

**Змістовий модуль 7. Трансформатори.
Тема № 7. Трансформатори.**

План лекції

1. Устрій і принцип роботи трансформатора.
2. Втрати в трансформаторі.
3. Автотрансформатори.
4. Зварювальні трансформатори.

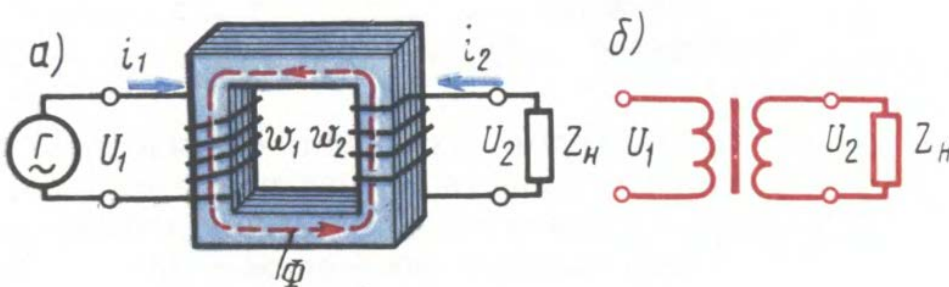
1. Устрій і принцип роботи трансформатора

Трансформатор (мал. 1) - статичний електромагнітний пристрій, що служить для перетворення електричної енергії змінного струму однієї напруги в електричну енергію змінного струму тієї ж або іншої напруги при незмінній частоті.

Найбільше застосування в електротехнічних установках, а також в енергетичних системах передачі й розподілу електроенергії мають **силові трансформатори**, з допомогою яких змінюють значення змінної напруги і струму.

Трансформатор складається із двох основних частин: **магнітопроводу** (сердечника) і **обмоток**. Для зменшення втрат від вихрових струмів, що виникають при перемагнічуванні, сердечники збирають із окремих тонких (0,3-0,5 мм) пластин спеціальної трансформаторної сталі. Ця сталь характеризується вузькою петлею гістерезису й великим електричним опором. Для зменшення втрат від вихрових струмів пластини ізолюють одна від одної шляхом покриття їх ізолюючими плівками.

Найпростіший однофазний трансформатор складається зі сталевого сердечника й двох обмоток - *первинної* й *вторинної* (мал. 1). Якщо до первинної обмотки трансформатора підвести змінна напругу U_1 , то в ній з'явиться деякий струм i_1 , який створить у сердечнику змінний магнітний потік Φ .



Мал. 1. Електромагнітна (а) та принципова (б) схема трансформатора



Мал. 2. Силевий трансформатор

Цей потік за законом електромагнітної індукції наведе в обох обмотках ЕРС індукції e_1 й e_2 :

$$\begin{aligned} e_1 &= E_{1m} \sin \omega t = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_2 &= E_{2m} \sin \omega t = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

де w_1 й w_2 - число витків у первинній і вторинній обмотках відповідно.

Ці диференціальні рівняння дозволяють знайти залежність між ЕРС обмотки й магнітним потоком у магнітопроводі. З першого рівняння

$$d\Phi = -\frac{E_{1m}}{w_1} \sin \omega t dt, \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{E_{1m}}{\omega w_1} \cos \omega t + C \quad . \quad (3)$$

Тут постійна інтегрування $C=0$, тому що синусоїдальна ЕРС не може створити постійну складову магнітного потоку.

Підставивши в останню рівність $E_{1m} = \sqrt{2}E_1$ і $\omega = 2\pi f$, одержимо

$$\Phi = \frac{\sqrt{2}E_1}{2\pi f w_1} \cos \omega t = \frac{E_1}{4,44 f w_1} \cos \omega t = \Phi_m \cos \omega t \quad (4)$$

звідки

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m \quad (5)$$

і аналогічно

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m \quad (6)$$

Це вираження, що зв'язує діюче значення ЕРС в обмотці з амплітудою магнітного потоку в магнітопроводі, прийнято називати **формулою трансформаторної ЕРС**. Вона відіграє важливу роль у теорії трансформаторів і електричних машин змінного струму.

Оскільки для ідеального трансформатора у відповідності із другим законом Кірхгофа $u_1 = -e_1$ й $u_2 = e_2$, то

$$\left| \frac{u_1}{u_2} \right| = \frac{e_1}{e_2}, \text{ або } \left| \frac{U_1}{U_2} \right| = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k, \quad (7)$$

де k - *коефіцієнт трансформації*.

Ми бачимо, що *відношення напруг на первинній і вторинній обмотках трансформатора дорівнює відношенню чисел витків у цих обмотках*. Відзначимо, що формула (7) виконується точно тільки для ідеального трансформатора або в режимі холостого ходу.

Таким чином, трансформатор перетворить підведену до нього напругу відповідно до відношення числа витків його обмоток.

Враховуючи високий ККД трансформатора, можна вважати, що $S_1 \approx S_2$, де $S_1 = U_1 I_1$ - потужність, споживана з мережі; $S_2 = U_2 I_2$ - потужність, що віддається в навантаження. Таким чином, $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$, звідки

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{U_1}{U_2} = k. \quad (8)$$

Відношення струмів вторинної й первинної обмоток приблизно дорівнює коефіцієнту трансформації, тому струм I_2 у стільки разів збільшується (зменшується), у скільки разів зменшується (збільшується) U_2 .

На мал. 2 представлений зовнішній вигляд малогабаритного силового трансформатора.

2. Втрати в трансформаторі

Перетворення електричної енергії в трансформаторі супроводжується втратами. На відміну від електричних машин трансформатор не має частин, що рухаються, тому механічні втрати при роботі відсутні. Наявні втрати обумовлені *явищем гістерезису, вихровими струмами, потоками розсіювання магнітного поля й активним опором обмоток*.

Як відомо, феромагнітні матеріали складаються з невеликих областей мимовільного намагнічування, які називаються доменами. Якщо феромагнетик помістити в змінне магнітне поле, створюване змінним струмом, то феромагнетик буде циклічно перемагнічуватися із частотою змінного струму. При цьому домени будуть міняти свою орієнтацію з такою ж частотою. При

переорієнтаціях доменів відбувається робота через внутрішнє тертя доменів один об одного. Як відомо, у феромагнетику, що зазнає циклічного перемагнічування, магнітний потік пов'язаний зі струмом залежністю, що виражається петлею гістерезису. При цьому при кожнім перемагнічуванні сердечника витрачається робота, пропорційна площі петлі гістерезису. Ця робота внаслідок внутрішнього тертя йде на нагрівання сердечника. Для зменшення втрат на *гістерезис* сердечники трансформаторів виготовляють зі спеціальної трансформаторної сталі.

Вихрові струми, або струми Фуко, що виникають у провідниках, що перебувають у змінних магнітних полях, створюються й у сердечнику трансформатора. Замикаючись у товщі сердечника, ці струми нагрівають його й приводять до втрат енергії. Оскільки вихрові струми виникають у площинах, перпендикулярних магнітному полю, то для їхнього зменшення сердечники трансформаторів набирають із окремих ізольованих одна від одної сталевих пластин.

Потоки розсіювання в сердечнику трансформатора створюються тою частиною магнітного потоку, яка замикається не через магнітопровід, а через повітря в безпосередній близькості від витків. Потоки розсіювання становлять близько 1 % від основного магнітного потоку трансформатора.

Активний опір обмоток створює втрати за рахунок активних струмів, що нагрівають обмотки. Для їхнього зменшення обмотки трансформаторів виконують, як правило, з міді.

Режим роботи трансформатора, при яким його вторинна обмотка розімкнута, називають *режимом холостого ходу* (трансформатор працює без навантаження). Режим роботи трансформатора, при яким у вторинну обмотку включене навантаження, називають *робочим*.

Як уже говорилося, перетворення електричної енергії в трансформаторі супроводжується втратами. Коефіцієнт корисної дії трансформатора (ККД) - відношення активної потужності, що віддається, до споживаної:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \quad (9)$$

де P_1 - потужність, споживана з мережі;

P_2 - потужність, що віддається навантаженню.

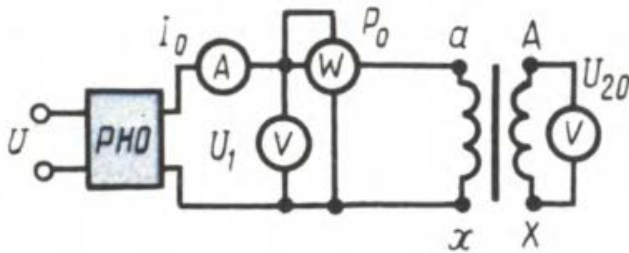
На практиці ККД трансформаторів визначають *непрямим методом*, тобто шляхом роздільного визначення втрат. При цьому виходять із того, що КПД трансформатора може бути представлений у наступному виді:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{CT} + P_M} \quad (10)$$

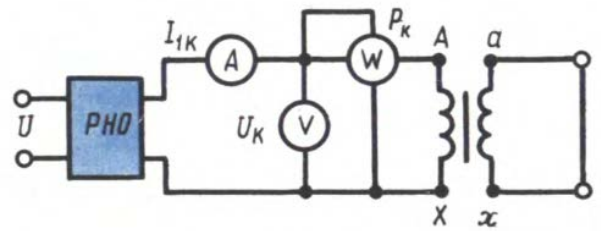
де P_{CT} - втрати в сталі (сердечнику);

P_M - втрати в міді (в обмотках).

Втрати в сталі й міді вимірюють у дослідах холостого ходу й короткого замикання відповідно.



Мал. 3. Дослід холостого ходу



Мал. 4. Дослід короткого замикання

У досліді *холостого ходу* (мал. 3), у якому на первинну обмотку подають номінальну напругу, а вторинну обмотку залишають розімкнутою, визначають втрати в сталі, тобто втрати на *гістерезис і вихрові струми*. Через те, що при номінальній напрузі на первинній обмотці магнітний потік практично постійний, то незалежно від того, навантажений трансформатор чи ні, втрати в сталі для нього є постійною величиною. Таким чином, можна вважати, що в режимі холостого ходу енергія, споживана трансформатором з мережі, витрачається тільки на втрати в сталі, тому потужність цих втрат вимірюють ватметром, включеним у ланцюг первинної обмотки. При цьому, щоправда, не враховуються втрати на нагрівання проводу первинної обмотки струмом холостого ходу. Але цей струм невеликий, і втрати від нього також невеликі. У цьому досліді визначаються також коефіцієнт трансформації k й струм холостого ходу I_{XX} .

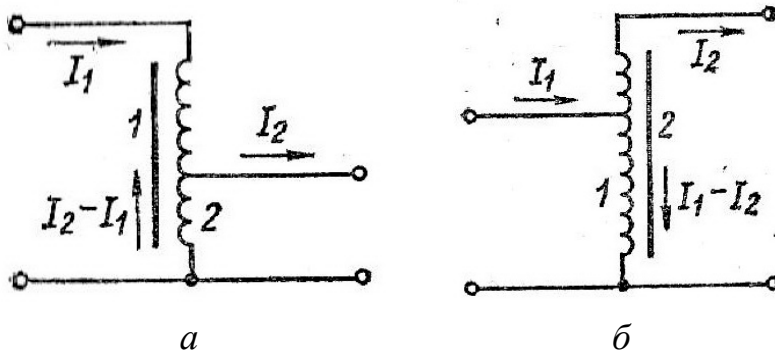
Якщо вторинну обмотку трансформатора замкнути *накоротко*, а на первинну обмотку подати таку знижену напругу, при якій струми в обмотках не перевищують номінальних значень, то енергія, споживана трансформатором з мережі, витрачається в основному на теплові *втрати в проводах* обмоток трансформатора. Насправді, при короткозамкненій вторинній обмотці до первинної підводиться знижена напруга, тому магнітний потік дуже малий і втрати в сталі, що залежать від значення магнітного потоку, також малі. Цей дослід називають дослідом короткого замикання (мал. 4). Отже, ватметр, включений у ланцюг первинної обмотки трансформатора в цьому досліді, покаже потужність, відповідну до втрат у міді (P_M). Напругу, при якій струми в

обмотках трансформатора при досліді короткого замикання дорівнюють номінальним значенням, називають напругою короткого замикання $U_{кз}$.

3. Автотрансформатор

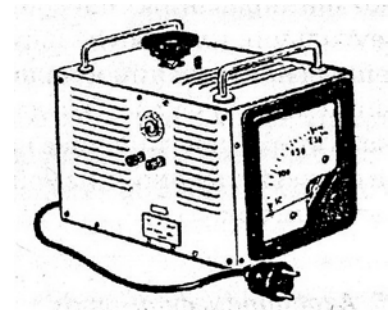
Автотрансформатор являє собою трансформатор, у якого первинна й вторинна обмотки не ізольовані одна від одної й частково сполучені. У понижувального автотрансформатора обмотка низької напруги є частиною обмотки високої напруги (мал. 5, а). Якщо частину обмотки автотрансформатора зробити первинною, а всю обмотку - вторинною, то автотрансформатор буде підвищувальним (мал. 5, б).

У порівнянні зі звичайним трансформатором при одній і тій же потужності автотрансформатор має меншу площу перетину сердечника. Це пояснюється тим, що в автотрансформаторі не вся енергія передається через магнітний потік. Частина енергії передається за рахунок безпосереднього проходження струму з первинного ланцюга у вторинний, тому що вони з'єднані один з одним. Чим ближче коефіцієнт трансформації автотрансформатора до одиниці, тем менше енергії передається магнітним потоком. Якщо $k = 1$, то вся енергія переходить із первинного ланцюга у вторинну без допомоги магнітного потоку, і в цьому випадку автотрансформатор стає зайвим.



Мал. 5. Автотрансформатор:

а) понижувальний; б) підвищувальний



Мал. 6. Лабораторний автотрансформатор ЛАТР.

Через те що частина витків автотрансформатора входить і в первинну й у вторинну обмотки, то кількість проводів для обмоток потрібна менше, чим у трансформаторі. Крім того, через загальну частину обмотки автотрансформатора проходить струм обох ланцюгів, рівний $I_2 - I_1$ (у підвищувальному автотрансформаторі $I_1 - I_2$). Чим ближче один до одного струми I_1 й I_2 , тем менше струм у загальній частині обмотки й тем менше може бути діаметр її проводу. Таким чином, при коефіцієнті трансформації,

близькому до одиниці ($k = 0,5...1$ для понижувального автотрансформатора й $k = 1...2$ - для підвищувального) заощаджується значна кількість міді.

Найчастіше автотрансформатори виготовляють із ковзним контактом, що дозволяє плавно регулювати вихідну напругу в широких межах. Прикладом може служити лабораторний автотрансформатор (ЛАТР) (мал.6).

4. Зварювальні трансформатори

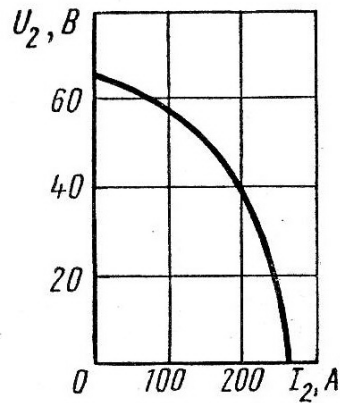
До джерел живлення зварювальних апаратів пред'являються специфічні вимоги: при заданій потужності вони повинні створювати великі струми в навантаженні, причому різка зміна опору навантаження не повинна суттєво позначатися на значенні зварювального струму.

Відносно невисокі напруги при великих струмах забезпечують не тільки ефективно тепловиділення у зварювальному контакті, але й безпеку зварника, що працює звичайно серед металевих конструкцій з високою електропровідністю.

Відповідно до розглянутих вимог зварювальні трансформатори забезпечують зниження напруги від 220 або 380 В до 60-70 В. Така напруга на затискачах вторинної обмотки встановлюється при холостому ході зварювального трансформатора. У процесі зварювання вона коливається від максимального значення 60-70 В до значень, близьких до нуля.

Опір електричної дуги, що виникає при зварюванні, змінюється при переміщеннях руки зварника. Якби напруга на затискачах вторинної обмотки трансформатора підтримувалася постійною, - виникали б різкі коливання струму в ланцюзі й регулювати тепловиділення було б неможливо. Тому зварювальний трансформатор улаштований так, що при різкім зменшенні опору дуги струм у ланцюзі збільшується незначно, а добуток I^2R , що визначає кількість теплоти, зберігається на необхідному рівні.

Відповідно до закону Ома при різкім зменшенні опору й незначнім збільшенні струму напруга на дюзі знижується. Зварювальний трансформатор має крутоспадаючу зовнішню характеристику (мал. 7). Зварювальний трансформатор витримує короткі замикання, що виникають у випадку дотику електрода до зварювального шва. Струм короткого замикання, як показує зовнішня характеристика, обмежений. Вторинна обмотка трансформатора розрахована на досить тривале протікання цього струму.



Мал. 7. Зовнішня характеристика зварювального трансформатора

Питання для самоконтролю

1. Поясніть устрій і принцип дії трансформатора.
2. Перелічіть втрати в трансформаторі й поясніть їхню фізичну природу.
3. Чому сердечник трансформатора збирають із тонких пластин трансформаторної сталі, ізольованих друг від друга?
4. Що називається коефіцієнтом трансформації?
5. Який режим роботи трансформатора називається холостим ходом?
6. Як і з якою метою проводиться дослід короткого замикання?
7. Як вимірюють ККД трансформатора?
8. Поясніть устрій автотрансформатора. Чим він принципово відрізняється від звичайного трансформатора?
9. Які вимоги висуваються до зварювальних трансформаторів?
10. Яка головна особливість зовнішньої характеристики зварювального трансформатора?

Список літератури

1. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. техникумов. – М.: Высш. шк., 2005. – §§ 7.1 – 7.7 (с. 182 – 199).
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: учеб. пособие. – 15-е изд., стереотипное – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – §§7.1 – 7.6 (с. 171 – 189).
3. Славинский А.К., Туревский И.С. Электротехника с основами электроники: учебное пособие. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2009. – глава 7, §§ 7.1 – 7.6 (с. 138 – 174).