші ораманың кірісіндегі активті қуаттың P_1 (берілген қуат) қатынасын айтамыз:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}. \quad (2.4.6)$$

Шығындардың суммасы:

$$\sum P = P_{0ном} + \beta^2 P_{кном} \quad (2.4.7)$$

Үш фазалы трансформатордың екінші орамасының активті қуаты (Вт):

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_{ном} \cos \varphi_2, \quad (2.4.8)$$

мұнда $S_{ном} = \sqrt{3} U_{2ном} I_{2ном}$ – трансформатордың номиналды қуаты, В·А; I_2 және U_2 – тоқтың А және кернеудің В сызықты мәні.

$P_1 = P_2 + \sum P$ ескере отырып, трансформатордың ПӘК есептіу үшін:

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_{0ном} + \beta^2 P_{кном}} \quad (2.4.9)$$

Теңдеу (2.4.9) көретініміз, трансформатордың ПӘК жүктеменің шамасына (β) және сипатына тәуелді ($\cos \varphi_2$). Бұл тәуелділік (сурет 1.41) графигінде көрсетілген. Жүктеменің магниттік шығындары электрлік шығындарға тең болған кезде, ПӘК максималды мәні жүктемеге сәйкес келеді: $P_{0\text{НОМ}} = \beta^2 P_{\text{кНОМ}}$, бұдан ПӘК максималды мәніне сәйкес келетін жүктеме коэффициентінің мәні:

$$\beta' = \sqrt{\frac{P_{0\text{НОМ}}}{P_{\text{кНОМ}}}}. \quad (2.4.10)$$

Көбінесе трансформатордың ПӘК максималды мәні $\beta' = 0,45 \div 0,65$. Теңдеу (2.4.10) β' мәнін теңдеу (1.79) β қойып, трансформатордың ПӘК максималды мәнінің теңдеуін аламыз:

$$\eta_{\text{макс}} = \frac{\beta' S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2}{\beta' S_{\text{НОМ}} \cos \varphi_2 + 2P_{0\text{НОМ}}} \quad (2.4.11)$$

Қуат бойынша қарастырылатын ПӘК кей кезде энергия бойынша ПӘК түсінігі ретінде қолданылады. Қатынастар бір жыл ішінде тұтынушыларға берілетін энергия сапасының W_2 (кВт·ч) осы жыл ішінде тұтынушылардың қоректендіргіш электр торабынан алынатын энергияға W_1 қатынасын айтамыз:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{W_2}{W_1} \quad (2.4.12)$$

Энергия бойынша трансформатордың ПӘК түрлендіру қолданысының тиімділігін сипаттайды [37].

2.5. Орамаларды жалғау топтамалары.

Трансформатордың векторлық диаграммаларын салған кезде қазірге кезге дейін ораманың ЖК ЭҚК $\vec{E}_{\text{АХ}}$ және ораманың ТК ЭҚК $\vec{E}_{\text{ах}}$ фаза бойынша сәйкес келеді деп саналады. Бірақ бұл тек трансформатордың орамаларының бірінші және екінші орамдары бір бағытта болған жағдайда жіне орамалардың шығыстарының бір белгіде болған жағдайда дұрыс. Бұл сурет 2.5.1, а. Егер трансформатордың ТК орамасының бағытын өзгертетін болсақ немесе оның шығыстарының белгілерін ауыстырып қоятын болсақ, онда фазасына ЭҚК $\vec{E}_{\text{АХ}}$ қатысты ЭҚК $\vec{E}_{\text{ах}}$ 180° – қа ығысады (сурет 2.5.1, б). ЭҚК $\vec{E}_{\text{АХ}}$ және ТК ЭҚК $\vec{E}_{\text{ах}}$ арасындағы фазаның ығысуын жалғау топтамасы деп қарастырады. Осы фазалардың арасындағы ығысу 0 – ден 360° – қа дейін өзгереді, ал ығысудың қысқалығы 30° құрайды, онда топтамаларды жалғау үшін мынадай сандарды қолданады: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 және 0.

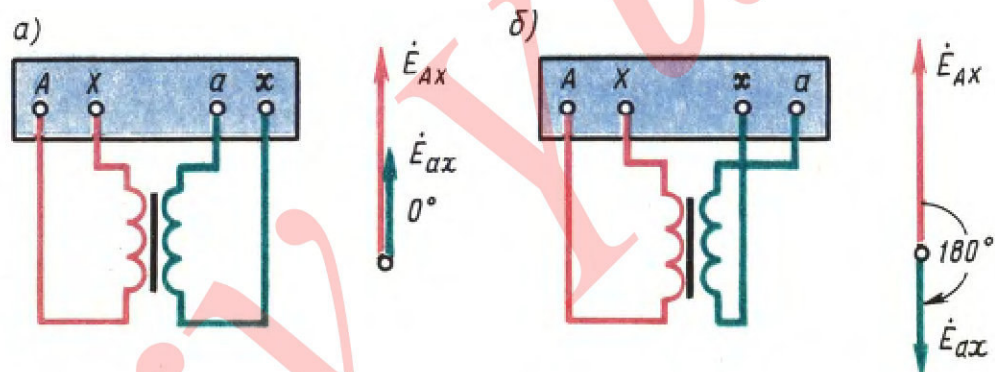
ТК орамасының сызықтық ЭҚК векторының ЖК орамасының сызықтық ЭҚК векторына байланысты бұрыштық ауысуын 30° бойынша топтама жалғауларын көрсететін сандарының көбеюімен анықтайды. Сағат тілі

бойынша ЖК орамасының сызықтық ЭҚК векторнан ТК орамасының сызықтық ЭҚК векторына дейін бұрыштық ауысу есептеледі. Мысалы, 5 топтама жалғауы ТК ЭҚК векторы фаза бойынша ЖК ЭҚК векторынан $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$ бұрышқа қалатынын көрсетеді.

Жалғау топтамаларын оңай түсіну үшін сағатпен салыстыру әдісін қолданады. Сондықтан ЖК орамасының ЭҚК векторы минуттық бағыттыушысымен сәйкес келеді, бұл бағыттауыш 12 цифрынан тұрады, ал ТК орамасының ЭҚК векторы – сағат бағытымен сәйкес келеді (сурет 2.5.2). Осыдан көретініміз ЭҚК \dot{E}_{Ax} пен ЭҚК \dot{E}_{ax} векторларының фазада сәйкес келуі 0 топтамасы болады (12 емес). Бұдан басқа ЭҚК векторларының айналуының оң бағытын сағат тілінің айналу бағытына қарама – қарсы болады [33].

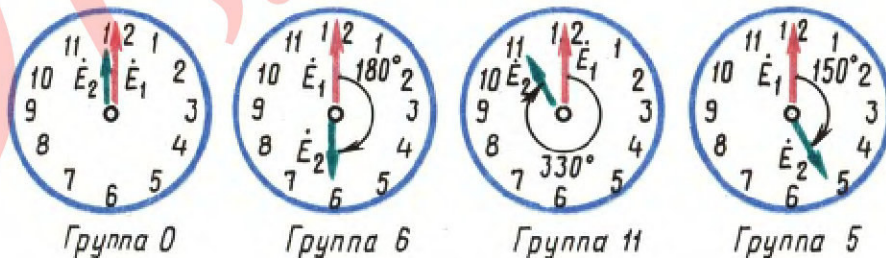
Бір фазалы трансформатордың орамалары жалғану топтамасы тек екеу ғана: фаза \dot{E}_{Ax} және ЭҚК \dot{E}_{ax} бойынша сәйкес келетін 0 тобы, және фаза \dot{E}_{Ax} және ЭҚК \dot{E}_{ax} бойынша 180° ығысуына сәйкес келетін 6 топтама. Бұл топтамалардан мемлекеттік стандарттарда тек 0 топтамасын қарастырады, және $II - 0$ деп белгілейді.

Үш фазалы трансформаторлардың орамаларын жалғаудың әр түрлі тәсілдері арқылы 12 түрлі жалғау топтамаларын аламыз [41].



Сурет 2.5.1. Бір фазалы трансформаторлардың орамаларының жалғау топтамалары

а – $II - 0$ тобы, б – $II - 6$ тобы



Сурет 2.5.2. сағаттар бағыттарының топтамаларды жалғануының белгілерімен салыстырылуы

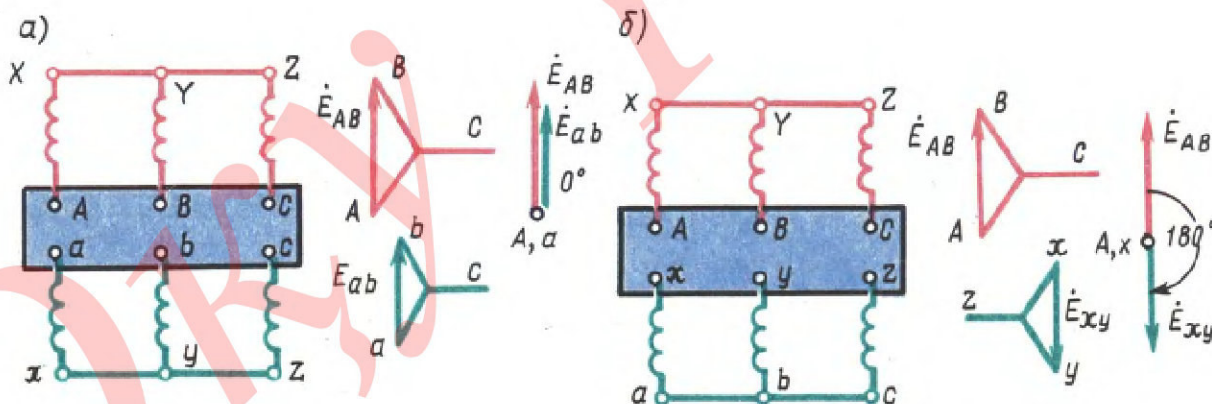
Жалғанудың сұлбасының мысалы ретінде “жұлдызша - жұлдызша” (сурет 2.5.3, а) жалғауды қарастырайық. ЭҚК векторлық диаграммалары сызықтық ЭҚК \dot{E}_{AB} және \dot{E}_{ab} арасындағы ығысу нөлге тең екендігін көрсетеді. Бұны А

және а нүктелерін ЖК және ТК орамаларының ЭҚК векторлық диаграммаларында беттестіру арқылы байқауымызға болады. Сонымен қатар, орамалардың жалғану сұлбалары 0 тобында болады; $Y/Y - 0$ деп белгіленеді. Егер ТК жағындағы нөл нүктесіне a, b, c ұштарын жалғап, ал x, y, z ұштарынан ЭҚК шешетін болсақ, онда ЭҚК \dot{E}_{ab} фазаны 180° өзгертсек, трансформатор 6 ($Y/\Delta - 6$) тобына жатады ($Y/Y - 6$) [49].

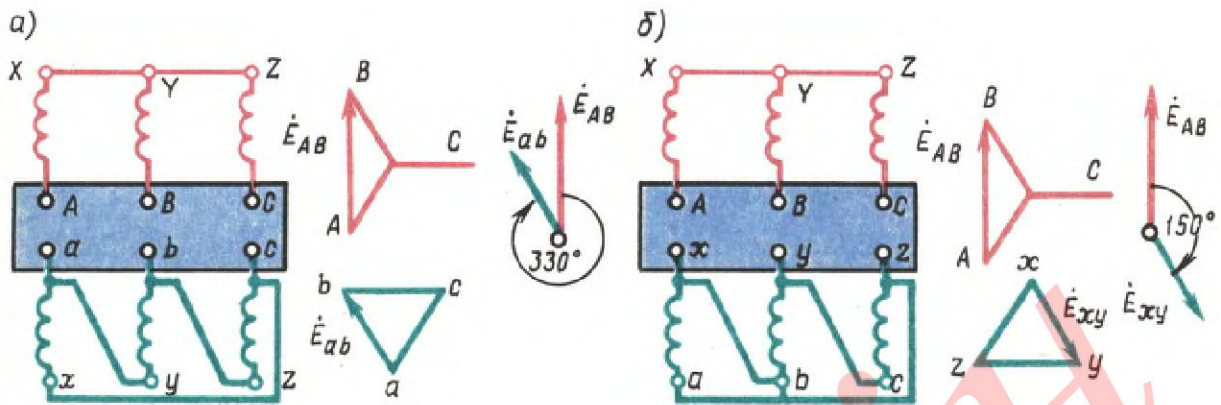
Сурет 2.5.4, а көрсетілгендей ораманы “жұлдызша – үш бұрышты” жалғағанда 11 ($Y/\Delta - 11$) тобында болады. Егер ТК фазалық орамаларының соңы мен басын ауыстыратын болсақ, онда \dot{E}_{ab} векторы 180° – қа бұрылады және трансформатор 5 ($Y/\Delta - 5$) тобында болады (сурет 2.5.4, б).

ЖК мен ТК орамалары бірдей жалғану сұлбасында, мысалы Y/Y және Δ/Δ , онда жалғанудың үш топтарын алады, ал ЖК мен ТК орамалары бірдей емес жалғану сұлбасында, мысалы Y/Δ немесе Δ/Y , – тақ болады.

Қарастырылған жалғанудың үш тобы (0, 6, 11 және 5) негізгілері болып саналады. Әр негізгі жалғану тобын трансформатордың бір жағына шығыстарын айналдыра қайта маркерлеу әдісімен, мысалы ТК жағы (жалғау сұлбасының өзгеруінсіз), екі топтамадан ауға болады. Мысалы, трансформатор $Y/Y - 0$ жалғау топтамасында ТК орамасының шығыстарын қайта маркерлеп және abc реттілігінің орнына sab реттілігін қабылдасақ, онда ЭҚК \dot{E}_{ab} векторы 120° – қа бұрылады, осыдан $Y/Y - 4$ тобын аламыз. Егер ТК орамасының шығыстарын bca реттілігінде қайта маркерлесе, онда \dot{E}_{ab} векторы тағы 120° – қа бұрылады, ал барлығы 240° болады, бұдан алатынымыз $Y/Y - 8$.



Сурет 2.5.3. Орамалардың жалғану сұлбасы және векторлық диаграммалары:
а) $Y/Y - 0$ тобы үшін; б) $Y/Y - 6$ тобы үшін



Сурет 2.5.4. Орамалардың жалғану сұлбасы және векторлық диаграммалары:
 а) Y/Δ – 11 тобы үшін; б) Y/Δ – 5 тобы үшін

Аналогті түрде негізгі топ 6 айналдыра қайта маркерлеу тәсілі жолымен туындайтын 10 және 2 топтарын алады, негізгі топ 11 – туындайтын топтар 3 және 7, негізгі топ 5 – туындайтын топтар 9 және 1.

Туындаушы топтардың қарағанда негізгі топтардың артықшылықтары көп, яғни олар бір стержінде орналасқан ораманың шығыстарының біркелкі белгіде болуы. Бірақ, үш фазалы трансформаторларда тәжірибе бойынша жалғаудың барлық түрі қолданыла бермейді.

Күштік трансформаторларды дайындау немесе эксплуатация кезінде кей кезде жалғау сұлбаранын тәжірибелі түрде тексеру қажеттіліктері туындап жатады.

ІІІ ТАРАУ. ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫ ЕСЕПТЕУ АЛГОРИТМІ БОЙЫНША ТӘЖІРИБЕЛІК БӨЛІМ

3.1. Күштік трансформаторларды есептеу процедураларын алгоритмдеу

Күштік трансформаторларды есептеу әр түрлі методикамен орындалады, бірақ осы уақытқа дейін жалпыға ортақ ешбір есептеу тәсілі жоқ. Есептеулердің барлық тәсілдері арнайы күштік трансформаторлардың негізгі және қосымша бөліктерінің күштік сипаттамалары мен конструктивті параметрлерін есептеуге негізделеді [36].

Сол себептен ғылыми жұмыстың мақсаты күштік трансформаторларды есептеу үшін универсалды алгоритмнің құрастыру [24].

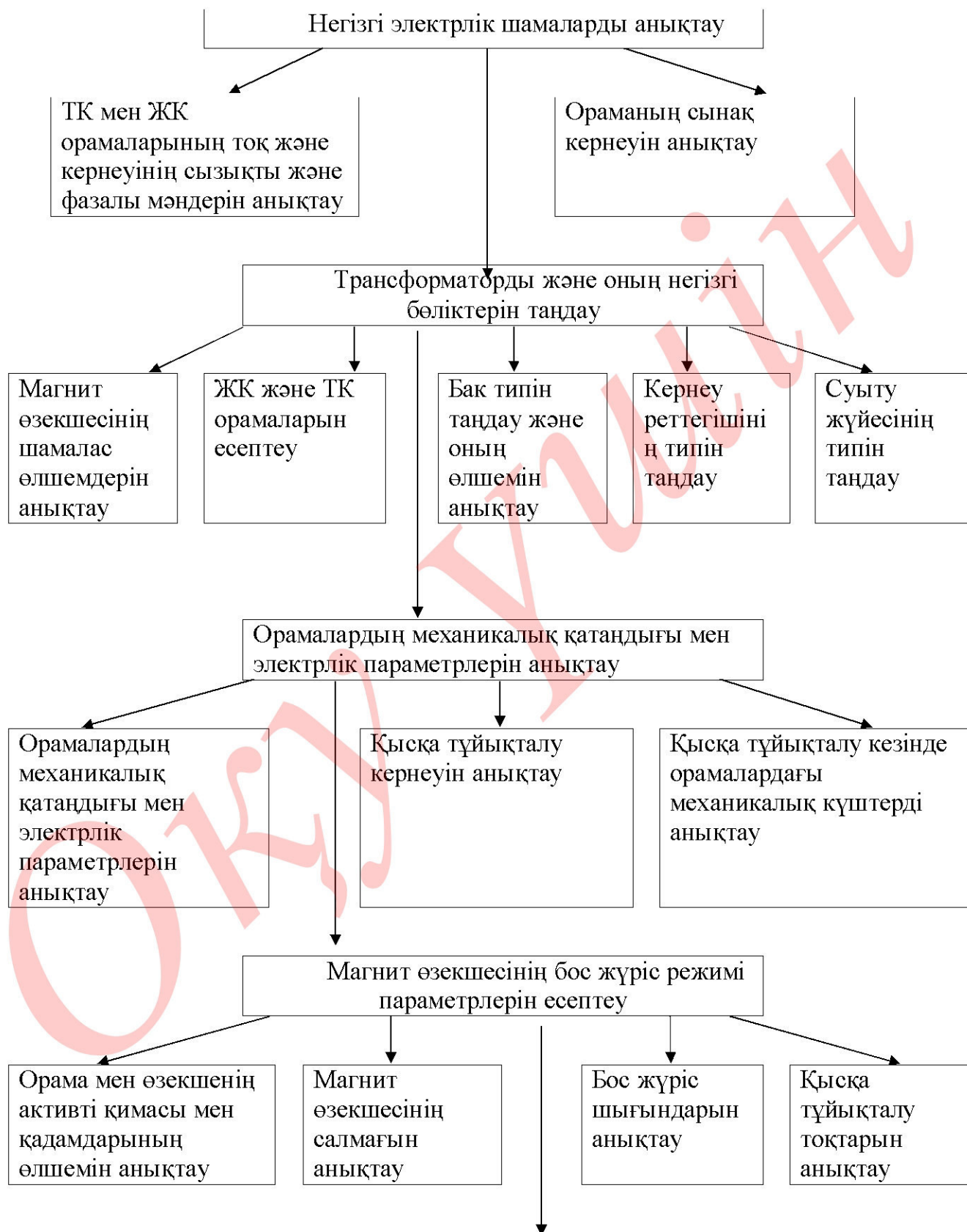
Негізгі электрлік шамаларды анықтау келесі реттілікте орындалады:

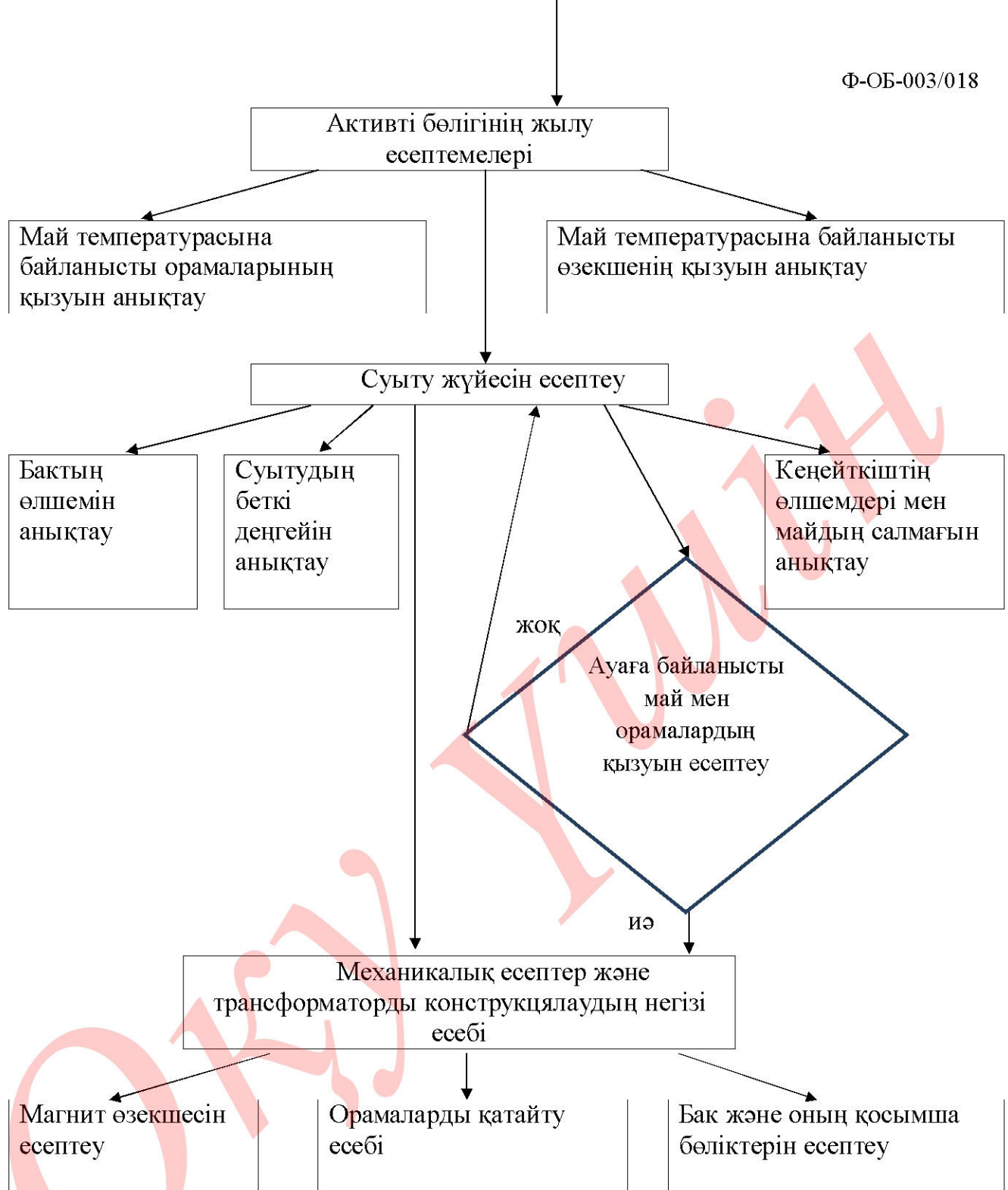
1. Трансформатордың типі мен оның негізгі құрама бөліктерін таңдау.
2. Электрлік параметрлерін анықтау және ораманың механикалық қатаңдығын анықтау.
3. Магнит өзекшесін есептеу және бос жүріс параметрлерін анықтау.
4. Активті бөлігінің жылуын есептеу.
5. Суыту жүйелерін есептеу
6. Трансформатордың механикалық есептеулері мен конструкциясын көрсету [17].

Трансформатор элементтерін реттілік есептеулері үшін әрбір есептеудің негізгі бөлігіне блок сұлбалары келтірілген. Мысалы, негізгі есептеудің екінші бөлігі үшін есептің реттілігін келтіріп және конструктивті сипаттамалары мен негізгі параметрлерін таңдау:

1. Магнит өзекшесінің өлшемдерін есептеу:
 - трансформатор листінің маркасы мен оқшамасын таңдау
 - өзекше мен ярмадағы индукциясын таңдау
 - өзекшенің қадамдар саны мен диаметрін
 - ораманың негізгі оқшаудамасы үшін негізгі оқшауламалар аралығын анықтау
 - магнит өзекшесінің шамалас өлшемдерін анықтау
2. ЖК және ТК орамаларын есептеу:
 - ЖК және ТК орамаларының типін таңдау
 - ЖК және ТК орамаларының орамдар санын сосын өлшемін анықтау
3. Бак типін таңдау және оның өлшемін анықтау
4. Кернеу реттегішінің типін таңдау
5. Суыту жүйесінің типін таңдау

Күштік трансформатордың есептелуі бойынша жасалған алгоритмінің блок сұлбасы



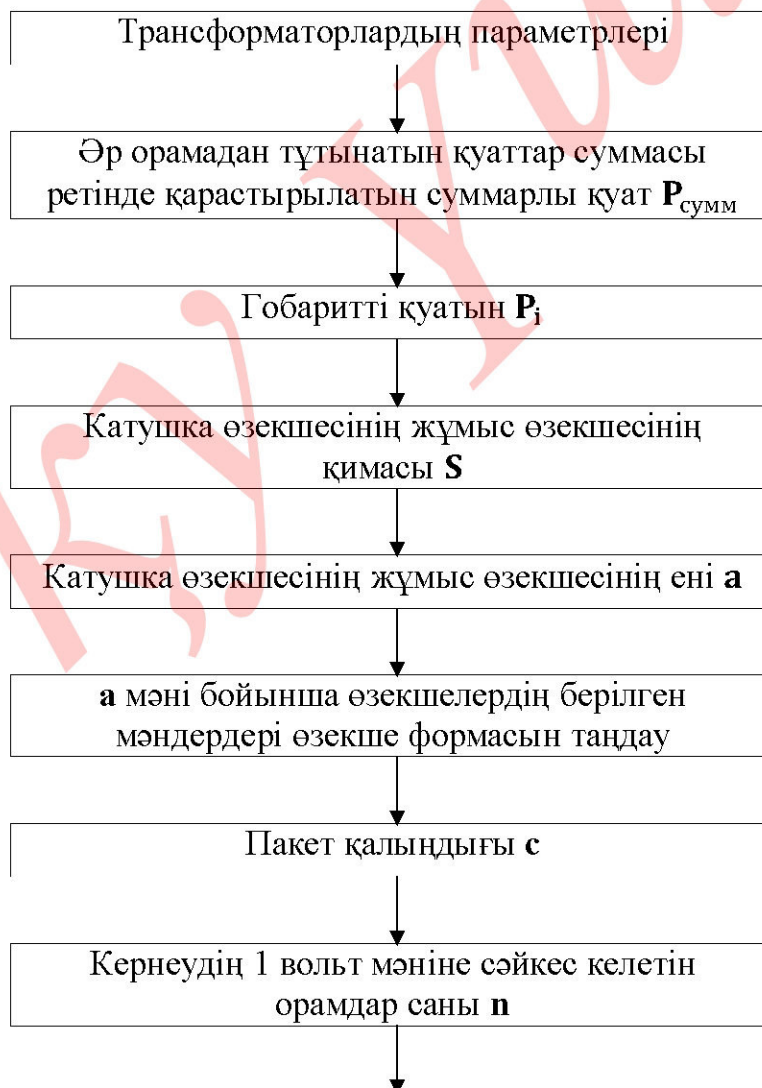


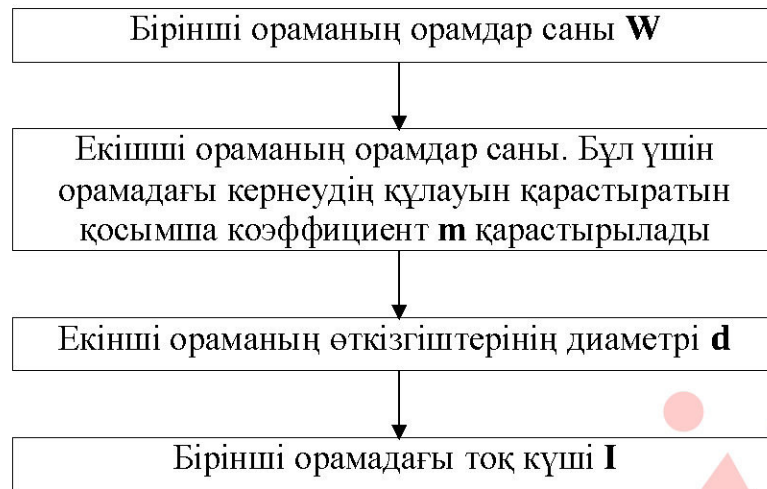
3.2. Күштік трансформаторды есептеу программасы

1. Есептеуге берілген деректер қоры:

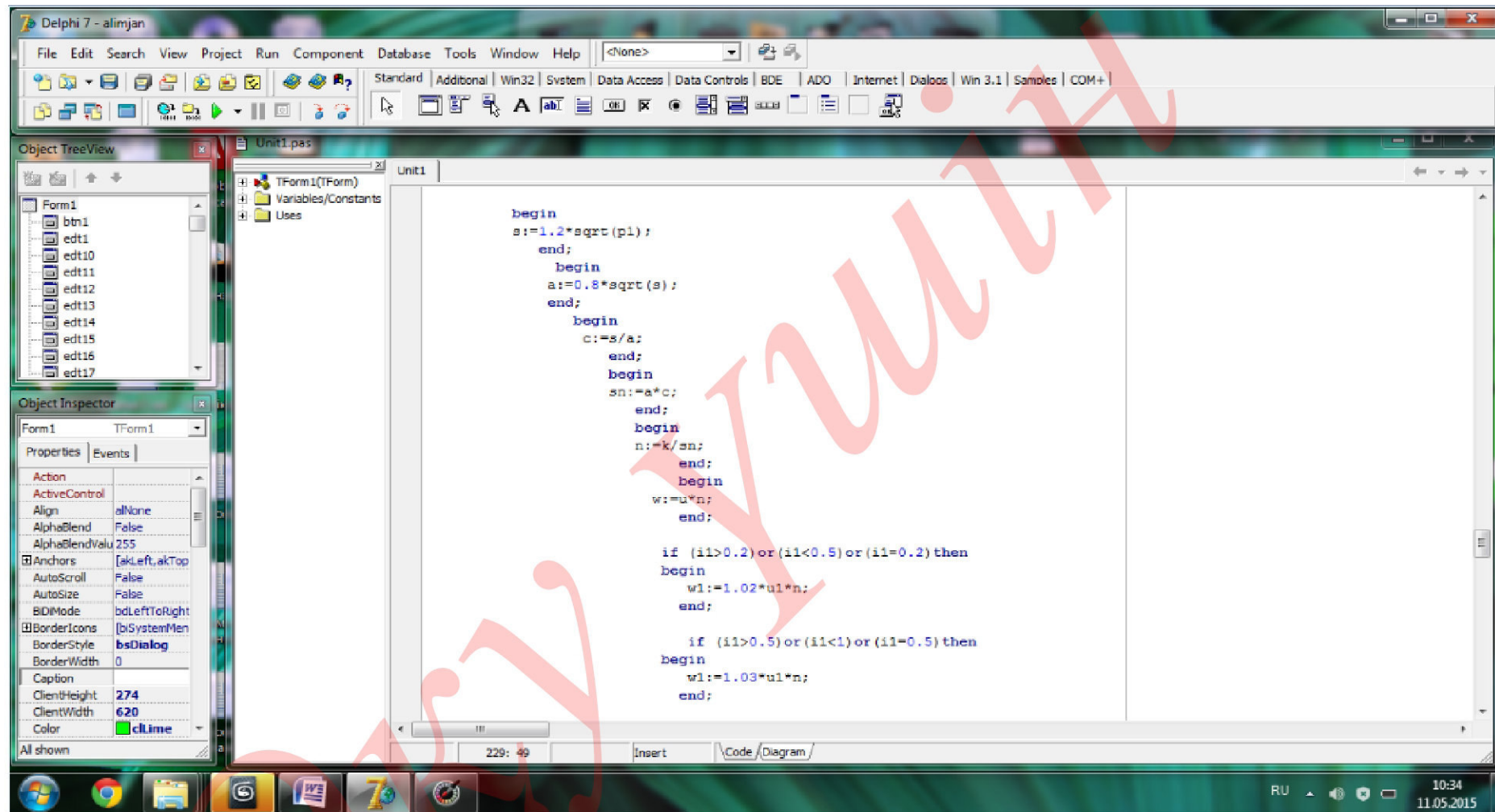
- номиналды қуат P ;
- фазалар саны m ;
- жиілігі $f = 50$ Гц;
- кернеу U ;
- орамаларды жалғау мен жалғау топтамасы;
- қысқа тұйықталу кернеуі u_k ;
- бос жүріс шығындар P_0 ;
- қысқа тұйықталу шығындары P_k ;
- жұмыс режимі – қалыпты;
- суыту тәсілі – термосифонды жасанды циркуляциясымен болатын май;
- монтаждау – сыртқы [18];

Күштік трансформатордың есептелуі бойынша жасалған есептеу программасының блок сұлбасы

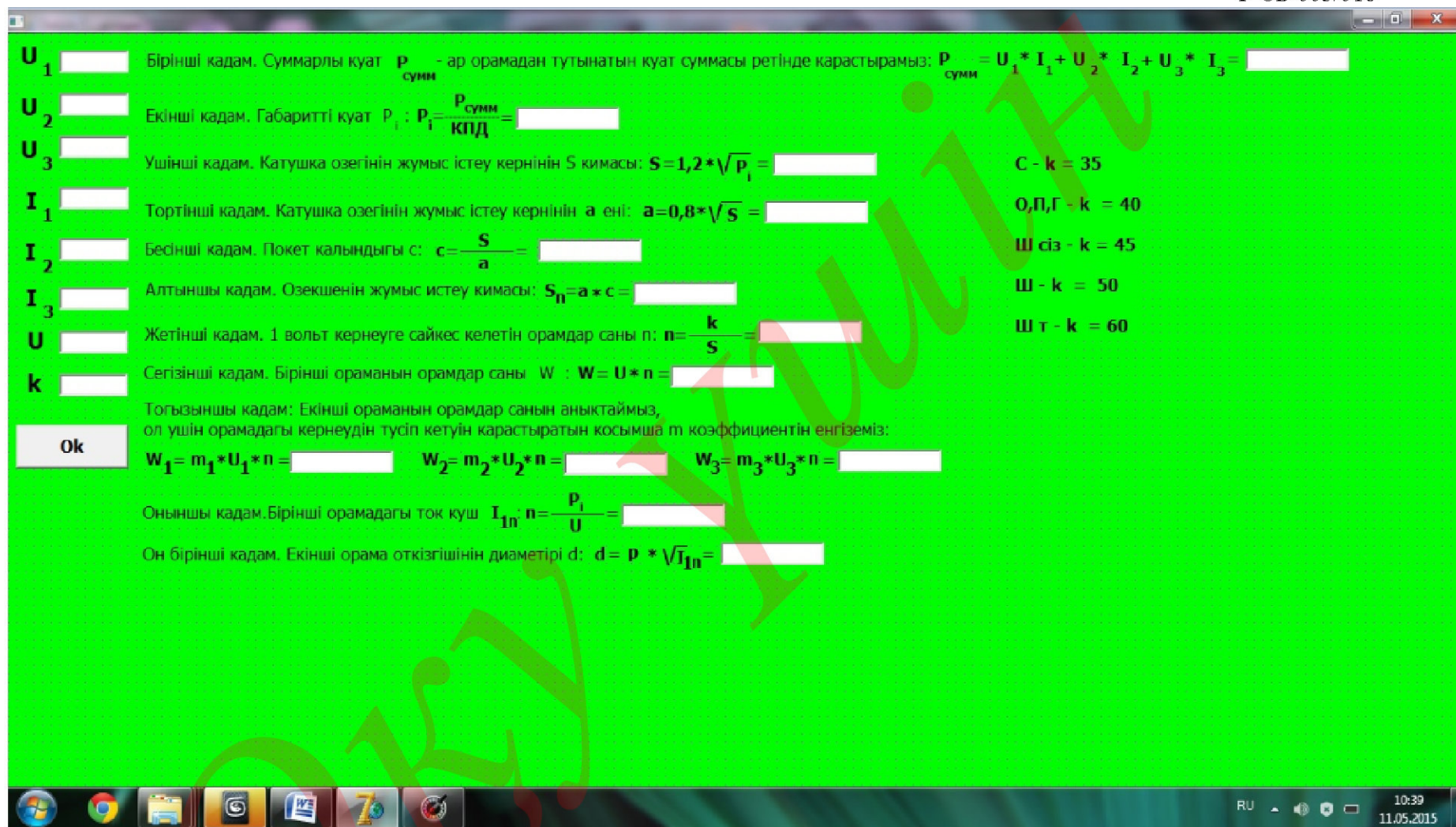




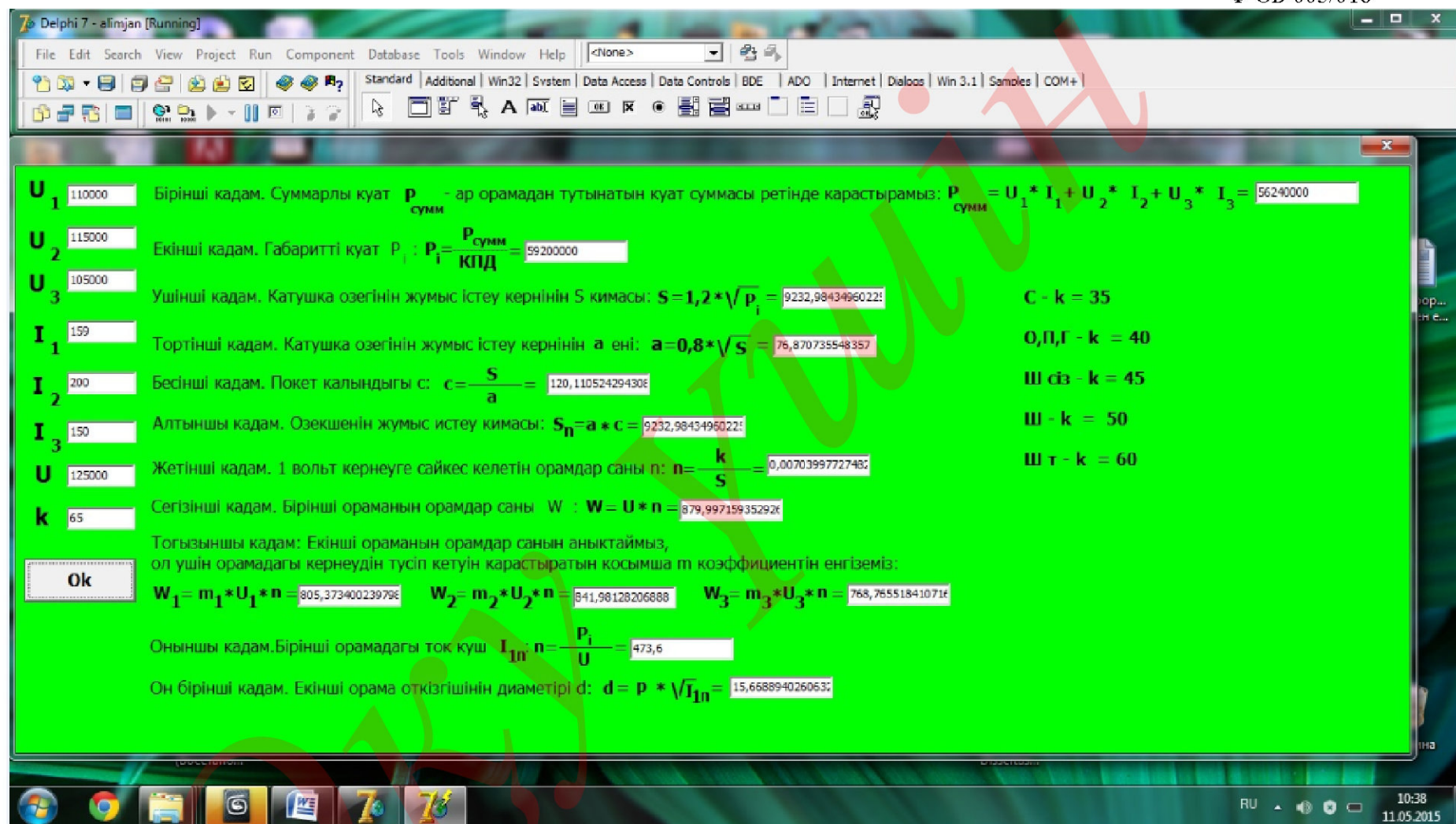
Оқу үлгісін



Сурет 3.2.1. Күштік трансформатордың есептелуі бойынша жасалған алгоритмінің Delphi Borland программалау тілінде алгоритмделуі



Сурет 3.2.2. Алгоритмделген есептерді Delphi Borland программалау тілінің Inter --Face көрінісі



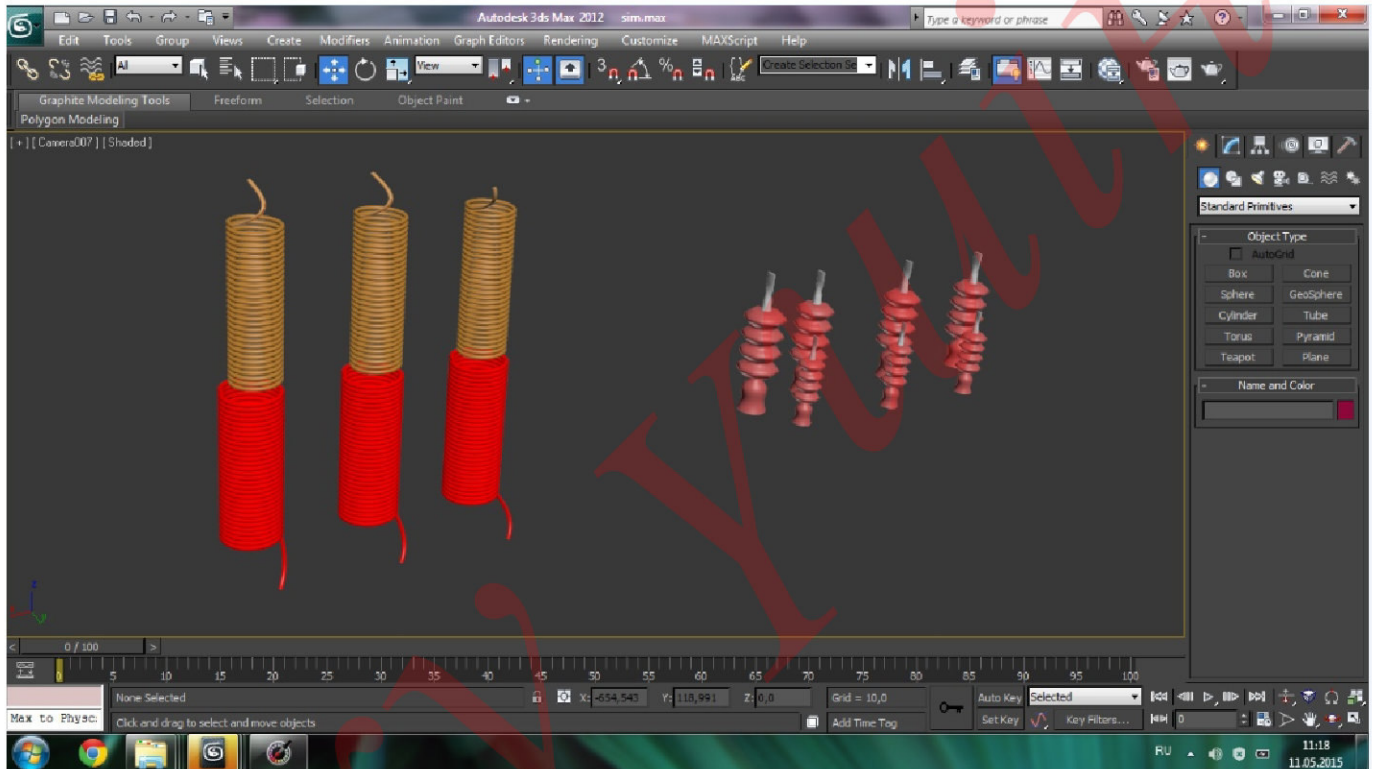
Сурет 3.2.3. Күштік трансформатордың алгоритмделген есептер мәндерін Delphi Borland программалау тілінің Inter – Face енгізіп қортындыларын ал

Трансформаторлардың параметрлерін анықтау

Программаның бірінші қадамы. Әр орамадан тұтынатын қуаттар суммасы ретінде қарастырылатын суммарлы қуатты $P_{\text{сумм}}$ анықтау:

$$P_{\text{сумм}} = U_1 I_1 + U_2 I_2 + \dots + U_n I_n \quad (3.2.1)$$

мұндағы: $U_1 I_1, U_2 I_2$ и т.д. – екінші орамадағы тоқтар мен кернеулердің көбейтіндісі.



Сурет 3.2.4. Күштік трансформатордың кіріс және шығыс сізықтық кернеулерін бактен оқшаулау мақсатында қолданылатын фарфорлы оқшауламалар мен ЖК және ТК орамаларының көрінісі

Программаның екінші қадамы. Гобаритті қуатын P_i анықтау:

$$P_i = \frac{P_{\text{сумм}}}{\text{ПӘК}} \quad (3.2.2)$$

ПӘК 1 кесте арқылы анықтаймыз:

Пайдалы әсер коэффициентін анықтау

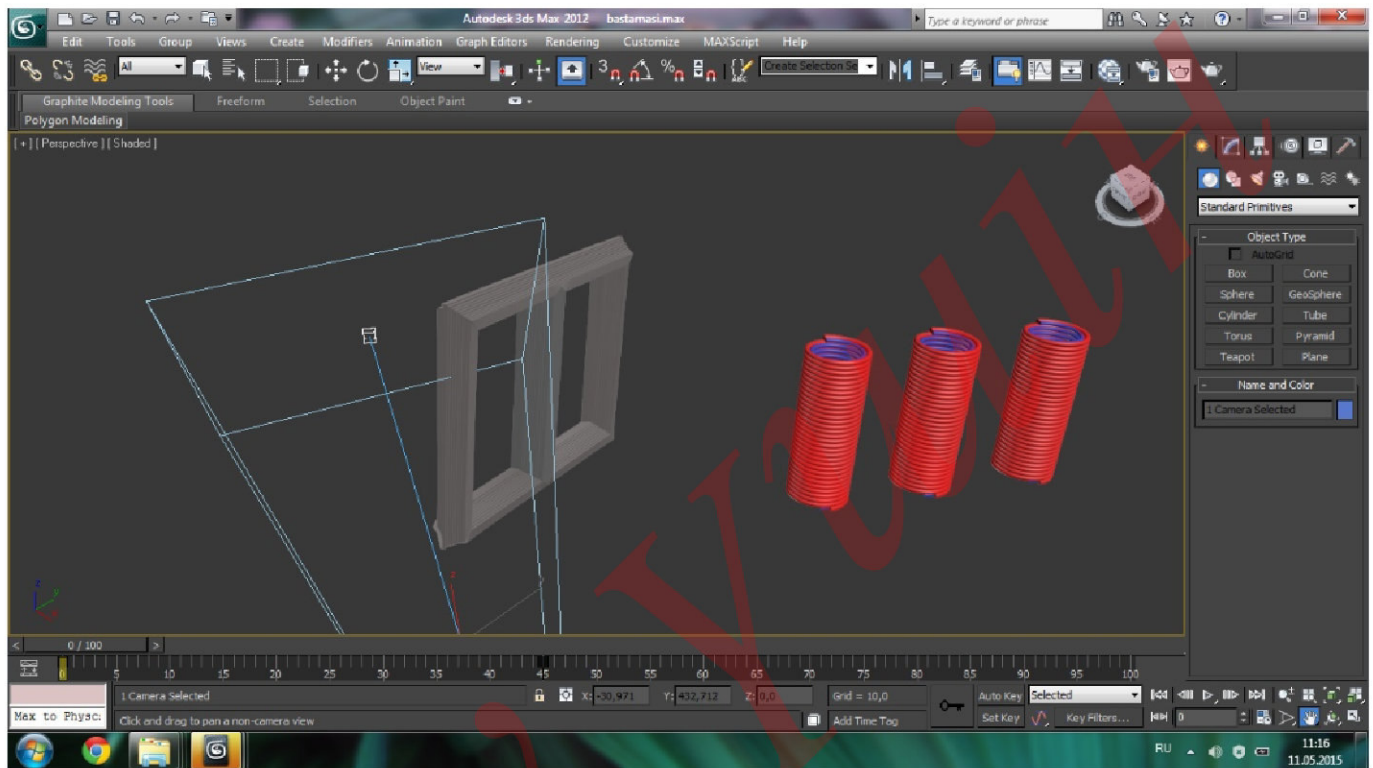
Кесте 3.2.1

Суммарлы қуаты, Вт	10-20	20-40	40-100	100-300
Трансформатордың ПӘК	0,8	0,85	0,88	0,92

Программаның үшінші қадамы. Катушка өзекшесінің жұмыс өзекшесінің қимасын S анықтау:

$$S = 1,2 \cdot \sqrt{P_i} \quad (3.2.4)$$

мұнда қимасы см^2 .



Сурет 3.2.5. Магнит өзекшесінің көрінісі. Сомен қатар магнит өзекшесіне осы 3D Max программасында камера түсіп тұр. Сол камера арқылы оның 3D кеңістігіндегі көрінісін жақсартамыз.

Программаның төртінші қадамы. Катушка өзекшесінің жұмыс өзекшесінің енін a анықтау:

$$a = 0,8 \cdot \sqrt{S} \quad (3.2.4)$$

Программаның бесінші қадамы. Өзекше формасын таңдау. a (см.) табылған мәні бойынша өзекшелердің берілген мәндердері бойынша таңдау

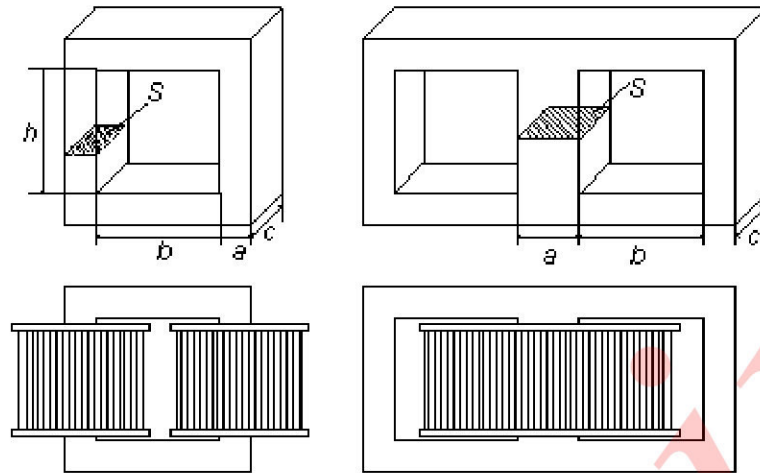
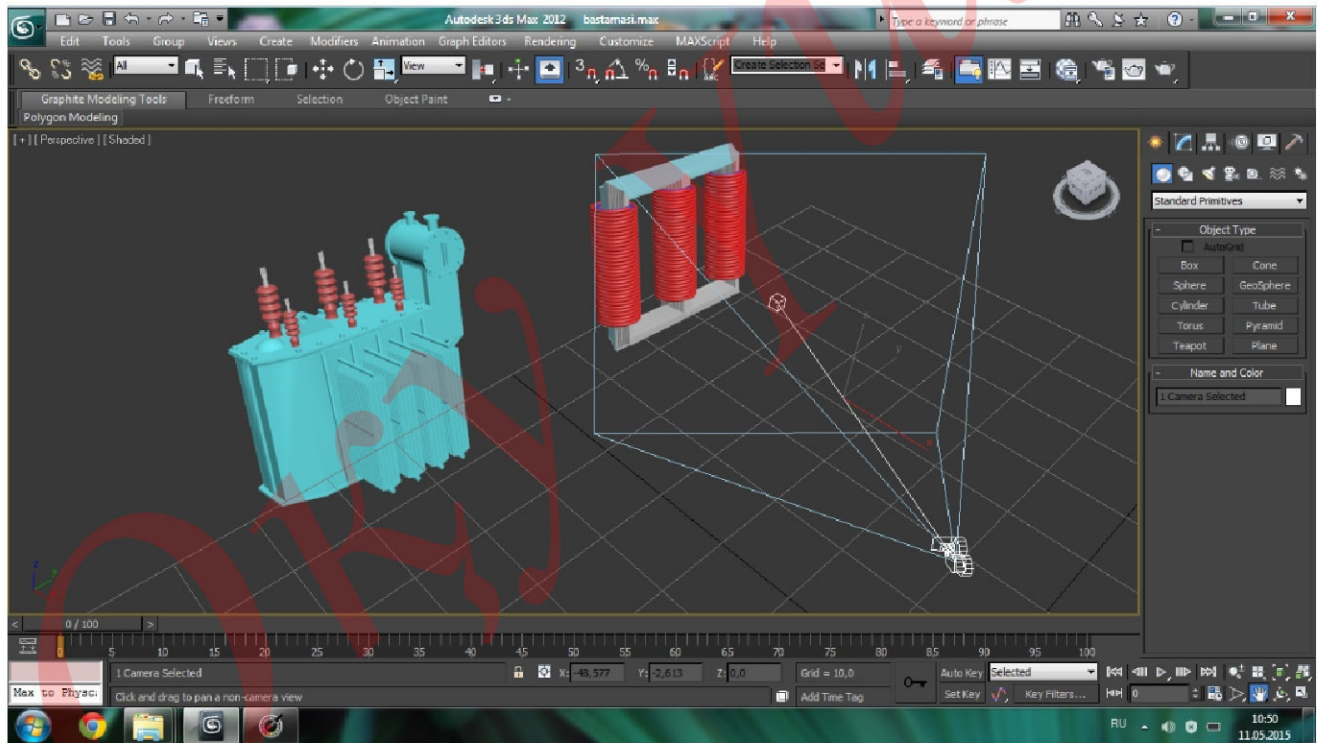


Рис. 1. Трансформатордағы өзекшесі формасының көп тараған түрі мен орамалардың өзекшеде орналасуы



Сурет 3.2.6. Магнит өзекшесінің стержініне ТК және ЖК орамаларының орналасу көрінісі. ТК стержіне жақын ал ЖК ТК – ден соң орнатылады.

Программаның алтынышы қадамы. Пакет қалыңдығын с (см.) анықтау:

$$c = \frac{S}{a} \quad (3.2.5)$$

Программаның жетінші қадамы. Кернеудің 1 вольт мәніне сәйкес келетін орамдар санын орамдар санын n анықтау:

$$n = \frac{k}{S} \quad (3.2.6)$$

Коэффициент k жалпы 35÷60 аралығында жатады. Ол сталь өзекшесінің пластинасы құрамына тәуелді.

0,35 мм қалыңдықтағы сталь үшін:

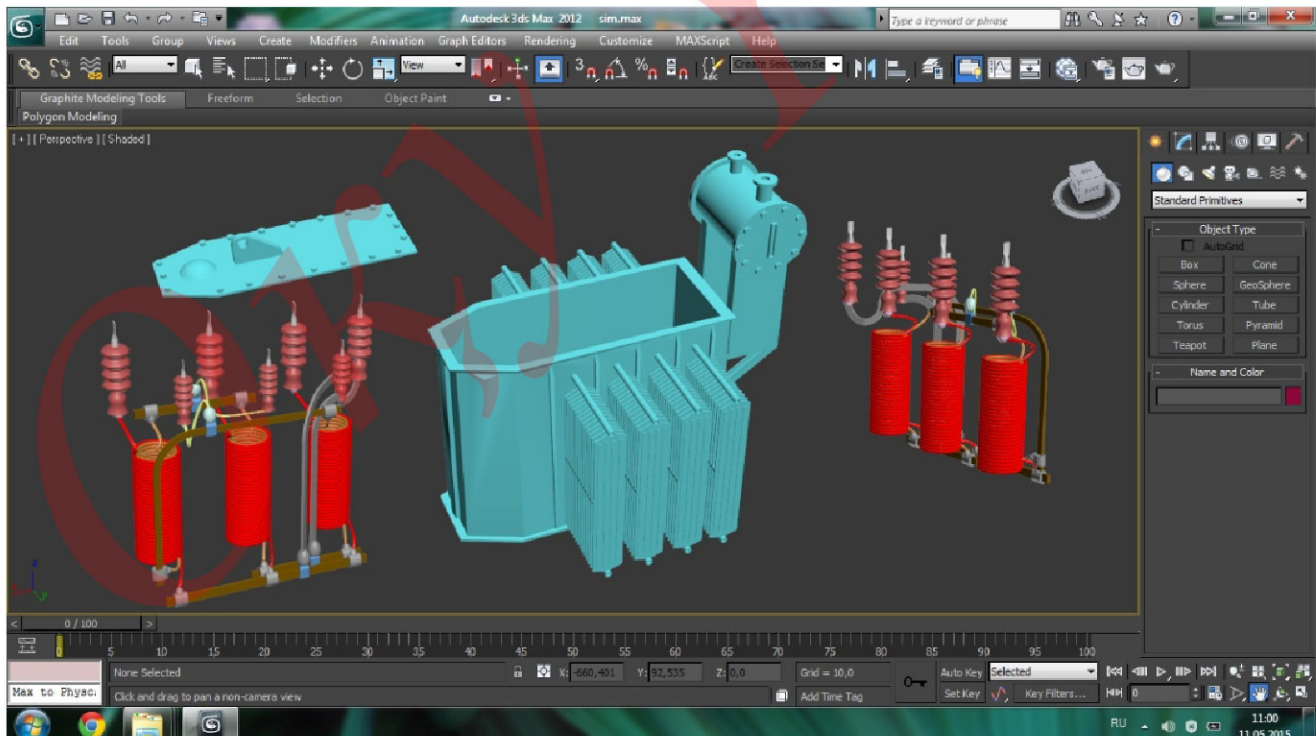
- жіңішке сталдан түзілген С – түріндегі формадағы өзекше $k=35$;
- бұрышы бойынша тесігі жоқ П – или Г– түріндегі пластиналардан жиналған О – түріндегі формадағы өзекшелер үшін $k=40$;
- тесікгі жоқ Ш – түріндегі формадағы пластиналар үшін $k=45$;
- тесігі бар Ш – түріндегі формадағы пластиналар үшін $k=50$;
- тесігі бар Ш – түріндегі формадағы 0,35 мм қалыңдықтағы пластиналар үшін $k=60$;

Коэффициент k өзгертуге болады, бірақ ескеру керек, k кішірейту ораманы жеңілдетеді, бірақ трансформатор жұмысын ауырлатады.

Жоғары қорытпа сталдан жасалған пластинаны қолдану арқылы осы коэффициентті азайтуға болады, ал төменгі қорытпа сталдан жасалған пластинаны қолдану арқылы осы коэффициентті арыттыруға болады

Программаның сегізінші қадамы. Бірінші ораманың орамдар санын W :

$$W = U \cdot n \quad (3.2.7)$$



Сурет 3.2.7. Күштік трансформатор багі көрінісі мен орамаларының жалғану сұлбасының көрінісі.

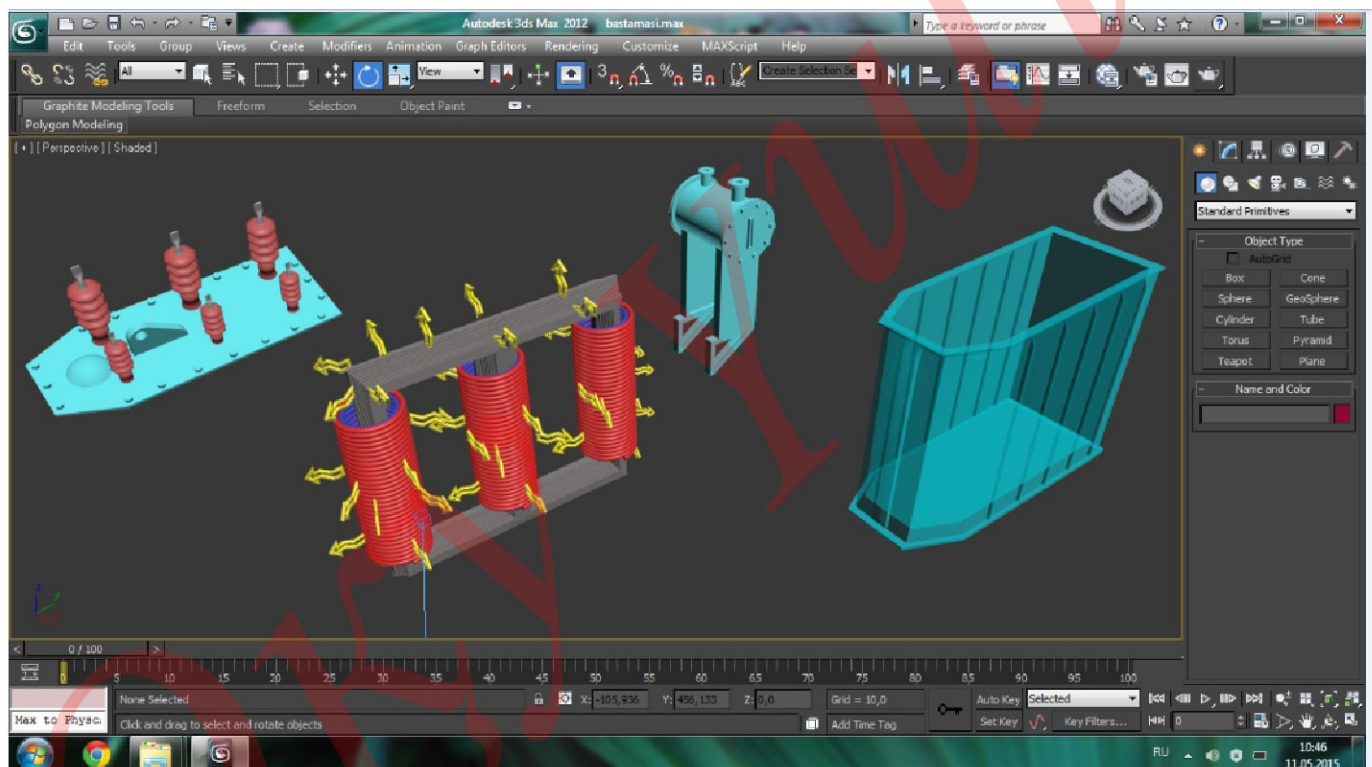
Программаның тоғызыншы қадамы. Екінші ораманың орамдар санын анықтау. Бұл үшін орамадағы кернеудің құлауын қарастыратын қосымша коэффициент m енгіземіз:

$$W = m \cdot U \cdot n \quad (3.2.8)$$

Коэффициент m орама арқылы өтетін тоқ күшіне тәуелілігі

Кесте 3.2.2

Екінші орамасының тоқ күші, А	0,2-0.5	0,5-1.0	1,0-2,0	2,0-4,0
M	1,02	1,03	1,04	1,06



Сурет 3.2.8. Күштік трансформатордың комплектациясы. Күштік трансформатордың жұмыс кезіндегі орамалар мен магнит өзешесінің қызуынан пайда болатын жылу шығынының трансформатор майы арқылы ауаға берілу көрінісі.

Программаның оныншы қадамы. Екінші ораманың өткізгіштерінің диаметрі d анықтау:

$$d = p \cdot \sqrt{I} \quad (3.2.9)$$

мұндағы: d - мыс өткізгішінің диаметрі, мм;

I- орамадағы ток күші, A;
 p- өткізгіштің маркасына байланысты болатын қызу шамасы деңгейін есептейтін коэффициент

Өткізгіштер маркасына тәуелді p коэффициентін анықтау

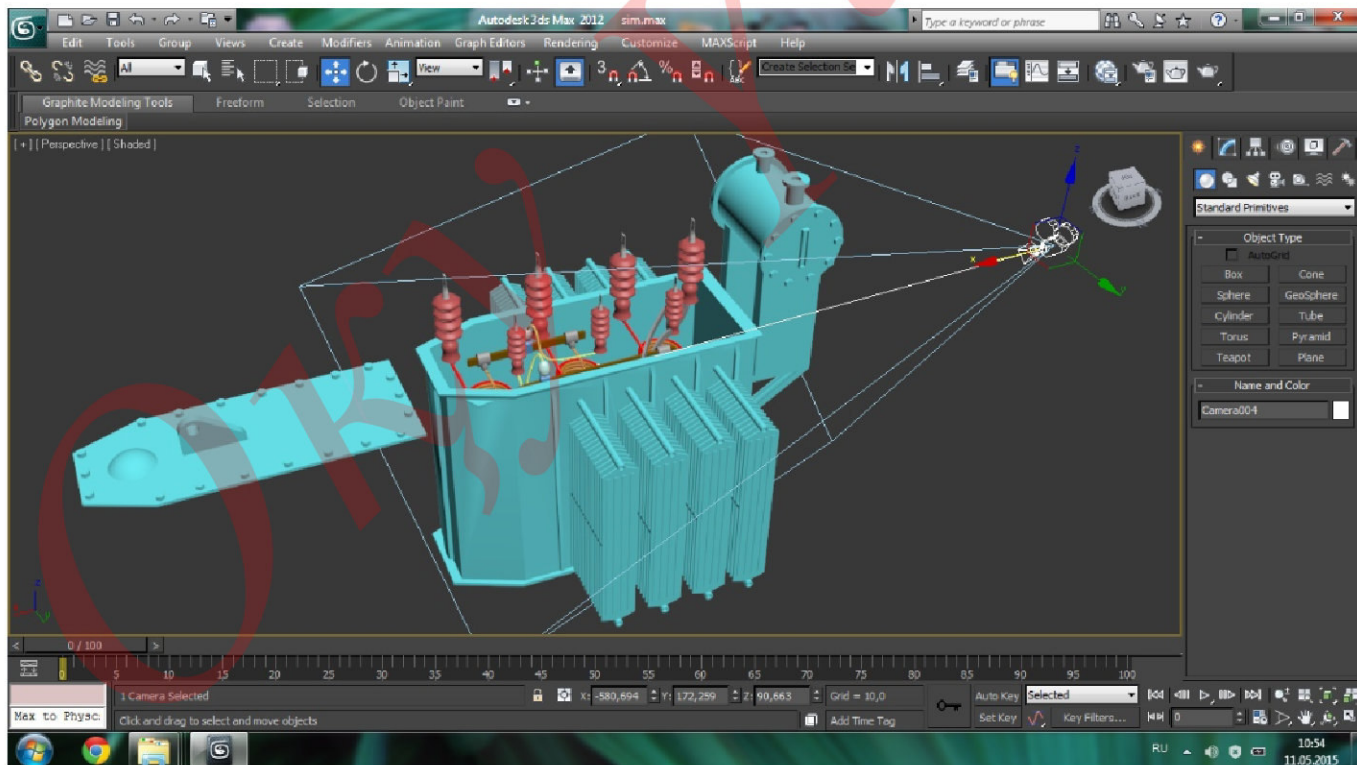
Кесте 3.2.3

Өткізгіш маркасы	ПЭЛ	ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭТ
p	0,8	0,72	0,69	0,65

Программаның он бірінші қадамы. Бірінші орамадағы ток күшін I анықтау:

$$I = \frac{P_i}{U} \quad (3.2.10)$$

Екінші ораманың өткізгіштерінің диаметрін анықтағаннан кейін мыс бойынша стандартты үлкен мәніне жақын өткізгіштер диаметрлері рамыз , ал оқшауламада өткізгіштер диаметрі 4 кестедегі мыс өткізгіштері диаметрінен 10% жоғары.



Сурет 3.2.9. күштік трансформаторының толық жиналғандағы бейнесі.

Екінші орама өткізгіштері үшін келтірілген орамдардың кестесі

Кесте 2.2.4

Орама	Орамдар саны, W	Мыс бойынша өткізгіштердің диаметрі d , мм	Оқшауламасы бойынша өткізгіштің диаметрі, мм
I (бірінші)	1680	0,24	0,25
1	50	0,9	0,99
2	94	0,41	0,45
3	917	0,18	0,2

Қортынды

Трансформатор өндіруші заводтар мен өндіріс орындарында сол жерде өндірілетін күштік трансформаторлар үшін өздерінде қолданылатын есептеулер мен сол есептеулердің программалары қолданылады, себебі сол программалар арқылы уақытын үнемдеу тиімділігіне қол жеткізуге болады. Мұндай есептеулер сол өнеркәсіпте шектеулі ғана мамандардың қолданысында болады және де олардың интеллектті жеке меншігі болып табылады. Сол себептен мұндай программалар сырттағы басқа инженерлердің қолданылысынан шектелген.

Диссертациялық жұмыста өндірісте шығарылатын күштік трансформаторлардың параметрларын есептеу процедурасының алгоритмдері орындалды. Есептеу процедураларының алгоритмі жалпы қолданысқа ортақ болатындай етіліп компьютерлік программада программаланды және де сол алгоритмдерді дизайнерлік программада жасалып, анимация түрінде көрсетілді.

Күштік трансформаторлардың есеп процедуралары компьютерлік программа – Borland Delphi программалау тілінде орындалып, бейне түрде конструкциялары реттілікпен анимациясы бойынша 3D Max дизайнерлеу программасында жасалды.

Бір жағынан бұл жасалған программалар арқылы трансформаторлар үшін жалпы мамандар қолданысына ортақ есептеулерге қол жеткіземіз, ал екінші жағынан осы есептеулерді түсіндірме оқулық құралы ретінде де қолдана аламыз.

Пайдаланылган әдебиеттер тізімі

1. Бондаренко С. В. Бондаренко М. Ю. Программирование на языке Delphi в MVS. 2010.
2. Попов Д.А., Руднев В.Н. Электрические машины. – Задание на курсовой проект. – Изд-во ВЗИИТа. – М. 1987. – 2, 5 п.л.
3. Китаев В. Е. Трансформаторы. Изд. 5-е перераб. Учеб. Пособие для профессионально-технических учебных заведений и подготовки рабочих на производстве. М., «Высшая школа», 1992. – 208 с. с илл.
4. Минскер Е. Г., Аншин В. Ш. Сборка трансформаторов. Учебник для сред. проф.-техн. училищ. Изд. 4-е, переработ. и доп. М., «Высш. школа», 1996. – 215 с. с илл.
5. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов [Текст] : уч. пособие для вузов / Павел Михайлович Тихомиров. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 528 с. : ил. – Библиогр.: с. 518. – Предм. указ.: с. 519-524. – 40000 экз.
6. Брятова, Л. И. Методические указания к расчету на ЭВМ основных размеров силового мощного трансформатора по дисциплине “Электрические машины и электропривод” для студентов спец. 101800 [Текст] / Лариса Игнатьевна Брятова. – Самара : СамИИТ, 2002. – 20 с. : ил. – Библиогр.: с. 19. – 300 экз.
7. Сечин В.И. Проектирование силовых трансформаторов: учеб. пособие — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2005 г.
8. Гончарук А.И. Расчет и конструирование трансформаторов: Учеб. для техникумов. - М. - Энергоатомиздат, 1990 г.
9. А.В. Сапожников. Конструирование трансформаторов — издание второе, перераб. М.: Государственное энергетическое издание 1989г.
10. Standard Handbook for Electrical Engineers (8th ed.). McGraw-Hill. p. 597, Fig. 6-42.
11. "The Ideal Transformer". IRE Transactions on Circuit Theory 5 (2): 145–145. doi:10.1109/TCT.1958.1086447.
12. Hameyer, Kay (2001). "§2.1.2 'Second Maxwell-Equation (Faraday's Law)' in Section 2 - Basics". Electrical Machines I: Basics, Design, Function, Operation. RWTH Aachen University Institute of Electrical Machines. pp. 11–12, eq. 2–12 to 2–15.
13. Dig SILENT GmbH. Short-Circuit Method IEC 61363. October 2009.
14. Current Transformer Saturation Detection Using Gaussian Mixture Models
15. M. Moghimi Haji, B. Vahidi, S. H. Hosseinian, Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology.
16. Transformers – The Basics. Martin Grech, Geoff Severt, Copyright 2001
17. Leslie Lamport " Predicate Transformers for Concurrency".
18. ACM Transactions on Programming Languages and Systems 2009
19. Heathcote, Martin (Nov 3, 1998). J & P Transformer Book (12th ed.). Newnes. pp. 2–3. ISBN 0-7506-1158-8.

20. Power Transformer Principles and Applications. CRC. pp. 20–21.
21. Hameyer, Kay (2001). "§3.2 'Definition of Transformer Ratio' in Section 3 - Transformers". *Electrical Machines I: Basics, Design, Function, Operation*. RWTH Aachen University Institute of Electrical Machines. p. 27.
22. Knowlton, §6-13, p. 552
23. Miller, Wilhelm C.; Robbins, Allan H. (2013). *Circuit analysis : theory and practice* (5th ed.). Clifton Park, NY: Cengage Learning. p. 990. ISBN 978-1-1332-8100-9. Retrieved 25 September 2014.
24. Tcheslavski, Gleb V. (2008). "Slide 13 Impedance Transformation in Lecture 4: Transformers". *ELEN 3441 Fundamentals of Power Engineering*. Lamar University (TSU system member).
25. M. R.; Ula, S.; Webb, W. E. (2005). "§2.5.5 'Transformers' & §10.1.3 'The Ideal Transformer'". In Whitaker, Jerry C. *The Electronics Handbook* (2nd ed.). Taylor & Francis. pp. 172, 1017. ISBN 0-8493-1889-0.
26. ANSI/IEEE C57.13, ANS Requirements for Instrument Transformers. New York, N.Y.: IEEE. 1978 (superseded, 1993). p. 4 (§3.26). ISBN 0-7381-4299-9. Check date values in: |date= (help)
27. "Connections - Polarity" (PDF). Retrieved 13 April 2013.
28. Say, M. G. (1984). *Alternating Current Machines* (5th ed.). Halsted Press. ISBN 0-470-27451-4.
29. McLaren, P. G. (1984). *Elementary Electric Power and Machines*. pp. 68–74. ISBN 0-13-257601-5.
30. Terman, Frederick E. (1955). *Electronic and Radio Engineering* (4th ed.). New York: McGraw-Hill. p. 15.
31. Daniels, A. R. *Introduction to Electrical Machines*. pp. 47–49.
32. IEC Std 60404-2 Magnetic Materials – Part 2: Methods of Measurement of the Magnetic Properties . . .
33. Gururaj, B.I. (June 1963). "Natural Frequencies of 3-Phase Transformer Windings". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 82 (66): 318–329. doi:10.1109/TPAS.1963.291359.
34. EE-Reviewonline.com. "Steinmetz's Formula for Magnetic Hysteresis". Retrieved 7 February 2013.
35. "Understanding Transformer Noise" (PDF). FP. Retrieved 30 January 2013.
36. Pansini, Anthony J. (1999). *Electrical Transformers and Power Equipment*. Fairmont Press. p. 23. ISBN 0-88173-311-3.
37. Del Vecchio, Robert M. et al. (2002). *Transformer Design Principles: With Applications to Core-Form Power Transformers*. Boca Raton: CRC Press. pp. 10–11, Fig. 1.8. ISBN 90-5699-703-3.
38. *Engineering and Design – Hydroelectric Power Plants Electrical Design*. U.S. Army Corps of Engineers. p. 4-1.
39. Allan, D.J. (Jan 1991). "Power Transformers – The Second Century". *Power Engineering Journal* 5 (1): 5–14. doi:10.1049/pe:19910004.

40. Kulkarni, S. V.; Khaparde, S. A. (May 24, 2004). Transformer Engineering: Design and Practice. CRC. pp. 36–37. ISBN 0-8247-5653-3.
41. Hasegawa, Ryusuke (June 2, 2000). "Present Status of Amorphous Soft Magnetic Alloys". Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 215-216: 240–245. doi:10.1016/S0304-8853(00)00126-8.
42. Lee, Reuben. "Air-Core Transformers". Electronic Transformers and Circuits. Retrieved May 22, 2007.
43. Dixon, L.H., Jr. (1997). "Eddy Current Losses in Transformer Windings" (PDF). Texas Instrument. pp. R2–1–to–R2–10.
44. Central Electricity Generating Board (1982). Modern Power Station Practice. Pergamon Press.
45. Dixon, Lloyd (2001). "Power Transformer Design" (PDF). Magnetics Design Handbook. Texas Instruments.