

§ 32. ТРАНСФОРМАТОР



Однією з основних переваг електричної енергії є те, що її можна передавати на великі відстані, наприклад, за допомогою проводів. Але під час передавання енергії неминучі її втрати, зокрема на нагрівання. Згідно із законом Джоуля — Ленца кількість теплоти, що виділяється в провідниках, дорівнює: $Q = I^2 R t$. Отже, зменшити втрати енергії на нагрівання можна, зменшивши: 1) опір проводів; 2) силу струму. Розглянемо, як ці можливості реалізують на практиці.



Чому напругу необхідно змінювати

Активний опір проводу визначається матеріалом, з якого він виготовлений, його довжиною та площею поперечного перерізу: $R = \frac{\rho l}{S}$. Отже, для зменшення опору проводів слід зменшити питомий опір матеріалу або збільшити площу поперечного перерізу проводу.

Збільшення площі поперечного перерізу призводить до значного збільшення маси проводів і, як наслідок, додаткових витрат матеріалу на виготовлення проводів, опор ліній електропередач тощо. Можна зменшити питомий опір, замінивши сталевий провід алюмінієвим, що й роблять для передавання електроенергії на великі відстані. Але це не розв'язує проблеми повністю, оскільки передавання значної потужності $P = UI$ за відносно невеликої напруги потребує досить великої сили струму.

Якщо ту саму потужність передавати за великої напруги (відповідно, за малої сили струму), то втрати енергії значно зменшуються.

Наприклад, збільшення напруги в 10 разів приведе до зменшення сили струму в 10 разів, отже, кількість теплоти, що виділиться в провіднику під час передавання, зменшиться в 100 разів.

Саме тому *перед тим, як передавати енергію на великі відстані, потрібно підвищувати напругу. І навпаки: після того як енергія дійшла до споживача, напругу потрібно знижувати*. Таке змінення напруги здійснюється за допомогою *трансформаторів*.

2

Як побудований трансформатор і який принцип його дії

Трансформатор (від лат. *transformo* — перетворюю) — електромагнітний пристрій, що перетворює змінний струм однієї напруги на змінний струм іншої напруги за незмінної частоти.

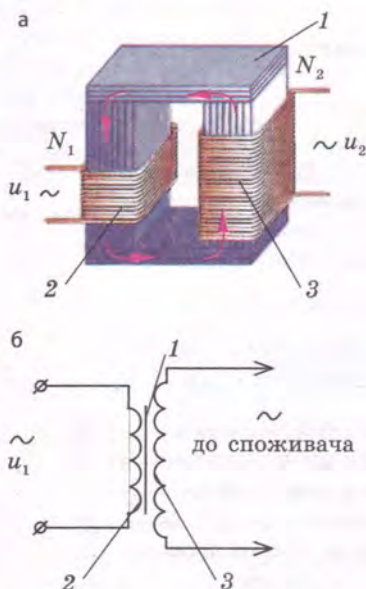


Рис. 32.1. Будова (а) та схематичне позначення (б) найпростішого (однофазного) трансформатора: 1 — осердя, 2 — первинна обмотка трансформатора; 3 — вторинна обмотка трансформатора

Найпростіший трансформатор складається зі сталевого замкнутого *осердя* (магнітопроводу) і двох *обмоток* (рис. 32.1). Осердя виготовлене з тонких пластин трансформаторної сталі, обмотки — з ізольованого проводу. До однієї з обмоток, яка називається *первинною* і має N_1 витків проводу, подається електрична енергія від джерела змінного струму. До другої обмотки — *вторинної*, яка має N_2 витків проводу, підключають споживачі електричної енергії.

Принцип дії трансформатора ґрунтується на явищі електромагнітної індукції. Якщо первинна обмотка трансформатора підключена до джерела змінного струму, то струм i_1 , який йде по її витках, утворює в замкнутому осердді змінний магнітний потік Φ . Пронизуючи витки первинної та вторинної обмоток, змінний магнітний потік створює ЕРС самоіндукції e_1 в первинній обмотці та ЕРС індукції e_2 у вторинній обмотці.

Згідно із законом електромагнітної індукції ЕРС індукції e , індукована в кожному витку первинної та вторинної обмоток трансформатора, дорівнює:

$$e = -\Phi'(t).$$

Первинна обмотка має N_1 витків проводу, вторинна — N_2 , отже, $e_1 = -N_1\Phi'(t)$ і $e_2 = -N_2\Phi'(t)$ відповідно. Оскільки ЕРС створюється тим самим магнітним потоком, то різниця фаз між ЕРС індукції первинної та вторинної обмоток дорівнює нулю. Тому в будь-який момент часу

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2},$$

де \mathcal{E}_1 і \mathcal{E}_2 — діючі значення ЕРС відповідно в первинній і вторинній обмотках.

З іншого боку:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{-N_1 \Phi'(t)}{-N_2 \Phi'(t)} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Таким чином, відношення діючих значень ЕРС, індукованих у первинній і вторинній обмотках трансформатора, дорівнює відношенню кількості витків в обмотках:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

Величину k називають **коефіцієнтом трансформації**.

Трансформатор називається **понижувальним**, якщо коефіцієнт трансформації більший за одиницю ($k > 1$). В понижувальних трансформаторах вторинна обмотка містить менше витків проводу, ніж первинна.

Трансформатор називається **підвищувальним**, якщо коефіцієнт трансформації менший за одиницю ($k < 1$). В підвищувальних трансформаторах вторинна обмотка містить більше витків проводу, ніж первинна.

3 Холостий хід роботи трансформатора

Розглянемо, як працює трансформатор, вторинна обмотка якого розімкнена, тобто трансформатор не навантажений (рис. 32.2). Робота ненавантаженого трансформатора називається **холостим ходом**.

Первинна обмотка трансформатора підключена до джерела змінного струму, напруга на виході якого u_1 . Під час проходження струму в обмотці виникає ЕРС самоіндукції e_1 . Падіння напруги на первинній обмотці дорівнює: $i_1 r_1 = u_1 + e_1$, де r_1 — опір обмотки, який будемо вважати нехтовно малим. Отже, в будь-який момент часу $u_1 \approx -e_1$, тому для діючих значень напруги та ЕРС маємо рівність: $U_1 \approx \mathcal{E}_1$.

По вторинній обмотці струм не йде (обмотка розімкнена), тому напруга на кінцях вторинної обмотки дорівнює ЕРС індукції: $u_2 + e_2 = 0$, $u_2 = -e_2$, відповідно $U_2 = \mathcal{E}_2$.

Таким чином, у режимі холостого ходу виконується рівність:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k.$$

Якщо кількість витків у первинній обмотці більша, ніж у вторинній ($k > 1$), то трансформатор понижує напругу ($U_1 > U_2$). І навпаки: якщо кількість витків у первинній обмотці менша, ніж у вторинній ($k < 1$), то трансформатор підвищує напругу ($U_1 < U_2$). Добираючи співвідношення між кількістю витків у первинній та вторинній обмотках, можна підвищувати або понижувати напругу в потрібну кількість разів.

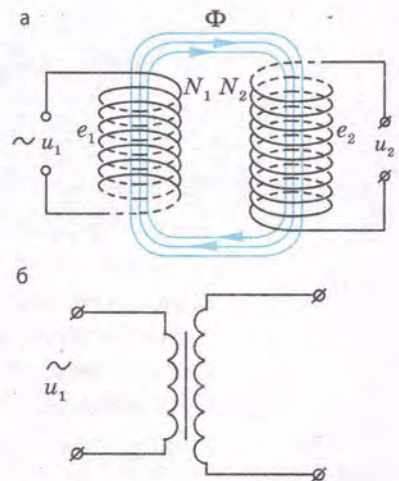


Рис. 32.2. Холостий хід роботи трансформатора: а — схема уставки; б — електрична схема

Зверніть увагу:

1) *трансформатор не може здійснити перетворення напруги постійного струму*, оскільки в цьому випадку магнітний потік не змінюється й ЕРС індукції не виникає;

2) *трансформатор не можна підключати до джерела постійного струму*: опір первинної обмотки є малим, тому сила струму в ній зросте настільки, що трансформатор нагріється й вийде з ладу.

4 Як працює навантажений трансформатор

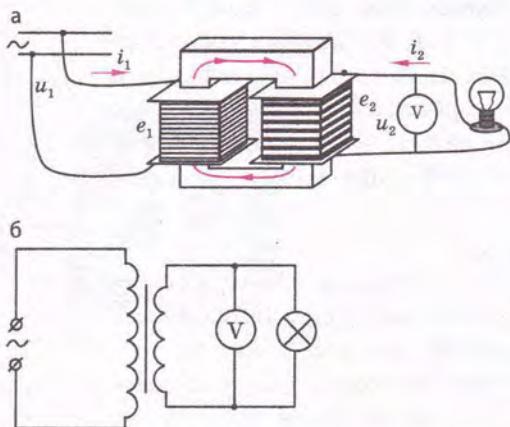


Рис. 32.3. Робота навантаженого трансформатора: а — зовнішній вигляд установки; б — електрична схема

Якщо вторинну обмотку трансформатора замкнути на навантаження, то в ній виникне електричний струм (рис. 32.3). Цей струм викличе зменшення магнітного потоку в осерді і, як наслідок, зменшення ЕРС самоіндукції в первинній обмотці. У результаті сила струму в первинній обмотці збільшиться, і магнітний потік зросте до попереднього значення. Чим більшими є сила струму у вторинній обмотці й потужність, яка віддається споживачу, тим більшими є струм у первинній обмотці й потужність, яка споживається від джерела.

Зазвичай втрати енергії в трансформаторі є малими, тому можна вважати, що потужності в первинній і вторинній обмотках приблизно однакові:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2.$$

Це означає, що сила струму в підвищувальному трансформаторі більша в первинній обмотці ($U_1 < U_2 \Rightarrow I_1 > I_2$), а в понижувальному — у вторинній обмотці ($U_1 > U_2 \Rightarrow I_2 > I_1$).

5 Як підвищити ККД трансформатора

У трансформаторі, як і в будь-якому іншому технічному пристрої, існують певні втрати енергії.

Відношення потужності, яку трансформатор віддає споживачу електричної енергії, до потужності, яку трансформатор споживає з електричної мережі, називається **коефіцієнтом корисної дії трансформатора**:

$$\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1}.$$

Основні втрати енергії в трансформаторі й технічні прийоми, які використовують для зменшення цих втрат, наведені в таблиці.

Втрати енергії в трансформаторі

Виділення теплоти внаслідок проходження електричного струму в обмотках

Виділення теплоти внаслідок виникнення струмів Фуко в осерді, яке перебуває у змінному магнітному полі

Випромінювання енергії у вигляді електромагнітних хвиль

Втрати енергії на перемагнічування осердя

Способи зменшення втрат енергії

Обмотки трансформатора виготовляють із високоякісної міді з досить великою площею поперечного перерізу. Зі збільшенням сили струму збільшується кількість теплоти, що виділяється в обмотках, тому обмотки нижчої напруги виготовляють із проводів більшого діаметра

Осердя виготовляють із набірних пластин, тим самим збільшуючи його опір і зменшуючи силу струмів Фуко

Осердя роблять замкненим і такої форми, яка не сприяє випромінюванню електромагнітних хвиль

Осердя виготовляють із трансформаторної сталі, яка легко перемагнічується

Деякі трансформатори завдяки своїй конструкції мають ККД до 99 %.

6 Застосування трансформаторів

Підвищувальні трансформатори розташовують поблизу генераторів змінного струму, встановлених на електричних станціях, що дозволяє здійснювати передавання електроенергії на далекі відстані за високих напруг (більше 500 кВ), завдяки чому втрати енергії в проводах значно зменшуються.

У місцях споживання електроенергії встановлюють понижувальні трансформатори, в яких висока напруга, що подається від високовольтих ліній електропередач, знижується до порівняно невеликих значень, за яких працюють споживачі електричної енергії (рис. 32.4, 32.5).

Окрім систем передавання й розподілу електроенергії, трансформатори застосовують у випрямних пристроях, у лабораторіях, для живлення радіоапаратури, приєднання електровимірювальних приладів до кіл високої напруги, електрозварювання тощо.



Рис. 32.4. Трансформаторна підстанція поблизу міста



Рис. 32.5. Схема передавання та розподілу енергії в електричній мережі

7 Учимся розв'язувати задачі

Задача. Первинна обмотка трансформатора, яка містить 1500 витків проводу, підключена до кола змінного струму напругою 220 В. Визначте кількість витків у вторинній обмотці, якщо вона має живити коло з напругою 6,3 В за сили струму 1,5 А. Навантаження активне, опір вторинної обмотки 0,20 Ом. Опором первинної обмотки знехтувати.

N_2 —?

Дано:

$$U_1 = 220 \text{ В}$$

$$U_2 = 6,3 \text{ В}$$

$$I_2 = 1,5 \text{ А}$$

$$N_1 = 1500$$

$$r_2 = 0,20 \text{ Ом}$$

Аналіз фізичної проблеми, розв'язання. За будь-якого режиму роботи трансформатора: $\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$ (1).

Оскільки опір первинної обмотки є нехтовно малим, то $U_1 = \mathcal{E}_1$ (2). Коло вторинної обмотки є замкненим, джерелом електричної енергії в ньому є вторинна обмотка з активним опором, тому згідно із законом Ома: $I_2 = \frac{\mathcal{E}_2}{R + r_2}$.

Звідси $\mathcal{E}_2 = I_2(R + r_2) = I_2 R + I_2 r_2 = U_2 + I_2 r_2$ (3). Підставляючи вирази (2) і (3) у формулу (1), маємо: $\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2 + I_2 r_2} \Rightarrow N_2 = N_1 \frac{U_2 + I_2 r_2}{U_1}$.

Визначимо значення шуканої величини:

$$[N_2] = \frac{\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{Ом}}{\text{В}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{В}} = 1; \{N_2\} = \frac{1500(6,3 + 1,5 \cdot 0,20)}{220} = 45, N_2 = 45.$$

Аналіз результатів. Трансформатор понижувальний ($U_1 > U_2$), тобто вторинна обмотка має містити менше витків, ніж первинна. Отже, отриманий результат цілком реальний.

Відповідь: кількість витків у вторинній обмотці $N_2 = 45$.



Підбиваємо підсумки

Трансформатор — електромагнітний пристрій, що перетворює змінний струм однієї напруги на змінний струм іншої напруги за незмінної частоти. Він складається зі сталевого замкненого осердя й двох розташованих на ньому обмоток.

У будь-якому режимі роботи відношення діючих значень ЕРС, індукованих у первинній і вторинній обмотках трансформатора, дорівнює відношенню кількості витків в обмотках: $\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$, де k — коефіцієнт трансформації. Якщо $k > 1$, то трансформатор понижувальний; якщо $k < 1$ — підвищувальний.

У режимі холостого ходу виконується рівність: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$.

ККД трансформатора визначається співвідношенням: $\eta = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1}$.



Контрольні запитання

1. У чому перевага електричної енергії над іншими видами енергії? 2. Назвіть основні способи зменшення втрат енергії під час її передавання. 3. Що таке трансформатор? Яка його будова? На якому явищі ґрунтується його дія? 4. Опишіть фізичні процеси, що відбуваються в трансформаторі в режимі холостого

ходу; в режимі навантаження. 5. Як визначити коефіцієнт трансформації? 6. Який трансформатор називається понижувальним? підвищувальним? Де їх застосовують? 7. Які основні втрати енергії існують у трансформаторі? Як їх зменшити? 8. Як визначити ККД трансформатора?

Вправа № 27

1. На рис. 32.3 зображено лампу, приєднану через трансформатор до мережі змінного струму. Який це трансформатор — підвищувальний чи понижувальний? Чому вторинна обмотка виготовлена з більш товстого дроту, ніж первинна?
2. Первинна обмотка трансформатора містить 1000 витків проводу, вторинна — 3500 витків. У режимі холостого ходу напруга на вторинній обмотці дорівнює 105 В. Яка напруга подається на трансформатор? Яким є коефіцієнт трансформації?
3. Потужність, яку споживає трансформатор, становить 90 Вт, напруга на вторинній обмотці 12 В. Якою є сила струму у вторинній обмотці, якщо ККД трансформатора 75 %?
4. Трансформатор із коефіцієнтом трансформації 5 приєднаний до мережі змінного струму напругою 220 В. Визначте опір вторинної обмотки трансформатора, якщо напруга на ній дорівнює 42 В, а сила струму 4,0 А. Опором первинної обмотки знехтувати.
- 5*. Чому трансформатор гуде? Яка основна частота звукових коливань, якщо трансформатор підключений до промислової мережі?