

Лекція №6

(частина 1)

ТРАНСФОРМАТОРИ

План лекції:

1. Призначення і принцип дії трансформаторів.
2. Будова трансформаторів.
3. Робочий процес трансформатора.

1 Призначення і принцип дії трансформаторів

Трансформатором називається електромагнітний статичний пристрій, призначений для перетворення шляхом електромагнітної індукції струмів і напруг однієї величини, в струми та напруги іншої, при незмінній частоті.

Враховуючи значну різноманітність трансформаторів, вони класифікуються за низкою показників. Досить поширеною є класифікація трансформаторів за призначенням:

– **силові** – призначені для зниження втрат в лініях електропередач (ЛЕП): спершу напруга біля джерела (електростанції) підвищується, а отже, струм знижується, і передається електрична енергія при напрузі 220, 330, 500, 750 кВ і більше, а потім знижується, в кілька етапів, до робочої напруги 6-10 кВ, 660, 380 та 220 В. Слід зауважити, що в процесі передачі електроенергії підвищення напруги в 10 раз, знижує втрати в ЛЕП у 100 разів;

– **спеціальні силові** – для живлення електричних дугових печей та зварювальних пристроїв;

– **вимірювальні трансформатори струму та напруги** – призначені для розширення меж вимірювальних приладів, живлення обмоток пристроїв обліку електроенергії, захисту і автоматики в системах електропередачі та відокремлення вимірювальних кіл від силових;

– **трансформатори автоматики** та обчислювальної техніки (пік-трансформатори, імпульсні, множники частоти та числа фаз тощо) – для створення сигналів та імпульсів у колах автоматики і обчислювальної техніки;

– **трансформатори побутових пристроїв**, які мають значну кількість обмоток і використовуються у побутових пристроях, телевізорах, радіоприймачах тощо.

Крім цього, широко використовується поділ трансформаторів за іншими ознаками, наприклад: за числом фаз (однофазні, трифазні, багатофазні); за способом охолодження (з природним і штучним, сухі та масляні); за числом обмоток на фазу (двообмоткові, триобмоткові і багатообмоткові); за конструкцією магнітної системи (площині, просторові, стержневі, броньові і бронестрижневі) та інші.

Найпростіший силовий трансформатор складається з магнітопроводу (осердя), виконаного з феромагнітного матеріалу (зазвичай листова електротехнічна сталь), і двох обмоток, розташованих на стержнях магнітопроводу (рисунок 6.1, *а*). Одна з обмоток, що зветься **первинною** із числом витків W_1 , приєднана до джерела змінного струму на напругу U_1 . До іншої обмотки із числом витків W_2 , що зветься **вторинною**, підключено навантаження Z_H . Первинна і вторинна обмотки трансформатора не мають електричного зв'язку і потужність із однієї обмотки в іншу передається електромагнітним шляхом.

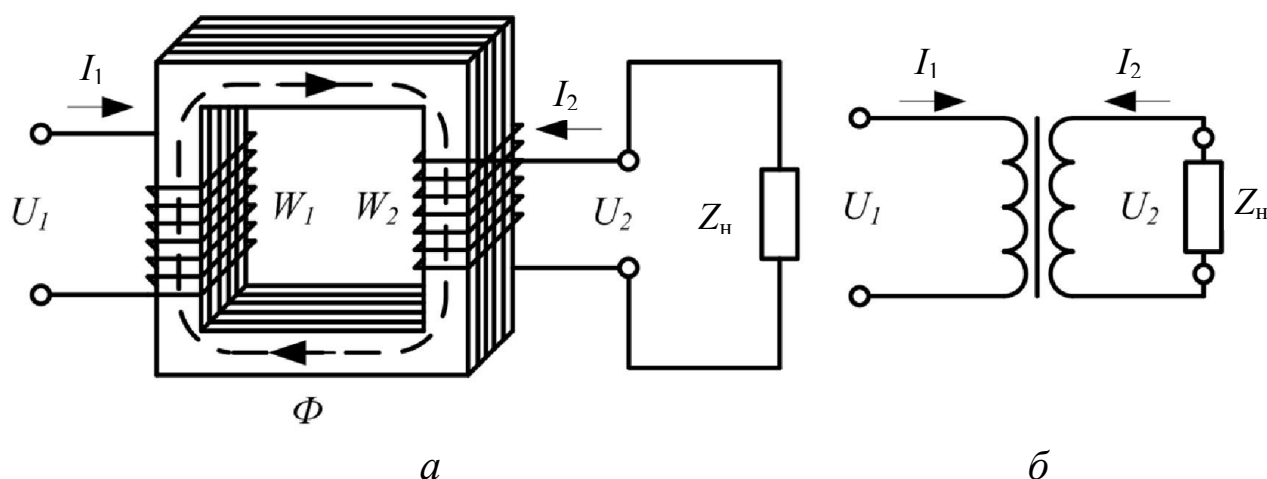


Рисунок 6.1 – Електромагнітна (*а*) і принципова (*б*) схеми трансформатора

Магнітопровід, на якому розташовані ці обмотки, служить для посилення індуктивного зв'язку між обмотками.

При підключенні первинної обмотки до джерела змінного струму у витках цієї обмотки протікає змінний струм I_1 і створює намагнічувальну силу $F_1 = I_1 \cdot W_1$. В магнітній системі трансформатора з магнітним опором R_m виникає потік $\Phi_1 = F_1 / R_m$. Цей потік, як і напруга мережі, в часі змінюється за синусоїдальним законом, а в просторі осердя трансформатора він пульсує, перетинаючи витки первинної W_1 та вторинної W_2 обмоток, і створює в них відповідно ЕРС E_1 та E_2 .

ЕРС первинної обмотки E_1 називається ЕРС самоіндукції, її миттєве значення e_1 визначається за виразом

$$e_1 = -W_1 \cdot d\Phi / dt, \quad (6.1)$$

у вторинній обмотці – ЕРС взаємоіндукції E_2 із миттєвим значенням e_2

$$e_2 = -W_2 \cdot d\Phi / dt, \quad (6.2)$$

де W_1 і W_2 – число витків у первинній і вторинній обмотках трансформатора.

При підключенні навантаження Z_n до виводів вторинної обмотки трансформатора під дією ЕРС E_2 у колі цієї обмотки потече струм I_2 , який створить власну намагнічувальну силу $F_2 = I_2 \cdot W_2$ і, відповідно, потік Φ_2 . Потіки Φ_1 та Φ_2 замикаючись в одній магнітній системі, створюють результуючий магнітний потік Φ_0

$$\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2. \quad (6.3)$$

Враховуючи, що первинна обмотка ввімкнена до мережі, потужність якої можна розглядати як нескінченно велику, в порівнянні з потужністю трансформатора, то величина діючого значення змінного магнітного потоку Φ_0 , при будь-якій зміні навантаження, змінюватись не може, тобто завжди залишається такою, щоб магнітна система була насиченою, як і при н.х.. Дійсно, якщо магнітний потік Φ_2 направлений назустріч потоку Φ_1 , то зниження Φ_0 неможливе, тому що зростання потоку Φ_2 автоматично компенсується з мережі збільшенням струму I_1 , а отже, і магнітного потоку Φ_1 , а магнітна система залишається насиченою. Саме з цієї причини відсутнє поняття «**реакції якоря**» у магнітній системі трансформатора. Як результат, зростання струму навантаження на затискачах вторинної обмотки трансформатора I_2 автоматично приводить до зростання струму I_1 , завдяки насиченому стану магнітної системи й незмінності діючого значення результуючого (основного) магнітного потоку Φ_0 .

На виводах вторинної обмотки встановлюється напруга U_2 . У підвищувальних трансформаторах $U_2 > U_1$, а в знижувальних $U_2 < U_1$.

З виразів (6.1) і (6.2) видно, що ЕРС e_1 і e_2 , які наводяться в обмотках трансформатора, відрізняються одне від одного лише різ-

ним числом витків W_1 і W_2 в обмотках, тому, застосовуючи обмотки з необхідним співвідношенням витків, можна виготовити трансформатор практично на будь-яке відношення напруг.

Обмотку трансформатора, підключену до мережі з більш високою напругою, називають **обмоткою вищої напруги (ВН)**; обмотку, приєднану до мережі меншої напруги, – обмоткою **нижчої напруги (НН)**.

Якщо первинною обмоткою є обмотка ВН, то трансформатор називається **знижувальним**, якщо ж НН, то – **підвищувальним**.

Як і обертові електричні машини, трансформатор має властивість оборотності, тобто один і той же трансформатор може використовуватись і як знижувальний, і як підвищувальний. Але, звичайно, кожен трансформатор має окреме призначення: або він підвищувальний, або – знижувальний.

З принципу дії витікає, що трансформатор може працювати лише в мережі змінного струму. При ввімкненні первинної обмотки в мережу постійного струму, магнітний потік змінюватись не буде ($d\Phi/dt = 0$). Отже в обмотках трансформатора не буде створюватись ЕРС, і як наслідок у первинній обмотці буде протікати значний струм, тому що при відсутності ЕРС він буде обмежуватись тільки відносно незначним активним опором обмотки. Значний струм може викликати недопустиме перегрівання обмотки і навіть її перегорання.

На рисунку 6.1, б наведено зображення однофазного трансформатора на принципових електричних схемах.

Властивості трансформатора визначаються його номінальними параметрами, до яких відносяться: 1) номінальна первинна напруга (лінійна) $U_{1ном}$, В або кВ; 2) номінальна вторинна напруга (лінійна) $U_{2ном}$ (напруга на виводах вторинної обмотки при відключеному навантаженні і номінальній первинній напрузі), В або кВ; 3) номінальні лінійні струми в первинній $I_{1ном}$ і вторинній $I_{2ном}$ обмотках, А; 4) номінальна повна потужність $S_{1ном}$, кВ·А (для однофазного трансформатора $S_{ном} = U_{1ном} \cdot I_{1ном}$, для трифазного – $S_{ном} = \sqrt{3}U_{1ном} \cdot I_{1ном}$).

Номінальні лінійні струми обчислюють за номінальною потужністю трансформатора: для трифазного трансформатора

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{1ном}}; \quad (6.4)$$

$$I_{2ном} = \frac{S_{ном} 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{2ном}} \quad (6.5)$$

де $S_{ном}$ – номінальна потужність трифазного трансформатора, кВ·А.

Кожен трансформатор розрахований для включення в мережу змінного струму певної частоти. В Україні трансформатори загально-го призначення розраховані на частоту $f = 50$ Гц (у деяких інших країнах $f = 60$ Гц), у пристроях автоматики і зв'язку застосовують трансформатори на частоти 50, 400 або 1000 Гц.

2 Будова трансформаторів

Сучасний силовий трансформатор – це досить складний пристрій, що має значну кількість різних конструктивних елементів: магнітопровід, обмотки, виводи, бак тощо. Магнітопровід із насадженими на стержні обмотками складає **активну частину трансформатора**. Решта елементів називаються **допоміжними елементами (неактивними)**.

Розглянемо більш детально конструкцію основних частин трансформатора.

Магнітопровід. Магнітне коло трансформатора створює магнітопровід (вживається також назва **магнітна система**). Магнітопровід та елементи, що його стягують, називаються **кістяком**.

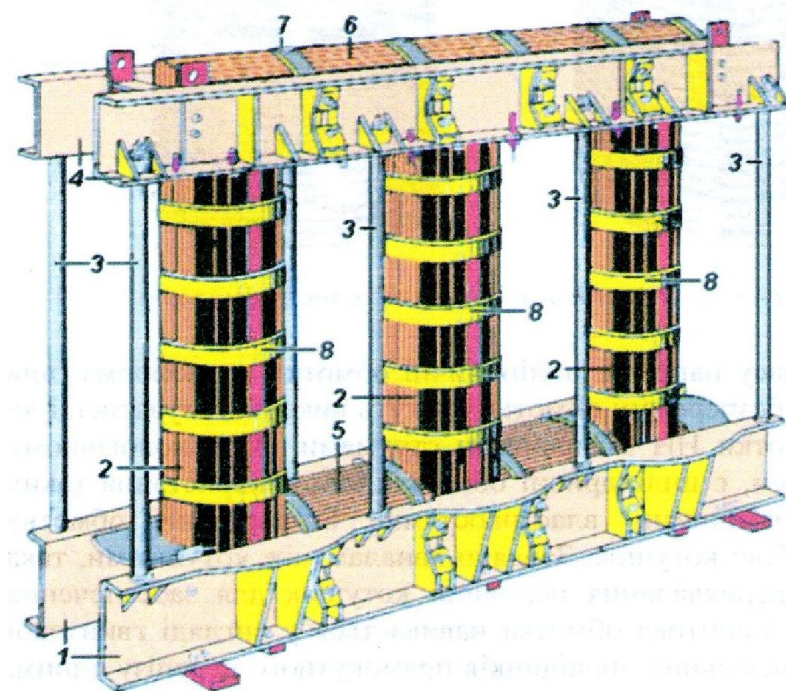


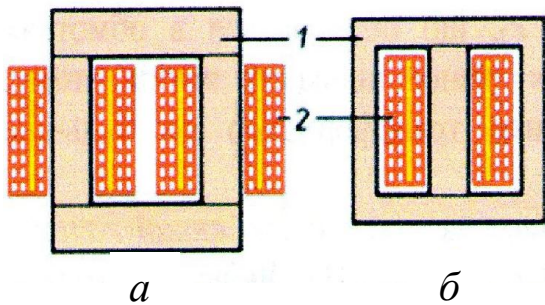
Рисунок 6.2 – Кістяк силового трифазного трансформатора

На рисунку 6.2 зображено кістяк трифазного трансформатора. Кістяк виконує подвійну функцію: поперше, він складає магнітне коло, по якому замикається магнітний потік, а по-друге, на ньому кріпляться обмотки, відводи (відпайки), перемикачі та інші деталі і вузли, тобто він є конструктивною основою трансформатора.

Як уже зазначалось, магнітопровід складається зі стержнів 2, на яких розміщуються обмотки, і ярма (нижнього 5 та верхнього 6), що з'єднують стержні. Магнітна система має шихтовану конструкцію, тобто набирається з окремих пластин високоякісної електротехнічної сталі товщиною (0,28-0,35) мм (у сучасних конструкціях і менше), ізолюваних одна від одної ізоляційною плівкою. Така конструкція найбільш технологічна і дозволяє суттєво знизити втрати від вихрових струмів, а якість сталі – втрати від гістерезису, що, в кінцевому результаті, підвищує ККД трансформатора.

У сучасних силових трансформаторах, використовується конструкція магнітних систем із косими та з комбінованими (частково прямі, частково косі) стиками при шихтуванні, що дозволяє знизити втрати в стиках від анізотропії сталі. Стержні системи опресовуються й стягуються бандажами 8, а ярма – балками (нижніми 1 та верхніми 4), що з'єднуються шпильками 3 і металевими напівбандажами 7.

В залежності від взаємного розташування стержнів, ярем і обмоток магнітопроводи поділяються на стержневі (рисунок 6.3, а), броньові (рисунок 6.3, б) та бронестержньові. У стержньовій кон-



а – стержнева; б – броньова

Рисунок 6.3 – Конструкції магнітопроводи трансформаторів

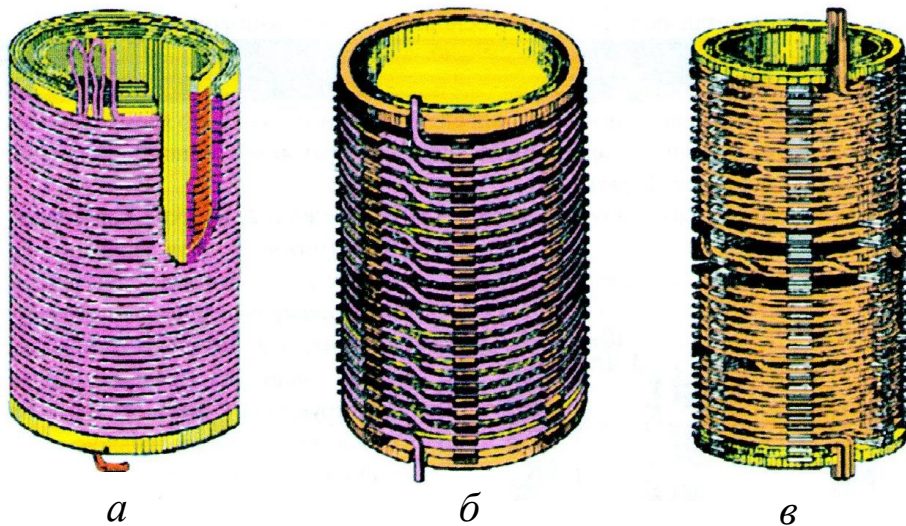
якби обмотки розташовувались тільки на одному стержні. Найчастіше бронестержньова конструкція використовується у трансформаторах великої потужності для зниження висоти магнітної системи, що забезпечує вписування такого трансформатора у залізничний габарит.

Крім шихтованої конструкції магнітні системи можуть виконуватися витими, тобто навиватися зі стрічки електротехнічної сталі безпосередньо в обмотку на спеціальному обладнанні. Частіше (для малопотужних трансформаторів) після навивання магнітопроводи ро-

зрізаються для подальшого насаджування обмоток, в цьому випадку вони називаються стиковими.

Обмотки. Елементами електричних кіл трансформатора є обмотки. Обмотки трансформаторів виконуються із мідних або алюмінієвих обмоткових проводів круглого чи прямокутного перерізу, ізолюваних лаковим покриттям, бавовняною пряжею або кабельним папером. Як правило, обмотки намотуються на паперово-бакелітові циліндри і насаджуються концентрично одна другій на стержень осердя, при цьому обмотка НН розміщується безпосередньо на стержні, а обмотка ВН – на ній (зверху), зовні. Таке розміщення дозволяє суттєво знизити ізоляційні проміжки між стержнями та обмотками, а отже і габарити трансформатора в цілому. Крім концентричних обмоток можуть використовуватися обмотки, що чергуються. В таких обмотках котушки ВН чергуються з котушками НН по висоті стержня, що дозволяє знизити магнітне розсіювання, але суттєво ускладнює ізоляцію.

В силових трансформаторах переважно використовуються концентричні обмотки, які за характером намотування можна поділити на циліндричні (рисунк 6.4, *а*), безперервні котушкові (рисунк 6.4, *б*) та гвинтові (рисунк 6.4, *в*).



а – циліндрична; *б* – безперервна; *в* – гвинтова

Рисунок 6.4 – Обмотки силового трансформатора

В залежності від номінального струму та класу напруги, циліндричні обмотки трансформаторів поділяються на одношарові, двошарові та багатошарові. Ці та безперервні обмотки можуть використовуватись і як обмотки ВН, і як обмотки НН, а гвинтові – лише як обмотки НН із значними струмами.

У технологічному відношенні найпростішими, а отже, і найдешевшими, є циліндричні обмотки, що намотуються на паперово-бакелітові циліндри в один або кілька паралельних провідників. Використання таких обмоток обмежується їх гіршими електродинамічними властивостями.

Безперервна обмотка виконується у вигляді окремих сполучених між собою котушок. Завдяки каналам між котушками, така обмотка добре охолоджується, але необхідність перекладання половини котушок для забезпечення безперервності значно ускладнює її виготовлення.

Гвинтова обмотка навивається у вигляді гвинтової лінії з витків, складених із кількох (від 4 до 20) паралельних провідників прямокутного перерізу одним, двома чи більше ходами. Значна кількість паралельних провідників, концентрично розміщених відносно один одного, вимагає їх перекладання (виконання транспозиції) при намотуванні. Перекладання дозволяє вирівняти довжину окремого провідника і створити для кожного з них однакові умови щодо поля розсіювання, але утрудняє процес виготовлення і підвищує собівартість гвинтової обмотки.

Допоміжні елементи. За способом охолодження силові трансформатори поділяються на: сухі типа С (охолоджуються навколишнім повітрям); сухі типа СД (штучне форсування руху повітря за допомогою вентиляторів); масляні типа М (охолоджуються рідким електроізоляційним матеріалом (трансформаторним маслом)); масляні типа Д (здійснюється примусова циркуляція повітря вздовж зовнішніх поверхонь радіаторів та бака при природній циркуляції масла в них). В масляних трансформаторах (рисунок 6.5) активна частина поміщається в бак, заповнений трансформаторним маслом. Трансфо-

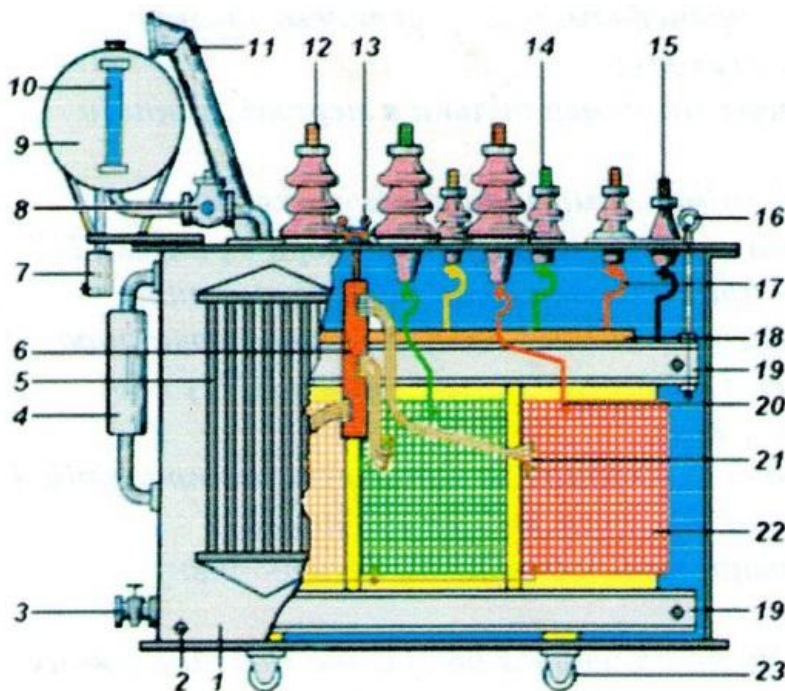


Рисунок 6.5 – Силовий масляний трансформатор

помогою вентиляторів); масляні типа М (охолоджуються рідким електроізоляційним матеріалом (трансформаторним маслом)); масляні типа Д (здійснюється примусова циркуляція повітря вздовж зовнішніх поверхонь радіаторів та бака при природній циркуляції масла в них). В масляних трансформаторах (рисунок 6.5) активна частина поміщається в бак, заповнений трансформаторним маслом. Трансфо-

рматорне масло, маючи кращу теплопровідність ніж повітря, служить для відводу теплоти від активної частини трансформатора. Крім цього, трансформаторне масло, як гарний діелектрик, забезпечує високу електричну міцність, а отже, і більш надійну роботу трансформатора при менших габаритах. У трансформаторів незначної потужності до 25 кВ·А застосовуються баки із гладкими стінками. У більш потужних – трубчаті чи гофровані баки, або бак 1 із навісними радіаторами 5. Навісні радіатори збільшують поверхню охолодження і дозволяють знизити габарити трансформатора. На кришці бака розташовуються:

- виводи ВН 12, НН 14, та нейтралі 15 для з'єднання відводами 17 і 20 обмоток 22 трансформатора з мережею та навантаженням;
- ручний привод 13 перемикача 6, призначеного для ступінчатої зміни числа витків, як правило, в обмотці ВН, де виконуються для цього відводи 21;
- розширювач 9, ним компенсується об'єм масла при зміні температури і зменшується площа дотику масла до повітря;
- масловказівник 10 – скляна трубка, що з'єднана обома кінцями з розширювачем і указує на рівень трансформаторного масла в розширювачі при фіксованій температурі;
- повітроосушник 7 – заповнена силікагелем ємність, через яку масло розширювача сполучується з навколишнім повітрям;
- газове реле 8, призначене для подачі сигналу й відмикання трансформатора від мережі при аварійних режимах, що супроводжуються виділенням газу з масла; із цією метою газове реле має дві пари контактів, розміщених в спеціальних поплавках;
- викидна труба 11 забезпечує захист трансформаторів, потужність яких 1000 кВ·А і більше, від розривання бака при значному зростанні тиску в середині бака у аварійних випадках; із цією метою викидна труба закінчується фланцем зі скляним диском, який і лопається при зростанні тиску;
- рим-болти 16 для піднімання активної частини, які найчастіше сполучуються шпильками з ярмовими балками 19, що стягують ярмо 18;
- термосифонний фільтр 4 забезпечує постійне очищення масла від вологи й представляє заповнений силікагелем циліндр, сполучений з верхньою та нижньою частинами бака, у якій розташовуються також кран для заливання під тиском масла 3 і болт заземлення 2;
- візок 23 прикріплюється до дна бака і забезпечує переміщення трансформатора в межах підстанції.

3 Робочий процес трансформатора

3.1 Основні рівняння трансформатора

Основний змінний магнітний потік Φ у магнітопроводі трансформатора, зчіплюючись із витками обмоток W_1 і W_2 (див. рисунок 6.1), наводить у них ЕРС [див. вирази (6.1) та (6.2)]

$$e_1 = -W_1 \cdot d\Phi / dt;$$

$$e_2 = -W_2 \cdot d\Phi / dt.$$

Припустимо, що магнітний потік Φ є синусоїдальною функцією часу, тобто

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t, \quad (6.6)$$

де Φ_{\max} – максимальне значення потоку.

Тоді, підставивши (6.6) у формулу ЕРС e_1 (6.1) і провівши диференціювання, одержимо

$$e_1 = -\omega \cdot W_1 \cdot \Phi_{\max} \cdot \cos \omega t. \quad (6.7)$$

Але оскільки $\cos \omega t = -\sin(\omega t - \pi/2)$, то

$$e_1 = \omega \cdot W_1 \cdot \Phi_{\max} \cdot \sin(\omega t - \pi/2). \quad (6.8)$$

За аналогією,

$$e_2 = \omega \cdot W_2 \cdot \Phi_{\max} \cdot \sin(\omega t - \pi/2), \quad (6.9)$$

З (6.8) і (6.9) видно, що ЕРС e_1 і e_2 відстають по фазі від потоку Φ на кут $\pi/2$ (90°). Максимальне значення ЕРС

$$E_{1\max} = \omega \cdot W_1 \cdot \Phi_{\max}. \quad (6.10)$$

Розділивши $E_{1\max}$ на $\sqrt{2}$ і підставивши $\omega = 2\pi f$, одержимо діюче значення первинної ЕРС (В)

$$E_1 = E_{1\max} / \sqrt{2} = (2\pi / \sqrt{2}) \cdot W_1 \cdot f \cdot \Phi_{\max} = 4,44 W_1 \cdot f \cdot \Phi_{\max}. \quad (6.11)$$

Аналогічно, для вторинної ЕРС

$$E_2 = 4,44 \cdot W_2 \cdot f \cdot \Phi_{\max}. \quad (6.12)$$

Відношення ЕРС обмотки вищої напруги до ЕРС обмотки нижчої напруги називають коефіцієнтом трансформації

$$k = E_1 / E_2 = W_1 / W_2. \quad (6.13)$$

При практичних розрахунках коефіцієнт трансформації з деяким допущенням приймають рівним відношенню номінальних напруг обмоток ВН і НН

$$k \approx U_{1\text{ном}} / U_{2\text{ном}}. \quad (6.14)$$

Струми I_1 і I_2 в обмотках трансформатора крім основного магнітного потоку Φ створюють магнітні потоки розсіювання $\Phi_{\sigma 1}$ й $\Phi_{\sigma 2}$ (рисунок 6.6), кожний з яких зчеплений з витками лише власної обмотки і індукує у ній ЕРС розсіювання. Ці ЕРС у первинній і вторинній обмотках мають такі значення

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \cdot di_1 / dt; \quad e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \cdot di_2 / dt, \quad (6.15)$$

де $L_{\sigma 1}$ і $L_{\sigma 2}$ – індуктивності розсіювання.

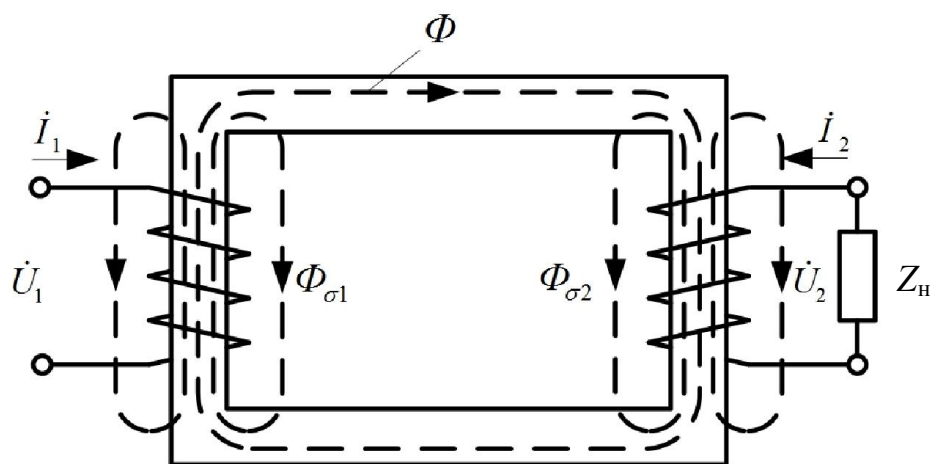


Рисунок 6.6 – Магнітні потоки в однофазному трансформаторі

Оскільки магнітні потоки розсіювання замикаються головним чином у немагнітному середовищі, магнітна проникність якого постійна, то і індуктивності $L_{\sigma 1}$ і $L_{\sigma 2}$ можна вважати постійними.

Діючі значення ЕРС розсіювання пропорційні струмам у відповідних обмотках

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 x_1; \quad \dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 x_2, \quad (6.16)$$

де x_1, x_2 – індуктивні опори розсіювання первинної і вторинної обмоток відповідно, Ом (знак мінус у цих виразах свідчить про реактивність ЕРС розсіювання).

Таким чином, у кожній з обмоток трансформатора індуються по дві ЕРС: ЕРС від основного потоку Φ і ЕРС від потоку розсіювання ($\Phi_{\sigma 1}$ у первинній обмотці і $\Phi_{\sigma 2}$ у вторинній обмотці).

Для первинного кола трансформатора, ввімкненого в мережу на напругу U_1 , з урахуванням падіння напруги в активному опорі первинної обмотки r_1 можна записати рівняння напруг згідно другого закону Кірхгофа

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_1 r_1, \quad (6.17)$$

або, після перенесення ЕРС \dot{E}_1 і $\dot{E}_{\sigma 1}$ в праву частину рівняння і виразивши ЕРС розсіювання через індуктивний опір розсіювання x_1 , одержимо рівняння напруг для первинного кола трансформатора

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1. \quad (6.18)$$

ЕРС первинної обмотки E_1 , що наводиться основним магнітним потоком Φ , представляє собою ЕРС самоіндукції, а тому перебуває у протифазі з підведеною до первинної обмотки напругою U_1 .

Звичайно індуктивне $j\dot{I}_1 x_1$ і активне $\dot{I}_1 r_1$ падіння напруги невеликі, а тому з деяким наближенням можна вважати, що підведена до трансформатора напруга U_1 врівноважується ЕРС E_1 , тобто

$$\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1). \quad (6.19)$$

Для вторинного кола трансформатора, замкнутого на навантаження з опором Z_n , рівняння напруг має вигляд

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 Z_n, \quad (6.20)$$

тобто сума ЕРС, наведених у вторинній обмотці ($\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2}$), урівноважується сумою падінь напруг $\dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 Z_n$. Де r_2 – активний опір вторинної обмотки. Падіння напруги на навантаженні $\dot{I}_2 Z_n$ являє собою напругу на виводах вторинної обмотки трансформатора

$$I_2 Z_n = U_2. \quad (6.21)$$

Приведемо рівняння (6.20) до виду, аналогічному рівнянню ЕРС для первинного кола (6.18). При цьому врахуємо вираз (6.19) і (6.21) і одержимо рівняння напруг для вторинного кола трансформатора

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2 = \dot{I}_2 Z_n. \quad (6.22)$$

Із цього рівняння видно, що напруга на виході навантаженого трансформатора відрізняється від ЕРС вторинної обмотки на величину падіння напруг у цій обмотці.

Припустимо, що трансформатор працює в режимі холостого ходу (рисунок 6.7, а), тобто до виводів його первинної обмотки підведена напруга U_1 , а вторинна обмотка розімкнута ($U_2 = 0$). Струм I_0 у первинній обмотці при цих умовах називають струмом холостого ходу.

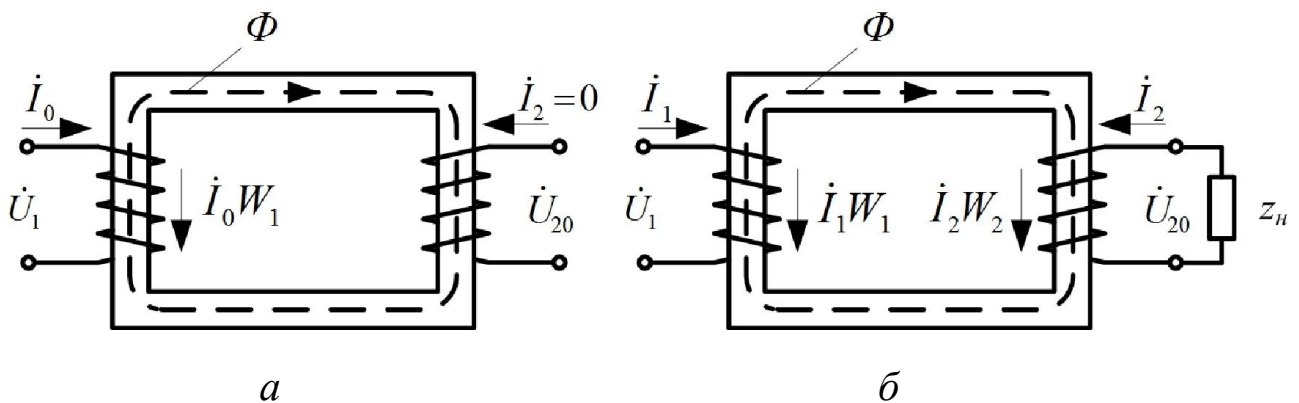


Рисунок 6.7 – Режими холостого ходу (а) і навантаження (б) в однофазному трансформаторі

Магніторухійна сила (МРС) $I_0 W_1 = F_{10}$, створена цим струмом, наводить у магнітопроводі трансформатора основний магнітний потік, максимальне значення якого

$$\Phi_{\max} = (\sqrt{2}/R_m) \cdot I_0 W_1 \quad (6.23)$$

де R_m – магнітний опір магнітопроводу.

При замиканні вторинної обмотки на навантаження Z_n (рисунок 6.7, б) у ній виникає струм I_2 . При цьому струм у первинній обмотці збільшується до значення I_1 .

Тепер потік Φ_{\max} створюється діями МРС $I_1 W_1 = F_1$ і $I_2 W_2 = F_2$

$$\Phi_{\max} = (\sqrt{2}/R_m) \cdot (I_1 W_1 + I_2 W_2). \quad (6.24)$$

Цей потік можна визначити з (6.11)

$$\Phi_{\max} = E_1 / (4,44W_1f),$$

або, враховуючи, що $\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1)$, одержимо

$$\Phi_{\max} \approx U_1 / (4,44W_1f). \quad (6.25)$$

З (6.25) видно, що значення основного магнітного потоку Φ практично не залежить від навантаження трансформатора, тому що напруга U_1 незмінна. Однак варто мати на увазі, що це положення є наближеним і відноситься до випадків навантаження, що не перевищує номінальне. Пояснюється це тим, що положення про незмінність потоку Φ прийнято на підставі рівняння (6.19) $\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1)$, що не враховує падіння напруги в первинному колі.

Прийняте положення, що $\Phi = const$ дозволяє прирівняти вирази (6.23) і (6.25)

$$(\sqrt{2}/R_m) \cdot \dot{I}_0 W_1 = (\sqrt{2}/R_m) \cdot (\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2)$$

і одержати рівняння МРС трансформатора

$$\dot{I}_0 W_1 = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2. \quad (6.26)$$

Перетворюючи (6.26), можна МРС первинної обмотки $\dot{I}_1 W_1$ представити у вигляді суми двох складових

$$\dot{I}_1 W_1 = \dot{I}_0 W_1 + (-\dot{I}_2 W_2).$$

Складова $\dot{I}_0 W_1$ наводить у магнітопроводі трансформатора основний магнітний потік Φ , а складова $-\dot{I}_2 W_2$ врівноважує МРС вторинної обмотки $\dot{I}_2 W_2$.

Вплив МРС вторинної обмотки трансформатора $\dot{I}_2 W_2$ на основний магнітний потік Φ можна пояснити за допомогою правила Ленца. Відповідно до цього правила наведена в обмотці ЕРС створює в ній такий струм, що своєю магнітною дією спрямований проти причини, що викликала появу цієї ЕРС. Причиною наведення ЕРС E_2 у вторинній обмотці трансформатора є основний магнітний потік Φ , тому струм у вторинній обмотці I_2 створює МРС $\dot{I}_2 W_2$, спрямовану зустрічно потоку

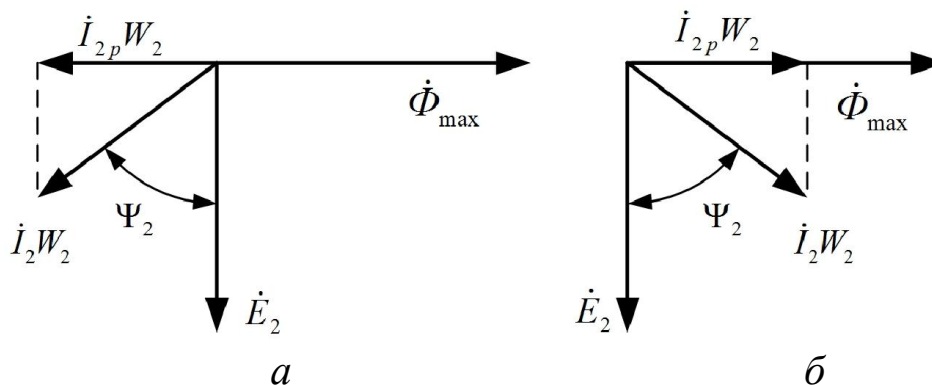
Φ , тобто перебуває з ним у протифазі і прагне послабити цей потік. Якби обмотка W_2 була замкнута накоротко або на чисто індуктивний опір і при цьому не мала активного опору, то струм \dot{I}_2 відставав би по фазі від ЕРС \dot{E}_2 на кут $\Psi_2 = 90^\circ$ і вся МРС $\dot{I}_2 W_2$ розмагнічувала магнітопровід. Але в реальних умовах вторинна обмотка замкнута на опір навантаження $Z_n = r_n \pm jx$, та ще й сама має активний опір r_2 . Тому фазний зсув струму \dot{I}_2 від ЕРС \dot{E}_2 відрізняється від 90° і з основним магнітним потоком Φ взаємодіє не вся МРС $\dot{I}_2 W_2$, а лише її реактивна складова.

При активно-індуктивному навантаженні, коли $Z_n = r_n \pm jx$ і струм навантаження \dot{I}_2 відстає по фазі від ЕРС вторинної обмотки \dot{E}_2 на кут Ψ_2 , МРС $\dot{I}_2 W_2$ своєю реактивною (індуктивною) складовою $\dot{I}_{2p} W_2$ розмагнічує магнітопровід

$$\dot{I}_{2p} W_2 = \dot{I}_2 W_2 \sin \Psi_2, \quad (6.27)$$

де $\dot{I}_{2p} = \dot{I}_2 \sin \Psi_2$ – реактивна складова струму навантаження трансформатора.

На рисунку 6.8, а представлена векторна діаграма МРС для випадку активно-індуктивного навантаження трансформатора. На діаграмі вектор ЕРС вторинної обмотки \dot{E}_2 відстає по фазі від вектора основного магнітного потоку Φ_{\max} на кут 90° , а вектор МРС вторинної обмотки $\dot{I}_2 W_2$ відстає по фазі від ЕРС \dot{E}_2 на кут Ψ_2 (рисунок 6.8, а). З виконаних на цій діаграмі побудов видно, що реактивна (індуктивна) складова МРС вторинної обмотки $\dot{I}_{2p} W_2$ перебуває в протифазі з основним магнітним потоком Φ_{\max} , тобто розмагнічує магнітопровід трансформатора.



а – активно-індуктивне навантаження; б - активно-ємнісне навантаження

Рисунок 6.8 – Векторна діаграма МРС трансформатора

Аналізуючи роботу трансформатора, необхідно відзначити, що при навантаженні трансформатора в межах номінального значення основний магнітний потік Φ майже не змінюється і прийняте раніше положення, що $\Phi = const$, цілком є припустимим. Відбувається це тому, що МРС вторинної обмотки $\dot{I}_2 W_2$, реактивна складова якої розмагнічує магнітопровід, компенсується складовою первинної МРС

$$(-\dot{I}_2 W_2) = \dot{I}_1 W_1 - \dot{I}_0 W_1. \quad (6.28)$$

При коливаннях струму навантаження трансформатора \dot{I}_2 змінюється МРС вторинної обмотки $\dot{I}_2 W_2$, а це викликає відповідні зміни МРС первинної обмотки $\dot{I}_1 W_1$ за рахунок її складової $-\dot{I}_2 W_2$. Що ж стосується складової МРС холостого ходу $\dot{I}_0 W_1$, то її значення залишається практично незмінним, достатнім для створення в магнітопроводі трансформатора основного магнітного потоку $\Phi = const$.

При активно-ємнісному навантаженні трансформатора, коли $Z_n = r_n \pm jx$ і струм навантаження \dot{I}_2 випереджає по фазі ЕРС \dot{E}_2 на кут Ψ_2 , реактивна (ємнісна) складова МРС вторинної обмотки $\dot{I}_2 W_2$ співпадає по фазі з основним магнітним потоком Φ_{max} і підмагнічує магнітопровід трансформатора (рисунок 6.8, б). У цьому випадку, так само як і при активно-індуктивному навантаженні [див. (6.30)], складова первинної МРС $(-\dot{I}_2 W_2)$ компенсує дію вторинної МРС $\dot{I}_2 W_2$.

Розділивши рівняння МРС (6.26) на число витків w_1 , одержимо

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 W_2 / W_1, \text{ или } \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 \quad (6.29)$$

де $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 W_2 / W_1$, – струм навантаження (вторинний струм), приведенний до числа витків первинної обмотки.

Інакше кажучи, це такий струм, що в обмотці із числом витків W_1 створює таку ж МРС, що і струм I_2 у вторинній обмотці W_2 , тобто

$$I'_2 W_1 = I_2 (W_2 / W_1) W_1 = I_2 W_2.$$

Перетворивши вираз (6.29), одержимо рівняння струмів трансформатора

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \quad (6.30)$$

Із цього рівняння видно, що первинний струм I_1 можна розглядати як суму двох складових: складову I_0 , що створює МРС $I_0 W_1$, необхідну для наведення в магнітопроводі основного магнітного потоку Φ , і складову $-I'_2$, що створює МРС $-I'_2 W_1$ і компенсує МРС вторинної обмотки $I_2 W_2$ трансформатора. Така дія складових первинного струму приводить до того, що будь-яка зміна струму навантаження I_2 супроводжується зміною первинного струму I_1 за рахунок зміни його складової $-I'_2$, що перебуває в протифазі зі струмом навантаження I_2 .

Основний магнітний потік Φ є змінним, а тому магнітопровід трансформатора піддається систематичному перемагнічуванню. Внаслідок цього в магнітопроводі трансформатора мають місце магнітні втрати від гістерезису і вихрових струмів, що наводяться змінним магнітним потоком у пластинах електротехнічної сталі. Потужність магнітних втрат еквівалентна активній складовій струму н.х. Таким чином, струм н.х. має дві складові: реактивну I_{0p} , – представляє собою струм, що намагнічує, і активну I_{0a} , обумовлену магнітними втратами.

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}. \quad (6.31)$$

Зазвичай активна складова струму н.х. невелика і не перевищує 0,1 від I_0 , тому вона суттєво не впливає на струм н.х. трансформатора.

На рисунку 6.9 представлена векторна діаграма, на якій зображені вектори струму н.х. I_0 і його складові I_{0a} і I_{0p} . Кут δ , на який вектор основного магнітного потоку $\dot{\Phi}_{\max}$ відстає по фазі від струму i_0 , називають кутом магнітних втрат. Неважко помітити, що цей кут збільшується з ростом активної складової струму н.х. I_{0a} , тобто з ростом магнітних втрат у магнітопроводі трансформатора.

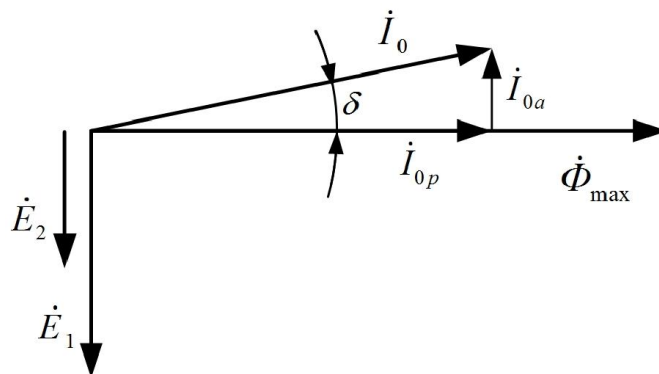


Рисунок. 6.9 – Розкладання струму н.х. трансформатора на складові

Сила струму н.х. у трансформаторах великої і середньої потужності відповідно становить (2-10)% від номінального первинного струму. Тому при навантаженні, близькому до номінального, нехтуючи струмом I_0 і перетворюючи (6.26), одержимо

$$I_1 / I_2 = W_2 / W_1, \quad (6.32)$$

тобто. струми в обмотках трансформатора обернено пропорційні числам витків цих обмоток: струм більше в обмотці з меншим числом витків і менше в обмотці з більшим числом витків. Тому обмотки НН виконують проводом більшого перерізу, ніж обмотки ВН, що мають більше число витків.

3.2 Приведений трансформатор, його схема заміщення і векторна діаграма

У загальному випадку параметри первинної обмотки трансформатора відрізняються від параметрів вторинної обмотки. Ця різниця найбільш відчутна при більших коефіцієнтах трансформації, що ускладнює розрахунки і побудову векторних діаграм, оскільки в цьому випадку довжина векторів електричних величин первинної обмотки значно відрізняється від довжини однойменних векторів вторинної обмотки. Зазначені труднощі можна усунути приведенням всіх параметрів трансформатора до однакового числа витків, зазвичай до числа витків первинної обмотки W_1 . З цією метою всі величини, що характеризують вторинне коло трансформатора, – ЕРС, напругу, струм і опори – перераховують на число витків W_1 первинної обмотки.

Таким чином, замість реального трансформатора з коефіцієнтом трансформації $k = W_1 / W_2$, одержують еквівалентний трансформатор з $k = W_1 / W_2' = 1$, де $W_2' = W_2 / k$. Такий трансформатор називають **приведеним**. Величини вторинної обмотки такого трансформатора позначаються штрихом «/».

Однак приведення вторинних параметрів трансформатора не повинне відбитися на його енергетичних показниках: всі потужності і фазові зсуви у вторинній обмотці приведенного трансформатора повинні залишитися такими, як і в реальному трансформаторі.

Так, електромагнітна потужність вторинної обмотки реального трансформатора $E_2 I_2$ повинна дорівнювати електромагнітній потужності вторинної обмотки приведенного трансформатора

$$E_2 I_2 = E_2' I_2'. \quad (6.33)$$

Підставивши значення наведеного струму вторинної обмотки $I_2 = I_2(W_2/W_1)$ в (6.33), одержимо формулу приведенної вторинної ЕРС

$$E'_2 = \frac{I_2}{I'_2} E_2 = \frac{I_2}{I_2} \frac{W_1}{W_2} E_2 = E_2 \frac{W_1}{W_2}. \quad (6.34)$$

Оскільки $U_2 I_2 \approx U'_2 I'_2$, то приведена напруга вторинної обмотки

$$U'_2 \approx U_2 (W_1/W_2). \quad (6.35)$$

З умови рівності втрат в активному опорі вторинної обмотки маємо $I_2^2 r_2 = I'^2_2 r'_2$. Визначимо приведений активний опір

$$r'_2 = r_2 (I_2 / I'_2)^2 = r_2 (W_1 / W_2)^2. \quad (6.36)$$

Приведений індуктивний опір розсіювання вторинної обмотки визначають із умови рівності реактивних потужностей $I_2^2 x_2 = I'^2_2 x'_2$, звідки

$$x'_2 = x_2 (W_1 / W_2)^2. \quad (6.37)$$

Приведений повний опір вторинної обмотки трансформатора

$$Z'_2 = r'_2 + jx'_2 = (r_2 + jx_2)(W_1 / W_2)^2 = Z_2 (W_1 / W_2)^2. \quad (6.38)$$

Приведений повний опір навантаження, підключеного до виводів вторинної обмотки, визначимо за аналогією з (6.38)

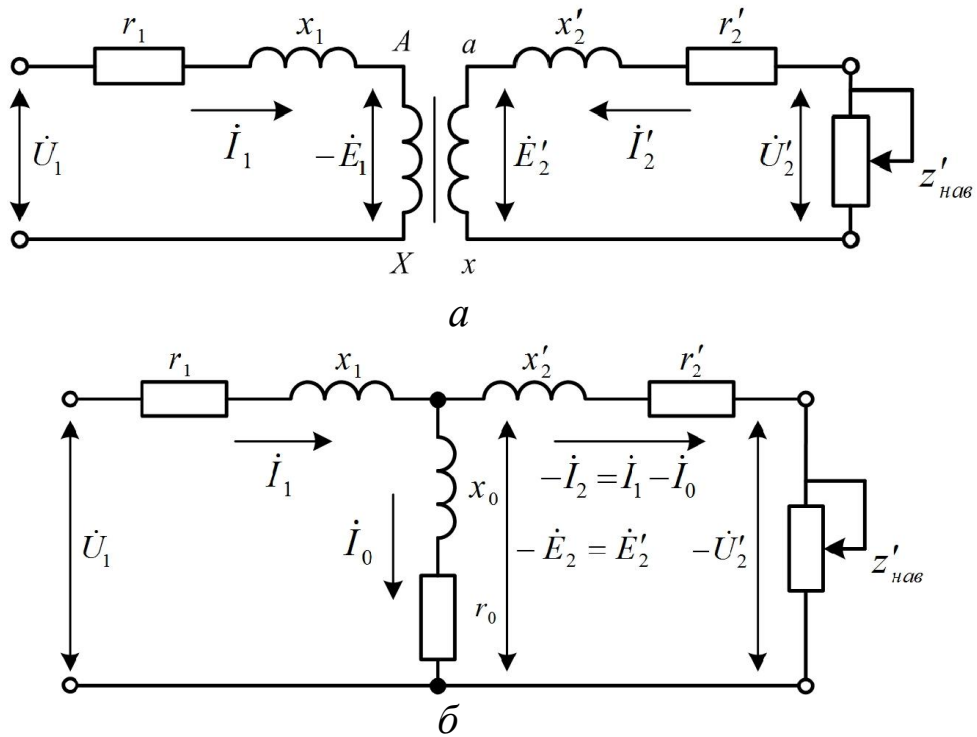
$$Z'_n = Z_n (W_1 / W_2)^2. \quad (6.39)$$

Рівняння напруг і струмів для приведенного трансформатора мають вигляд

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 Z_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1; \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 r'_2; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \end{aligned} \quad (6.40)$$

Ці рівняння встановлюють аналітичний зв'язок між параметрами трансформатора у всьому діапазоні навантажень від режиму н.х. до номінального.

Ще одним засобом, що полегшує дослідження електромагнітних процесів і розрахунок трансформаторів, є застосування електричної схеми заміщення приведенного трансформатора. На рисунку 6.10, а представлена еквівалентна схема приведенного трансформатора, на якій опори r і x умовно винесені з відповідних обмоток і включені послідовно їм.



a – еквівалентна схема; *б* – схема заміщення

Рисунок 6.10 – Схеми приведенного трансформатора

Як було встановлено раніше, у приведенному трансформаторі $k = 1$, а тому $-\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$. У результаті точки *A* і *a*, а також *X* і *x* на схемі мають однакові потенціали, що дозволяє електрично з'єднати зазначені точки, одержавши *T*-подібну схему заміщення приведенного трансформатора (рисунок 6.10, б). В електричній схемі заміщення трансформатора магнітний зв'язок між колами замінено електричним.

Схема заміщення приведенного трансформатора задовольняє всім рівнянням ЕРС і струмів приведенного трансформатора (6.40) і являє собою сукупність трьох кіл: первинного – з опором $Z_1 = r_1 + jx_1$ і струмом \dot{I}_1 ; що намагнічує – опором $Z_0 = r_0 + jx_0$ і струмом \dot{I}_0 ; вторинного – із двома опорами: опором вторинної обмотки $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$ і опором навантаження $Z'_{нав} = r'_{нав} \pm jx'_{нав}$ і струмом $-\dot{I}_2$. Зміною опору навантаження $Z'_{нав}$ на схемі заміщення можуть бути відтворені всі режими роботи трансформатора.

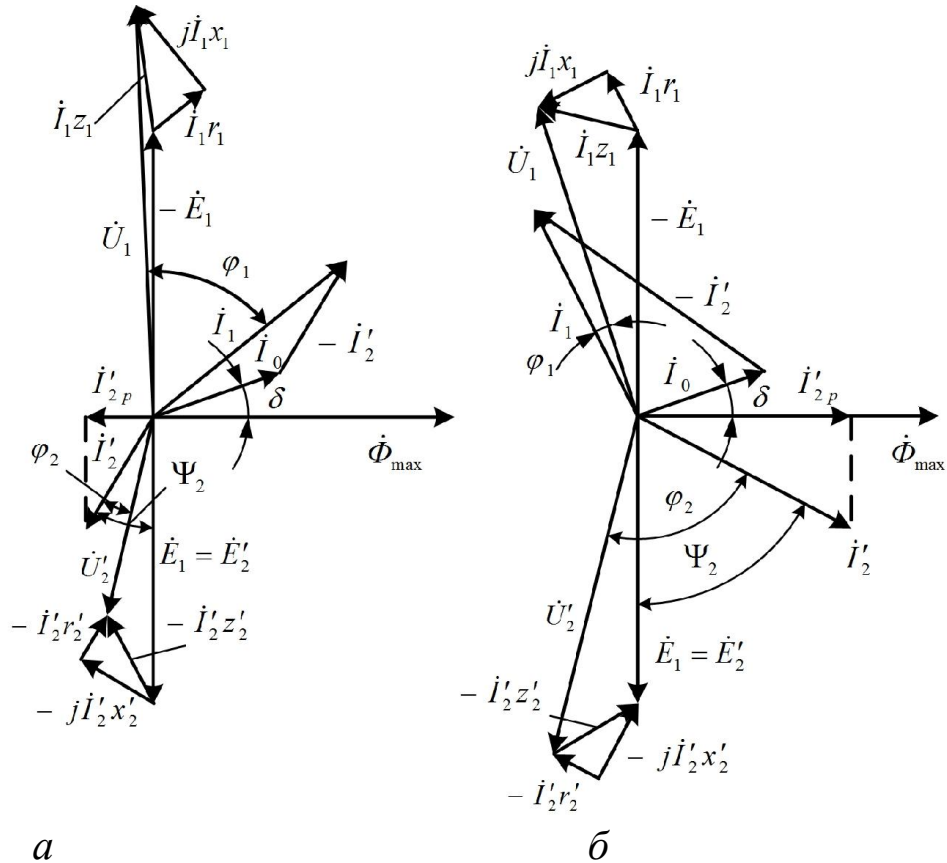
Параметри кола намагнічування $Z_0 = r_0 + jx_0$ визначаються струмом н.х. Наявність у цьому колі активної складової r_0 обумовлено магнітними втратами в трансформаторі.

Всі параметри схеми заміщення, за винятком $Z'_{нав}$, є постійними для даного трансформатора і можуть бути визначені з досліду н.х. і досліду к.з.

Векторна діаграма трансформатора

Скориставшись схемою заміщення приведенного трансформатора і основними рівняннями напруг і струмів (6.40), побудуємо векторну діаграму трансформатора, що наочно показує співвідношення і фазові зсуви між струмами, ЕРС і напругами трансформатора. Векторна діаграма – графічне вираження основних рівнянь приведенного трансформатора (6.40).

Побудову діаграми (рисунок 6.11, *a*) варто починати з вектора максимального значення основного магнітного потоку $\dot{\Phi}_{\max} = E_1 / (4,44W_1f)$.



a – активно індуктивне навантаження; *б* – активно-ємнісне навантаження

Рисунок 6.11 – Векторні діаграми трансформатора

Вектор струму \dot{I}'_0 випереджає по фазі вектор потоку $\dot{\Phi}_{\max}$ на кут δ , а вектори ЕРС \dot{E}_1 , і \dot{E}'_2 відстають від цього вектора на кут 90° [див. (6.8) і (6.9)]. Далі будуємо вектор \dot{I}'_2 . Для визначення кута зсуву фаз між \dot{E}'_2 і \dot{I}'_2 треба знати характер навантаження. Припустимо, що навантаження трансформатора активно-індуктивне. Тоді вектор \dot{I}'_2 відстає по фазі від \dot{E}'_2 на кут обумовлений як характером зовнішнього навантаження, так і власними опорами вторинної обмотки.

$$\psi_2 = \operatorname{arctg} \frac{x'_2 + x'_H}{r'_2 + r'_H}, \quad (6.41)$$

Для побудови вектора вторинної напруги \dot{U}'_2 необхідно з вектора ЕРС \dot{E}'_2 відняти вектори падіння напруги $j\dot{I}'_2 x'_2$ і $\dot{I}'_2 r'_2$. Із цією метою з кінця вектора \dot{E}'_2 опускаємо перпендикуляр на напрямок вектора струму \dot{I}'_2 і відкладаємо на ньому вектор $j\dot{I}'_2 x'_2$. Потім проводимо пряму, паралельну \dot{I}'_2 , і на ній відкладаємо вектор $-\dot{I}'_2 r'_2$. Побудувавши вектор $-\dot{I}'_2 r'_2$, одержимо трикутник внутрішнього падіння напруги у вторинному колі. Потім із цієї точки проводимо вектор $\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2$, що випереджає по фазі струм \dot{I}'_2 на кут $\varphi_2 = \operatorname{arctg} \left(\frac{x'_H}{r'_H} \right)$.

Вектор первинного струму будують як векторну суму: $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2)$. Вектор $-\dot{I}'_2$ проводимо з кінця вектора \dot{I}_0 протилежно вектору \dot{I}'_2 .

Побудуємо вектор $\dot{U}_1 = -\dot{E}'_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1$, для чого до вектора $-\dot{E}'_1$, що випереджає по фазі вектор потоку Φ_{\max} на 90° , додаємо вектори внутрішнього падіння напруги первинної обмотки: вектор $\dot{I}_1 r_1$, паралельний току \dot{I}_1 , і вектор $j\dot{I}_1 x_1$, що випереджає вектор струму \dot{I}_1 на кут 90° . З'єднавши точку 0 з кінцем вектора $\dot{I}_1 Z_1$, одержимо вектор \dot{U}_1 , що випереджає по фазі вектор струму \dot{I}_1 , на кут φ_1 .

Іноді векторну діаграму трансформатора будують із метою визначення ЕРС обмоток. У цьому випадку заданими є параметри вторинної обмотки: U_2 , I_2 і $\cos\varphi_2$. Знаючи W_1/W_2 , визначають \dot{U}'_2 і \dot{I}'_2 а потім будують вектори цих величин під фазовим кутом φ_2 одне від одного. Вектор ЕРС $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$ одержують геометричним додаванням вектора напруги \dot{U}'_2 із падіннями напруги у вторинній обмотці

$$\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + j\dot{I}'_2 x'_2 + \dot{I}'_2 r'_2. \quad (6.42)$$

У випадку активно-ємнісного навантаження векторна діаграма трансформатора має вигляд, показаний на рисунку 6.11 б. Порядок побудови діаграми залишається таким же, але вид її трохи змінюється. Струм \dot{I}'_2 у цьому випадку випереджає по фазі ЕРС \dot{E}'_2 на кут

$$\psi_2 = \operatorname{arctg} \frac{x'_2 - x'_H}{r'_2 + r'_H}. \quad (6.43)$$

При значній ємнісній складовій навантаження падіння напруги в ємнісних складових опорів навантаження і індуктивне падіння напруги розсіювання у вторинній обмотці частково компенсують одне одного. У результаті напруга \dot{U}'_2 може виявитися більше, ніж ЕРС \dot{E}'_2 . Крім того, реактивна (випереджувальна) складова вторинного струму $\dot{I}'_{2p} = \dot{I}'_2 \sin \psi_2$ збігається по фазі з реактивною складовою струму н.х. \dot{I}'_{0p} , тобто підмагнічує магнітопровід трансформатора.

Це веде до зменшення первинного струму \dot{I}'_1 , у порівнянні з його значенням при активно-індуктивному навантаженні, коли впливає складова \dot{I}'_{2p} (рисунок 6.11, а).

Контрольні запитання

1. Що називається трансформатором?
2. За якими признаками і як класифікують трансформатори?
3. Що представляє собою найпростіший трансформатор і як називаються обмотки трансформатора?
4. Поясніть принцип дії трансформатора використовуючи відповідну схему.
5. Чому при роботі, незалежно від навантаження, максимальний магнітний потік трансформатора не змінюється?
6. Чому для трансформатора відсутнє поняття «реакції якоря»?
7. Чому не можна використовувати трансформатори в мережах постійного струму?
8. Який трансформатор слід вважати підвищувальним, а який знижувальним?
9. Яке призначення магнітної системи та обмоток трансформатора і як вони разом називаються?
10. Як класифікуються магнітопроводи та обмотки сучасних трансформаторів?
11. Яка роль трансформаторного масла в роботі масляного трансформатора?
12. Перерахуйте деталі та вузли, що розташовуються в баці на його стінках і кришці та поясніть їх призначення і конструкцію?

13. Поясніть які деталі та вузли силового трансформатора пов'язані з виконанням його безпосередніх функцій, а які призначені для контролю і захисту самого трансформатора?

14. Згадайте за якими співвідношеннями визначаються струми в обмотках трансформатора.

15. Як виводиться формула ЕРС трансформатора?

16. Чому ЕРС, що створюється в обмотках, які перетинаються змінним потоком, відстає від потоку і на який кут?

17. Як складаються рівняння ЕРС та струмів трансформатора?

18. Що представляє собою приведений трансформатор та його математична модель?

19. Які умови виконуються при приведенні вторинних величин до числа витків первинної обмотки?

20. Що дає використання приведенного трансформатора замість реального?

21. Що представляє собою намагнічувальна вітка схеми заміщення?

22. Що таке коефіцієнт трансформації і який трансформатор слід вважати підвищувальним, а який знижувальним?

23. Яким чином можна визначити параметри схеми заміщення трансформатора?