

Міністерство освіти і науки України  
Центральноукраїнський національний технічний університет

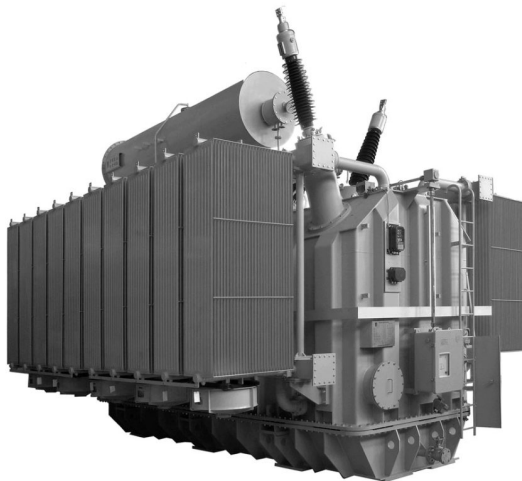
Факультет  
автоматики, енергетики

Кафедра  
електротехнічних систем та  
енергетичного менеджменту

# ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ. ТРАНСФОРМАТОРИ

методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт  
для здобувачів вищої освіти  
першого (бакалаврського) рівня

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка



Кропивницький  
2022

Міністерство освіти і науки України  
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет  
автоматики, енергетики

Кафедра  
електротехнічних систем та  
енергетичного менеджменту

# **ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ. ТРАНСФОРМАТОРИ**

**методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт  
для здобувачів вищої освіти першого  
(бакалаврського) рівня**

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Затверджено  
на засіданні кафедри  
електротехнічних систем та  
енергетичного менеджменту  
Протокол №14 від 6.06.2022 р.

Кропивницький  
2022

Електричні машини. Трансформатори: метод. рекоменд. до виконання лаб. роб. з навч. дисц. «Електричні машини» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / [уклад. : Н. Ю. Гарасьова, О. А. Козловський, В. П. Солдатенко] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2022. – 98 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. Н. Ю. Гарасьова,  
канд. техн. наук, доц. О. А. Козловський,  
канд. техн. наук, доц. В. П. Солдатенко.

Рецензент: докт. техн. наук, проф. С.І. Осадчий

© Н.Ю. Гарасьова, О.А. Козловський,  
В.П. Солдатенко, 2022  
© Центральноукраїнський національний  
технічний університет, 2022

# ЗМІСТ

	стор.
<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ У ЛАБОРАТОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН</b> .....	5
1. Підготовка до виконання лабораторних робіт .....	5
2. Порядок виконання лабораторної роботи .....	5
3. Вимоги до оформлення звіту .....	7
4. Правила техніки безпеки в лабораторії електромашин.....	8
<b>ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ</b> .....	<b>11</b>
<b>Робота №1.</b> Конструктивне виконання силових трифазних трансформаторів .....	11
<b>Робота №2.</b> Випробування однофазного трансформатора .....	39
<b>Робота №3.</b> Дослідження трифазного двохобмоткового трансформатора .....	53
<b>Робота №4.</b> Паралельна робота трифазних трансформаторів.....	69
<b>Робота №5.</b> Маркування обмоток і визначення групи з'єднань трифазних трансформаторів .....	79
<b>РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ</b> .....	98

## ВСТУП

Дані методичні рекомендації є першою частиною загальних методичних рекомендацій до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Електричні машини». Характер та об'єм робіт відповідає робочій програмі навчальної дисципліни «Електричні машини» спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Метою вивчення розділу «Трансформатори» є набуття майбутніми бакалаврами з електроенергетики, електротехніки та електромеханіки теоретичних і практичних знань у сфері перетворення електричної енергії. Після вивчення розділу «Трансформатори» студенти повинні знати принцип дії трансформаторів, їх будову, основні характеристики, фізичні явища, які відбуваються в різних режимах роботи, а також вміти аналізувати й описувати стаціонарні та перехідні процеси в них.

Теоретичною базою для вивчення розділу «Трансформатори» є вища математика, фізика, теоретичні основи електротехніки та основи метрології та електричних вимірювань. При вивченні будови й режимів роботи трансформаторів необхідні також знання з комп'ютерної графіки, електротехнічних матеріалів, прикладної механіки та промислової електроніки. У свою чергу, знання електричних машин є базою для вивчення спеціальних дисциплін з енергетики та електромеханіки.

Трансформатори є необхідними елементами енергосистеми змінного струму. Вони дозволяють передавати електричну енергію на значні відстані, забезпечують її розподіл між крупними і найдрібнішими приймачами. Завдяки застосуванню трансформаторів полегшується виробництво електричних машин змінного струму, які не можуть працювати при дуже високій напрузі, а також електричної апаратури й приймачів електричної енергії. Лише завдяки трансформаторам змінний струм набув найширшого застосування в промисловості, відсунувши постійний струм на друге місце.

# **ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ У ЛАБОРАТОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН**

## **1. Підготовка до виконання лабораторних робіт**

1. Отримати у викладача завдання до виконання лабораторної роботи.
2. Ознайомитися з теоретичними відомостями за темою лабораторної роботи за матеріалами методичних вказівок, чітко усвідомити мету проведення роботи й кінцеві результати, які повинні бути отримані в результаті її виконання.
3. Вивчити лекційний матеріал і необхідні розділи рекомендованої літератури за темою лабораторної роботи.
4. Вивчити методику експериментальних досліджень і порядок виконання роботи згідно методичних вказівок (розділ #.3).
5. Підготуватись до захисту роботи згідно контрольних запитань.
6. Підготувати бланк звіту (титульний лист, короткі теоретичні відомості, схеми, таблиці і т. ін.).
7. При необхідності проконсультуватись у викладача.
8. З'явитися на лабораторне заняття з методичними вказівками до виконання лабораторних робіт, з підготовленим бланком звіту, мікрокалькулятором або персональним комп'ютером типу Notebook, а також канцелярським приладдям.

## **2. Порядок виконання лабораторної роботи**

1. До лабораторної роботи допускаються студенти, які пройшли вступний інструктаж з техніки безпеки в лабораторії електричних машин та інструктаж до роботи, що має бути виконана за планом.
2. Студенти, що не підготувались до роботи (не підготовлено звіт, не опрацьовано теоретичний матеріал, відсутні канцелярські приладдя) або мають заборгованості з попередньої роботи до виконання наступної лабораторної роботи не допускаються.

3. Для виконання лабораторних робіт формуються бригади зі студентів у складі 3-5 чоловік. Така кількість студентів визначається необхідністю одночасного зняття великої кількості показів вимірювальних приладів і регулюванням декількох параметрів досліджуваного об'єкта. У процесі роботи кожний учасник бригади виконує певні обов'язки. У наступних роботах обов'язки студентів у бригаді змінюються таким чином, щоб всі студенти набували навичок з різних видів робіт лабораторного дослідження.

До кожної роботи кожному студентові видаються додаткові індивідуальні завдання.

4. Виконання роботи можна починати лише після допуску викладачем та проведення інструктажу з даної роботи.

5. Лабораторні роботи виконуються у відповідності до «Порядку виконання роботи», який наводиться у методичних вказівках до кожної роботи окремо (розділ №3). Результати вимірювань заносять до таблиць звіту. Зміни в Порядку допускаються лише з дозволу викладача.

6. Збирання схеми й будь-які зміни в ній дозволяється робити лише при знеструмленому лабораторному стенді. Зібрану схему перед вмиканням перевіряє викладач.

7. По закінченні роботи після перевірки отриманих результатів за вказівкою викладача, схему розбирають і робоче місце приводять у порядок.

8. Лабораторна робота завершується необхідними розрахунками, графічними побудовами й кінцевим оформлення звіту, а також його захистом.

9. Лабораторна робота зараховується, якщо звіт повністю відповідає вимогам розділу 4 методичних вказівок; всі схеми, таблиці, графіки й розрахунки виконані вірно й акуратно; якщо студент відповів на контрольні запитання викладача, показавши знання будови й принципу роботи об'єкту досліджень, розуміння фізичних процесів, що пояснюють отримані у даній роботі результати. Крім того, студент повинен знати методику експериментальних досліджень даної електричної машини або трансформатора, тобто пояснити порядок дій при виконанні будь-якого експерименту у лабораторній роботі. Захист лабораторної роботи оцінюється за п'ятибальною системою.

### 3. Вимоги до оформлення звіту

1. Кожен студент виконує та захищає звіт самостійно у визначений навчальним планом термін.

2. Звіт оформлюється від руки або на персональному комп'ютері на аркушах формату А4 із основним надписом згідно ДСТУ ГОСТ 2.104:2006 на одній стороні, з дотриманням наскрізної нумерації листів, таблиць, рисунків.

3. Зміст звіту визначається розділом #.4 методичних вказівок до кожної лабораторної роботи. Зазвичай, він містить наступні складові: титульний аркуш, короткі теоретичні відомості за матеріалами методичних вказівок, принципову електричну схему лабораторної установки, результати вимірювань, результати розрахунків, графіки і векторні діаграми за результатами вимірювань та розрахунків, критичну оцінку отриманих результатів, а також висновки за роботою.

4. Графіки й схеми слід креслити олівцем на стандартних аркушах міліметровки (або вклейках) з позначенням і розміткою осей, нанесенням величин експериментальних або розрахункових точок (хрестиками або точками потрійної товщини). Також можливо виконувати графічні побудови на чистих аркушах паперу з нанесенням на них координатних сіток.

Ескізи, графіки, рисунки повинні мати підписуночі надписи.

5. Всі розрахунки слід супроводжувати формулами з літерними позначенням і розшифровкою величин, що входять до них, а також одиниць вимірювання відповідно до СІ.

6. При виконанні звітів на персональному комп'ютері, необхідно:

- текст звіту та формули набирати шрифтом Times New Roman розміром 14 pt; рисунки, схеми виконувати у графічному редакторі;
- графіки виконувати у спеціалізованих програмних середовищах (MathCad, MatLab та ін.) з дотриманням вимог п. 4.

7. Категорично забороняється виконувати звіти у вигляді «ксерокопій» лабораторної роботи з методичних вказівок. Якщо роздруківки звітів співпадають у декількох студентів, то звіт приймається до захисту лише у першого, всім іншим студентам, що представили копії, видається нове індивідуальне завдання, а звіти вилучаються та анулюються незалежно від об'єму виконаної роботи.

#### 4. Правила техніки безпеки в лабораторії електромашин

Лабораторні роботи з дослідження трансформаторів та електричних машин повинні виконуватися з суворим дотриманням правил техніки безпеки.

Лабораторні стенди в лабораторії електричних машин є діючими електроустановками, окремі елементи яких знаходяться під високою напругою – **220, 380 В**. Тому за певних умов, що виникають із-за порушення встановлених правил, лабораторні стенди можуть стати джерелом враження людини електричним струмом та інших видів травматизму.

Тіло людини володіє електропровідністю, а тому при доторканні до двох неізолюваних елементів установки, що знаходяться під напругою (одним з цих елементів може виявитися корпус електричної машини або трансформатора), через тіло людини проходить електричний струм. Досягнувши небезпечних значень (більше **0,03 А**), цей струм приводить або до сильних опіків (електрична травма), або до важких поразок нервової, серцевої та дихальної систем організму людини (електричний удар). Наслідки ураження електричним струмом бувають важкими і можуть привести до летального результату.

Специфіка досліджень електричних машин і трансформаторів студентами полягає в тому, що при недотриманні правил техніки безпеки студент наражається на небезпеку ураження електричним струмом. Необхідно пам'ятати, що багато елементів лабораторної установки, що знаходяться під напругою, доступні для дотику. Тому необхідно у лабораторії дотримуватися виняткової обережності і правил *техніки безпеки*:

1) студент знаходячись в лабораторії електричних машин, повинен бути гранично дисциплінованим і уважним; беззаперечно виконувати вказівки викладача; знаходитися безпосередньо біля досліджуваної лабораторної установки; на робочому місці не припустимо вживати їжу і напої, ставити посуд із рідинами або продуктами харчування;

2) забороняється: підходити до інших установок, розподільних щитів і пультів і робити на них будь-які вмикання або перемикання; вмикати схему, якщо хто-небудь торкається її неізолюваних струмоведучих частини; проводити будь-які комутації в схемі, що знаходиться під напругою; залишати без нагляду лабораторну установку або окремі прилади під напругою;

3) збирати схеми дослідів дозволяється лише на відключеному від електричної мережі лабораторному стенді;

4) вмикати лабораторний стенд дозволяється лише після перевірки змонтованої схеми викладачем, і у його присутності; всі операції комутації необхідно дублювати голосом, наприклад: «**вмикаю**», «**вимикаю**», «**додаю навантаження**» і т. п.;

5) при переміщеннях повзунів і рукояток пускорегулюючої апаратури необхідно стежити за тим, щоб рука торкалася лише до їх ізольованих частин; необхідно стежити, щоб швидкість обертання випробовуваних агрегатів не перевищувала номінальну, допускаючи перевищення її лише з дозволу викладача та до зазначених меж;

6) необхідно дотримуватися обережності при роботі з електричними машинами і не доторкатися до частин, що обертаються у тому числі й поверхні валів; одяг студента не повинен мати вільно звисаючих кінців шарфів, косинок, краваток і т. п. для виключення можливості затягування;

7) під час роботи з лабораторною установкою, що знаходиться під напругою, студенти повинні стояти на гумових ізоляційних килимках;

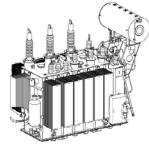
8) після закінчення лабораторної роботи, необхідно перевірити відключення від живлячої мережі лабораторного стенду, вивести регулятор автотрансформатора в нульове положення;

9) категорично забороняється студентам самостійно ремонтувати лабораторні стенди в разів виходу їх з ладу, про всі помічені несправності у роботі обладнання студент повинен негайно доповісти викладачу;

10) якщо відбулося ураження електричним струмом, лабораторний стенд необхідно терміново відключити від мережі, надати потерпілому першу допомогу і повідомити про це викладачу.

Інструктаж з техніки безпеки проводиться на початку кожного семестру із обов'язковою фіксацією в журналі реєстрації інструктажів лабораторії електричних машин, де кожний студент ставить поточну дату та свій підпис.





## КОНСТРУКТИВНЕ ВИКОНАННЯ СИЛОВИХ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

**Мета:** вивчити конструкцію силових трифазних трансформаторів.

### 1.1 Теоретичні відомості

*Силовий трансформатор* – це статичний пристрій, що має дві чи більше обмоток, призначений для перетворювання через електромагнітну індукцію однієї чи декількох систем змінної напруги (струму) в одну чи декілька систем змінної напруги (струму), як правило, з іншими значеннями за тієї самої частоти, з метою пересилання електричної потужності [7].

Головними конструктивними елементами силового трансформатора є: магнітопровід, обмотки, система регулювання напруги, вводи, бак (рис. 1.1).

Магнітна система трансформатора (магнітопровід) є його конструктивною основою та служить для локалізації в ній основного (робочого) магнітного поля.

Магнітопроводи трансформаторів виготовляються із електротехнічної сталі з підвищеним (до 5%) вмістом кремнію. Це приводить до збільшення магнітної проникності сталі її питомого електричного опору, зниження втрат на гістерезис, від вихрових струмів. Крім того, кремній послаблює старіння сталі, зменшує її магнітострикцію і, отже, шум трансформаторів. Однак, наявність кремнію в сталі приводить до підвищення її крихкості та ускладнює її механічну обробку.

Магнітні властивості електротехнічної сталі залежать від напрямку, у якому здійснюється намагнічування листів. Це пов'язано з тим, що кристалічні решітки сталі являють собою об'ємно центрований куб з трьома типами кристалографічних напрямків (рис. 1.2). Якщо у кристалі напрямок вздовж ребра куба збігається з напрямком прокатки сталі то це напрямок легкого намагнічування I, якщо з напрямком вздовж діагоналі грані – то це напрямок середнього намагнічування II, а якщо з напрямком вздовж просторової діагоналі – це напрямок важкого намагнічування III.

Таким чином, для одержання того самого значення індукції за напрямках легкого, середнього і важкого намагнічування необхідно прикласти відповідно слабке, середнє і сильне магнітне поле.

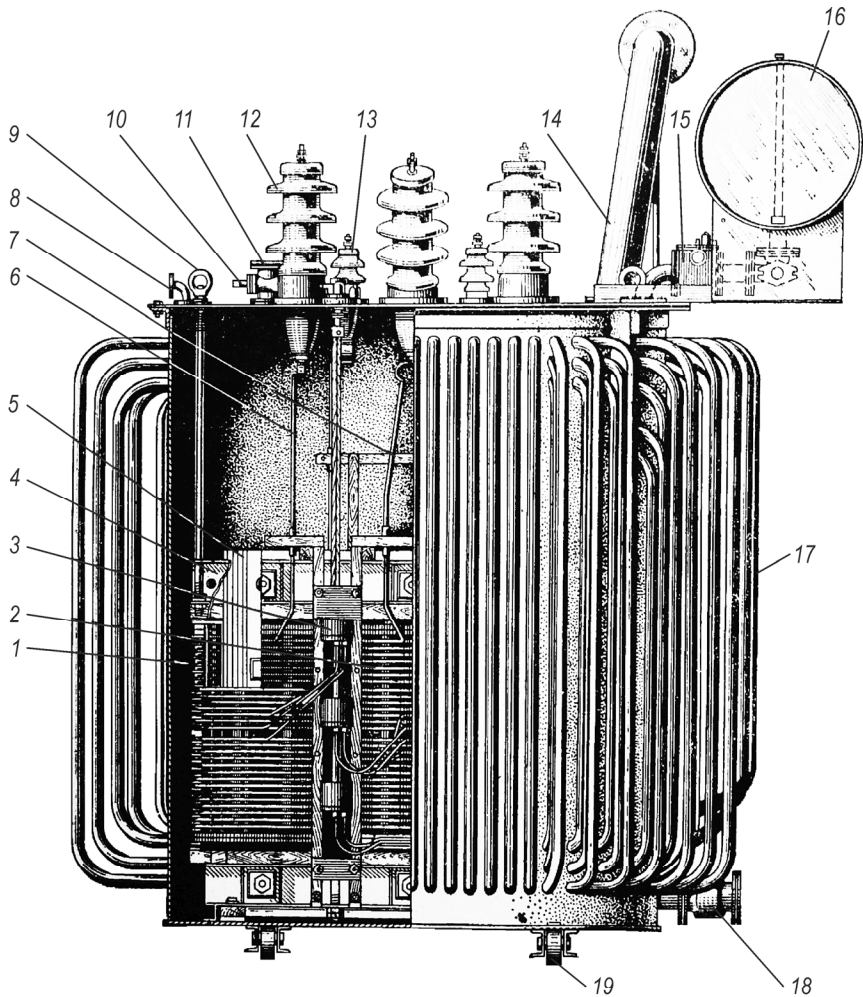


Рис. 1.1. Трансформатор із трубчатим баком

1 – обмотка ВН; 2 – обмотка НН; 3 – перемикач відгалуджень обмотки ВН; 4 – балка, для спресування ярма; 5 – шихтований магнітопровід; 6 – виводи ВН; 7 – виводи НН; 8 – патрубок для приднання вакуумного насоса; 9 – кільце для підйому висної частини; 10 – привод ПБЗ; 11 – кран для заливання оливи; 12 – ізолятор ВН; 13 – ізолятор НН; 14 – вихлопна труба; 15 – газове реле; 16 – розширювач; 17 – бак; 18 – кран для зливу оливи; 19 – транспортний ролик

Раніше для виготовлення магнітних систем трансформаторів використовувалася гарячекатана сталь товщиною 0,5 і 0,35 мм з робочою індукцією в магнітопроводі 1,4-1,45 Тл. Гарячекатана сталь має полікристалічну структуру, у якій кристали розташовані хаотично (рис. 1.3) це приводить до ізотропності її магнітних властивостей у всіх напрямках.

У даний час для виготовлення магнітопроводів застосовується холоднокатана електротехнічна анізотропна сталь товщиною 0,23, 0,27, 0,30, 0,35 мм [8], питомі втрати якої в 2-2,5 рази нижчі, ніж у гарячекатаної (рис. 1.2, а, б). Холоднокатана сталь дозволяє збільшити індукцію в магнітопроводі до 1,6-1,65 Тл при одночасному зменшенні маси сталі магнітопроводу та маси металу обмоток. У сучасних трансформаторах втрати неробочого ходу складають 0,1-0,25% від номінальної потужності.

Згідно з ДСТУ EN 10107:2009 холоднокатана анізотропна електротехнічна сталь випускається у виді текстурованих листів і штаб звичайної якості (марки T110-23S – T145-35S), з високою магнітною індукцією (марки T90-27P – T111-30P) та з оптимізованою доменною структурою(марки T95-23D – T110-30D).

Для виготовлення магнітопроводів використовуються сталі зі спеціальними електроізоляційними покриттям з товщиною на сторону 0,005 мм і коефіцієнтом заповнення 0,945-0,96.

У магнітопроводі розрізняють стержні та ярма. Стержень – це та частина магнітопроводу, на якій розташовані обмотки. Ярмо – це частина магнітопроводу, що з'єднує стержні.

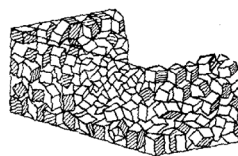
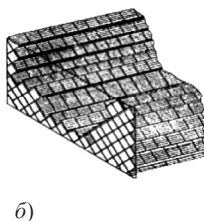
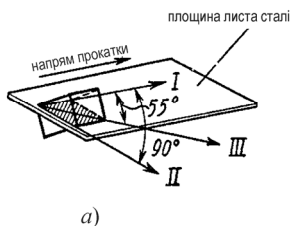


Рис. 1.2. Холоднокатана електротехнічна сталь з ребровою текстурою:

- а) напрямок кристаллографічних осей;
- б) схематичне розташування кристалів

Рис.1.3. Схематичне розташування кристалів гарячекатаної електро-технічної сталі

Найбільшого розповсюдження отримали такі типи магнітопроводів: стержневі, бронестержневі, броньові, просторові й тороїдальні. У стержньовому магнітопроводі (рис. 1.4, *а*) ярма з'єднують кінці різних стержнів і кожне яро розташовується тільки з боку торців стержнів і обмоток трансформатора. При цьому по ярму проходить магнітний потік, що дорівнює потокові стержня. Даний тип магнітопроводу набув переважного застосування.

Броньовий тип магнітопроводу (рис. 1.4, *в*) характеризується тим, що обидва кінці кожного стержня з'єднуються не менш ніж двома бічними ярмами. При цьому по ярму проходить магнітний потік рівний половині потоку стержня, тому переріз ярма менший перерізу стержня в два рази. У таких трансформаторах для одержання потоку в ярмі, рівного половині потоку стержня, необхідно змінити маркування або напрямок намотування обмоток середньої фази стосовно обмоток інших фаз.

У силових трансформаторах потужністю 100 000 кВ·А і вище, застосовують бронестержневий магнітопровід (рис. 1.4, *б*). Для нього характерним є те, що тільки два стержні з трьох мають бічні ярма і потік ярма менший потоку стержня в  $\sqrt{3}$  раз. Тому в бронестержньовому магнітопроводі в порівнянні зі стержневим висота торцевих ярем менша у  $\sqrt{3}$  раз, внаслідок чого габарити трансформатора в цілому істотно зменшуються.

За взаємним розташуванням стержнів і ярем магнітопроводи підрозділяють на плоскі, у яких поздовжні осі всіх стержнів і ярем розташовані в одній площині (рис. 1.4), і просторові, в яких осі стержнів і ярем розташовані в різних площинах (рис. 1.5). Просторова конструкція за рахунок більш рівномірного розподілу магнітного потоку дозволяє знизити масу магнітопроводу і зменшити втрати холостого ходу на 12-15%.

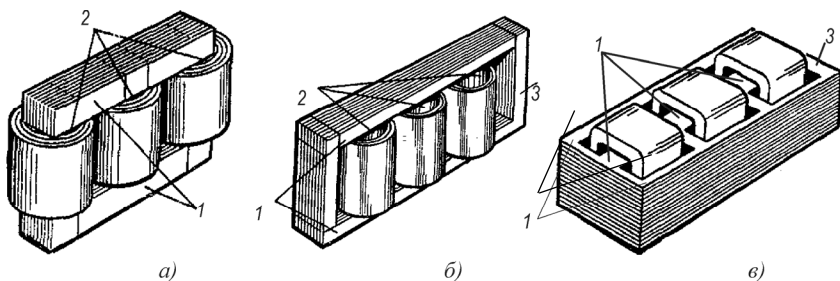


Рис. 1.4. Магнітопроводи трифазного трансформатора

*а*) стержневий; *б*) бронестержневий; *в*) броньовий;

1 – торцеве яро; 2 – стержень; 3 – бічне яро

За способом з'єднання стержнів з ярмами магнітопроводи ділять на стикові та шихтовані (рис. 1.6). У останніх пластини стержнів і ярма збирають у перепліт – шихтують (рис. 1.6, *a*), завдяки чому вони не мають суцільного стику в площині поперечного перерізу, що приводить до істотного зменшення немагнітних зазорів у порівнянні зі стиковими магнітопроводами. У стикових магнітопроводах стержні та ярма збирають із пластин електротехнічної сталі окремо, а потім з'єднують у площині роз'єму після насадки обмоток на стержні. Наявність немагнітних зазорів у місцях стику викликає підвищене значення струму неробочого ходу, а також значне нагрівання місця стику.

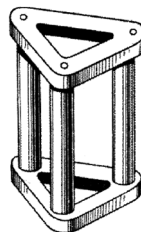


Рис. 1.5. Просторовий магнітопровід трифазного трансформатора

За формою стику пластин стержнів і ярма шихтовані магнітопроводи виконують із прямими, косими та комбінованими стиками. При прямому стику у вузлах магнітопроводу (рис. 1.7, *a*) є зона, в якій напрями прокату сталі та магнітного потоку не збігаються. При використанні холоднокатаної сталі розбіжність напрямів прокату й магнітного потоку призводить до істотного збільшення втрат і струму неробочого ходу трансформатора. Для зменшення втрат у кутах можливо застосувати дворамну конструкцію магнітопроводу (рис. 1.7, *b*), у якій об'єм кутів і втрати в них знижуються в 2 рази в порівнянні з тими ж параметрами при однорамній конструкції. Однак, більш ефективним є застосування косих стику (рис. 1.7, *в*, *г*). Оптимальним кутом для пластин стержнів, що стикуються між собою, і ярма є кут, рівний  $45^\circ$ . Застосування косих стику у магнітопроводах, дозволяє зменшити втрати неробочого ходу на 10-12%, а струм неробочого ходу – на 25-30%.

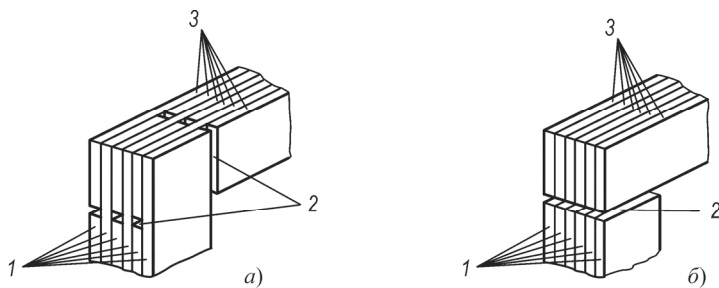


Рис. 1.6. Способи з'єднання стержнів з ярмами:

*a*) шихтуванням; *b*) стиковий

1 – пластини стержня; 2 – зазор між пластинами; 3 – пластини ярма

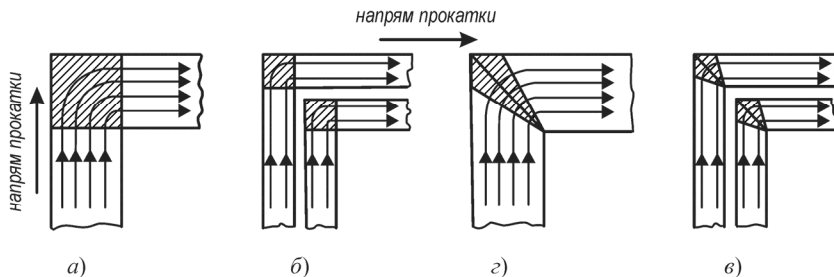


Рис. 1.7. Форми стиків стержнів і яра

- а) прямий; б) прямий дворамного магнітопровода; в) косий;  
 з) косий дворамного магнітопровода

У силових трансформаторах середньої і великої потужності найбільш широке застосування одержала плоска стержньова шихтована конструкція магнітопроводу. Поперечний переріз стержнів такого магнітопроводу звичайно має вигляд симетричної східчастої фігури, вписаної в коло (рис. 1.8 а, в). Це пов'язано з тим, що обмотки силових трансформаторів звичайно мають циліндричну форму і переріз стержнів прагнуть наблизити до кола. Діаметр кола, в яке вписують східчасту фігуру перерізу стержня, називають діаметром  $d$  стержня трансформатора.

У сучасних трансформаторах потужністю 25-80 000 кВ·А число ступенів у перерізі стержня коливається від 5 до 16. При цьому коефіцієнт заповнення кола  $k_{з,к} = 0,89-0,92$ . Для зменшення втрат і струму неробочого ходу загальний переріз яра вибирають на 2-5% більшим ніж переріз стержня.

Пресування стержнів магнітопроводів силових трансформаторів потужністю до 630 кВ·А здійснюється шляхом установки між стержнем і обмоткою розклинюючих дерев'яних планок і стержнів (рис. 1.8, а). Пресування стержнів також виконують за допомогою сталевих пластин (з немагнітної сталі) товщиною 3-6 мм, посилені поздовжніми ребрами жорсткості (рис. 1.8, б). У трансформаторах потужністю 1000 кВ·А і більше, стержні пресують сталевими стрічковими бандажами або бандажами зі склострічки (рис. 1.8, в). Пресування ярем магнітопроводів трансформаторів потужністю до 630 кВ·А здійснюється ярмовими балками, що стягуються шпильками, які винесені за межі яра.

Магнітопровід з усіма вузлами і деталями, що служать для з'єднання його окремих частин у єдину конструкцію називається *остовом*.

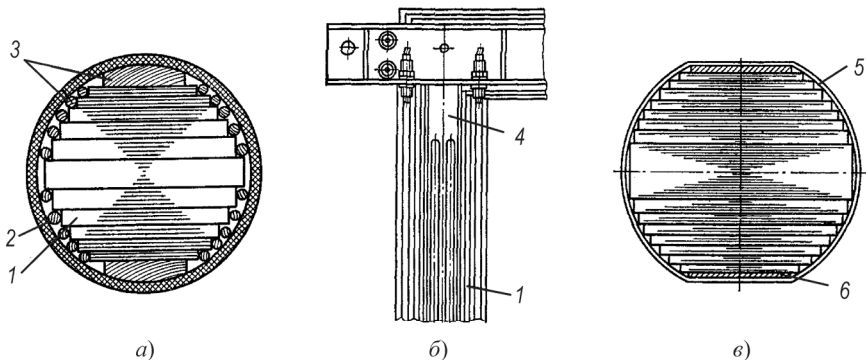


Рис. 1.8. Способи пресування стержнів трансформатора

а) дерев'яними планками й стержнями; б) стальними пластинами;

в) бандажами із склострічки;

1 – стержень; 2 – циліндр обмотки; 3 – дерев'яні деталі для пресування;

4 – пластина; 5 – склобандаж; 6 – стальна пластина

При роботі трансформатора металеві частини остова під дією електричного поля обмоток набувають різних зарядів. Тому між ними виникає різниця потенціалів, що може викликати розряди і у кінцевому підсумку вивести трансформатор з ладу. Тому всі металеві частини остова трансформатора повинні бути надійно заземлені.

*Обмотки* є найважливішим елементом трансформатора. Термін служби трансформатора завжди визначається строком служби його обмоток.

За розташуванням на стержні обмотки підрозділяють на концентричні (рис. 1.9, а) та почергові (рис. 1.9, б).

Основним елементом кожної обмотки є виток, що складається з одного або кількох паралельних провідників. Сукупність витків утворює котушку. Обмотка може складатися з однієї або кількох котушок. Витки, намотані впритул на циліндричній поверхні, утворюють шар.

За конструктивно-технологічними ознаками обмотки підрозділяють на наступні основні типи.

#### 1. Циліндричні одно- і багат шарові обмотки.

а) Одно- і двошарові циліндричні обмотки з прямокутного дроту (рис. 1.10 а, б) застосовують як обмотки НН при номінальних струмах до 800 А. Витки кожного шару намотують по гвинтовій лінії впритул один до одного; виток може мати до 4-6 паралельних дротин, що вкладають плазом або на ребро.

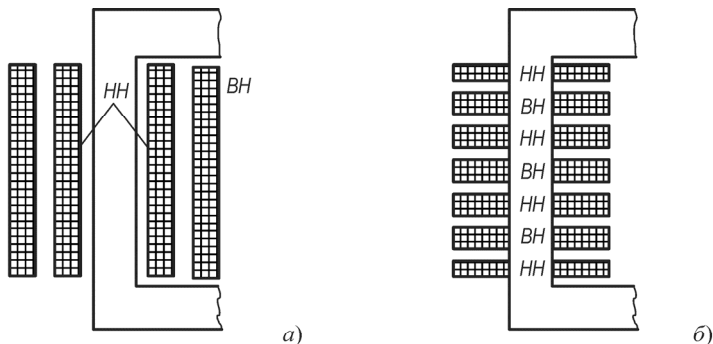


Рис. 1.9. Конструкція обмоток  
а) концентричні; б) почергові

Циліндричні обмотки з прямокутного дроту прості у виробництві, однак недостатньо стійкі до впливу осьових сил короткого замикання, тому що радіальний розмір шару невеликий.

б) Багатошарові циліндричні обмотки виконують із дротів круглого перерізу і застосовують в основному як обмотки ВН (до 35 кВ). Перший шар обмотки намотують на паперово-бакелітовий циліндр, між шарами прокладають ізоляцію з кабельного паперу (рис. 1.10, б). Для збільшення поверхні охолодження обмотку виконують із двох котушок, розділених вертикальним каналом. Регулювальні відгалуження часто виконують шляхом виводу петлі дроту без його обриву (рис. 1.10, б).

Обмотки цього типу отримали широке розповсюдження для напруги 110 кВ і вище. При великих струмах намотують обмотку з транспонованого дроту. Вертикальні шари обмотки відділені один від одного ізоляційними циліндрами.

в) Котушечні багатошарові циліндричні обмотки розділені по висоті на окремі багатошарові котушки, намотані з круглого дроту. Між котушками встановлюють шайби або горизонтальні прокладки, що утворюють охолоджуючі канали (рис. 1.10, в). Котушки намотують на паперово-бакелітовий циліндр з рейками з електрокартону, що утворюють вертикальні охолоджуючі канали.

г) Шинні та листові обмотки є різновидом циліндричних шарових обмоток (рис. 1.10, г) Вони широко використовуються як обмотки НН трансформаторів, призначених для живлення електричних печей. Обмотки виконують з числом витків 1 або 2.

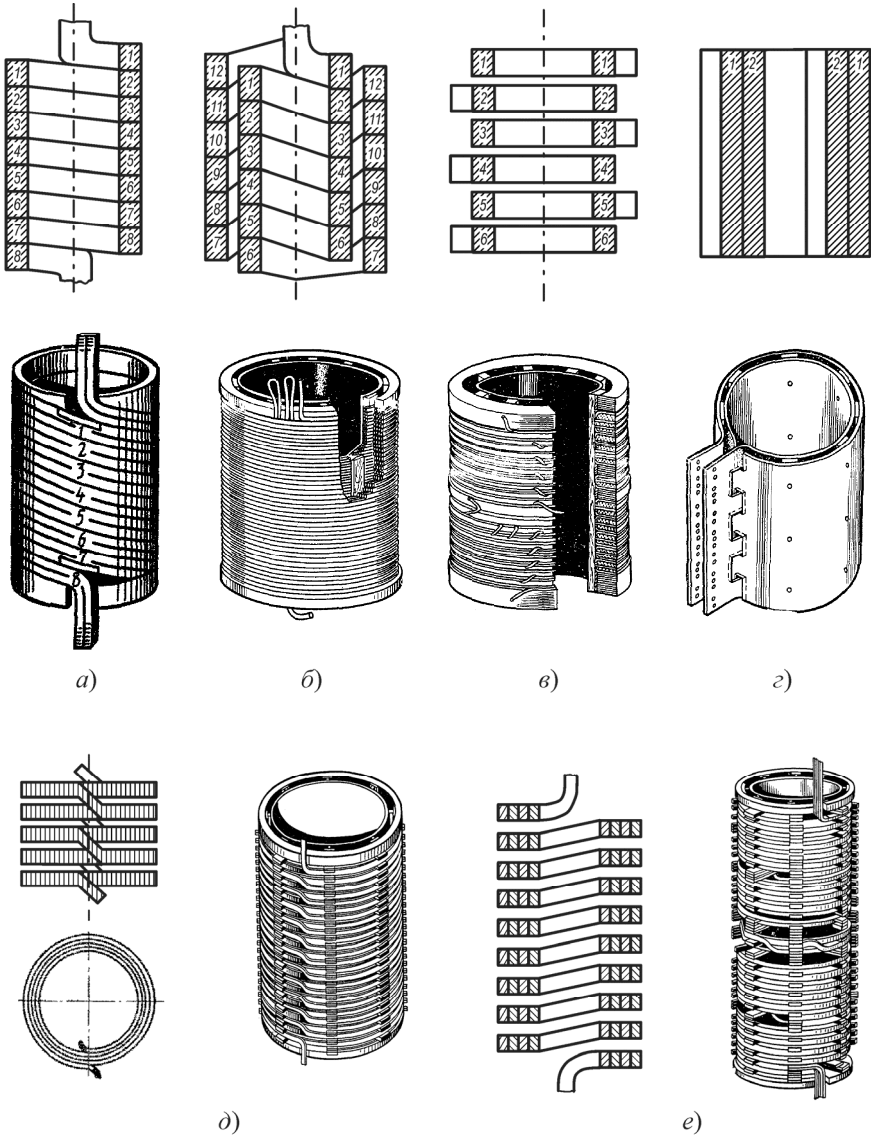


Рис. 1.10. Обмотки трифазних трансформаторів

а) схема, загальний вид одношарової циліндричної обмотки; б) схема, загальний вид двошарової циліндричної обмотки; в) схема, загальний вид котушечної циліндричної обмотки; г) схема, загальний вид двовиткової шинної обмотки; д) схема, загальний вид безперервної обмотки; е) схема, загальний вид одноходової гвинтової обмотки

2. Неперервні котушечні обмотки складаються з послідовно з'єднаних дискових котушок, що намотані по спіралі безперервно, тобто без обриву дроту між окремими котушками (рис. 1.10, д).

Неперервні котушечні обмотки використовуються як обмотки ВН і НН через їх велику механічну міцність і надійність. Між котушками виконують канали для охолодження. При виконанні обмотки з двох (і більше) паралельних провідників дроти при переході з котушки в котушку змінюють місцями, виконуючи транспозицію. У тих випадках, коли важко виконати обмотку неперервною, застосовується дискова обмотка, що збирається з комплекту окремо намотаних подвійних котушок.

3. Гвинтові одно- і багатоходові обмотки виконують з кількох паралельних прямокутних дротів (рис. 1.10, е). Витки обмотки вкладають по гвинтовій лінії, що має один або кілька ходів. Кожен хід може мати від 4 до 20 паралельних дротів, намотаних плазом. Між витками і паралельними витками (ходами) виконують оливні канали.

Так як паралельні дроти гвинтової обмотки, розташовані концентрично й знаходяться на різній відстані від осі обмотки, то вони мають різну довжину. Це приводить до розбіжності їх активних та індуктивних опорів. Для рівномірного розподілу струму між паралельними дротами і зменшення додаткових втрат гвинтові обмотки виконують з транспозицією дротів, що утворюють один виток.

Гвинтові обмотки застосовують як обмотки НН для струмів більше 300 А, вони можуть мати від 4 і більше паралельних дротів. Обмотки мають значну опорну поверхню і достатню електродинамічну стійкість.

4. Обмотки з фольги (стрічки). Для виготовлення обмоток замість мідного дроту також використовується алюмінієва фольга. Такі обмотки мають певні переваги в порівнянні з обмотками із дроту: кращі масогабаритні показники та охолодження обмотки завдяки більш рівномірному розподілу температури по всьому перерізу котушки; зменшені осьові зусилля при короткому замиканні (КЗ). За рахунок вирівнювання міжвиткових ємностей вздовж обмотки збільшується її стійкість до імпульсних перенапруг.

Як провідникові матеріали в трансформаторах застосовують мідь і алюміній. Для виготовлення дротів обмоток застосовують м'яку мідь марки ПММ, а для струмопровідних стержнів, шин – тверду мідь марки ПМТ.

При виготовленні обмоток застосовують алюмінієвий дріт круглого та прямокутного перерізу марок: АПБ, АПБУ, АПБД та ін.

У оливних трансформаторах обмотки, виводи, регулятори напруги і дрти, що їх з'єднують розміщені в баку з оливою. Вводи (прохідні ізолятори) мають дві частини: нижню, що знаходиться в оливі бака, і верхню, повітряну, що знаходиться поза баком. Таким чином, розрізняють внутрішню (у оливі) і зовнішню (у повітрі) ізоляцію оливних трансформаторів.

Внутрішню ізоляцію підрозділяють на головну і поздовжню. Головна – це ізоляція кожної з обмоток відносно заземлених частин і інших обмоток, електрично не зв'язаних з даною обмоткою. Поздовжня – це ізоляція між різними елементами даної обмотки (між витками, шарами, котушками, деталями ємнісного захисту).

До зовнішньої ізоляції трансформаторів відносяться зовнішня ізоляція вводів, повітряні проміжки між вводами і від вводитів до заземлених частин. Вводи являють собою фарфорові прохідні ізолятори, через внутрішню порожнину яких проходить струмоведучий стержень. Всередині бака ввід зв'язаний відводом з обмоткою, зовні – підключений до електричної мережі.

Зовнішня конфігурація і розміри вводитів залежать від класу напруги, роду установки трансформатора і сили струму. Вводи (ізолятори) для зовнішньої установки мають зонтоподібні ребра для того, щоб під дощу частина поверхні фарфору залишалася сухою. Нижній поверхні зонтоподібного ребра надається така форма, при якій краплі води не можуть на ній утримуватися (рис. 1.11). При такій конструкції ізоляторів збільшується шлях поверхневого розряду і електрична міцність вводу.

Вводи на напругу 110 кВ і вище підрозділяють на оливо-бар'єрні та паперово-оливні. У оливо-бар'єрних основна ізоляція – трансформаторна олива, розділена на шари паперово-бакелітовими циліндрами із зрівняльними обкладками з алюмінієвої фольги. У паперово-оливних вводах основна ізоляція – кабельний папір, щільно намотаний на мідну трубу. Папір просочений трансформаторною оливою і розділений на шари зрівняльними обкладками з фольги. Вводи заповнюються дегазованою трансформаторною оливою, ізольованою від оливи бака і атмосферного повітря (герметичні вводи).

Для ізоляції дртів обмоток і виводів, а також міжшарової ізоляції обмоток та ін. пристроїв застосовують електроізоляційні папери марок: Т-120, ТМ-120, ТМП-120, ТВ-120, ТВУ-80 товщиною 80 і 120 мкм.

Іншим основним ізоляційним матеріалом є електроізоляційний картон призначений для роботи в оливі. Він має високу механічну міцність, малу усадку після сушіння, стійкість до впливу напруги в напрямку, перпендикулярному поверхні, і до впливу поверхневих розрядів. Картон випускають п'яти марок: АМ, А, Б, У, Г.

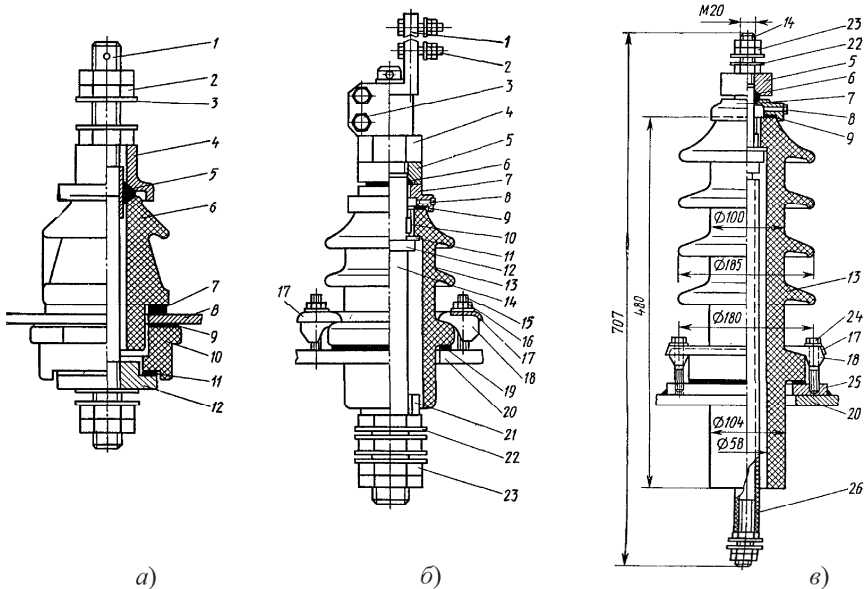


Рис. 1.11. З'ємні вводи:

а) на струм 400 А і напругу 1 кВ: 1 – мідна шпилька; 2 – гайка; 3 – шайба; 4 – латунний ковпак; 5 – гумове кільце; 6 і 10 – керамічні ізолятори; 7 – гумова прокладка; 8 – кришка бака; 9, 11 – електрокартонні шайби; 12 – латунна втулка;

б) на струм 3000 А і напругу 6-10 кВ: 1 – мідний башмак; 2, 3 – болти; 4 – гайка; 5 – втулка; 6 – гумове кільце; 7 – ковпак; 8 – гвинт; 9 – гумове ущільнення; 10 – виступ стержня; 11, 19 – шайба електрокартонна; 12 – бортик стержня; 13 – ізолятор; 14 – стержень; 15 – шпилька; 16 – гайка; 17 – фланець; 18 – притисний кулачок; 20 – кришка бака; 21 – втулка гетинаксова; 22 – шайба; 23 – гайка;

в) на струм 250 А і напругу 35 кВ; 25 – установочний фланець; 26 – паперово-бакелітова трубка

Для оливних трансформаторів застосовують світлу лакотканину марки ЛХММ. У сухих трансформаторах, що працюють при підвищеній температурі та потребують ізоляції підвищеного класу нагрівостійкості, застосовується електроізоляційна склотканина на основі кремнійорганічного лаку марки ЛСК-155/180 та ін.

Електротехнічний гетинакс застосовують для виготовлення деталей перемикаючих пристроїв, кріплення обмоток і виводів. Він випускається у вигляді пластин різної товщини (від 8 до 50 мм).

Паперово-бакелітові вироби виготовляють у вигляді трубок шляхом намотування лакованого бакелітовим лаком паперу з наступним запіканням і

лакуванням. У трансформаторах застосовують для ізоляції обмоток, виводів і перемикаючих пристроїв.

Електроізоляційні лаки (марок ГФ-95 і МЛ-92) використовують для просочення з наступним запіканням обмоток трансформаторів. Гліфталево-оливна емаль марки ГФ-92-ГС застосовується для покриття просочених лаком обмоток і фарбування сталевих деталей сухих трансформаторів.

Трансформаторна олива має електричну міцність 50-60 кВ/мм, а  $\text{tg}\delta$  при 70 °С не більш 2,5%.

Термін служби паперової ізоляції скорочується в два рази при збільшенні температури вище допустимої всього на 8 °С. Конструкція ізоляції трансформатора ускладнюється з ростом напруги обмотки ВН і істотно впливає на його вартість. Для трансформаторів класу напруги 220-500 кВ вартість ізоляції досягає 25 % вартості всього трансформатора.

На рис. 1.12 приведено в якості прикладу основні деталі ізоляції трансформатора ТМ-1600/35/10.

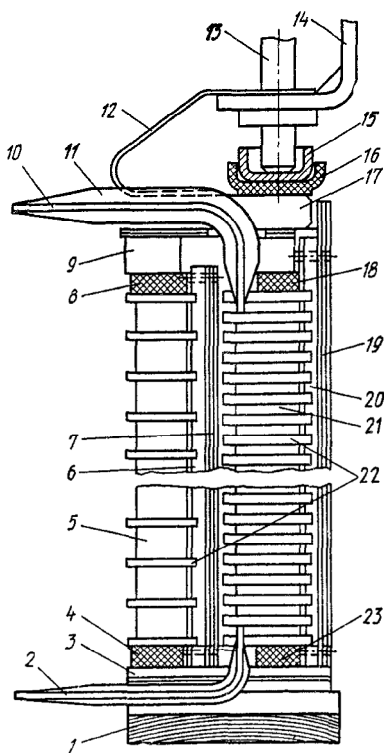


Рис. 1.12. Розміщення обмоток і ізоляції трансформатора потужністю 1600 кВА класу напруги 35 кВ:

1 – зрівняльна ізоляція; 2, 10 – нижній і верхній виводи обмотки НН; 3, 9 – нижня і верхня ярмова ізоляція; 4, 8 – нижнє і верхнє опорні кільця обмотки ВН; 5, 2 – обмотки ВН і НН; 6 – опорний клин обмотки ВН; 7, 19 – циліндри; 11 – паперова ізоляція верхнього виводу НН; 12 – стрічка що заземлює пресуючі кільця; 3 – пресуючий гвинт; 14 – ярмова балка; 15, 16 – сталевий та ізоляційний стакани; 17 – пресуюче кільце; 18, 23 – верхнє і нижнє опорні кільця обмотки НН; 10 – клин (рейка); 22 – прокладки між котушками

Найпоширеніші на сьогодні системи охолодження трансформаторів і їх умовні позначення приведені в табл. 1.1.

У трансформаторах з охолодженням типу **C (AN)** та **C3 (ANAN)** активна частина має безпосередній контакт з навколишнім повітрям і її охолодження відбувається шляхом випромінювання і природної конвекції повітря.

У трансформаторах з охолодженням типу **СГ (ANAN)** активну частину розміщують у баці, заповнений газом, наприклад елєгазом. У цьому випадку охолодження відбувається за рахунок природної циркуляції газу і повітря.

У трансформаторах з охолодженням типу **СД (ANAF)** застосовують штучне форсування руху повітря за допомогою вентиляторів.

Через меншу теплопровідність і електричну міцність повітря у порівнянні з оливою, сухі трансформатори застосовуються при потужностях до 1600-2500 кВ·А і вищій напрузі до 15-20 кВ.

У трансформаторах з охолодженням типу **М (ONAN)** активна частина знаходиться у баку з трансформаторною оливою. Внаслідок чого, створюється природно циркулюючий конвекційний потік оливи, що відводить теплоту від нагрітих частин трансформатора до стінок і радіаторів бака, які охолоджуються шляхом випромінювання і природної конвекції повітря.

Для трансформаторів потужністю до 25-40 кВ·А застосовують гладкі баки. При великих потужностях – ребристі або трубчасті.

У трансформаторах потужністю 10 000-80 000 кВ·А з охолодженням типу **Д (ONAF)**, встановлюють вентилятори, що здійснюють примусову циркуляцію повітря вздовж зовнішніх поверхонь радіаторів бака при природній циркуляції оливи в них. У цьому випадку тепловіддача збільшується майже в два рази в порівнянні з охолодженням типу **М (ONAN)**. Дана система охолодження допускає тривалу роботу трансформатора з відключеними вентиляторами, якщо навантаження не перевищує 50% від номінального.

У трансформаторах потужністю 80 000-400 000 кВ·А використовується примусова циркуляція оливи через спеціальні малогабаритні охолоджувачі – це системи охолодження типу **ДЦ (OFAF)** і **НДЦ (ODAF)**. У таких охолоджувачах олива протікає через тонкостінні труби, що примусово обдуваються повітрям (рис. 1.13, а).

Таблиця 1.1. Системи охолодження трансформаторів і їхні умовні позначення

Система охолодження	Умовне позначення	
	за ДЕСТ 11677	за ІЕС 60076-2:2011; ІЕС 60076-11:2004
<i>Сухі трансформатори</i>		
природне повітряне при відкритому виконанні	С	AN
природне повітряне при захищеному виконанні	СЗ	ANAN
природне повітряне при герметичному виконанні	СГ	ANAN
повітряне з дуттям	СД	ANAF
<i>Оливі трансформатори</i>		
природна циркуляція повітря та оливи	М	ONAN
примусова циркуляція повітря та природна циркуляція оливи	Д	ONAF
природна циркуляція повітря та примусова циркуляція оливи з неспрямованим потоком оливи	МЦ	OFAN
природна циркуляція повітря та примусова циркуляція оливи зі спрямованим потоком оливи	ТМЦ	ODAN
примусова циркуляція повітря та оливи з неспрямованим потоком оливи	ДЦ	OFAF
примусова циркуляція повітря та оливи зі спрямованим потоком оливи	НДІ	ODAF
примусова циркуляція води та оливи з неспрямованим потоком оливи	Ц	OFWF
примусова циркуляція води та оливи із спрямованим потоком оливи	НЦ	ODWF
<i>Трансформатори з негорючим рідиним діелектриком</i>		
Природна циркуляція повітря та діелектрика	Н	LNAF
Примусова циркуляція повітря і примусова циркуляція діелектрика	НД	LNAF
Примусова циркуляція повітря і направлений потік діелектрика	ННД	LFAF

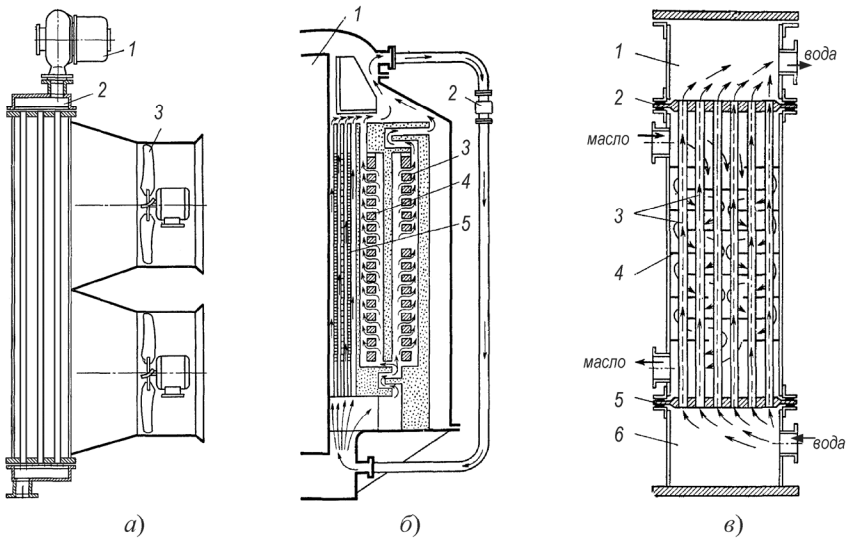


Рис. 1.13. Ескізи охолоджувачів:

- а) системи охолодження НДЦ: 1 – електронасос; 2 – охолоджувач; 3 – вентилятор;  
 б) системи охолодження: НМД: 1 – магнітопровід; 2 – електронасос; 3–5 – обмотки ВН, СН і НН;  
 в) системи охолодження Ц і НЦ: 1, 6 – верхня і нижня водяні камери; 2, 5 – верхня й нижня трубні дошки; 3 – труби для води; 4 – перегородки для направлення масла

У трансформаторах з охолодженням типу **МЦ (OFAN)** і **НМЦ (ODAN)** на кожному радіаторі встановлені насос для створення примусової циркуляції оливи, а у каналах обмоток і магнітопроводу – спеціальні пристрої (перегородки, щити), за допомогою яких забезпечується направлений рух оливи (рис. 1.13, б). Внаслідок чого, ефективно збільшується тепловіддача і зменшуються габарити трансформатора. При відключенні оливних насосів системи **МЦ (OFAN)** і **НМЦ (ODAN)** допускають тривалу роботу трансформатора, якщо навантаження не перевищує 30–40% від номінального.

У трансформаторах з охолодженням типів **Ц (OFWF)** и **НЦ (ODWF)** використовується примусова циркуляція оливи через охолоджувачі з примусовим водяним охолодженням. У таких охолоджувачах (рис. 1.13, в) вода рухається по трубах, а олива рухається в міжтрубному просторі, розділеному спеціальними перегородками для підвищення ефективності його охолодження. Недоліком цих систем є те, що трансформатор не може працювати з відключеними насосами навіть при неробочому ході.

У трансформаторах з охолодженням типу **Н (LNAF)**, **НД (LNAF)** і **ННД (LF AF)** активну частину розміщують у баку, що заповнений рідким негорючим діелектриком. Сучасні рідкі діелектрики (наприклад, синтетичний органічний ефір MIDE L 7131, натуральний складний ефір MIDE L EN) мають добру екологічну сумісність, низьку токсичність, низький коефіцієнт термічного розширення і практично не змінюють свої діелектричні властивості від дії вологи. Головним недоліком негорючих діелектриків є вища вартість ніж у трансформаторної оливи.

У конструктивному плані, система охолодження **Н (LNAF)** аналогічна системі охолодження типу **М (ONAN)**, а **НД (LNAF)** – **Д (ONAF)**.

Допоміжне обладнання системи охолодження оливних трансформаторів служить для контролю за станом оливи, його захисту від впливу навколишнього повітря і захисту від руйнування бака при внутрішніх ушкодженнях трансформатора. До складу допоміжного устаткування входять: розширювач, показчик рівня оливи, термометр або термометричний сигналізатор, осушувач повітря, газове реле, вихлопна труба і арматура бака.

Розширювач служить для компенсації коливань рівня оливи в баку трансформатора при коливаннях температури і запобігає безпосередньому контакту оливи в баку з навколишнім повітрям, тобто її окисленню. Конструктивно розширювач являє собою сталевий циліндричний бачок, що встановлений горизонтально над кришкою бака трансформатора й з'єднаний з ним трубопроводом (рис. 1.14). Об'єм розширювача складає приблизно 10% об'єму оливи в баку.

Оливовказівник служить для контролю за рівнем оливи у трансформаторі та встановлюється на торцевій частині розширювача з боку НН, а в трансформаторах без розширювача – на стінці бака. На оливовказівнику наносяться три контрольні риски, що відповідають рівням оливи в непрацюючому трансформаторі при температурах оливи  $-45$ ,  $+15$  і  $+40$  °С (рис. 1.14). У трансформаторах потужністю до 630 кВ·А встановлюють ртутні скляні термометри зі шкалою 0-150 °С, потужністю 1000 кВ·А і вище, а також у трансформаторах герметичного виконання потужністю 160 кВ·А і вище – термометричні сигналізатори. У трансформаторах з охолодженням типів **Д (OF AF)**, **МЦ (OF AN)**, **НМЦ (ODAN)**, **ДЦ (OF AF)**, **НДЦ (ODAF)**, **Ц (OF WF)** і **НЦ (ODWF)** встановлюють по два термосигналізатори, один для вимірювання температури оливи, інший – для автоматичного керування насосами і вентиляторами.

Осушувач повітря призначений для очищення від вологи і забруднень повітря, що надходить у трансформатор при температурних коливаннях рівня оливи (рис. 1.15). У трансформаторах до 630 кВ·А включно осушувач повітря вбудовується безпосередньо в розширювач, а в трансформаторах потужністю 1000 кВ·А і вище встановлюється на розширювачі і являє собою наповнений силікагелем металевий циліндр, що має оливний затвор.

При зниженні рівня оливи в розширювачі повітря, яке засмоктується у трансформатор, проходить через оливний затвор, очищаючись від сторонніх домішок, а потім проходить через шари силікагелю, що осушує повітря. У трансформаторах класу напруги 220 кВ і вище для більш надійного захисту оливи в розширювачі від окислювання застосовують так званий азотний захист. У цьому випадку надолівний простір розширювача заповнюють азотом, а розширювач герметизують.

Газове реле служить для захисту трансформатора від внутрішніх пошкоджень (виткових замикань в обмотках, пробойв ізоляції, «пожежі» в сталі магнітопроводу і т. п.), що супроводжуються виділенням газу, і встановлюється в трубопроводі між розширювачем і баком трансформатора (див. рис. 1.14). Час спрацьовування реле не перевищує 0,1 с. Реле встановлюють на трансформаторах потужністю 1000 кВ·А і більше.

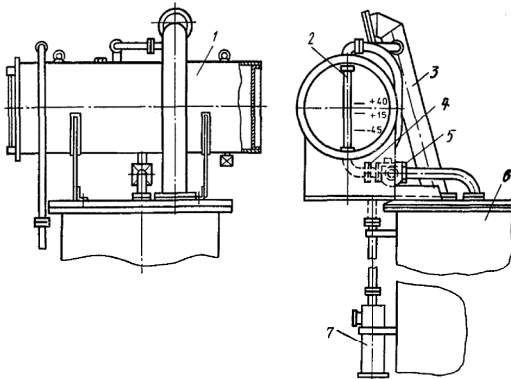


Рис. 1.14. Допоміжне устаткування системи охолодження масляного трансформатора:

- 1 – розширювач; 2 – показник рівня масла;
- 3 – вихлопна труба; 4 – плоский кран; 5 – газове реле; 6 – бак; 7 – осушувач повітря

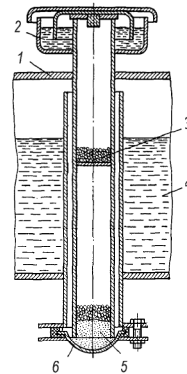


Рис. 1.15. Осушувач повітря, вбудований у розширювач:

- 1 – розширювач; 2 – масляний затвор; 3 – силікагель; 4 – масло;
- 5 – індикаторний силікагель; 6 – ковпак з органічного скла

Вихлопна труба служить для запобігання руйнування бака трансформатора при внутрішніх пошкодженнях, що супроводжуються різким підвищенням тиску. Її встановлюють на кришці бака трансформатора. Труба має закритий скляною мембраною верхній кінець. При підвищенні тиску всередині трансформатора і неспрацьовуванні захисту, скляна мембрана лопається і гази разом з оливою викидаються назовні. Вихлопна труба встановлюється на трансформаторах потужністю 1000 кВ·А і більше.

Арматура бака служить для заливання, відбору проб, спуску та фільтрації оливи. До неї відносяться крани, вентилі, засувки і пробки.

Необхідність підтримання напруги в різних точках мережі в межах  $\pm 10\%$  від рівня декларованої напруги  $U_c$  [9] визначає потребу в її регулюванні.

*Регулювання напруги* силових трансформаторів здійснюється зміною числа витків обмотки ВН. Для цього обмотки виконують з певною кількістю відгалуджень, кожне з яких має певну кількість витків. При перемиканні відгалуджень обмотки, вторинна напруга змінюється ступінчасто. В оливних трансформаторах перемикання регульовальних відгалуджень здійснюється спеціальними перемикаючими пристроями.

Перемикаючий пристрій – це комутаційний виріб, що містить велику кількість різних за призначенням контактів і деталей ізоляції, механізм привода та інші допоміжні частини. Його встановлюють всередині трансформатора з виводом привода на кришку або бічну стінку банка. Пристрій перемикання, його привод та система керування утворюють систему регулювання напруги трансформатора.

Системи регулювання напруги силових трансформаторів підрозділяють на три основних типи: механічні, тиристорно-механічні та безконтактні. На сьогодні, в силових трансформаторах на основі механічних перемикаючих пристроїв найбільшого розповсюдження отримали два типи систем регулювання напруги: ПБЗ (перемикання без збудження) та РПН (регулювання під навантаженням).

РПН та ПБЗ підключаються до обмотки ВН трансформатора, так як при меншому струмі навантаження, незважаючи на високу напругу, пристрій регулювання отримується більш економічним у порівнянні з пристроєм перемикання на стороні НН.

ПБЗ здійснює регулювання напруги лише при повному відключенні трансформатора від електричної мережі. Основними частинами його є контактна система, що складається з рухомих 4 і нерухомих контактів 5, та приводний механізм 3 для приведення в дію рухомих контактів (рис. 1.16). Електрична ізоляція перемикача від заземлених частин корпусу здійснюється за допомогою паперово-бакелітових деталей.

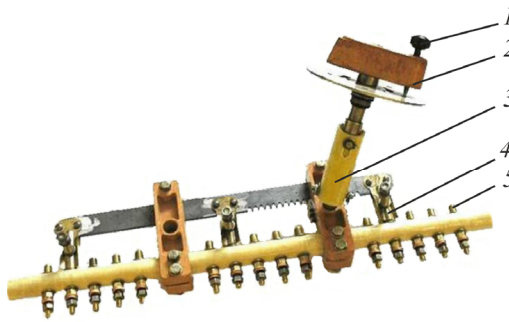


Рис. 1.16. Трифазний перемикаючий пристрій типу ПТРЛ:

1 – фіксатор; 2 – ковпак; 3 – привод; 4 – рухомий контакт; 5 – нерухомий контакт

Трансформатори загального призначення потужністю до 1600 кВ·А з ПБЗ мають 5 регульовальних відгалужень: +5, +2,5; 0; -2,5, -5%. Зазвичай відгалуження виконуються в «нульовій» точці трифазної обмотки, з'єднаної в зірку, з розподілом відгалужень у кожній з фаз. У трансформаторах малої потужності застосовуються найпростіша схема без симетрування за висотою обмотки витків, що перемикаються (1.17, а), а в трансформаторів більшої – складніші схеми з симетруванням відгалуджень за висотою обмотки (1.17, б, в).

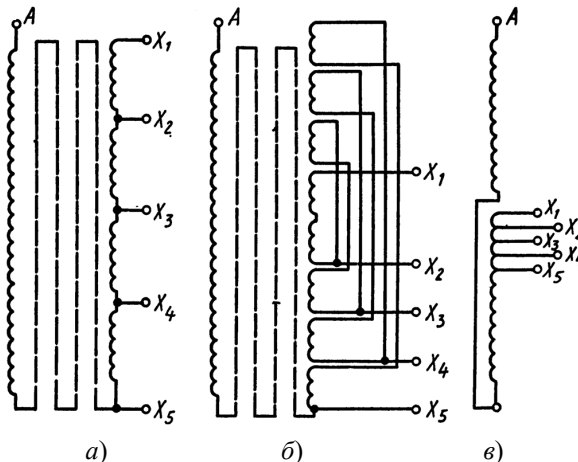


Рис. 1.17. Схеми виконання відгалуджень у обмотці ВН з пристроєм ПБЗ:

а) без симетрування за висотою обмотки; б) з симетруванням за висотою обмотки в багат шаровій циліндричній обмотці; в) з симетруванням за висотою витків, що перемикаються в безперервній обмотці

Найбільшого поширення отримало регулювання напруги за допомогою системи РПН – перемикач під навантаженням контактними пристроями, що забезпечують обмеження струму в контурах регулювання та гасіння дуги при перемикачях регулювальних відгалужень обмоток (рис. 1.18). Такі системи встановлюються в трансформаторах з номінальною потужністю від 1000 кВ·А. Основний діапазон рівнів напруги для РПН складає 35-330 кВ.

Трансформатори оснащені РПН, мають в обмотці ВН велике число регулювальних відгалужень, що виконуються з невеликим кроком – 1,5-1%, при загальній зоні регулювання  $\pm(10-20)\%$ . Особливістю РПН є те, що перехід з одного відгалуження на інше відбувається без розриву кола струму, тому в проміжному положенні перемикачі виявляються ввімкненими на два сусідніх відгалуження обмотки, а отже, частина обмотки між ними буде замкнена накоротко. Для обмеження струму КЗ застосовують струмообмежуючі реактори або резистори.



Рис. 1.18. Система РПН серії RS 9.3  
(блок керування не показано)

Конструкція перемикаючого пристрою типу UBBRT представлена на рис. 1.19. При роботі пристрою РПН на його контактах виникає дуга. Щоб уникнути забруднення трансформаторної оливи перемикач розміщується у власному резервуарі, всередині бака трансформатора. РПН типу UB працюють за принципом селекторного перемикання. Обладнання, необхідне для роботи РПН, розміщується в корпусі селекторного перемикача – циліндрі з посиленого скловолокном пластику 8. У верхній частині циліндра знаходиться металевий фланець 9, а в нижній частині – закрите металево дно 1.

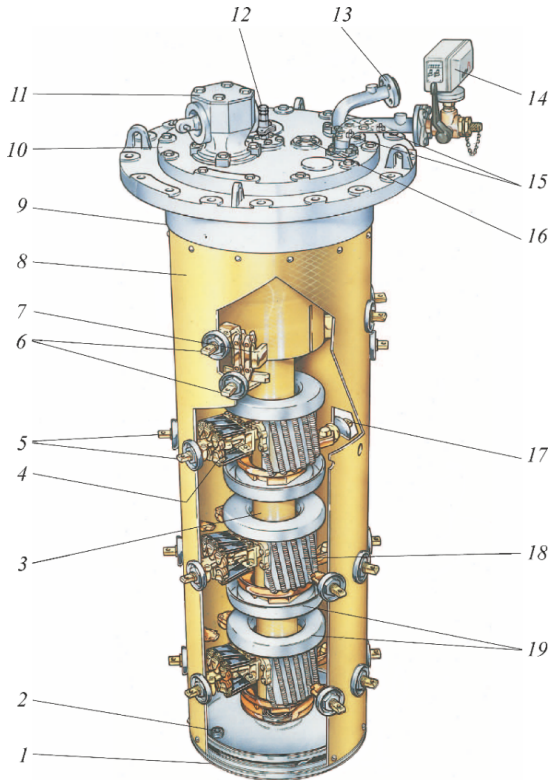


Рис. 1.19. Конструкція перемикача типу UBBRT:

1 – металеве дно; 2 – гвинт для зливання оливи; 3 – вал селекторного перемикача; 4, 5 – рухомі та нерухомі контакти селекторного перемикача; 6, 7 – рухомі та нерухомі контакти вибірника; 8 – циліндр; 9 – фланець; 10 – кришка; 11 – конічний редуктор; 12 – оливний клапан; 13 – патрубок оливорозширювача; 14 – реле тиску; 15 – клапан спуску повітря; 16 – віконце вказівника положення; 17 – клемма струмознімача; 18 – струмообмежуючий резистор; 19 – еcranуючі кільця

Приведення в рух валу селекторного перемикача 3 здійснюється від окремого приводного механізму, який кріпиться з боку бака трансформатора і з'єднується з допомогою приводних валів і конічних редукторів 11. РПН складається з трьох однакових однофазних пристроїв, що встановлені в корпусі селекторного перемикача. Кожний однофазний містить селекторний перемикач і дугогасні контакти.

Селекторний перемикач складається з нерухомих контактів 4 і системи рухомих контактів 5. Кожен нерухомий контакт має 2 контактних майданчики з кожної боку, одну для рухомого головного контакту і одну для рухомих перемикаючих контактів. Рухомий перемикаючий контакт і дугогасильні контакти представляють собою ролики, які рухаються зверху ножевидних нерухомих контактів. Переривання струму відбувається між нерухомим і рухомим перемикаючими контактами. У процесі роботи струм проводиться по чистій поверхні міді або срібла, на якій не виникає дуга.

Струмообмежувальні резистори 18 виконані з проводу, що спіральсно намотаний на ізольовану бобіну. Вони з'єднуються між рухомим головним контактом і дугогасними контактами.

Вибірник призначений для реверсу регульовальної обмотки або для зміни з'єднання при регулюванні в режимі «грубо – точно». Одна фаза вибірника складається з рухомого контакту 6 і трьох нерухомих контактів 7. Рухомий контакт закріплений зверху на осі приводного валу 3. Струм проводиться за допомогою чотирьох контактних пальців рухомого контактів. Вибірник не бере участі в перериванні струму під час перемикачів.

На рис. 1.20 показана принципова схема фази пристрою РПН із застосуванням активних струмообмежуючих опорів  $R1$  та  $R2$ .

При положенні перемикачів, що показано на рис. 1.20, трансформатор працює на відгалуженні  $X2$ . При переході на відгалуження  $X1$  спочатку перемикач  $SF1$  переводиться в положення роботи на відгалуженні  $X1$ , а потім перемикач  $SF$  за допомогою відповідного механізму швидко перемикається в положення, в якому приєднується до контактів 1 та 2. Послідовність розмикання контактів 3 і 4 та замикання контактів 1 і 2 розраховується так, щоб коло робочого струму 1 не розривається. Швидко, впродовж часток секунди, перемикачів необхідне для запобігання перегріву опорів  $R1$  і  $R2$ .

На рис. 1.21 приведена схема фази РПН зі струмообмежуючим реактором  $LR$  та послідовність перемикання при переході з відгалуження  $X1$  (рис. 1.21, а) на відгалуження  $X2$  (рис. 1.21, б). У кожній з двох гілок схеми перемикання є контактор ( $K1$  та  $K2$ ) для вимикання струму з даної гілки перед її вмиканням і рухомі контакти перемикача ( $SF1$  та  $SF2$ ), які розраховані на перемикання гілок без струму.

У нормальному робочому положенні (рис. 1.21, а, б) струми двох гілок схеми обтікають дві половини обмотки реактора в різних напрямках. Тому магнітний потік в магнітопроводів реактора практично відсутній, а його індуктивний опір малий.

При переході перемикача в проміжне положення (рис. 1.21, в), виникає струм  $K3$ , що протікає по всій обмотці реактора  $LR$  в одному напрямі. При цьому магнітопровід реактора намагнічується, а його опір відносно цього струму різко зростає.

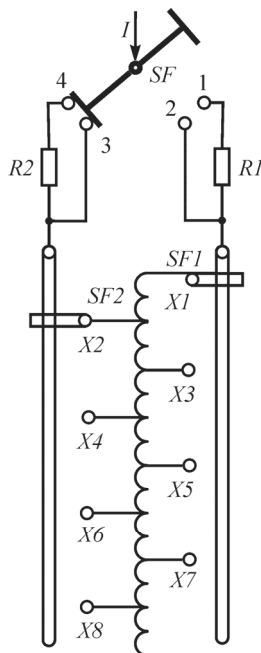


Рис. 1.20. Схема регулювання напруги фази пристрою РПН з використанням активних опорів

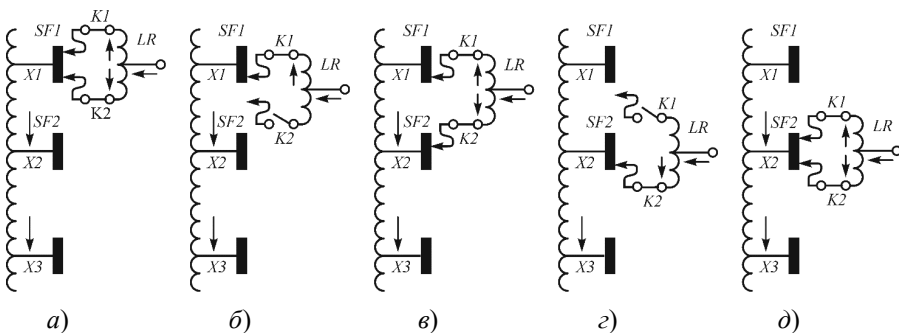


Рис. 1.21. Порядок перемикання відгалуджень фази обмотки РПН зі струмообмежуючим реактором

Умовні позначення силових трансформаторів загального призначення.

Структурна схема умовного позначення типу трансформатора має такий вигляд:

X	X	X	X	X	–	X	/	X	/	X	/	X	–	X	X
1	2	3	4	5		6		7		8		9		10	11

1 – тип трансформатора: *A* – автотрансформатор (трансформатор позначення не має); *O* або *T* – відповідно, однофазний, трифазний трансформатор;

2 – тип вторинної обмотки: *P* – розщеплена обмотка НН; або умовне позначення виду охолодження трансформатора згідно табл. 1.1;

3 – умовне позначення виду трансформатора: *T* – триобмотковий (двообмоткові позначення не мають); *L* – трансформатор з литою ізоляцією;

4 – тип регулятора напруги: *H* – трансформатор із РПН (ПБЗ не позначається); або виконання трансформатора: *Г* – герметичний;

5 – тип трансформатора за призначенням: *C* – трансформатор для власних потреб електростанцій; *B* – трансформатор вибухобезпечний; *M* – трансформатор багатогольового призначення для живлення ланцюгів керування, місцевого освітлення і сигналізації верстатів, електроінструмента і автоматики;

6 – номінальна потужність, кВ·А;

7 – клас напруги обмотки ВН, кВ;

8 – клас напруги обмотки СН, кВ;

9 – клас напруги обмотки НН, кВ;

10 – додаткове літерне позначення;

11 – кліматичне виконання і категорія розміщення: для експлуатації в районах з помірним кліматом – *У*; з помірним і холодним кліматом – *УХЛ*; із вологим тропічним кліматом – *ТВ*; із сухим тропічним кліматом – *ТС*; із сухим або вологим тропічним кліматом – *Т*; для експлуатації у всіх районах на суші, крім районів з дуже холодним кліматом (загальне кліматичне виконання) – *O*; для експлуатації в районах з помірно-холодним морським кліматом – *M*; із тропічним морським кліматом – *ТМ*; із помірно-холодним і тропічним морським кліматом – *ОМ*; для експлуатації у всіх районах, крім районів з дуже холодним кліматом (вскліматичне виконання) – *В*.

У залежності від місця розміщення при експлуатації розрізняють наступні виконання трансформаторів (за категоріями): 1 – установка на відкритому повітрі; 2 – установка в приміщеннях, де коливання температури і вологості несуттєво відрізняються від зовнішнього середовища; 3 – закриті приміщення з природною вентиляцією, де коливання температури і вологості значно менші, ніж на відкритому повітрі; 4 – закриті приміщення з мікрокліматом; 5 – приміщення з підвищеною вологістю.

Слід зазначити, що у маркуванні трансформаторів деякі літери можуть бути відсутніми.

## 1.2. Опис схеми установки

Лабораторна установка являє собою активну частину силового трифазного двообмоткового трансформатора ТМ-40/6,3/0,4. Збережена кришка бака з усіма змонтованими на ній системами. З одного стержня магнітопроводу зняті обмотки, що дозволяє вивчити конструкцію магнітопроводу (переріз стержня, ярма, конструкцію стержня, спосіб зборки магнітопроводу, тип опресування листів електротехнічної сталі). На обмотках середнього стержня виконаний розріз, що дозволяє вивчити конструкцію обмоток, систему їх охолодження і тип обмоткового проводу. Обмотки однієї фази в робочому стані. На активній частині трансформатора присутні зовнішня та внутрішня ізоляція.

## 1.3. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з паспортними даними трансформатора, що приведені на щитку, який розміщений на кришці бака. Розшифрувати умовні позначення типу трансформатора. Визначити лінійні і фазні значення напруг і струмів ВН та НН.

2. Виконати ескіз магнітопроводу. Визначити тип магнітопроводу.

3. Визначити тип обмотки. Ознайомитися з її конструкцією та ізоляцією. Накреслити ескіз обмотки однієї фази.

4. Визначити тип системи охолодження трансформатора.

5. Ознайомитися з конструкцією кришки бака: розширювачем, вводами ВН і НН, перемикачем відгалужень.

#### 1.4. Зміст звіту

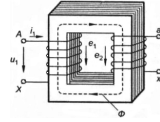
1. Короткі теоретичні відомості.
2. Опис основних та додаткових конструктивних вузлів 3-фазного силового трансформатора.
3. Літерні позначення трансформаторів.
4. Системи охолодження трансформаторів.
5. Ескіз магнітопроводу трансформатора лабораторної установки.
6. Ескіз обмоток.

#### 1.5. Контрольні запитання

1. Який пристрій називається трансформатором?
2. Із яких частин складається силовий 3-фазний трансформатор?
3. Конструкція існуючих типів магнітопроводів 3-фазних трансформаторів.
4. Із яких матеріалів виконується магнітопроводи трансформаторів, чому?
5. Конструкція обмоток 3-фазних трансформаторів.
6. Як визначити клас напруги обмоток трансформатора?
7. Поясніть конструкцію зовнішньої системи ізоляції трансформатора.
8. Поясніть конструкцію внутрішньої системи ізоляції трансформатора.
9. Яку будову мають допоміжні систем трансформатора?
10. Конструкція систем регулювання напруги 3-фазних трансформаторів.
11. Охарактеризуйте системи охолодження трансформаторів (15 шт.).
12. Розшифруйте наступні типи трансформаторів: ТМ-25/10; ТСЗ-630/10; ТМГ-1000/10/0,4; ТМЦ-80000/35/10; ТМН-2500/35/10; ОМТГ-500/110; ТРДЦН-125000/110/6,3-10,5; ТРДН-2500/110/6,3-6,3; ТДТН-25000/110/35/10; АТДЦТН-125000/220/110-68У1; ТРДНС-40000/20/10,5-10,5; ОРЦ-417000/500; ТСД-400/10/0,4; ТСГ-630/10; ТДТГ-10000/100; ТРДЦНК-80000/110/6,3-6,3У1.



## Лабораторна робота № 2



# ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Мета:** вивчити методику випробування трансформатора, дослідити його властивості в режимах НХ, КЗ і під навантаженням; навчитись визначати параметри  $T$ -подібної схеми заміщення, будувати векторні діаграми.

### 2.1. Теоретичні відомості

У трансформаторах існує магнітний зв'язок між первинною і вторинною обмотками. На рис. 2.1 наведена схема однофазного трансформатора, де I і II – первинна і вторинна обмотки;  $\underline{U}_1$  та  $\underline{U}_2$ ,  $I_1$  та  $I_2$  та,  $w_1$  та  $w_2$  – відповідно напруга, струм і число витків первинної та вторинної обмоток;  $\Phi$  – основний (робочий) магнітний потік;  $\Phi_{\sigma 1}$  та  $\Phi_{\sigma 2}$  – паразитні потоки розсіювання,  $\underline{Z}_{\text{наб}}$  – комплексний опір навантаження.

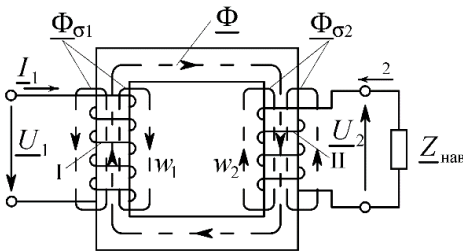


Рис. 2.1. Принципова схема однофазного трансформатора

обмотки *приведене* до числа витків первинної обмотки називається *схемою заміщення*.

Перехід від реального трансформатора до електричної схеми, яка його заміщує (імітує), проводиться в кілька етапів:

*a)* реальний трансформатор (рис. 2.1) замінюють ідеалізованим **1** (обмотки не мають опорів); в коло первинної обмотки вмикають опори  $R_1$  та  $jX_1$ , а в коло вторинної обмотки –  $R_2$  та  $jX_2$  (рис. 2.2, *a*);

При розрахунку режимів роботи і характеристик зручно магнітний зв'язок замінити електричним. У цьому випадку дослідження роботи трансформаторів спрощується: виконується розрахунок відносно простого електричного кола (а не магнітного). Електрична схема, в якій магнітний зв'язок між обмотками трансформатора замінений електричним, а число витків вторинної

- б) число витків вторинної обмотки  $w_2$  приводять до числа витків первинної  $w_1$ , в результаті чого ЕРС обмоток стають рівними:  $\underline{E}_1 = \underline{E}'_2$ ;
- в) з'єднують еквіпотенціальні точки  $a$  та  $a'$ ;  $b$  та  $b'$  (рис. 2.2, б);
- г) у схему рис. 2.2, б) додатково вводять намагнічуючий контур, по якому проходить струм НХ  $\underline{I}_0$  (рис. 2.2, в).

Усі параметри вторинної сторони схеми заміщення є приведеними до числа витків  $w_1$ . Приведені величини розраховуються за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}'_2 &= k_T \underline{E}_2; & \underline{U}'_2 &= k_T \underline{U}_2; & \underline{I}'_2 &= 1/k_T \underline{I}_2 \\ R'_2 &= k_T^2 R_2; & jX'_2 &= k_T^2 jX_2; & \underline{Z}'_{\text{наб}} &= k_T^2 \underline{Z}_{\text{наб}} \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$

де  $k_T = w_1/w_2$  – коефіцієнт трансформації трансформатора.

Тож будь-який реальний трансформатор може бути представлений еквівалентною електричною схемою заміщення рис. 2.2, б). Опори  $R_1$  та  $R_2$  відображають втрати активної потужності на нагрівання провідників обмоток, а опори  $X_1$  та  $X_2$  пропорційні величинам потоків розсіювання  $\Phi_{\sigma 1}$  та  $\Phi_{\sigma 2}$ . Ці потоки зчеплені лише з витками відповідно первинної або вторинної обмоток і не беруть участі в передачі енергії. Параметри контуру намагнічування

( $R_m$ ,  $X_m$ ) залежать від струму НХ  $\underline{I}_0$ . Опір  $R_m$  – відображає втрати активної потужності в магнітопроводі (нагрівання, перемагнічування). Величина  $X_m$  показує споживання реактивної потужності на створення робочого (основного) магнітного потоку  $\Phi$ .

Параметри схеми заміщення рис. 2.2, в) (окрім  $\underline{Z}'_{\text{наб}}$ ), є постійними величинами для кожного трансформатора. Вони залежать від конструкції магнітопроводу та обмоток, марки використаних електротехнічних матеріалів і визначаються з дослідів НХ та КЗ.

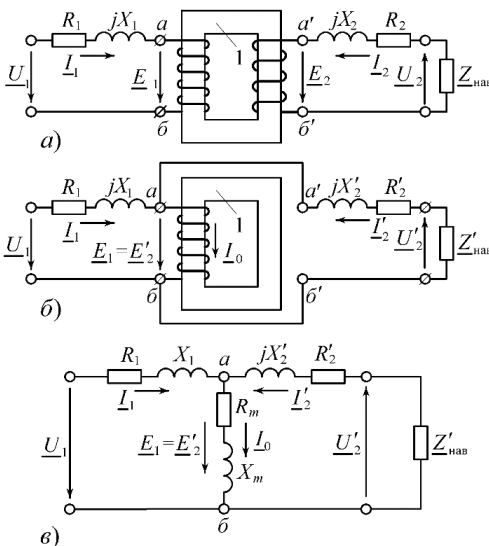


Рис. 2.2. Перехід від трансформатора до електричної схеми заміщення

Застосовуючи перший та другий закони Кірхгофа до схеми рис. 2.2, в можна записати систему рівнянь для приведеного трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_0 &= \underline{I}_1 - (-\underline{I}'_2) \\ \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 R_1 + j \underline{I}_1 X_1 \end{aligned} \right\} \quad (2.2.1)$$

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 R_1 + j \underline{I}_1 X_1 \quad (2.2.2)$$

$$\underline{E}'_2 = \underline{E}_1 = \underline{I}'_2 R'_2 + j \underline{I}'_2 X'_2 + \underline{U}'_2 \quad (2.2.3)$$

Рівняння струмів (2.2.1) можливо записати в наступному вигляді:

$$\underline{I}_0 w_1 = \underline{I}_1 w_1 - (-\underline{I}'_2 w_2). \quad (2.3)$$

Вираз (2.3) називається рівнянням магніторушійних сил (МРС) трансформатора. Змінні МРС первинної та вторинної обмоток взаємодіючи між собою створюють у магнітопроводі постійну за величиною МРС (постійний магнітний потік), який не залежить від навантаження трансформатора.

Рівняння електричної рівноваги для первинної обмотки (2.2.2) показує, що підведена до трансформатора напруга мережі витрачається на компенсацію спаду напруги в опорах  $R_1$  та  $jX_1$  і проти-ЕРС первинної обмотки.

Вираз (2.2.3) – рівняння електричної рівноваги вторинної обмотки.

Рівняння системи (2.2) повністю описують роботу трансформатора.

*Дослід неробочого ходу.* Схема вмикання трансформатора та вимірвальних приладів під час досліді НХ приведена на рис. 2.3, а). В якості первинної, як правило, використовують обмотку НН. Однофазний регулятор напруги РНО дозволяє плавно регулювати напругу джерела живлення. Змінюючи  $U_1$  в межах від  $0,5U_{1ном}$  до  $1,15U_{1ном}$  виконують кілька замірів через приблизно однакові інтервали струму НХ. За даними досліді НХ на загальній координатній площині будують залежності  $I_0 = f(U_1)$ ,  $P_0 = f(U_1)$ ,  $\cos\varphi_0 = f(U_1)$ , які називають *характеристиками неробочого ходу трансформатора*. На характеристиках відмічають точки  $I_{0,ном}$ ,  $P_{0,ном}$  і  $\cos\varphi_{0,ном}$ , що відповідають номінальній напрузі НХ  $U_{1,0} = U_{1ном}$  – рис. 2.3, б).

За даними досліді НХ отриманими при  $U_{1,0} = U_{1ном}$  визначають номінальні дані трансформатора та параметри схеми заміщення рис. 2.2, в):

а) струм неробочого ходу у відсотках від номінального:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{1ном}} \cdot 100\% ; \quad (2.4)$$

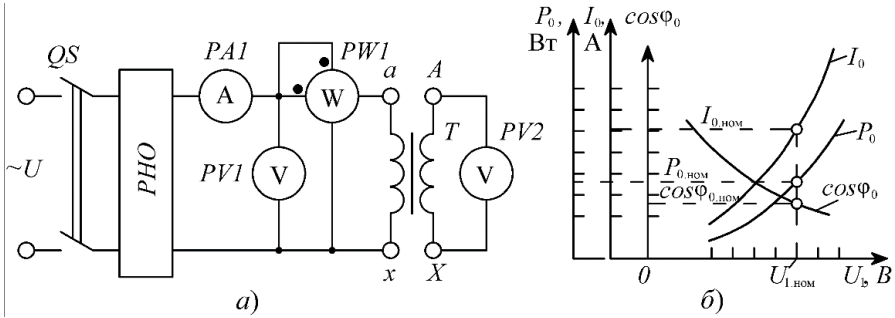


Рис. 2.3. Схема досліду НХ трансформатора а) та характеристики НХ б)

б) коефіцієнт потужності неробочого ходу:

$$\cos\Phi_0 = \frac{P_0}{U_{1,0}I_0}; \quad (2.5)$$

в) коефіцієнт трансформації:

$$k_T = \frac{U_{10}}{U_{20}}; \quad (2.6)$$

г) суму опорів первинної обмотки і контуру намагнічування:

$$\left. \begin{aligned} R_1 + R_m &= \frac{P_0}{I_0^2}, & Z_1 + Z_m &= \frac{U_{1,0}}{I_0}, \\ X_1 + X_m &= \sqrt{(Z_1 + Z_m)^2 - (R_1 + R_m)^2} \end{aligned} \right\}. \quad (2.7)$$

Для сучасних силових трансформаторів  $i_0 \approx 0,5-3,0\%$ , тобто  $I_0 \ll I_{1,ном}$ . Але оскільки  $R_1 \ll R_m$ , то активними втратами в первинній обмотці від струму НХ нехтують. Тобто, приймають, що потужність  $P_0$  витрачається на компенсацію втрат в магнітопроводі:  $P_0 = I_0^2(R_1 + R_m) = I_0^2R_1 + I_0^2R_m \approx I_0^2R_m$ , звідки:

$$R_m = \frac{P_0}{I_0^2}. \quad (2.8)$$

Опір  $X_m$  визначається робочим потоком  $\Phi$ , а  $X_1$  – значно меншим потоком розсіювання  $\Phi_{\sigma 1}$  (тобто  $X_1 \ll X_m$ ), тому вважають  $X_1 + X_m \approx X_m$ , і:

$$Z_m = \frac{U_{1,0}}{I_0}, \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (2.9)$$



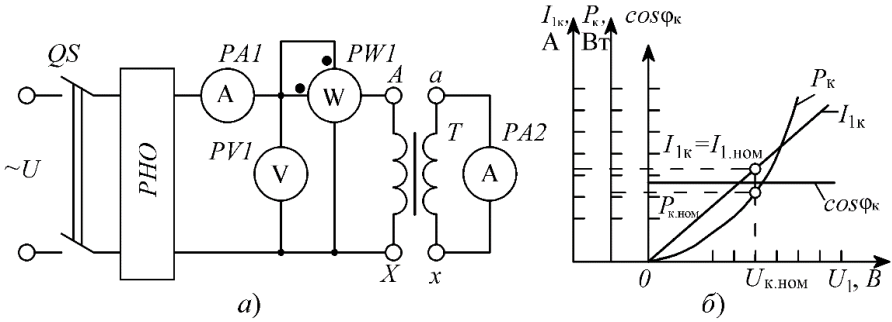


Рис. 2.5. Схема досліду КЗ а) та характеристики КЗ трансформатора б)

При проведенні досліду КЗ до первинної обмотки підводиться напруга, яка для сучасних силових трансформаторів складає 5-15% від  $U_{1ном}$ . Втрати в сталі пропорційні квадрату напруги  $U_1$ . Таким чином при досліді КЗ втрати в магнітопроводі складуть 0,25-2,25% від втрат НХ при  $U_1 = U_{1ном}$ . Тому ними в досліді КЗ нехтують, а отже і струмом  $I_0$ , (намагнічуючим контуром  $Z_m = R_m + jX_m$  в схемі рис. 2.2, в).

За даними досліду КЗ отриманими при  $I_{1к} = I_{1ном}$  визначають паспортні дані трансформатора та параметри схеми заміщення рис. 2.2, в):

а) напругу короткого замикання у відсотках від номінальної:

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1ном}} \cdot 100\% ; \quad (2.11)$$

б) коефіцієнт потужності в режимі короткого замикання:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_{1к} I_k} ; \quad (2.12)$$

в) опори короткого замикання:

$$\left. \begin{aligned} Z_k &= Z_1 + Z_2' = \frac{U_k}{I_{1ном}}, \\ R_k &= R_1 + R_2' = \frac{P_k}{I_{1ном}^2}, \\ X_k &= X_1 + X_2' = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \end{aligned} \right\} . \quad (2.13)$$

Звичайно приймають схему заміщення рис. 2.2, в) симетричною:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 = Z_2 = \frac{Z_{\kappa}}{2}, \\ R_1 = R_2 = \frac{R_{\kappa}}{2}, \\ X_1 = X_2 = \frac{X_{\kappa}}{2} \end{aligned} \right\}. \quad (2.14)$$

Напряга  $u_{\kappa}$  має активну і реактивну складові:

$$\left. \begin{aligned} u_{\kappa,а} = I_{\text{НОМ}} \cdot \frac{R_{\kappa}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% = u_{\kappa} \cos\varphi_{\kappa}, \\ u_{\kappa,р} = I_{\text{НОМ}} \cdot \frac{X_{\kappa}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% = u_{\kappa} \sin\varphi_{\kappa} \end{aligned} \right\}. \quad (2.15)$$

Отримані з досліду  $K3$  значення  $P_{\kappa,НОМ}$  і  $u_{\kappa,НОМ}$  необхідно привести до робочої температури обмоток  $\theta_2=75^{\circ}\text{C}$ :

$$\left. \begin{aligned} P'_{\kappa,НОМ} &= P_{\kappa,НОМ} [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)] \\ u'_{\kappa,а,НОМ} &= u_{\kappa,а,НОМ} [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)] \end{aligned} \right\}, \quad (2.16)$$

де  $\alpha = 0,004$  – температурний коефіцієнт для міді та алюмінію;

$\theta_1$  – температура обмоток трансформатора при проведенні досліду,  $^{\circ}\text{C}$ .

Температура впливає лише на активний опір обмоток, тому приводити до робочої температури потрібно лише активну складову напруги  $K3$ .

За відомою величиною  $u_{\kappa}$  можна визначити усталений струм  $K3$  у реальних умовах експлуатації (при  $U_1 = U_{1\text{НОМ}}$ ):

$$I_{\kappa} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{Z_{\kappa}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\frac{u_{\kappa}}{100\%} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}}} = \frac{100\%}{u_{\kappa}} I_{\text{НОМ}}. \quad (2.17)$$

Векторна діаграма трансформатора при  $K3$  побудована на рис. 2.6. При побудові не враховувався струм  $\text{НХ } I_0$ .

При аналізі режимів роботи трансформатора під навантаженням користуються схемою заміщення рис. 2.2, в) та відповідною системою рівнянь (2.2). Для наочності застосовують векторну діаграму. ВД будують для приведенного трансформатора. Тоді довжина векторів, які зображують параметри первинної та вторинної сторони буде співрозмірною.

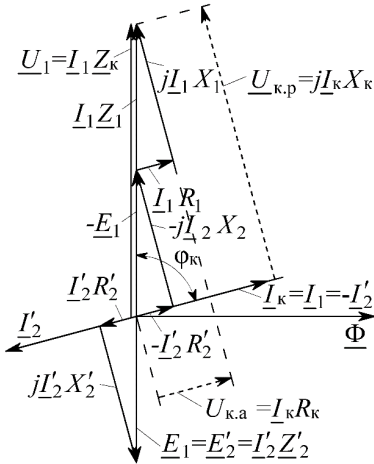


Рис. 2.6. Векторна діаграма трансформатора в режимі КЗ

На рис. 2.7 побудовані ВД для навантаження різного характеру.

Вихідними даними для побудови ВД є: величина та характер навантаження ( $Z_{\text{нав}} = R_{\text{нав}} + jX_{\text{нав}}$ ); параметри  $T$ -подібної схеми заміщення (розраховані за результатами дослідів НХ і КЗ).

Розглянемо детально порядок побудови векторної діаграми при активно-індуктивному навантаженні (рис. 2.7, б).

1. Проводять координатні осі, обирають масштаби магнітного потоку ( $m_{\Phi}$ , Вб/см), напруги ( $m_U$ , В/см) та струму ( $m_I$ , А/см). Усі побудови виконують в масштабі. Опір навантаження  $Z_{\text{нав}}$  приводять до первинної сторони.

2. Горизонтально відкладають вектор основного магнітного потоку, величина якого:

$$\Phi = \frac{E_1}{4,44 \cdot f \cdot w_1} \approx \frac{U_{\text{іном}}}{4,44 \cdot f \cdot w_1}. \quad (2.18)$$

3. Під кутом  $\alpha$  до  $\Phi$  у сторону випередження проводять вектор  $I_0$ ; кут  $\alpha$  визначається виразом  $\alpha = 90^\circ - \psi_1 \approx 90^\circ - \varphi_{1,0}$  (рис. 2.4), тобто:

$$\alpha \approx 90^\circ - \arccos\left(\frac{P_0}{U_{10} I_0}\right). \quad (2.19)$$

4. Під кутом  $90^\circ$  до  $\Phi$  в сторону відставання проводять вектори ЕРС обмоток  $E_1 = E'_2$  (величина векторів  $E_1 = E'_2 \approx U_{\text{іном}}$ ).

5. Під кутом  $\psi_2$  до  $E'_2$  будують вектор приведенного струму навантаження  $I'_2$ . Напрямок  $I'_2$  залежить від характеру навантаження вторинної обмотки. Величина кута  $\psi_2$  визначається виразом:

$$\psi_2 = \arctg\left(\frac{X'_2 + \text{Im}(Z'_{\text{нав}})}{R'_2 + R'_{\text{нав}}}\right) = \arctg\left(\frac{X'_2 \pm X'_{\text{нав}}}{R'_2 + R'_{\text{нав}}}\right). \quad (2.20)$$

де «+» для активно-індуктивного, «-» – для активно-ємнісного навантаження.

6. Від кінця вектора ЕРС  $\underline{E}'_2$  відкладають вектори:  $-j\underline{I}'_2 X'_2$  (перпендикулярний  $\underline{I}'_2$  і відстає на  $90^\circ$ ) та  $-\underline{I}'_2 R'_2$  (паралельний  $\underline{I}'_2$  і відстає на  $180^\circ$ ). Три вектори в сумі дадуть  $\underline{U}'_2$ , який випереджає при активно-індуктивному навантаженні (відстає при активно-ємнісному) вектор  $\underline{I}'_2$  на кут  $\varphi_2$  :

$$\varphi_2 = \arctg\left(\frac{X'_{\text{наб}}}{R'_{\text{наб}}}\right). \quad (2.21)$$

7. З початку координат відкладають вектора  $-\underline{I}'_2$  (паралельний  $\underline{I}'_2$  і відстає на  $180^\circ$ ). Сума векторів  $\underline{I}_0$  та  $-\underline{I}'_2$  дасть струм первинної обмотки  $\underline{I}_1$  .

8. Проводять вектор  $-\underline{E}_1$ , від кінця якого послідовно відкладають  $\underline{I}_1 R_1$  (паралельний  $\underline{I}_1$ ) та  $j\underline{I}_1 X_1$  (перпендикулярний  $\underline{I}_1$  і випереджає його на  $90^\circ$ ). Отримаємо вектор первинної напруги  $\underline{U}_1$ , що випереджає  $\underline{I}_1$  на кут  $\varphi_1$  .

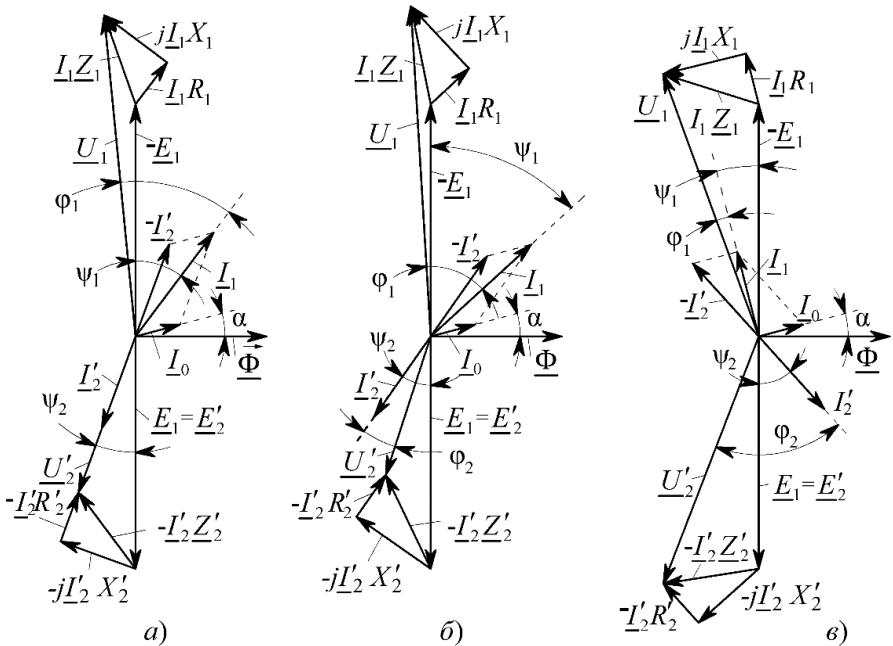


Рис. 2.7. Векторні діаграми однофазного трансформатора при навантаженні:  
 а) активне; б) активно-індуктивне; в) активно-ємнісне

Іноді ВД будують з метою визначення ЕРС обмоток трансформатора. У цьому випадку задані параметри вторинної обмотки:  $\underline{U}_2$ ;  $\underline{I}_2$ ;  $\cos \varphi_2$  та коефіцієнт трансформації. Визначають приведені величини  $\underline{U}'_2$  та  $\underline{I}'_2$ , будують їх на координатній площині під фазовим кутом  $\varphi_2$  один до одного. Вектори ЕРС  $\underline{E}'_2 = \underline{E}_1$  отримують геометричним додаванням векторів  $\underline{U}'_2$ ,  $\underline{I}'_2 R'_2$  та  $j \underline{I}'_2 X'_2$  згідно рівняння (2.3).

Зміною напруги трансформатора  $\Delta U$  називають різницю вторинних напруг при  $HX$  та під навантаженням (при  $U_1 = U_{1\text{ном}} = \text{const}$ ,  $f_1 = \text{const}$ ) виражену у відсотках від вторинної напруги неробочого ходу:

$$\Delta U = \frac{U_{2,0} - U_2}{U_{2,0}} \cdot 100\% . \quad (2.22)$$

Зміна напруги – важлива експлуатаційна характеристика трансформаторів. Визначати  $\Delta U$  з допомогою побудови ВД незручно із-за відносно малого значення і неточності графічної побудови. Тому користуються аналітичною формулою, яка витікає із ВД як геометричної побудови:

$$\Delta U = k_3 \left( u_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + u_{\text{кр}} \sin \varphi_2 \right) + \frac{k_3^2}{200} \left( u_{\text{ка}} \cos \varphi_2 - u_{\text{ка}} \sin \varphi_2 \right)^2 , \quad (2.23)$$

де  $k_3 = \frac{I_{2\text{нав}}}{I_{2\text{ном}}}$  – коефіцієнт завантаження трансформатора.

Останній доданок у рівнянні (2.23) малий, тому на практиці користуються спрощеною формулою:

$$\Delta U = k_3 \left( u_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + u_{\text{кр}} \sin \varphi_2 \right) . \quad (2.24)$$

На рис. 2.8, а приведена залежність  $\Delta U = f(\cos \varphi_2)$ , яка побудована за рівнянням (2.24) для  $k_3 = 1$ . З графіка видно, що при активному навантаженні  $\cos \varphi_2 = 1$  величина  $\Delta U$  незначна. При активно-індуктивному навантаженні  $\cos(+\varphi_2)$   $\Delta U$  зростає ( $U_2$  знижується) і досягає максимально можливого значення при  $\cos \varphi_2 = \cos \varphi_{\text{к}}$ . При активно-ємнісному навантаженні  $\cos(-\varphi_2)$  величина  $\Delta U$  зменшується ( $U_2$  зростає) і може стати навіть від'ємною, тобто  $U_2$  може перевищити напругу неробочого ходу  $U_{2,0}$ .

Зовнішньою характеристикою трансформатора називають залежність  $U_2 = f(I_2)$ , або  $U_2 = f(k_3)$  (при  $U_1 = U_{1,ном} = \text{const}$ ,  $f_1 = \text{const}$  і  $\cos\varphi_2 = \text{const}$ ). Для її побудови може бути використана формула:

$$U_2 = f(k_3) = U_{20} - \frac{\Delta U}{100} \cdot U_{20} = U_{20} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U}{100}\right). \quad (2.25)$$

Зовнішні характеристики трансформатора, що побудовані для різних значень коефіцієнта потужності  $\cos\varphi_2$  приведені на рис. 2.8, б).

Причиною зниження  $U_2$  з ростом навантаження ( $I_2$ ) є спад напруги на опорах вторинної обмотки ( $R_2, X_2$ ). Зростання напруги  $U_2$  при ємнісному характері навантаження пов'язане з тим, що ємність по відношенню до вторинної обмотки є генератором реактивної потужності. Протікання останньої від навантаження до трансформатора приводить до зростання напруги.

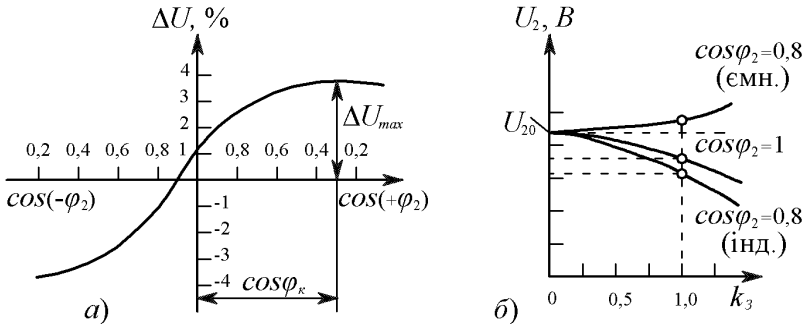


Рис. 2.8. Залежність  $\Delta U = f(\cos\varphi_2)$  а) та зовнішні характеристики силового трансформатора б)

При передачі електричної енергії із первинної обмотки трансформатора до вторинної в ньому виникають втрати енергії, величину яких характеризує коефіцієнт корисної дії (ККД).

ККД трансформатора - це відношення потужності  $P_2$ , що віддається навантаженню до потужності  $P_1$ , яка надходить в первинну обмотку:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1}. \quad (2.26)$$

На практиці ККД трансформатора визначається за формулою:

$$\eta = 1 - \frac{k_3^2 \cdot P_k + P_{10}}{k_3^2 \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2 + k_3^2 \cdot P_k + P_{10}}. \quad (2.27)$$

На рис. 2.9 приведені криві залежності ККД трансформатора від навантаження. При  $k_3 = 0$  та  $\eta = 0$ , потужність  $P_2 = 0$ . З ростом навантаження ККД підвищується, так як в енергетичному балансі зменшується питома вага магнітних втрат в сталі (не змінюються з навантаженням). При деякому значенні  $k_{3,опт}$  ККД досягає максимуму, після чого починає зменшуватися з ростом навантаження. Причиною цього є сильне зростання електричних втрат в обмотках, які зростають пропорційно квадрату струму, тобто  $k_3^2$  в той час, як корисна потужність  $P_2$  зростає лише пропорційно  $k_3$ .

Максимальна величина ККД в потужних трансформаторах досягає 0,98-0,99, в трансформаторах малої потужності – 0,6-0,7.

## 2.2. Опис схеми установки

У лабораторному стенді використовується однофазний трансформатор типу ОСО. Схема лабораторної установки приведена на рис. 2.10. Подача змінної напруги 220 В на стенд здійснюється перемикачем  $QS$ . Для зміни первинної напруги досліджуваній трансформатор  $T$  підключений до мережі через лабораторний автотрансформатор (ЛАТР)  $AT$ . Навантаження трансформатора

може змінюватися за величиною та характером, для чого в коло II-ї обмотки введені навантажувальні резистори  $R1-R4$ , дросель  $L$  та конденсатор  $C$ . Ці елементи вмикаються та вимикаються тумблерами  $S2-S7$ . Кнопка  $SB$  служить для створення штучного короткого замикання вторинної обмотки під час проведення дослідів КЗ. Встановлені на лицьовій панелі лабораторної установки прилади дозволяють вимірювати підведену до трансформатора активну потужність  $P_1$  ( $PW1$ ), струм

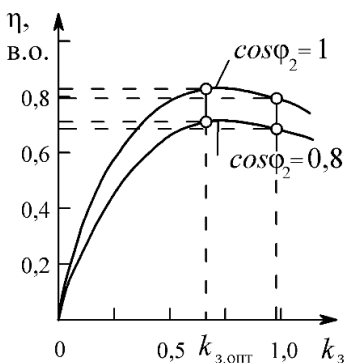


Рис. 2.9. Залежність ККД трансформатора від навантаження

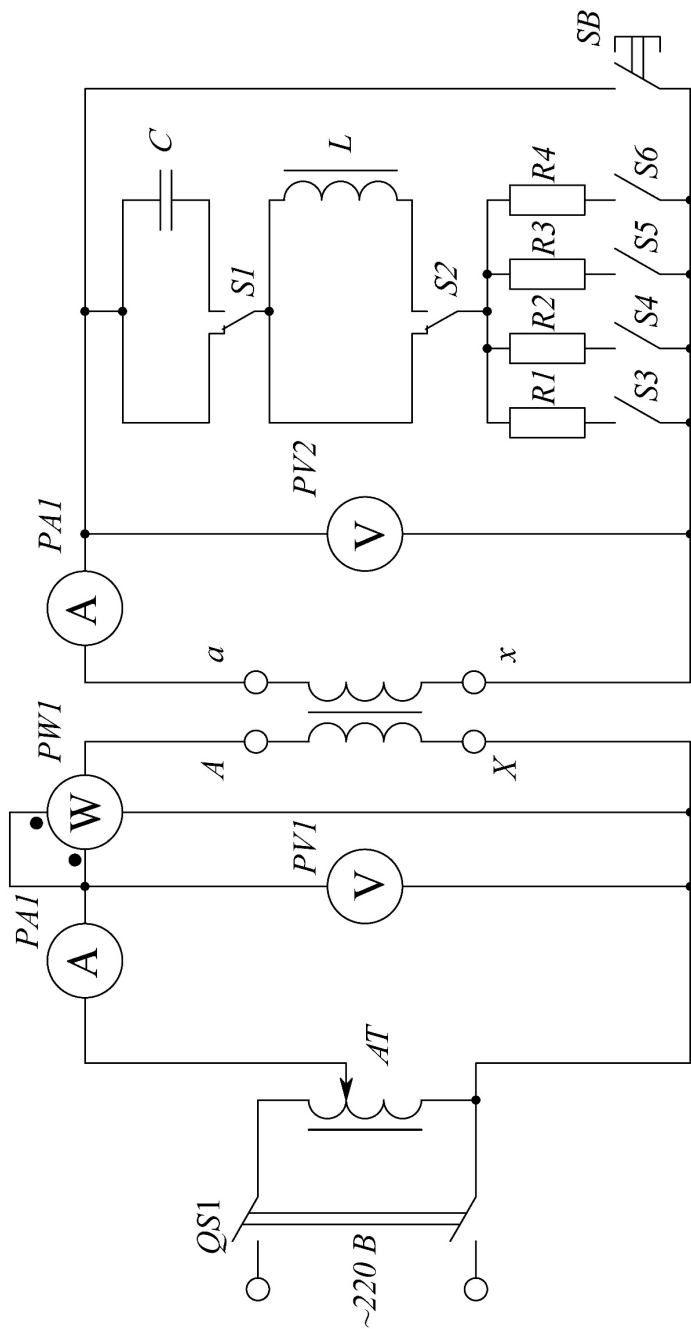


Рис. 2.10. Принципова електрична схема установки для дослідження однофазного трансформатора

первинної  $I_1$  ( $PA1$  та  $PA2$ ) і вторинної  $I_2$  ( $PA3$ ) обмоток, а також напругу обмоток  $U_1$  та  $U_2$  (відповідно  $PV1$  та  $PV2$ ). Тумблер  $SI$  служить для переключення між  $PA1$  та  $PA2$ . Прилад  $PA1$  – міліамперметр, що використовується для вимірювання струму в режимі НХ, а прилад  $PA2$  – це амперметр для вимірювання первинного струму в режимах навантаження та КЗ.

### 2.3. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з лабораторною установкою, принциповою схемою рис. 2.10, приладами. Записати паспортні дані трансформатора. Визначити ціни поділок усіх приладів. Встановити регулятор  $AT$  у положення «0».

2. Дослід неробочого ходу. Подати на стенд напругу перемикачем  $QS$ . Тумблером  $SI$  підключити в схему міліамперметр  $PA1$ . Регулятором  $AT$  встановити на первинній обмотці трансформатора напругу  $0,5U_{1ном}$ . Зняти показання приладів і отримані дані занести в табл. 2.1. Змінюючи  $U_1$  від  $0,5U_{1ном}$  до  $1,15U_{1ном}$  через рівні проміжки струму НХ заповнити табл. 2.1. По закінченні дослідів знизити регулятором  $AT$  напругу до нуля.

Таблиця 2.1 Дослід холостого ходу однофазного трансформатора

№ дослідів	Виміряно				Обчислено				
	$U_{1,0},$ $B$	$U_{2,0},$ $B$	$I_{1,0},$ $A$	$P_0,$ $Вт$	$k_T$	$R_0,$ $Ом$	$X_0,$ $Ом$	$Z_0,$ $Ом$	$\cos\varphi_{10},$ <i>в.о.</i>
1	$0,5U_{1ном}$								
...									
7	$1,15U_{1ном}$								

3. Дослід короткого замикання. Переконайтеся, що ручка регулятора  $AT$  знаходиться в положенні «0». Тумблером  $SI$  підключити в схему амперметр  $PA2$ . Натиснути і утримувати кнопку  $SB$ . Збільшуючи напругу регулятором  $AT$  встановити в первинній обмотці струм  $I_{1ном}$  (за показаннями амперметра  $PA2$ ). Зняти показання приладів і отримані дані занести до табл. 2.2. Повторити вимірювання для семи значень струму  $I_{1к}$  в діапазоні від 0 до  $1,2 I_{1ном}$ . Знизити ЛАТРОм напругу до нуля.

Таблиця 2.2 Дослід короткого замикання трансформатора

№ досліду	Виміряно				Обчислено				
	$U_{1к},$ <i>B</i>	$I_{1к},$ <i>A</i>	$I_{2к},$ <i>A</i>	$P_{1к},$ <i>Bm</i>	$U_{к},$ %	$R_{к},$ <i>Ом</i>	$X_{к},$ <i>Ом</i>	$Z_{к},$ <i>Ом</i>	$\cos\varphi_{к},$ <i>в.о.</i>
1		0							
...									
7		$I_{1ном}$							

4. Робота трансформатора при активному навантаженні. Встановити номінальну напругу на первинній обмотці трансформатора  $U_{1.ном}$ . Почергово підключити тумблерами  $S4-S7$  резистори  $R1-R4$  у вторинне коло трансформатора. Записати для кожного досліду показання приладів у табл. 2.3.

5. Робота трансформатора при активно-індуктивному навантаженні. Підключити тумблером  $S3$  котушку індуктивності  $L$ . Вмикаючи резистори  $R1-R4$  записувати показання приладів до табл. 2.3. Відключити  $S3$ .

6. Робота трансформатора при активно-ємнісному навантаженні. Підключити тумблером  $S2$  конденсатор  $C$ . Вмикаючи резистори  $R1-R4$  записувати показання приладів до табл. 2.3. Відключити  $S2$ . Встановити ручку регулятора  $AT$  на нульову позначку, відключити стенд від мережі.

Таблиця 2.3 Дослідження режимів навантаження

№ досліду	Виміряно					Обчислено		Примітка
	$U_1,$ <i>B</i>	$I_1,$ <i>A</i>	$P_1,$ <i>Bm</i>	$U_2,$ <i>B</i>	$I_2,$ <i>A</i>	$\cos\varphi_1,$ <i>в.о.</i>	$\Delta U,$ %	
активне навантаження								
1								$R_1,$
2								$R_1+R_2,$
3								$R_1+R_2+R_3$
4								$R_1+R_2+R_3+R_4$
активно-індуктивне навантаження								
5-8								$R_1-R_4, L$
активно-ємнісне навантаження								
9-12								$R_1-R_4, C$

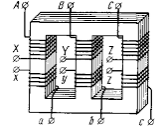
## 2.4. Зміст звіту

1. Паспортні дані трансформатора.
2. Принципова схема лабораторної установки рис. 2.10.
3. Дані вимірювань в режимах НХ, КЗ та навантаження (табл. 2.1-2.3).
4.  $T$ -подібна схема заміщення трансформатора з параметрами.
5. Розрахувати  $\Delta U$  трансформатора (у %) при зміні навантаження і порівняти з даними дослідів (склад навантаження задає викладач).
6. За даними табл. 2.3 побудувати залежності:  $I_1 = f(I_2)$ ;  $U_2 = f(I_2)$ ;  $\cos\varphi_1 = f(I_2)$ ;
7. Розрахувати за рівнянням (2.27) ККД трансформатора для  $k_3 = 0$ ; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25. Побудувати залежність  $\eta = f(k_3)$ .
8. Побудувати векторну діаграму трансформатора для одного із значень навантаження (за завданням викладача).
9. Висновки за роботою.

## 2.5. Контрольні запитання

1. Дослід неробочого ходу (схема, порядок проведення, обробка результатів, векторна діаграма).
2. Дослід короткого замикання (схема, порядок проведення, обробка результатів, векторна діаграма).
3. Режим роботи трансформатора під навантаженням, в.д.:
  - а) активне навантаження;
  - б) активно-індуктивне навантаження;
  - в) активно-ємнісне навантаження.
4. Що називається приведеним трансформатором? Запишіть формули, за якими розраховуються приведені величини.
5. Чому в досліді КЗ на первинну обмотку подається знижена напруга?
6. Характеристики трансформатора (НХ, КЗ, зовнішня, ККД).
7. Чому при індуктивному навантаженні напруга на вторинній обмотці трансформатора зменшується, а при ємнісній – збільшується?
8. Які фізичні процеси (явища) перетворення енергії в реальному трансформаторі відображають параметри  $T$ -подібної схеми заміщення.
9. Поясніть комплексні рівняння трансформатора.
10. Поясніть, що буде при підключенні первинної обмотки трансформатора до мережі постійного струму (напруга мережі рівна  $U_{1ном}$ ).

## Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО  
ТРАНСФОРМАТОРА

**Мета:** вивчити методику випробування трифазного трансформатора, дослідити його характеристики за різних схем з'єднання обмоток.

## 3.1. Теоретичні відомості

На рис. 3.1, а) представлено конструктивну схему трифазного трансформатора. До первинної обмотки підводиться симетрична система напруг  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ , які діють у відповідних фазах і наводять в стержнях магнітопроводу магнітні потоки  $\underline{\Phi}_A, \underline{\Phi}_B, \underline{\Phi}_C$  (рис. 3.1, б).

Трифазний тристержневий трансформатор подається у вигляді трьох однофазних (рис. 3.2, а). Стержні 1, 2, 3 можна об'єднати в один, через який буде проходити сума магнітних потоків фаз. При симетричній системі первинних напруг –  $\underline{\Phi}_A + \underline{\Phi}_B + \underline{\Phi}_C = 0$ , тому можна обійтися без об'єданого середнього стержня. Отриманий таким чином симетричний тристержневий трансформатор

(рис. 3.2, б) буде ще компактнішим, якщо вилучити ярма фази В (рис. 3.2, в). Викликана цим магнітна несиметрія фаз незначна і позначається лише на струмі НХ окремих фаз. У середній фазі струм НХ на 5-7% менший, ніж у крайніх фазах. Але струм НХ мало впливає на струм навантаження.

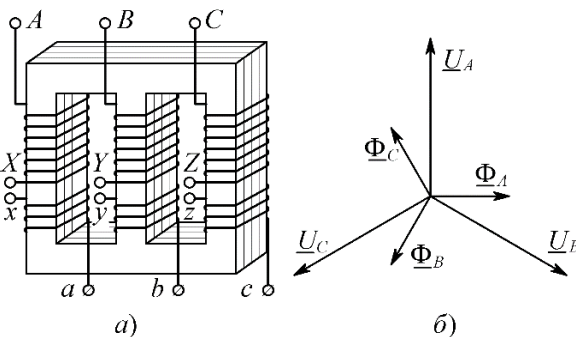


Рис. 3.1. Конструктивна схема трифазного трансформатора а) і векторна діаграма фазних напруг і потоків б)

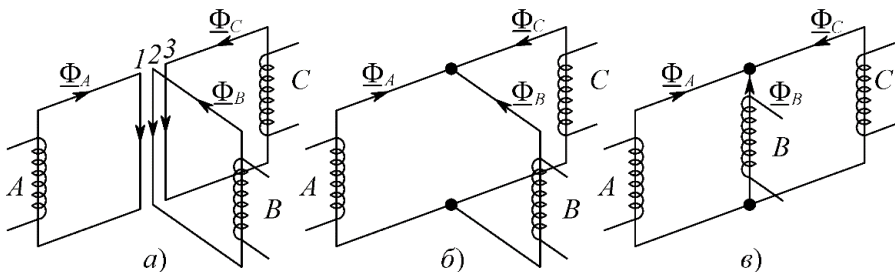


Рис. 3.2. Утворення тристержневого трифазного трансформатора з трьох однофазних

Для зменшення магнітної несиметрії тристержневого магнітопроводу, перетин ярем виконують на 10-15% більшим ніж перетин стержнів, що зменшує їх магнітний опір.

Отже, фази трифазного трансформатора знаходяться практично в однакових умовах, якщо система первинних напруг симетрична. Рівняння та схема заміщення однофазного трансформатора справедливі також для кожної фази трифазного трансформатора. Виключенням є режими НХ і несиметричного навантаження, на які істотно впливає схема з'єднання обмоток.

При підведенні до первинної обмотки синусоїдальної напруги в магнітопроводі виникає синусоїдальний магнітний потік  $\underline{\Phi} = \Phi_m \sin(\omega \cdot t)$ . Із-за явища магнітного насичення матеріалу магнітопроводу залежність між магнітним потоком  $\Phi$  і намагнічуючим струмом  $i_{0,p}$  нелінійна. Величина і форма кривої  $i_{0,p}$  визначається графічно. На рис 3.3, а) в II-му квадранті зображено закон зміни потоку в часі  $\Phi = f_1(t)$ , а в I-му –  $\Phi = f_2(i_{0,p})$  – крива намагнічування матеріалу магнітопроводу. Для побудови графіка  $i_{0,p} = f_3(t)$  на кривій  $\Phi = f_1(t)$  обирають ряд точок (1, 2, 3) і проєктують їх на  $\Phi = f_2(i_{0,p})$  (знаходять  $i_{0,p}$ , що відповідають обраним  $\Phi$ ). Проводять вертикальні лінії через точки 1, 2, 3 на осі  $i_{0,p}$  у IV-му квадранті до перетину з горизонтальними лініями, що проведені із точок 1, 2, 3 на осі часу цього квадранта. Із геометричної побудови видно, що при синусоїдальній формі кривої  $\Phi = f_1(t)$  намагнічуючий струм має пікоподібну форму.

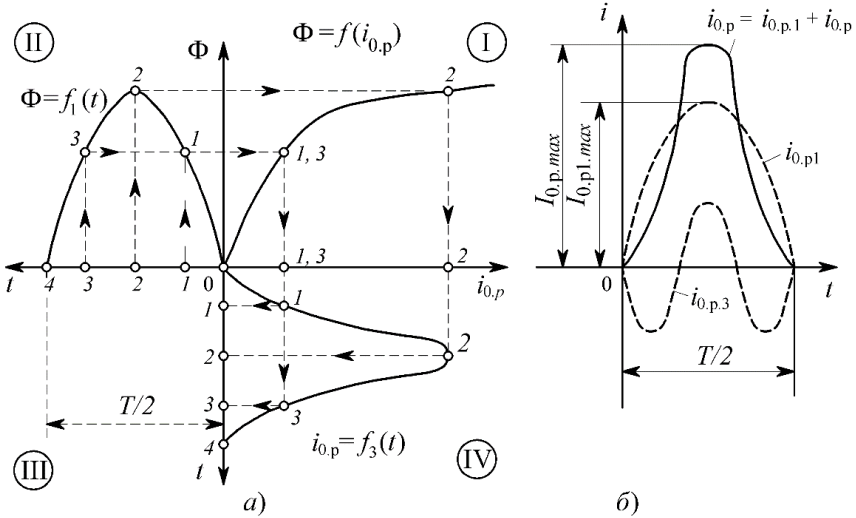


Рис. 3.3 Побудова кривої намагнічуючого струму  $i_{0,p} = f(t)$  а і розкладання її на складові в ряд Фур'є б)

Після розкладання кривої  $i_{0,p}$  в ряд Фур'є (рис. 3.3, б) видно, що в намагнічуючому струмі окрім основної гармоніки  $i_{0,p,v1}$ , ярко виражена третя  $i_{0,p,v3}$ . Це стосується лише реактивної складової струму КЗ, бо активна складова струму НХ  $i_{0,a}$  синусоїдальна.

Несинусоїдальний намагнічуючий струм  $i_{0,p}$  можна представити як суму синусоїдальних складових:

$$i_{0,p} = I_{0,p1,m} \sin(\omega t) + I_{0,p3,m} \sin(3\omega t) + I_{0,p5,m} \sin(5\omega t) + \dots \quad (3.1)$$

Треті гармоніки  $i_{0,p}$  для фаз трифазного трансформатора

$$\left. \begin{aligned} i_{0,p,v3A} &= I_{0p3Am} \sin(3\omega t) \\ i_{0,p,v3B} &= I_{0p3Bm} \sin(3(\omega t - 120^\circ)) = I_{0,p,v3,Bm} \sin(3\omega t) \\ i_{0,p,v3C} &= I_{0p3Cm} \sin(3(\omega t - 240^\circ)) = I_{0,p,v3,Cm} \sin(3\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

співпадають за фазою, тобто в будь-який момент часу мають однаковий напрям. Це суттєво впливає на процеси, що супроводжують намагнічування сердечників при трансформуванні трифазного струму.

Якщо обмотки трифазного тристержневого трансформатора з'єднана за схемою «зірка – зірка» ( $Y/Y$  – рис. 3.4, а) шлях для протікання 3-х гармонік відсутній, тому струм  $i_{0,p}$  буде синусоїдальним. Крива ж потоку  $\Phi = f(t)$  спотворюється та набуває сідлоподібної форми, що містить 3-ю гармоніку  $\Phi_{v3}$  (рис. 3.5, а). Потоки  $\Phi_{v3}$  не можуть замкнутися в тристержневому магнітопроводі, оскільки направлені однаково. Тому вони замикаються через оливу, стінки бака, повітря, викликаючи тим самим додаткові втрати потужності.

Несинусоїдальний потік  $\Phi = \Phi_{v1} \sin(\omega t) + \Phi_{v3} \sin(3\omega t)$  наводить у фазних обмотках несинусоїдальні ЕРС:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} = \omega w \Phi_{v1} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + 3\omega \Phi_{v3} \sin\left(3\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = e_1 + e_3 \quad (3.3)$$

Потрійна частота потоку  $\Phi_{v3}$  призводить до появи значної ЕРС 3-ї гармоніки  $e_{v3}$ , що різко збільшує амплітуду фазної ЕРС  $E_{max}$  (рис. 3.5, б) і небезпечно для ізоляції обмоток.

Амплітуда ЕРС третьої гармоніки  $E_{max,v3}$  в групі із трьох однофазних трансформаторів може досягати 45-60 % від  $E_{max1}$ . Лінійні ЕРС і напруги залишаються синусоїдальними та не містять 3-ї гармоніки.

Якщо обмотки трансформатора з'єднані за схемою «зірка з нульовим виводом - зірка» ( $Y_n/Y$  – рис. 3.4, б), то 3-ті гармоніки  $i_{0,p,v3}$  замикаються по нейтральному проводу. Намагнічуючі струми фаз ( $i_{0,p,A}$ ,  $i_{0,p,B}$ ,  $i_{0,p,C}$ ) містять 3-тю гармоніку, а потоки  $\Phi$  фаз синусоїдальні (рис. 3.3, а). Відтак фазні ЕРС теж синусоїдальні.

Схеми, за яких обмотки будь-якої сторони (ВН, НН) з'єднані в трикутник ( $\Delta$ ) найбільш бажані, бо не мають недоліків розглянутих вище схем.

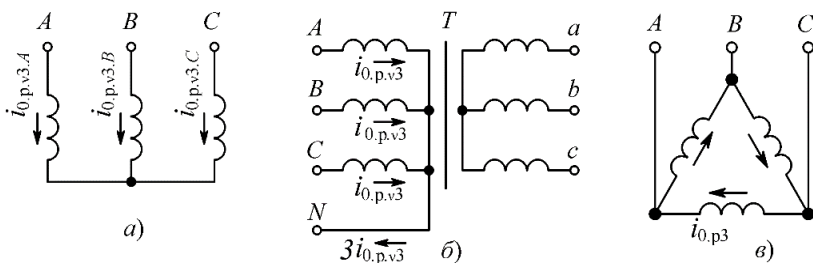


Рис. 3.4. Напрямок протікання струмів 3-ї гармоніки за різних схем з'єднання обмоток

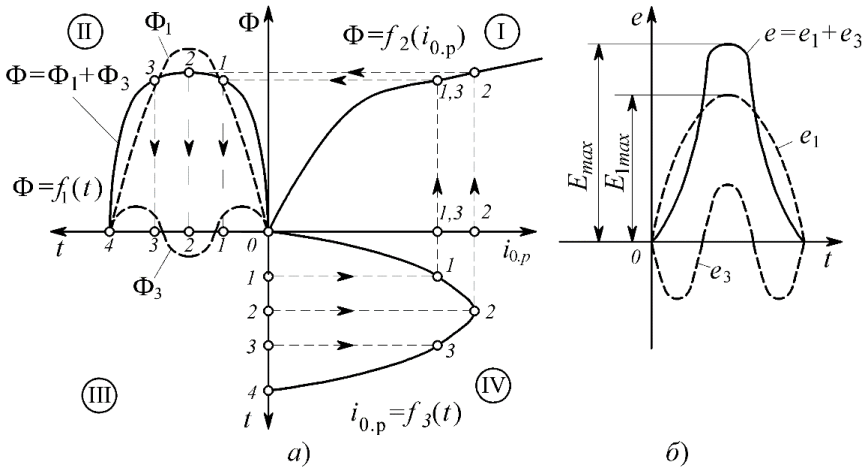


Рис. 3.5. Побудова кривої  $\Phi = f(t)$  при синусоїдальній формі  $i_{0,p}$  а), форма кривої ЕРС при несинусоїдальному магнітному потоці б)

Якщо I-на обмотка має схему з'єднання  $\Delta$ , то струми 3-ї гармоніки безперешкодно замикаються в контурі фазних обмоток (рис. 3.4, в). Значить фазні потоки та ЕРС синусоїдальні.

Якщо ж I-на обмотка з'єднана за схемою  $Y$ , а II-на обмотка – за схемою  $\Delta$ , а то ЕРС 3-ї гармоніки  $e_{v3}$ , наведені у ній створюють у замкненому контурі трикутника струм 3-ї гармоніки. Цей струм наводить у магнітопроводі магнітні потоки 3-ї гармоніки  $\Phi_{2v3}$ , що направлені зустрічно до потоків 3-ї гармоніки від намагнічуючого струму  $\Phi_{1v3}$ . У результаті сумарний потік  $\Phi_{\Sigma v3} = \Phi_{1v3} + \Phi_{2v3}$  значно послаблюється і практично не впливає на характеристики трансформатора.

Під час експлуатації трифазних трансформаторів часто зустрічаються випадки нерівномірного розподілу струмів за фазами внаслідок нерівномірного розподілу однофазних приймачів навантаження, а також унаслідок аварійних режимів, що виникають при однофазних і двофазних КЗ або при обриві однієї з фаз лінії електропередавання. Несиметрія II-ї напруги трансформатора, що виникає при цьому, несприятливо відбивається на споживачах. Наприклад, у двигунів змінного струму при живленні їх несиметричною напругою знижується допустима потужність. Для самого трансформатора несиметрич-

не навантаження може викликати перевантаження окремих його обмоток, а також надмірне підвищення фазної напруги та насичення магнітопроводу. Тому дослідження несиметричних режимів має важливе практичне значення.

Для дослідження несиметричних режимів використовується метод симетричних складових, згідно з яким будь-яка трифазна несиметрична система струмів  $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$  розкладається на системи струмів прямої  $\underline{I}_1$ , оберненої  $\underline{I}_2$  і нульової  $\underline{I}_0$  послідовностей (рис. 3.6):

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0} \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{B0} \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} + \underline{I}_{C0} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

Нульова послідовність  $\underline{I}_0$  може бути відсутня. Це залежить від схеми з'єднання вторинної обмотки. Струми  $\underline{I}_0$  можуть існувати лише в тому випадку, якщо для їх протікання існує контур. Відтак у схемах з'єднання обмоток  $Y/Y, Y/\Delta, \Delta/Y, \Delta/\Delta$  протікання струмів  $\underline{I}_0$  неможливе.

У несиметричних режимах струми  $\underline{I}_0$  у II-ї обмотці виникають при з'єднанні  $Y_n$ . Вплив струмів  $\underline{I}_0$  на роботу трансформатора залежить від схеми з'єднання I-ї обмотки ( $Y$  або  $\Delta$ ).

Якщо I-на обмотка трансформатора з'єднана за схемою  $Y$  (рис. 3.7) струми  $\underline{I}_0$  не будуть трансформуватись у ній (відсутній контур для їх протікання).

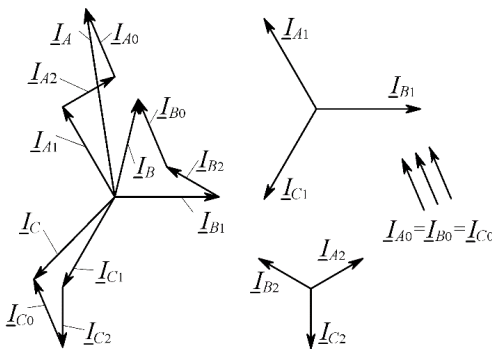


Рис. 3.6. Несиметрична система струмів та її симетричні складові  $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$

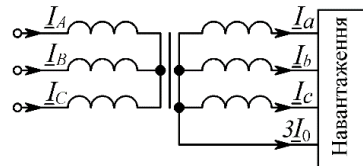


Рис. 3.7. Нульові струми в трансформаторі зі схемою з'єднання  $Y_n/Y$

Струми  $\underline{I}_0$  протікають лише у II-й обмотці, а в магнітному відношенні нічим не скомпенсовані зі сторони первинної обмотки, тому вони є намагнічуючими та створюють у трансформаторі додатковий магнітний потік нульової послідовності  $\Phi_0$ . Потоки  $\Phi_0$  у всіх фазах рівні і співпадають за напрямом:

$$\underline{\Phi}_{A.0} = \underline{\Phi}_{B.0} = \underline{\Phi}_{C.0} = \underline{\Phi}_0. \quad (3.5)$$

Поява струмів і потоків нульової послідовності аналогічна появи струмів і потоків 3-ї гармоніки, що виникають при намагнічуванні трансформаторів. Але вони мають різну природу виникнення і частоту зміни:  $\Phi_0, I_0$  виникають із-за несиметрії струмів навантаження і змінюються з частотою мережі;  $\Phi_3, I_3$  виникають із-за нелінійності магнітної характеристики і змінюються з потроєною частотою.

Потоки  $\Phi_0$  наводять у фазах первинної і вторинної обмоток ЕРС нульової послідовності:

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_{A.0} &= \underline{E}_{B.0} = \underline{E}_{C.0} = \underline{E}_{0.1} \\ \underline{E}_{a.0} &= \underline{E}_{b.0} = \underline{E}_{c.0} = \underline{E}_{0.2} \end{aligned} \right\}. \quad (3.6)$$

ЕРС  $\underline{E}_0$  пропорційні струму (поток) нульової послідовності:

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_{01} &= -\underline{I}'_0 Z'_{0П}; \\ \underline{E}_{02} &= -\underline{I}'_0 Z'_{0П}, \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

де  $\underline{E}_{01}, \underline{E}_{02}$  – ЕРС нульової послідовності первинної і вторинної обмоток;

$\underline{I}_0, \underline{I}'_0$  – струм нульової послідовності вторинної обмотки та його приведення;  $Z_{0П}, Z'_{0П}$  – повний опір взаємної індукції нульової послідовності (коефіцієнт пропорційності між ЕРС та струмом) та його приведення.

ЕРС  $\underline{E}_{01}$  у свою чергу приводять до викривлення симетричної системи первинних фазних напруг:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{A0} &= \underline{U}_A - \underline{E}_{01} \\ \underline{U}_{B0} &= \underline{U}_B - \underline{E}_{01} \\ \underline{U}_{C0} &= \underline{U}_C - \underline{E}_{01} \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

Відповідна векторна діаграма із зміщеною нульовою точкою приведена на рис 3.8. Система лінійних напруг залишається симетричною. Аналогічно наявність ЕРС  $\underline{E}_{02}$  приводить до викривлення системи вторинних фазних напруг, лінійні ж напруги симетричні.

Для уникнення значного перекосу фазних напруг допустимий струм в нульовому проводі при схемі з'єднання  $Y/Y_n$  обмежується ДЕСТ 11677 до 25% від  $I_{2,ном}$ . Тоді струм нульової послідовності не буде перевищувати  $25/3 = 8,3\%$  від  $I_{2,ном}$ .

Схема з'єднання  $Y/Y_n$  застосовується в стержневих трансформаторах. Для бронестержневих трансформаторів і трифазної групи однофазних трансформаторів схему  $Y/Y_n$  застосовувати не рекомендують, бо в них потоки  $\Phi_0$  можуть вільно замикатися в магнітопроводі і особливо сильно викривляти фазні напруги первинної і вторинної обмоток.

При з'єднанні первинної обмотки в  $\Delta$  (рис. 3.9) створюється контур, де можуть циркулювати струми  $\vec{I}_0$ . Тому при схемі з'єднання  $\Delta/Y_n$  всі три складові струму вторинної обмотки ( $\vec{I}_1, \vec{I}_2, \vec{I}_0$ ) будуть трансформуватись у первинну. Тепер струми  $\underline{I}_0$  первинної і вторинної обмоток будуть створювати зустрічні магнітні потоки  $\Phi_0$ , які практично зрівноважують один одного. Відтак не виникає ЕРС  $E_0$  і викривлення фазних напруг.

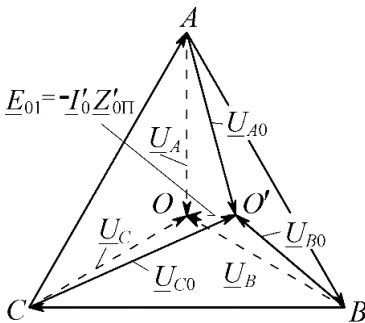


Рис. 3.8. Діаграма первинних напруг при несиметричному навантаженні трансформатора зі схемою  $Y/Y_n$

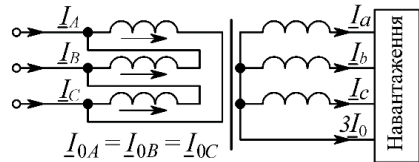


Рис. 3.9. Нульові струми в трансформаторі зі схемою  $\Delta/Y_n$

Теоретичний розрахунок опорів для струмів нульової послідовності дуже складна задача. Тому на практиці опір  $Z_{0П}$  визначається експериментально (за показами амперметра, вольтметра та ватметра). Під час проведення досліду штучно створюють такий же розподіл струмів у обмотках трансформатора, який повинен бути для струмів  $\underline{I}_0$ :

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{A0} = \underline{I}_{B0} = \underline{I}_{C0} = \underline{I}_{01} \\ \underline{I}_{a0} = \underline{I}_{b0} = \underline{I}_{c0} = \underline{I}_{02} \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Для цього три фази обмотки можна з'єднати послідовно або паралельно (рис. 3.10). Рубильник  $QS$  на схемах рис. 3.10 повинен:

- бути замкнутим, якщо у вторинній обмотці можливе існування струмів  $\underline{I}_0$  (схема з'єднання вторинної обмотки  $\Delta$  або  $Y_n$ );
- бути розімкнутим, якщо у вторинній обмотці не може існувати струмів  $\underline{I}_0$  (схема з'єднання вторинної обмотки  $Y$ ).

Опори нульової послідовності визначаються так:

- для схеми рис. 3.10, а):

$$Z_{0П} = \frac{U}{3I}; \quad R_{0П} = \frac{P}{3I^2}; \quad X_{0П} = \sqrt{Z_{0П}^2 - R_{0П}^2}; \quad (3.10)$$

- для схеми рис. 3.10, б):

$$Z_{0П} = \frac{3U}{I}; \quad R_{0П} = \frac{3P}{I^2}; \quad X_{0П} = \sqrt{Z_{0П}^2 - R_{0П}^2}. \quad (3.11)$$

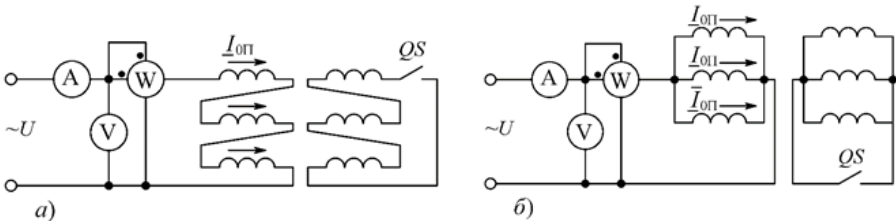


Рис. 3.10. Схеми для визначення опору нульової послідовності



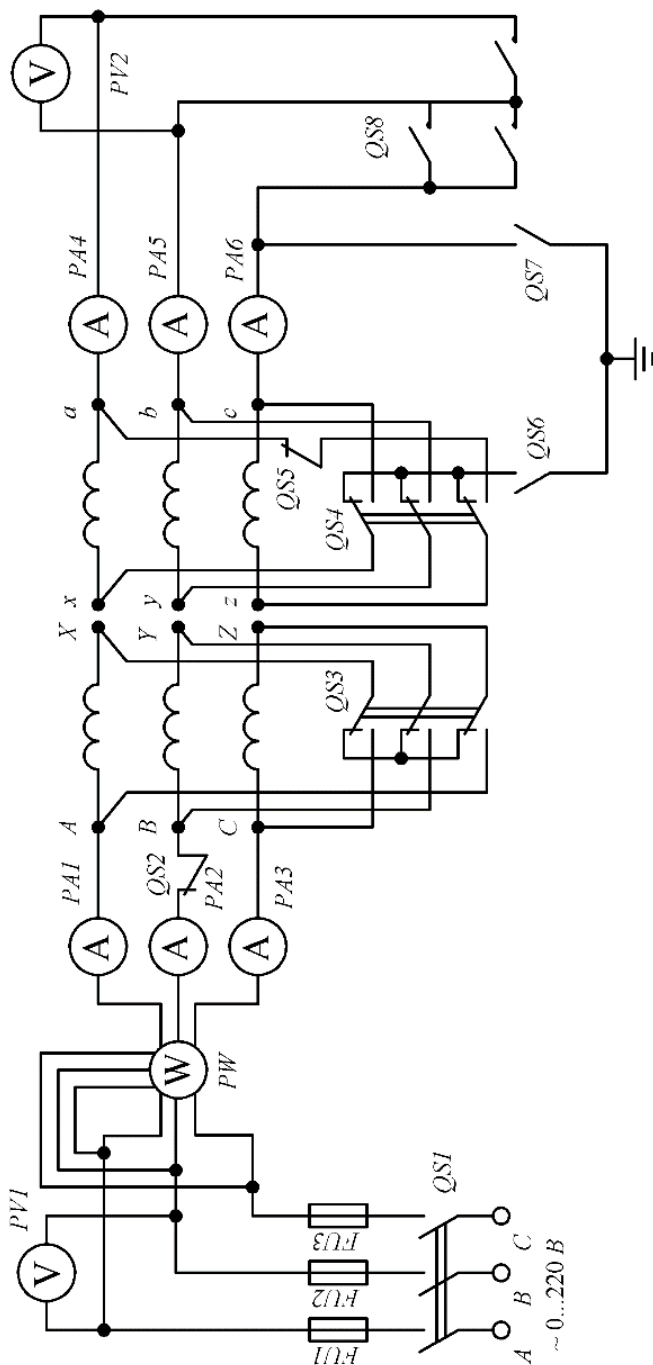


Рис. 3.11. Принципова електрична схема лабораторної установки для дослідження трифазного трансформатора



7. Провести дослід з вимірювання опорів нульової послідовності за схемою рис. 3.10, а) для двох випадків: струми нульової послідовності є; струми нульової послідовності відсутні. Встановити перемикачі  $QS3$  і  $QS4$  у положення « $\Delta$ »,  $QS8$  – у нейтральне положення, а  $QS6$  і  $QS7$  – розімкнути. Перемикач  $QS2$  встановити в положення, при якому на трансформатор подається однофазна напруга.

При замкнутому  $QS5$  увімкнути  $QS1$ . Для трьох значень напруги  $U_1 < U_k$  записати показання приладів до табл. 3.4.

Таблиця 3.4 Визначення  $Z_{0II}$  при наявності струмів  $I_0$ 

№ п/п	Виміряно			Обчислено		
	$U_{1,0}, B$	$I_{1,0}, A$	$P_{1,0}, Bm$	$Z_0, Ом$	$R_0, Ом$	$X_0, Ом$
1						
2						
3						

Розімкнути  $QS5$ . Для 3-х значень напруги  $U_1 < U_k$  записати показання приладів до табл. 3.5.

Таблиця 3.5 Визначення  $Z_{0II}$  при наявності струмів  $I_0$ 

№ п/п	Виміряно			Обчислено		
	$U_{1,0}, B$	$I_{1,0}, A$	$P_{1,0}, Bm$	$Z_0, Ом$	$R_0, Ом$	$X_0, Ом$
1						
2						
3						

8. Розрухувати первинні лінійні струми трансформатора при несиметричних КЗ аналітично і порівняти з експериментальними даними (табл. 3.3).

Для двофазного КЗ на стороні НН (фази  $b$  і  $c$ ) при схемі  $Y/Y$ :

$$\underline{I}_A = 0;$$

$$\underline{I}_B = \frac{I_{2K}}{k_T};$$

$$\underline{I}_C = \frac{-I_{2K}}{k_T}.$$

Для двофазного КЗ на стороні НН (фази  $b$  і  $c$ ) при схемі  $\Delta/Y$ :

$$\underline{I}_A = \frac{I_{2к}}{k_T};$$

$$\underline{I}_B = \frac{I_{2к}}{k_T};$$

$$\underline{I}_C = \frac{2I_{2к}}{k_T}.$$

Однофазне КЗ при схемі з'єднання обмоток  $Y/Y_n$  істотно відрізняється від двох попередніх тим, що при ньому виникають струми нульової послідовності  $\underline{I}_{a0} = \underline{I}_{b0} = \underline{I}_{c0}$  і так зване однофазне намагнічування трансформатора.

Для однофазного КЗ на стороні НН (фаза  $c$ ) при схемі  $Y/Y_n$ :

$$\underline{I}_A = \frac{I_{2к}}{3k_T};$$

$$\underline{I}_B = \frac{I_{2к}}{3k_T};$$

$$\underline{I}_C = \frac{-2I_{2к}}{3k_T}.$$

### 3.4. Зміст звіту

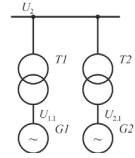
1. Паспортні дані трансформатора.
2. Принципова схема лабораторної установки рис. 3.11.
3. Результати дослідів НХ та симетричного трифазного КЗ (вимірювання і розрахунки).
4. Схеми та результати дослідів несиметричних КЗ: двофазне (схема  $Y/Y$ ), двофазне (схема  $\Delta/Y$ ), однофазне (схема  $Y/Y_n$ ).
5. Аналітичний розрахунок первинних лінійних струмів несиметричних КЗ трансформатора.
6. Схема для експериментального визначення опорів нульової послідовності, результати вимірювань і розрахунків.
7. Висновки за роботою.

### 3.5. Контрольні запитання

1. Особливості проведення дослідів НХ та КЗ трифазних трансформаторів.
2. Як отримати трифазний трансформатор із трьох однофазних?
3. Запишіть систему комплексних рівнянь для трьох фаз трифазного трансформатора.
4. Поясніть особливості намагнічування магнітопроводів трифазних трансформаторів.
5. Які схеми з'єднання обмоток трансформаторів найбільш бажані з точки зору практичної експлуатації і чому?
6. Режим роботи трансформатора при несиметричному навантаженні.
7. Поясніть суть методу симетричних складових.
8. Як впливає несиметричне навантаження на фазні і лінійні напруги первинної та вторинної обмоток трансформатора?
9. Експериментальне визначення опору нульової послідовності трансформатора.
10. Поясніть співвідношення між лінійними струмами первинної обмотки трансформатора і струмом короткого замикання для випадків:
  - a*) двофазне КЗ на стороні НН (фази  $b$  і  $c$ ) при схемі  $Y/Y$ ;
  - б*) двофазне КЗ на стороні НН (фази  $b$  і  $c$ ) при схемі  $\Delta/Y$ ;
  - в*) однофазне КЗ на стороні НН (фаза  $c$ ) при схемі  $Y/Y_n$ .



## Лабораторна робота №4



# ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

**Мета:** вивчити умови вмикання трифазних двообмоткових трансформаторів на паралельну роботу.

### 4.1. Теоретичні відомості

Паралельною називають роботу двох або більше трансформаторів за схемою вмикання, при якій їх первинні обмотки підключені до загальної первинної мережі (первинні шини), а вторинні обмотки – до загальної вторинної мережі (вторинні шини).

Паралельна робота трансформаторів необхідна з наступних причин:

- резервування енергопостачання споживачів електричної енергії у випадку аварії або необхідності планового ремонту основного трансформатора;
- зменшення втрат енергії в періоди малих навантажень підстанції шляхом відключення частини трансформаторів, які працюють паралельно;
- плавлення ожеледі на проводах повітряних ліній електропередавання.

Умови паралельної роботи трансформаторів наступні:

а) рівність коефіцієнтів трансформації лінійних напруг:

$$k_{T1} = k_{T2} = k_{T3} = \dots = k_{Tn}; \quad (4.1)$$

б) рівність напруг короткого замикання трансформаторів:

$$u_{к1} = u_{к2} = u_{к3} = \dots = u_{кn}; \quad (4.2)$$

в) однакові схеми та групи з'єднання обмоток трансформаторів.

Рекомендується, щоб відношення номінальних потужностей трансформаторів не перевищувало 3:1.



Невиконання умов паралельної роботи спричинює нерівномірне завантаження трансформаторів або появу зрівнюючих струмів  $\underline{I}_{\text{зр}}$  вже в режимі неробочого ходу. Ці струми циркулюють по замкнених контурах, що утворені вторинними обмотками паралельно включених трансформаторів та провідниками спільних шин. У загальному вигляді формула для визначення зрівнюючого струму двох трансформаторів  $T1$  і  $T2$  має вид

$$\underline{I}_{\text{зр}} = \frac{\Delta \underline{E}_2}{\underline{Z}_{\text{к.1}} + \underline{Z}_{\text{к.2}}} = \frac{\underline{E}_{2.1} - \underline{E}_{2.2}}{\underline{Z}_{\text{к.1}} + \underline{Z}_{\text{к.2}}}, \quad (4.3)$$

де  $\underline{E}_{2.1}$ ,  $\underline{E}_{2.2}$  – вторинні фазні ЕРС  $T1$  і  $T2$ ;

$\underline{Z}_{\text{к.1}}$ ,  $\underline{Z}_{\text{к.2}}$  – комплексні опори КЗ трансформаторів.

При невиконанні умови *рівності коефіцієнтів трансформації* ( $k_{\text{т1}} \neq k_{\text{т2}}$ ) у вторинних обмотках трансформаторів буде протікати зрівнюючий струм, який переважує трансформатор з меншим значенням  $k_{\text{т}}$ .

Припустимо, що на паралельну роботу включені два однофазних трансформатори  $T1$  і  $T2$  з  $S_{\text{ном1}} = S_{\text{ном2}}$  і різними  $k_{\text{т}}$ . Нехай у  $T1$  номінальна вторинна ЕРС  $\underline{E}_{2.1}$  більша, ніж у другого  $\underline{E}_{2.2}$ , тобто  $k_{\text{т1}} > k_{\text{т2}}$  (рис. 4.2, а). Так як  $\underline{E}_{2.1} > \underline{E}_{2.2}$ , то між вторинними обмотками трансформаторів при вмиканні на паралельну роботу з'явиться різниця ЕРС  $\Delta \underline{E}_2 = \underline{E}_{2.1} - \underline{E}_{2.2}$ , що зумовить появу в обмотках зрівнюючого струму  $\underline{I}_{\text{зр}}$ . Він реактивний, бо обмотки мають переважно індуктивні опір. У  $T1$  зрівнюючий струм  $\underline{I}_{\text{зр}}$  відстає від ЕРС  $\underline{E}_{2.1}$  на  $90^\circ$  і створює магнітний потік  $\underline{\Phi}_{\text{зр.1}}$ , що наводить у вторинній обмотці  $T1$  ЕРС  $\underline{E}_{\text{зр.1}}$ , яка відстає від потоку  $\underline{\Phi}_{\text{зр.1}}$  на  $90^\circ$ . Як видно з рис. 4.2, б) ЕРС  $\underline{E}_{\text{зр.1}}$  направлена назустріч ЕРС  $\underline{E}_{2.1}$  і зменшує її величину до напруги  $\underline{U}_2$ . У  $T2$  зрівнюючий струм  $\underline{I}_{\text{зр.2}}$  та ЕРС  $\Delta \underline{E}_2$  мають напрями, що протилежні напрямкам відповідних величин у  $T1$ . Тому  $\underline{I}_{\text{зр.2}}$  створює магнітний потік  $\underline{\Phi}_{\text{зр.2}}$ , що наводить в обмотці ЕРС  $\underline{E}_{\text{зр.2}}$ , яка додається до ЕРС обмотки  $\underline{E}_{2.2}$ . У результаті напруга обмотки зростає до величини  $\underline{U}_2$ .

Таким чином, завдяки протіканню в обмотках зрівнюючого струму напруги обмоток вирівнюються і струми навантаження трансформаторів будуть однакові, так як однакові їх потужності.

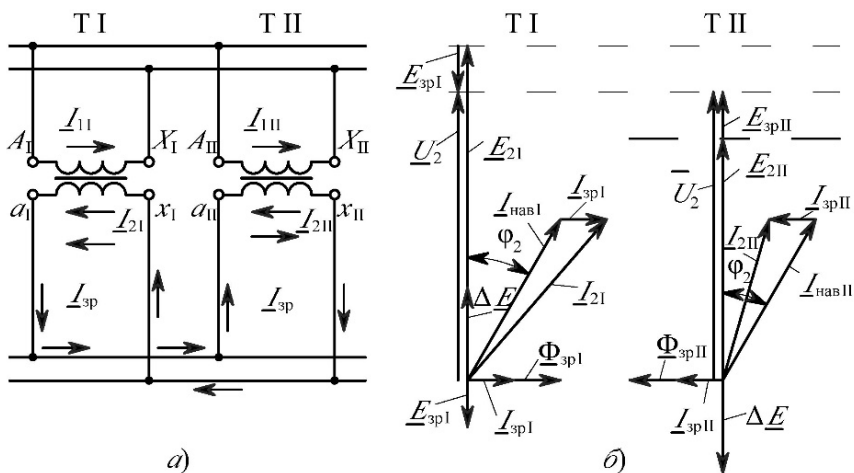


Рис. 4.2. Паралельна робота однофазних трансформаторів при  $k_{T1} \neq k_{T2}$ :  
а) схема; б) векторні діаграми

Якщо під кутом  $\varphi_2$  відкласти на *в.д.* струми навантаження обох трансформаторів  $I_{\text{нав.1}} = I_{\text{нав.2}} = 0,5 I_{\text{нав}}$ , а потім додати до них відповідні  $I_{\text{зр}}$ , то видно, що *T1* буде перевантажений за струмом, а *T2* недовантажений ( $I_{21} > I_{2II}$ ). Таким чином,  $I_{\text{зр}}$  не дає можливості використати трансформатори на повну потужність: перевантажувати *T1* понад номінальну потужність не можна.

Допускається паралельна робота трансформаторів з різними  $k_T$ , якщо:

$$\Delta k_T \% = \frac{k_{T1} - k_{TII}}{k_T} 100 \leq \pm 0,5\%, \quad (4.4)$$

де  $k_T = \sqrt{k_{T1} \cdot k_{TII}}$  – середньгеометричне значення коефіцієнтів  $k_T$ .

На практиці величину  $I_{\text{зр}}$  при різних  $k_T$  визначають за формулою:

$$I_{\text{зр}} = \frac{\Delta U_2 I_{2\text{НОМ.1}}}{u_{к.1} + \frac{u_{к.2}}{\beta}}, \quad (4.5)$$

де  $u_{к.1}$  і  $u_{к.2}$  – напруги КЗ трансформаторів, %;

$\Delta U_2$  – різниця вторинних напруг, %:

$$\Delta U = \frac{U_{2.I} - U_{2.II}}{U_{2.ном}} 100\% ; \quad (4.6)$$

$\beta$  – відношення номінального струму другого (більшого за потужністю) трансформатора до номінального струму першого (меншого за потужністю) трансформатора:

$$\beta = \frac{I_{2.ном.I}}{I_{2.ном.II}} . \quad (4.7)$$

Якщо потужності трансформаторів рівні, то  $\beta = 1$ .

При паралельній роботі трансформаторів з неоднаковими напругами КЗ ( $u_{к.I} \neq u_{к.II}$ ) трансформатор з меншим  $u_{к}$  виявляється перевантаженим.

Опір  $Z_{к}$  пропорційний напрузі КЗ  $u_{к}$ . При вмиканні на паралельну роботу 2-х трансформаторів (рис. 4.3) з різними  $u_{к}$  (опорами) на шинах вторинної напруги встановлюється певне значення напруги  $U_2$  за умови  $k_{\tau 1} = k_{\tau 2}$ . Спади напруги в обох трансформаторах при навантаженні повинні бути рівними, тобто  $I_1 Z_{к.I} = I_{II} Z_{к.II}$ , звідки:

$$\frac{I_1}{I_{II}} = \frac{Z_{к.II}}{Z_{к.I}} . \quad (4.8)$$

Таким чином, струми навантаження паралельно включених трансформаторів обернено пропорційні їх опорам. У трансформатора з меншим  $u_{к}$  повинен проходити по обмоткам більший струм, ніж у трансформатора з більшим  $u_{к}$ , щоб при однаковій потужності трансформаторів спади напруг в їх обмотках були однаковими, а у вторинній мережі встановлюється фіксована напруга  $U_2$ . На рис. 4.4 зображені зовнішні характеристики двох трансформаторів однакової потужності (крива 1 для трансформатора з більшим  $u_{к}$ , а крива 2 – з меншим  $u_{к}$ ). Зовнішні характеристики також свідчать про перевантаження другого трансформатора.

Допускається паралельна робота трансформаторів з різними  $u_{к}$ , якщо:

$$\Delta u_{к} = \frac{u_{к.I} - u_{к.II}}{u_{к.ср}} \cdot 100 \leq 10\% , \quad (4.9)$$

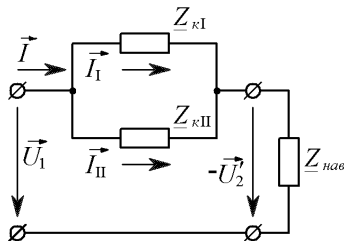


Рис. 4.3. Паралельне включення трансформаторів з різними  $u_k$

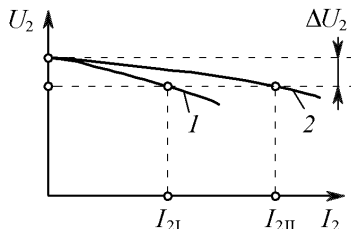


Рис. 4.4. Зовнішні характеристики трансформаторів з різними  $u_k$  ( $u_{к.I} > u_{к.II}$ )

де  $u_{к.ср}$  – середньоарифметичне значення  $u_{к.I}$  та  $u_{к.II}$  :

$$u_{к.ср} = \frac{u_{к.I} + u_{к.II}}{2} . \quad (4.10)$$

При паралельній роботі групи із  $n$  трансформаторів можна визначити навантаження  $i$ -го трансформатора за виразом

$$S_i = \frac{S}{\sum \frac{S_{ном}}{u_k}} \cdot \frac{S_{ном.i}}{u_{к.i}} , \quad (4.11)$$

де  $S_i$  – навантаження  $i$ -го трансформатора, кВА;

$S$  – загальне навантаження всієї паралельної групи, кВА;

$u_{к.i}$  – напруга к.з.  $i$ -го трансформатора, %;

$S_{ном.i}$  – номінальна потужність  $i$ -го трансформатора, кВА

$$\sum \frac{S_{ном}}{u_k} = \frac{S_{ном.I}}{u_{к.I}} + \frac{S_{ном.II}}{u_{к.II}} + \frac{S_{ном.III}}{u_{к.III}} + \dots + \frac{S_{ном.n}}{u_{к.n}} . \quad (4.12)$$

Якщо трансформатори належать до різних груп з'єднання обмоток, то паралельна робота їх неможлива: між обмотками трансформаторів виникає різниця потенціалів, що викликає значні зрівнюючі струми ще при НХ.

Припустимо, що на паралельну роботу включені два трансформатори із з'єднанням обмоток  $Y/\Delta$ -11 і  $Y/Y$ -0, що мають однакові первинні і вторинні номінальні напруги. Тоді вектори вторинних ЕРС  $\underline{E}_2$  трансформаторів будуть рівні по величині, але зсунуті по фазі на  $30^\circ$  (рис. 4.5). У замкненому

контури вторинних обмоток виникає різниця ЕРС, величина якої

$$\Delta E_2 = 2E_2 \sin \frac{30^\circ}{2} = 0,518E_2. \quad (4.13)$$

З (4.3) і (4.13), врахувавши, що  $E_2 = U_2 = U_{\text{ном}}$  і  $Z_k = u_k / 100 \cdot U_{\text{ном}} / I_{\text{ном}}$  визначається  $I_{\text{зр}}$  для інших груп з'єднання (інший кут  $\alpha$ )

$$I_{\text{зр}} = \frac{2U_{\text{ном}} \sin \frac{\alpha}{2}}{\frac{u_{\text{к.І}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном.І}}}{I_{\text{ном.І}}} + \frac{u_{\text{к.ІІ}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном.ІІ}}}{I_{\text{ном.ІІ}}}} = \frac{200 \sin \frac{\alpha}{2}}{\frac{u_{\text{к.І}}}{I_{\text{ном.І}}} + \frac{u_{\text{к.ІІ}}}{I_{\text{ном.ІІ}}}}, \quad (4.14)$$

де  $\alpha$  – кут між векторами вторинних лінійних напруг (ЕРС);

$u_{\text{к.І}}$  і  $u_{\text{к.ІІ}}$  – напруги КЗ трансформаторів, %;

$I_{\text{ном.І}}$  та  $I_{\text{ном.ІІ}}$  – номінальні струми трансформаторів, А.

Для двох трансформаторів однакової потужності ( $I_{\text{ном.І}} = I_{\text{ном.ІІ}} = I_{\text{ном}}$ ):

$$I_{\text{зр}} = \frac{200 \sin(\alpha/2)}{u_{\text{к.І}} + u_{\text{к.ІІ}}} I_{\text{ном}}. \quad (4.15)$$

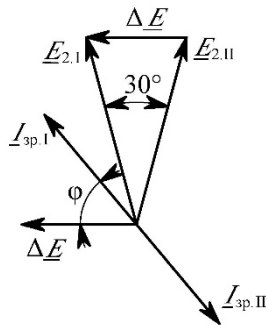


Рис. 4.5 Зрівнюючі струми при паралельній роботі трансформаторів з групами  $\text{Y}/\Delta$ -11 і  $\text{Y}/\text{Y}$ -0

## 4.2. Опис схеми установки

У роботі використовуються два однотипних трифазних двообмоточних трансформатори  $T1$  і  $T2$  типу ТС3-1,5/0,4; при схемі з'єднання обмоток  $Y/Y$  їх номінальні первинна та вторинна напруги становлять, відповідно, 380 та 36 В; номінальні струми НН –  $I_{2\text{ном.І}} = I_{2\text{ном.ІІ}} = 13,5$  А; напруги КЗ рівні  $u_{к.І} = u_{к.ІІ} = 6,5\%$ .

Принципова схема лабораторної установки приведена на рис. 4.6.

Живлення схеми може здійснюватися безпосередньо від трифазної мережі 380/220 В (через рубильник  $QS1$ ) або від регулятора напруги (через рубильник  $QS2$ ). Перемикачем  $QS3$  можна змінювати схему з'єднання вторинної обмотки  $T2$  із  $Y$  на  $\Delta$ . У вторинне коло  $T2$  перемикачем  $QS4$  може бути підключений додатковий опір  $Z_{д}$  (один в кожен фазу), це дозволяє збільшити  $u_{к.ІІ}$  до 9,5%. Навантаженням трансформаторної групи є блок ламп розжарювання. Підключення і зміна величини навантаження  $Z_{нав}$  здійснюється перемикачем  $QS5$ , що має чотири положення.

Встановлені вимірювальні прилади дозволяють контролювати напругу живлення ( $pV1$ ), вторинну напругу ( $pV2$ ), вторинні струми обмоток  $T1$  і  $T2$  ( $pA1$  і  $pA2$ ), струм навантаження ( $pA3$ ).

## 4.3. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з лабораторною установкою, номінальними даними трансформаторів, принциповою схемою рис. 4.6.

2. Дослідження паралельної роботи трансформаторів при ідеальних умовах:  $k_{т1} = k_{т2}$ ,  $u_{к.І} = u_{к.ІІ}$ , однакові групи і схеми з'єднання обмоток. Перемикачем  $QS3$  встановити схему  $Y$ , перемикачем  $QS4$  вивести додатковий опір  $Z_{д}$ . Подати напругу на установку перемикачем  $QS1$ . Змінюючи навантаження з допомогою  $QS5$  від 0 до  $2I_{2\text{ном}}$ , записувати показання приладів до табл. 3.1.

Таблиця 4.1 Паралельна робота трансформаторів (виконані всі умови)

№ досліджу	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I_{2.І}$ , А	$I_{2.ІІ}$ , А	$I_{нав}$ , А
1					
...					
4					

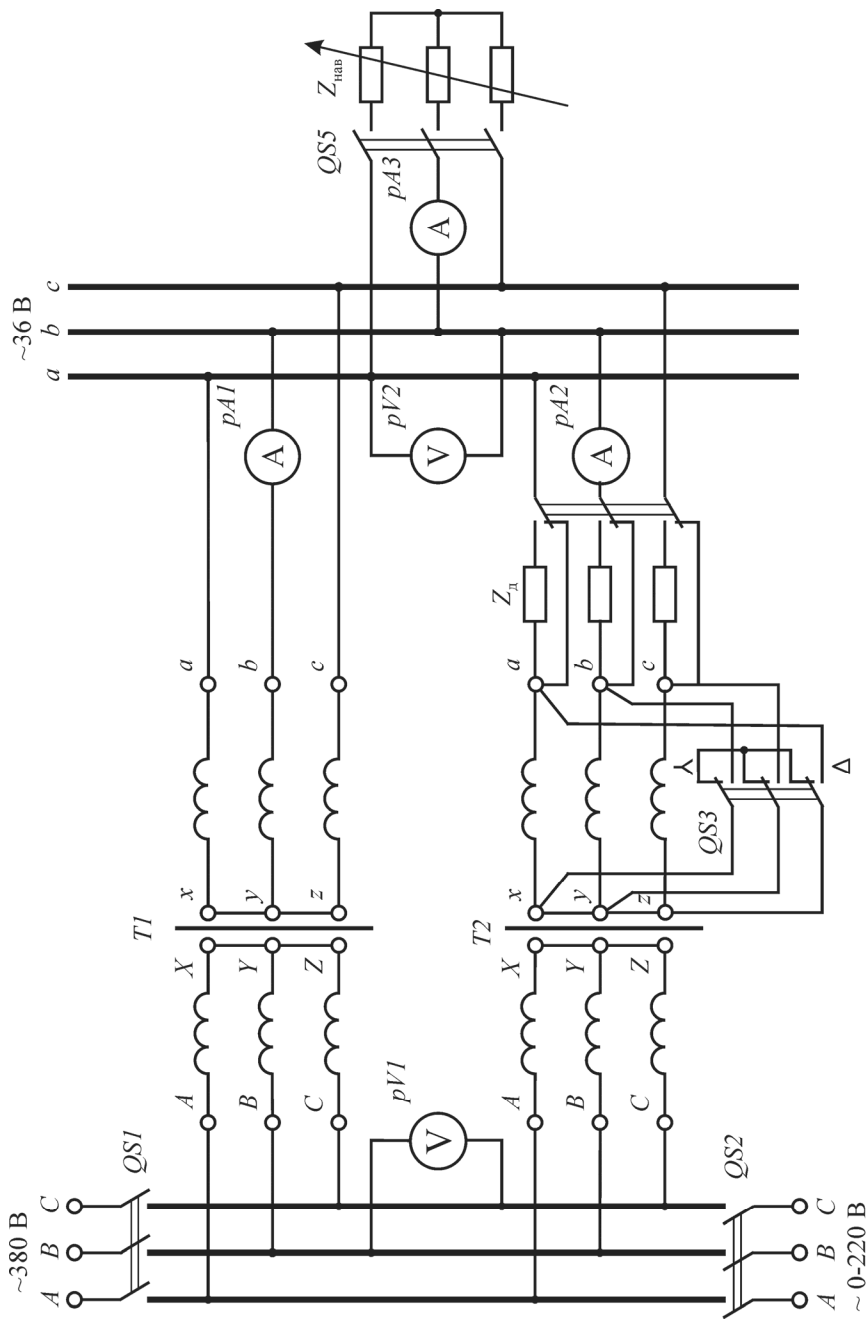


Рис. 4.6. Принципова електрична схема установки для дослідження паралельної роботи трансформаторів

3. Дослідження паралельної роботи трансформаторів при  $u_{к1} \neq u_{кII}$ . Підключити в коло вторинної обмотки Т2 додатковий опір  $Z_d$  перемикачем  $QS4$ ,  $QS3$  залишається в положенні Y. Перемикачем  $QS1$  подати напругу на установку. Змінюючи навантаження з допомогою  $QS5$  від 0 до  $2I_{2ном}$ , записувати показання приладів до табл. 4.2. Відключити  $QS1$ . Відключити опір  $Z_d$  і напругу від установки ( $QS4$  і  $QS1$ )

4. Дослідження паралельної роботи трансформаторів при різних групах з'єднання обмоток. Схема і група з'єднання обмоток Т1 Y/Y-0. Перемикачем  $QS3$  встановити схему і групу з'єднання обмоток Т2 Y/ $\Delta$ -11. Напруга на стенд подається від регулятора напруги через перемикач  $QS2$ . Збільшуючи напругу живлення від нуля записати показання приладів до табл. 3.3.

Таблиця 4.2 Паралельна робота трансформаторів при  $u_{к1} \neq u_{кII}$

№ досліджу	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I_{2.1}$ , А	$I_{2.II}$ , А	$I_{нав}$ , А
1					
...					
4					

Таблиця 4.3 Паралельна робота трансформаторів при різних схемах

№ досліджу	$U_1$ , В	$I_{2.1}$ , А	$I_{2.II}$ , А
1			
...			
6			

#### 4.4. Зміст звіту

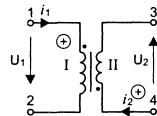
1. Паспортні дані трансформаторів.
2. Принципова схема лабораторної установки рис. 3.6.
3. Залежності  $I_{2.1}$ ,  $I_{2.II}$ ,  $U_2$  від  $I_{нав}$  побудовані за даними табл. 3.1.
4. Залежності  $I_{2.1}$ ,  $I_{2.II}$ ,  $U_2$  від  $I_{нав}$  побудовані за даними табл. 3.2.
5. Схема досліджу паралельної роботи трансформаторів при різних групах з'єднання обмоток. Розрахунок зрівнювального струму при номінальній первинній напрузі. Векторна діаграма напруг для даного випадку.
6. Висновки за лабораторною роботою.

#### 4.5. Контрольні запитання

1. З якою метою застосовують паралельну роботу трансформаторів?
2. Навіщо і як проводиться фазування трансформаторів з ізольованою нейтраллю?
3. Як проводиться фазування трансформатора із заземленою нейтраллю?
4. Назвіть умови включення трансформаторів на паралельну роботу.
5. Які процеси протікають при вмиканні на паралельну роботу несфазованих трансформаторів?
6. Що відбудеться, якщо увімкнути на паралельну роботу трансформатори з різними групами з'єднання обмоток?
7. Паралельна робота трансформаторів при  $k_{r1} \neq k_{r2}$ .
8. Паралельна робота трансформаторів при  $u_{k.I} \neq u_{k.II}$ .
9. Як визначити навантаження  $i$ -го трансформатора у групі із  $n$  трансформаторів, які працюють паралельно?



## Лабораторна робота №5



## МАРКУВАННЯ ОБМОТОК І ВИЗНАЧЕННЯ ГРУП З'ЄДНАННЯ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

**Мета:** навчитися за результатами дослідів маркувати виводи обмоток і визначати групу з'єднання при довільній схемі з'єднання обмоток.

### 5.1. Теоретичні відомості

У трифазних трансформаторах або в групах із трьох однофазних трансформаторів обмотки можуть бути з'єднані по схемам «зірка» –  $Y$ , «трикутник» –  $\Delta$  і «зигзаг» –  $Z$ , (рис. 5.1):

- при з'єднанні обмоток в зірку кінці обмоток зводять в одну точку, а початки приєднують до виводів (рис. 5.1, а);
- при з'єднанні обмоток в трикутник початок другої фазної обмотки приєднують до кінця першої, початок третьої – до кінця другої, початок першої – до кінця третьої, а вершини утвореного трикутника – до виводів (рис. 5.1, б);
- при схемі з'єднання зигзаг вторинна обмотка кожної фази розділена на дві частини і розміщена на двох окремих стержнях (рис. 5.1, в).

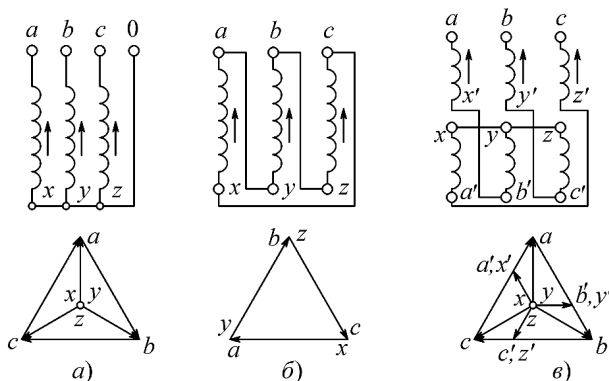


Рис 5.1 Схеми з'єднання обмоток трансформаторів і відповідні векторні діаграми ЕРС обмоток:  
а) зірка; б) трикутник; в) зигзаг

Для трансформаторів згідно ГОСТ 11677 встановлені стандартні позначення початків і кінців (виводів) обмоток і їх відгалужень (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Маркування виводів обмоток трансформаторів

Найменування обмотки	Тип трансформатора	
	однофазний	трифазний
<i>Обмотка високої напруги – ВН</i>		
початок	<i>A</i>	<i>A, B, C</i>
кінець	<i>X</i>	<i>X, Y, Z</i>
нульова точка	–	<i>O</i>
<i>Обмотка низької напруги – НН</i>		
початок	<i>a</i>	<i>a, b, c</i>
кінець	<i>x</i>	<i>x, y, z</i>
нульова точка	–	<i>o</i>
<i>Обмотка середньої напруги – СН (для триобмоткових трансформаторів)</i>		
початок	<i>A<sub>m</sub></i>	<i>A<sub>m</sub>, B<sub>m</sub>, C<sub>m</sub></i>
кінець	<i>X<sub>m</sub></i>	<i>X<sub>m</sub>, Y<sub>m</sub>, Z<sub>m</sub></i>
нульова точка	–	<i>O<sub>m</sub></i>
<i>Регульовальні відгалуження</i>		
відпайка (відгалуження)	<i>X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ... X<sub>n</sub></i> ,	<i>X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, ... X<sub>n</sub></i> <i>Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, ... Y<sub>n</sub></i> <i>Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>, ... Z<sub>n</sub></i>

Схеми з'єднання обмоток трифазного трансформатора позначають у вигляді дробу, в чисельнику якої – схема з'єднання обмотки ВН, а в знаменнику – обмотки НН. Так, якщо у трансформатора обмотка ВН з'єднана в трикутник, а обмотка НН – в зірку з виведеною нейтраллю, то таке поєднання схем обмоток позначатиметься  $\Delta/Y_n$ .

На сьогодні в Україні експлуатуються силові трифазні двообмоткові трансформатори загального призначення з наступними схемами з'єднання обмоток:  $Y/Y_n$ ,  $Y/\Delta$ ,  $Y_n/\Delta$ ,  $Y/Z_n$ ,  $\Delta/Y_n$  і  $\Delta/\Delta$ . Застосування того чи іншого з'єднання обмоток залежить від ряду причин. Так, в мережах 110 кВ і вище звичайно застосовують трансформатори із схемою з'єднання обмоток  $Y_n/\Delta$ . Це пов'язано з тим, що при заземленні нульової точки напруга виводів ВН трансформатора і проводів лінії передачі відносно землі буде в  $\sqrt{3}$  раз менша лінійної, що приводить до зниження вартості ізоляції і полегшує боротьбу

з перенапругами. У трансформаторах потужністю до 2500 кВ·А раніше широко застосовувалось з'єднання  $Y/Y_N$ , основною перевагою якого є те, що в порівнянні із з'єднанням  $\Delta/Y_N$  виготовлення обмотки ВН дешевше і технологічніше. З точки зору впливу вищих гармонік і роботи трансформатора при несиметричних навантаженнях доцільнішим є застосування з'єднання  $\Delta/Y_N$ , там, де не потрібен вивід нульової точки зі сторони НН, – з'єднання  $Y/\Delta$ . З аналогічною метою в трансформаторах до 250 кВ·А використовується з'єднання  $Y/Z$  замість  $Y/Y_N$ , хоча в цьому випадку витрата міді збільшується.

У практиці експлуатації трансформаторів окрім схем з'єднання необхідно знати взаємний напрямок ЕРС в обмотках.

На рис. 5.2 показані дві обмотки 1 і 2, що розміщені на одному і тому ж стержні та пронизуються одним і тим же магнітним потоком  $\Phi$ . На рис. 5.2, а обидві обмотки намотані в одну і ту ж сторону, верхні виводи обмоток прийняті за їх початки ( $A, a$ ), а нижні виводи – за кінці обмоток ( $X, x$ ). ЕРС  $\vec{E}_1$  і  $\vec{E}_2$ , що наводяться в обмотках 1 і 2 магнітним потоком  $\Phi$ , будуть направлені в одну сторону (наприклад в даний момент часу від кінців обмоток до їх початків), тобто ЕРС направлені узгоджено і співпадають по фазі.

Якщо у однієї з обмоток, наприклад у обмотки 2, змінити позначення початку і кінця на протилежне (рис. 5.2, б), то напрямок наведеної ЕРС  $\vec{E}_2$  по

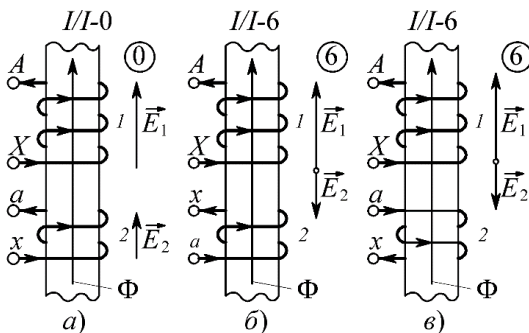


Рис. 5.2. Напрямок ЕРС в залежності від способу намотки обмоток і маркування:  
а) ЕРС направлені узгоджено; б) змінено позначення виводів, ЕРС направлені зустрічно; в) обмотки намотані в різні сторони, ЕРС у протифазі

відношенню до кінців обмотки 2 також зміниться на протилежний. Таким чином ЕРС  $\vec{E}_1$  і  $\vec{E}_2$  будуть зсунуті по фазі на  $180^\circ$  і направлені зустрічно. Аналогічний зсув фаз на  $180^\circ$  між ЕРС  $\vec{E}_1$  і  $\vec{E}_2$  можна отримати, змінивши напрямок намотки однієї із обмоток (наприклад обмотки 2 на рис. 5.2, в).

Отже, фазовий зсув між фазними ЕРС обмоток ВН і НН залежить як від позначення їх виводів, так і від напрямку намотки. При розміщенні обмоток ВН і НН на одному стержні цей зсув може бути рівним 0 або  $180^\circ$ .

Фазовий зсув між ЕРС  $\vec{E}_1$  і  $\vec{E}_2$  прийнято виражати *групою з'єднання обмоток трансформатора*. Але так як зсув фаз може змінюватися від 0 до  $360^\circ$ , а кратність зсуву складає  $30^\circ$ , то для позначення групи з'єднання обирається ряд чисел від 1 до 12. Кожна одиниця відповідає куту зсуву в  $30^\circ$  вектора лінійної ЕРС обмотки НН відносно вектора лінійної ЕРС обмотки ВН в напрямку руху стрілки годинника.

В основу такого позначення покладено порівняння відносного положення векторів  $\vec{E}_1$  і  $\vec{E}_2$  з положенням годинникової та хвилинної стрілок годинника. При цьому ЕРС обмотки ВН вважається хвилинною стрілкою, встановленою на цифрі 12, а вектор ЕРС обмотки НН вважається годинниковою стрілкою, яка і вказує групу (годину) – рис. 5.3.

Положення годинникової стрілки відносно хвилинної визначається положенням вектора  $\vec{E}_2$  відносно  $\vec{E}_1$ . Так схема на рис. 5.2, *а*) має групу 12 (0), а схеми на рис. 5.2, *б*), *в*) мають групу 6. Таким чином в однофазному трансформаторі можна отримати лише дві групи з'єднання: групу 12 (0), що відповідає співпаданню по фазі ЕРС обмоток ВН і НН та групу 6, що відповідає зсуву фаз між ЕРС ВН і НН на  $180^\circ$  ( $180^\circ/30^\circ=6$ ).

Із цих груп стандартною є група 12 (0). Її прийнято називати нульовою і позначати I/I-0.

У трифазних трансформаторах на групу з'єднання впливає не лише маркування виводів та напрямок намотки обмоток, але і послідовність з'єднання виводів, тобто схема з'єднання.

Змінюючи маркування виводів, можна отримати різні групи з'єднання: при схемі Y/Y парні (0, 2, 4, 6, 8, 10), а при схемі Y/Δ непарні (1, 3, 5, 7, 9, 11).

Для трифазних трансформаторів група з'єднання визначається аналогічно, але для цього застосовують лінійні значення ЕРС обмоток ВН та НН (на практиці зручніше користуватись лінійними напругами, а не ЕРС). Деякі схеми з'єднання і визначення груп, що їм відповідають приведено на рис. 5.3.

Трифазні силові трансформатори випускають лише двох груп: нульової і одинадцятої. Це полегшує включення їх на паралельну роботу.

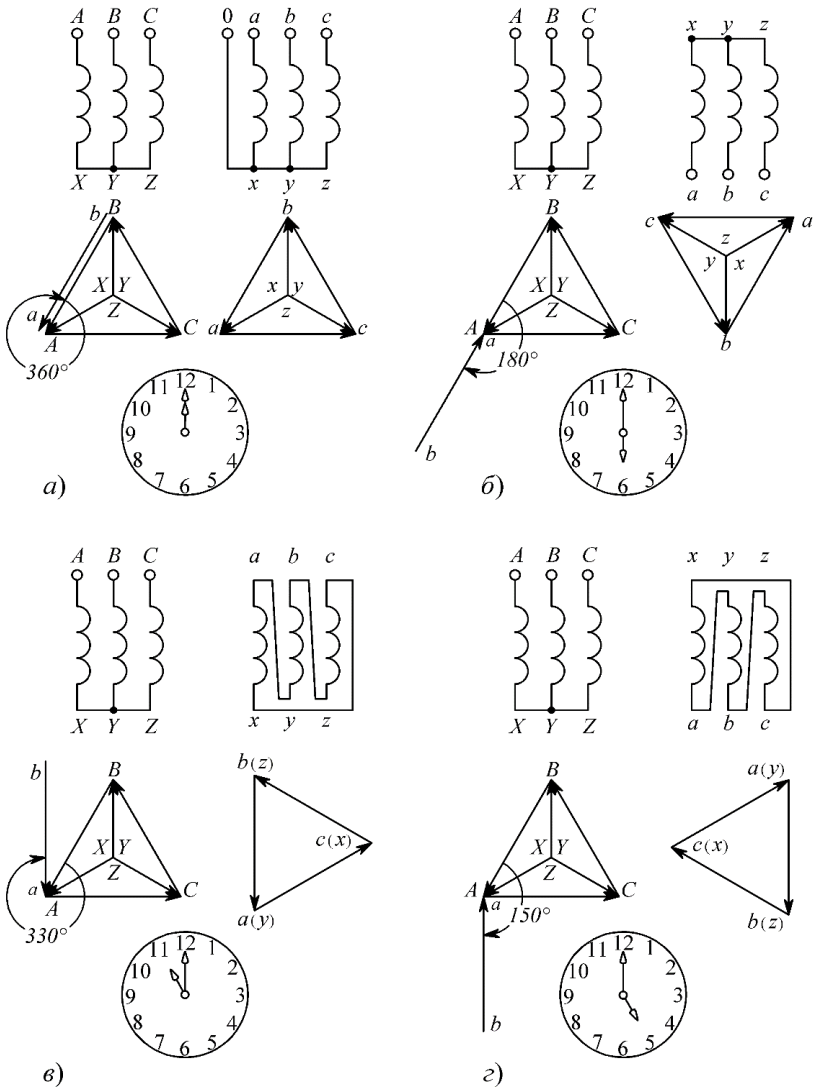


Рис. 5.3 Групи з'єднання трифазних трансформаторів:

а) Y/Y-0; б) Y/Y-6; в) Y/Δ-11; з) Y/Δ-5

Отже, перед включенням трансформаторів на паралельну роботу необхідно обов'язково промаркувати виводи обмоток трансформатора. Якщо маркування уже зроблено, то можна переходити до визначення групи з'єднання.

Як правило маркування виводів трансформаторів проводять на підприємстві виробнику. Але якщо маркування відсутнє, то можна провести його у наступній послідовності:

- 1) визначають виводи, які належать одній обмотці;
- 2) визначають належність кожної фази обмотки стороні ВН, НН і СН (якщо трансформатор триобмоточний);
- 3) визначають обмотки, які розміщені на одному стержні;
- 4) визначають початки і кінці обмоток.

Знайти пари затискачів, що належать одній обмотці можливо за допомогою омметра або вольтметра. Для трансформаторів малої потужності, у яких опір обмоток співрозмірний з опором вольтметра (великий опір), останній може дозволити визначити також належність обмотки стороні ВН або НН. У загальному випадку необхідно з достатньою для співставлення точністю виміряти опір усіх фазних обмоток. При цьому:

$$R_{\text{ВН}} > R_{\text{СН}} > R_{\text{НН}};$$

$$Z_{\text{ВН}} > Z_{\text{СН}} > Z_{\text{НН}}.$$

На рис. 5.4, *a*) показано виконання розмітки з допомогою вольтметра. Прилад вмикається між однією із фаз мережі змінного струму (наприклад С) і будь-яким виводом трансформатора. Будь-яка інша фаза з'єднувальним проводом почергово приєднується до інших одинадцяти виводів трансформатора. Якщо стрілка вольтметра відхилиться, то це свідчить про наявність замкнутого електричного кола. Таким чином встановлюється приналежність всіх шести пар виводів певним обмоткам трансформатора. Ті пари, яким відповідає менше відхилення стрілки вольтметра, будуть виводами обмоток ВН, а інші – виводами обмоток НН.

Обмотки ВН і НН, які належать одному стержню, можна визначити, якщо на одну з обмоток НН подати напругу змінного струму (не повинна перевищувати номінальної фазної напруги для цієї обмотки). Вольтметром вимірюють ЕРС всіх обмоток ВН. Найбільша з цих напруг буде виникати в тій обмотці, яка знаходиться на тому ж стержні, що і підключена до джерела напруги обмотка НН. Пояснюється це тим, що ЕРС лише цієї обмотки буде визначатись повним магнітним потоком  $\Phi_1$  (рис. 5.4, *б*), а не його частиною  $\Phi_2$  чи  $\Phi_3$ . Магнітний потік створюється струмом обмотки НН, що підключена до джерела напруги. Аналогічно визначають інші пари обмоток одного стержня.

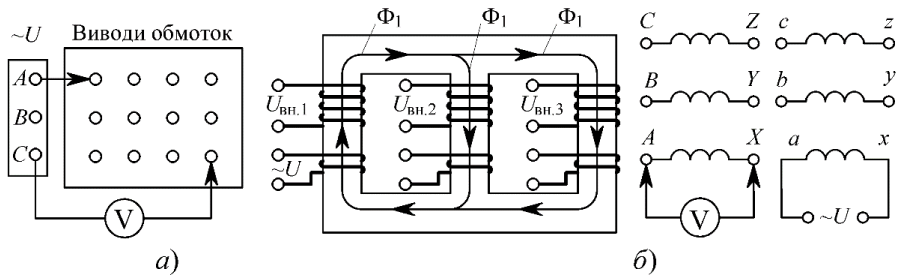


Рис. 5.4. Визначення пар виводів однієї обмотки з допомогою вольтметра а) і належності обмоток одному стержню б)

У трифазному трансформаторі пари фазних обмоток (ВН-НН) практично симетричні у магнітному відношенні і мають однакові електричні властивості (взаємне розташування, конструкція, число витків, переріз проводу), тому байдуже, яку із обмоток ВН назвати фазою *A*, яку фазою *B* і *C*. Для однієї цієї фази, наприклад фази *A*, початок (*A*) і кінець (*X*) можна обрати довільно. Тоді за початок інших обмоток потрібно прийняти також ті виводи, йдучи від яких намотка виконується в тому ж напрямку, що і обмотка фази *A*. Інші виводи цих обмоток будуть кінцями. Маркування інших обмоток можна виконати як на постійному, так і на змінному струмі. Обидва методи ґрунтуються на визначенні полярності ЕРС, яка наводиться в обмотках.

Отже, прийнявши для однієї з фаз обмотки ВН початок і кінець далі виводи фаз ВН розмічають на змінному струмі. Розмічена фаза обмотки ВН *A-X* з'єднується послідовно з іншою обмоткою ВН, а до виводів третьої приєднується вольтметр електромагнітної системи (рис. 5.5, а). Регулювальний реостат  $R_p$  необхідний, якщо напруга джерела живлення значно перевищує номінальну напругу обмоток трансформатора. Якщо при підключенні схеми стрілка вольтметра значно відхилиться, то це означає, що вивід *X* приєднаний до вивода *B*, а якщо його показання близькі до нуля, то вивід *X* приєднаний до вивода *Y*. Тобто в першому випадку ЕРС самоіндукції обмоток додаються, а в другому віднімаються. Після визначення затискачів *B* та *Y* на місце другої обмотки ВН підключають третю обмотку, вольтметр приєднують до виводів *B-Y*, і аналогічно знаходять початок і кінець третьої фази *C-Z*.

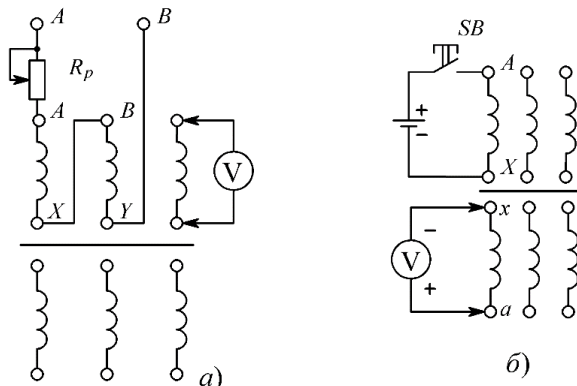


Рис. 5.5. Визначення початків і кінців обмоток ВН *a)* і НН *б)*

Для розмітки виводів обмотки НН збирають схему, де позитивний полюс джерела постійного струму з'єднують з виводом *A*, до виводів тієї ж фази обмотки НН приєднують магнітоелектричний вольтметр з нулем посередині шкали і вказаною полярністю затискачів (поляриметр) (рис. 5.5. *б*). Якщо замикання кнопки *SB* викличе відхилення стрілки поляриметра вправо від нульової позначки, а при розмиканні її – вліво, то затискач поляриметра “+” з'єднаний з початком (*a*) обмотки НН фази *A*. При протилежному відхиленні стрілки затискач “+” з'єднаний з кінцем (*x*) обмотки НН. Інші виводи обмотки НН *b-y* і *c-z* визначаються аналогічно, підключаючи джерело постійної напруги і поляриметр до другої і третьої фази. При виконанні розмітки за схемами рис. 5.5 напругу можна підводити і до обмотки НН.

Для визначення групи з'єднання обмоток трансформатора існує кілька методів:

- a)* метод фазометра або прямий метод;
- б)* метод вольтметра;
- в)* метод постійного струму;
- г)* метод моста змінного струму;
- д)* метод еталонного трансформатора;
- е)* метод ватметра.

При прямому методі до розмічених виводів трансформатора підключається спеціальний прилад – фазометр, який дозволяє безпосередньо по шкалі визначити кут між лінійними напругами обмоток (рис. 5.6).

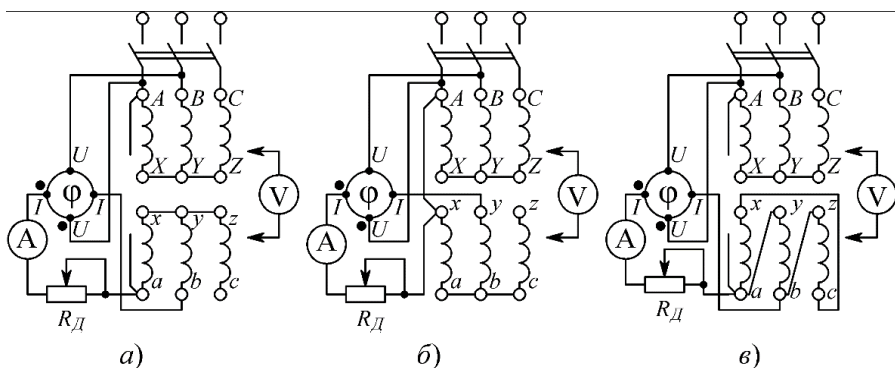


Рис. 5.6 Прямий метод визначення групи з'єднання обмоток:

а) група 0; б) група 6; в) група 11

При використанні метода вольтметра з'єднують перемичкою два яких-небудь однойменних (що належать одній фазі) виводів трансформатора (виводи  $A$  і  $a$  на рис. 5.7, а). Це роблять для вирівнювання потенціалів точок, тобто на векторній діаграмі напруг точки  $A$  та  $a$  будуть співпадати. На обмотку ВН подають симетричну систему напруг. Вольтметром вимірюють напруги  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ ,  $U_{Bb}$ ,  $U_{Cb}$ ,  $U_{Cc}$ , за якими будують діаграму (рис. 5.7, б).

Векторна діаграма лінійних напруг будується в наступній послідовності. Обирається масштаб напруги  $m_U$ . У масштабі будують рівносторонній трикутник лінійних напруг  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ . В масштабі з точки  $B$  проводять

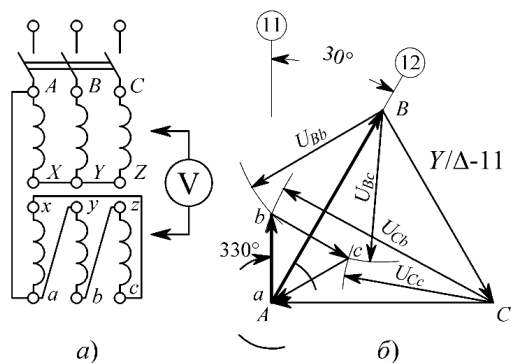


Рис. 5.7 Визначення групи з'єднання трансформатора методом вольтметра: а) схема; б) векторна діаграма напруг

циркулем дугу радіусом  $U_{Bb}$ , а з точки  $C$  – дугу радіусом  $U_{Cc}$ . Перетином дуг визначається положення точки  $b$ . Аналогічно з точки  $B$  проводять дугу радіусом  $U_{Bc}$ , а з точки  $C$  – дугу радіусом  $U_{Cc}$ . Перетином дуг визначається положення точки  $c$ . Як згадувалось вище точки  $A$  та  $a$  на діаграмі співпадають. З векторної діаграми легко визначити кут між напрямками лінійних напруг

$\vec{AB} \wedge \vec{a\bar{e}}$ . Кут визначається від вектора  $\vec{AB}$  до вектора  $\vec{a\bar{e}}$  в напрямку за годинниковою стрілкою. На рис. 5.7, б цей кут рівний  $360^\circ - 30^\circ = 330^\circ$ . Розділивши вимірний кут на  $30^\circ$  визначається група з'єднання – 11.

Належність трансформатора до певної групи з'єднання можна також визначити з допомогою поляриметра. При підключенні джерела постійного струму із дотриманням полярності до будь-яких виводів обмотки ВН, наприклад  $A-B$  (рис. 5.8), в момент замикання кнопки  $SB$  в інших обмотках буде наводитись миттєва ЕРС, значення і напрямок якої залежать від групи з'єднання обмоток.

Почергове приєднання при цьому відповідних затискачів поляриметра до виводів обмоток НН  $a-b$ ,  $b-c$  і  $c-a$  дозволяє зафіксувати напрямок дії миттєвої ЕРС між відповідними виводами чи нульове значення різниці потенціалів. Напрямок ЕРС, при замиканні кнопки  $SB$ , вважається додатнім при відхиленні стрілки поляриметра вправо від позначки "0" і від'ємним при відхиленні стрілки вліво від позначки "0".

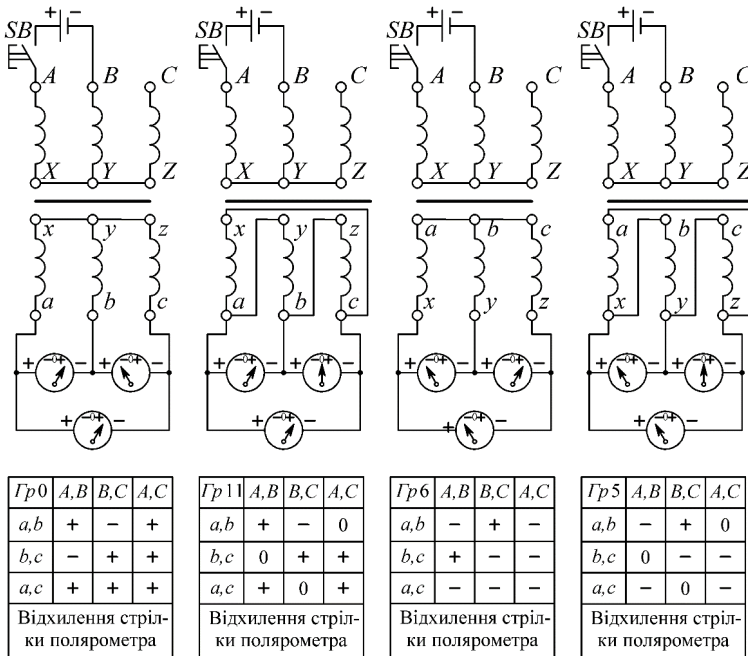


Рис. 5.8. Визначення групи з'єднання з допомогою поляриметра

Аналогічно дослід проводять при почерговому підключенні джерела постійного струму до виводів  $A-B$ ,  $B-C$  і  $A-C$ . Дев'ять вимірювань по поляриметру записують в таблицю (рис. 5.8). Кожній групі з'єднання обмоток трифазного трансформатора відповідає своя таблиця відхилень стрілок поляриметра. По таких таблицях і визначають групу з'єднання. Розглянуті чотири з'єднання є основними. Кожна із цих груп шляхом кругового перемаркування виводів ( $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ ) без зміни схеми з'єднання утворює по дві похідні групи:

- від 12: похідні 4-та і 8-ма;
- від 6: похідні 10-та і 2-га;
- від 11: похідні 3-тя і 7-ма;
- від 5: похідні 9-та і 1-ша.

## 5.2. Опис схеми установки

У роботі використовується трифазний двообмотковий трансформатор типу ТСЗ-1,5/0,4; номінальні напруги 380/36 В. На стенд виведені 12 кінців обмоток трансформатора, які жодним чином не позначені.

Стенд містить три джерела живлення: джерело змінної трифазної напруги 380 В, джерело змінної однофазної напруги 25 В, джерело постійної напруги 25 В. Під виводами джерела постійного струму знаходиться кнопка  $SB$  для комутації кола джерела.

У схемі стенда встановлено три вольтметри, які призначені для:

- $PV1$  – стаціонарний щитовий вольтметр для вимірювання напруги в межах до 500 В, призначений для вимірювання напруги первинної обмотки;
- $PV2$  – поляриметр для фіксації полярності ЕРС постійного струму;
- $PV3$  – переносний лабораторний вольтметр для вимірювання низької змінної напруги (до 60 В).

Прилади вмикаються в схему з допомогою спеціальних провідників з втичними контактами на кінцях.

У схемі стенда передбачена можливість підключення нульового проводу, для чого на лицьовій панелі є відповідні контакт і тумблер  $S$ .

Зовнішній вигляд стенда приведено на рис. 5.9.

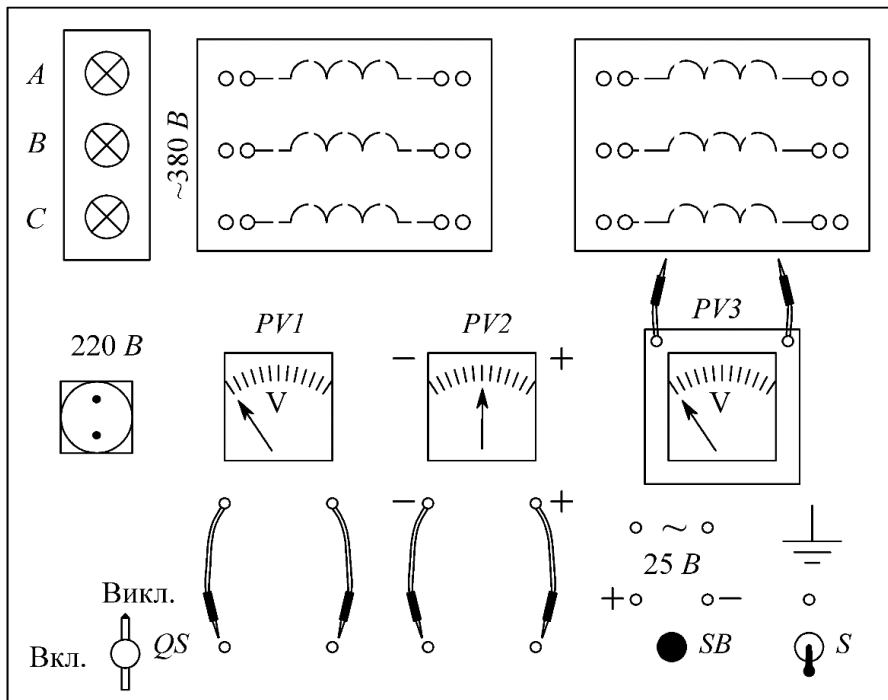


Рис. 5.9. Зовнішній вигляд стенда лабораторної роботи

### 5.3. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з установкою, приладами і паспортними даними трансформатора, порядком проведення роботи.

2. Провести маркування обмоток трансформатора:

2.1. Зібрати схему по рис. 5.10, а), з джерелом напруги  $\sim 25\text{ B}$  і переносним вольтметром PV3. Увімкнути перемикач QS. Підключаючи по чергово штирові контакти до двох будь-яких виводів (гнізд) трансформатора виявити пари контактів, що належать одній обмотці. Більше відхилення стрілки PV3 відповідає обмоткам НН, менше - обмоткам ВН. Вимкнути QS. Відмітити в звіті пари виводів трансформатора, які належать одній обмотці, обмоткам ВН та НН.

2.2. Зібрати схему по рис. 5.10, б. Напруга  $\sim 25\text{ В}$  подається на одну з фаз обмотки НН. Увімкнути  $QS$ . Штирьові контакти стаціонарного вольтметра  $PVI$  підключаються по черзі до трьох фазних обмоток ВН. Максимальне відхилення стрілки  $PVI$  відповідає обмотці ВН, яка знаходиться на тому ж стержні, що і обмотка НН, на яку подано напругу  $\sim 25\text{ В}$ . Тобто ці обмотки належать одній фазі. Підключити джерело  $\sim 25\text{ В}$  до другої, а потім третьої фази обмотки НН, при цьому повторити вимірювання напруги обмоток ВН вольтметром  $PVI$ . Вимкнути  $QS$ . Відмітити в звіті обмотки ВН і НН, що належать одному стержню магнітопроводу (одній фазі).

2.3. Визначити початки і кінці обмоток НН. Довільним чином намітити фази обмоток ВН та НН, а також початки обмоток ВН. Для однієї з обмоток НН (наприклад фази  $C$ ) довільно обрати початок і кінець обмотки ( $c$  та  $z$ ). Зібрати схему по рис. 5.10, в. Напруга  $\sim 25\text{ В}$  подається на дві послідовно з'єднані обмотки НН (маркування однієї з обмоток відоме). Увімкнути  $QS$ . Переносним вольтметром  $PV3$  виміряти напругу третьої обмотки НН. Вимкнути  $QS$ . Зібрати схему за рис. 5.10, г) у якій дві обмотки з'єднані теж послідовно, але вже іншими кінцями. Так само вимірюють напругу третьої обмотки НН. Якщо при вимірюванні стрілка  $PV3$  значно відхилиться, то вивід  $z$  приєднаний до виводу  $b$ , якщо показання  $PV3$  близькі до нуля, то з'єднані виводи  $z$  та  $у$ . Вимкнути  $QS$ . Відмітити в звіті виводи  $b$  та  $у$ . З'єднуючи послідовно дві інші обмотки НН аналогічно визначити з допомогою  $PV3$  виводи  $a$  та  $x$  і відмітити їх у звіті.

2.4. Зібрати схему за рис. 5.10, д). Постійна напруга  $\pm 25\text{ В}$  подається на фазну обмотку НН (наприклад на фазу  $C$ ). Контакт “+” приєднується до початку обмотки  $c$ , а “-” до кінця обмотки  $z$ . До обмотки ВН того ж стержня підключається поляриметр  $pV3$  через додатковий резистор  $R_d$ . Увімкнути  $QS$ . При замиканні кнопки  $SB$  фіксується відхилення стрілки поляриметра. При відхиленні стрілки вправо “+” приєднаний до  $C$ , а “-” до  $Z$ . При відхиленні вліво “+” приєднаний до  $Z$ , а “-” до  $C$ . Відключити  $QS$ . Відмітити в звіті виводи  $C$  і  $Z$ . По черзі подають постійну напругу в інші фази НН і вимірюють полярність ЕРС обмоток ВН інших фаз. Відмітити в звіті виводи  $B$ ,  $Y$ ,  $A$  та  $X$ .

3. Після проведення маркування з'єднати обмотки трансформатора за схемою  $Y/Y-0$  або  $Y/\Delta-11$ . Схему задає викладач.

4. У зібраній схемі (п.п. 3) з'єднати проводом виводи  $A$  та  $a$  трансформатора. Подати на первинну обмотку напругу  $380\text{ В}$ . Виміряти вольтметром  $PV1$  напруги  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ ,  $U_{Bb}$ ,  $U_{Cb}$ ,  $U_{Cc}$ ,  $U_{Cc}$ . Визначити групу з'єднання обмоток для зібраної схеми. Для визначення групи побудувати векторну діаграму лінійних напруг (рис. 5.7, б).

5. Методом поляриметра перевірити вірність визначення групи з'єднання п.п. 4 (метод поляриметра описаний в теоретичних відомостях).

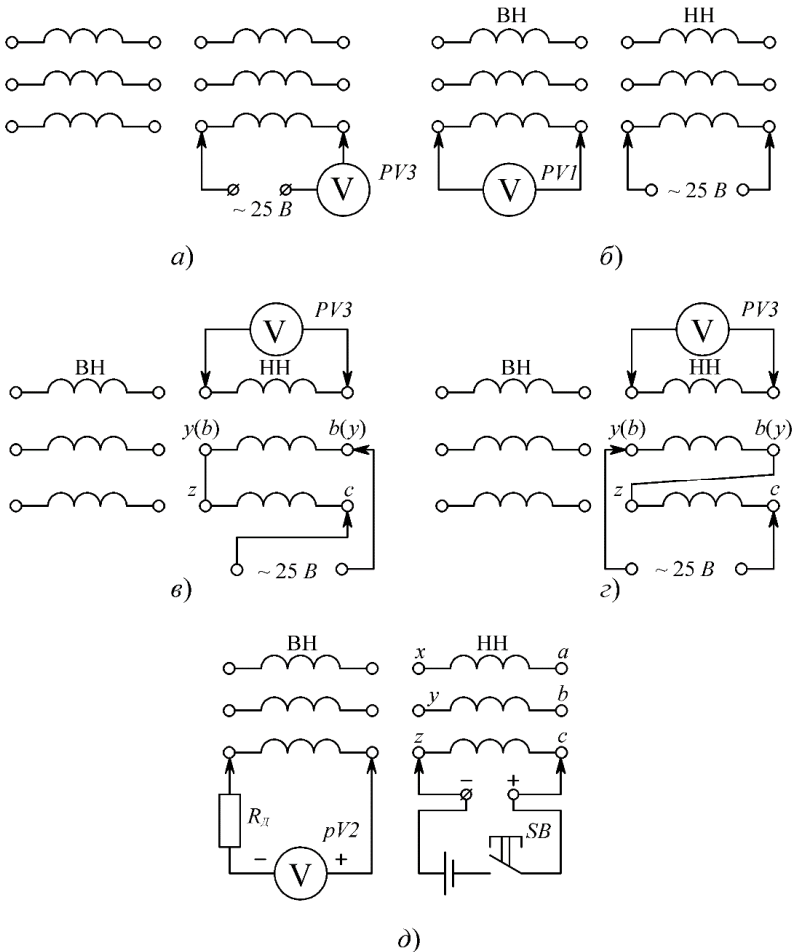


Рис. 5.10. Схеми для визначення маркування виводів трансформатора

#### 5.4. Зміст звіту

1. Короткі теоретичні відомості.
2. Опис схеми установки, паспортні дані трансформатора.
3. Схеми за якими виконувалось маркування і короткі коментарі до виконання дослідів.
4. Схема з'єднання обмоток трансформатора з нанесенням маркування, що була задана викладачем.
5. Векторна діаграма лінійних напруг з необхідними побудовами і поясненням визначення групи з'єднання.
6. Таблиця перевірки групи з'єднання за методом поляриметра.
7. Висновки.

#### 5.5. Контрольні запитання

1. Для чого потрібне маркування обмоток трансформаторів? Як позначаються виводи трансформаторів?
2. Як проводиться маркування виводів обмоток трансформатора?
3. Чим визначається група з'єднання трансформатора?
4. Поясніть, на прикладі однофазного трансформатора, як маркування виводів або напрямок намотки обмоток впливає на групу з'єднання трансформатора.
5. Перелічіть стандартні групи з'єднання одно- і трифазних трансформаторів. Зобразіть відповідні їм схеми і векторні діаграми напруг.
6. Які групи з'єднання можуть бути отримані при однаковій схемі з'єднання обмоток ВН і НН?
7. Які групи з'єднання називаються основними, а які – похідними?
8. Яким чином із основних груп з'єднання можна отримати похідні?
9. Як за допомогою вольтметра визначити групу з'єднання обмоток трифазного трансформатора?
10. Як за допомогою метода поляриметра визначити групу з'єднання обмоток трифазного трансформатора?

## РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

1. Яцун М. А. Електричні машини / М. А. Яцун. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 440 с.
2. Загірняк М. В. Електричні машини / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К.: Знання, 2009. – 399 с.
3. McPherson G., Laramore R. D. An Introduction to Electrical Machines and Transformers / George McPherson, Robert D. Laramore. – John Wiley & Sons, 1990 – 574 p.
4. Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery / Umans Stephen D. – New York: McGraw-Hill, 2014. – 702 p.
5. Winders J. J. Power Transformers: Principles and Applications / John J. Winder, Jr. – New York: Marcel Dekker, 2007. – 347 p.
6. Flanagan W.M. Handbook of transformer design and applications / William M. Flanagan. – New York: McGraw-Hill, 1992. – 496 p.
7. Трансформатори силові. Терміни та визначення: ДСТУ 3270-95. – [Чинний від 1.07.1996]. – К.: Держстандарт України. – 87 с.
8. ДСТУ EN 10107:2009 Лист і штаба з електротехнічної сталі текстуровані у стані повного оброблення. Технічні умови постачання (EN 10107:2005, IDT). – [Чинний від 1.07.2011].
9. ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT). – [Чинний від 1.10.2014].