

§ 21. ПЕРЕДАЧА ТА ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ЗМІННОГО СТРУМУ. ТРАНСФОРМАТОР



Трансформаторна підстанція

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: 1) зменшивши опір проводів; 2) зменшивши силу струму. Розглянемо, як ці можливості реалізують на практиці.

1 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 проводу слід зменшити питомий опір ρ матеріалу, з якого він виготовлений, або збільшити площу S поперечного перерізу проводу.

Збільшення площі поперечного перерізу призводить до значного збільшення маси проводів, додаткових витрат матеріалу на виготовлення проводів, опор ліній електропередачі тощо. Можна зменшити питомий опір, замінивши сталевий провід алюмінієвим, що й роблять у разі передавання електроенергії на великі відстані. Але це не розв'язує проблеми повністю: по-перше, порівняно зі сталлю алюміній досить дорого коштує; по-друге, передавання значної потужності ($P = UI$) за відносно невеликої напруги потребує досить великої сили струму, тому навіть за невеликого опору втрати енергії чималі.

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 в 10 разів і сили струму, отже, кількість теплоти, що виділиться в проводах під час передавання, зменшиться в 100 разів. Саме тому *перед тим, як передати енергію на великі відстані, потрібно підвищити напругу*. І навпаки: *після того як енергія дійшла до споживача, напругу потрібно знизити*. Така зміна напруги здійснюється за допомогою *трансформаторів*.

2 Як побудований трансформатор і яким є принцип його дії

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

Найпростіший трансформатор складається із замкненого *осердя* (магнітопроводу) і двох *обмоток* (рис. 21.1). Осердя виготовлено з тонких пластин трансформаторної сталі, обмотки — з ізольованого мідного дроту. До однієї з обмоток, яка називається *первинною* і має N_1 витків дроту, подається напруга від джерела змінного струму. До другої обмотки — *вторинної*, яка має N_2 витків дроту, — підключають споживачів електричної енергії.

Дія трансформатора ґрунтується на явищі електромагнітної індукції. Якщо первинну обмотку трансформатора підключено до джерела змінного струму, то струм, який іде в її витках, утворює в замкненому 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 дроту, вторинна — N_2 витків, 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 e_1 і e_2 — миттєві значення ЕРС, а $\mathcal{E}_1$ і $\mathcal{E}_2$ — діючі значення ЕРС в первинній і вторинній обмотках відповідно. 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 називають **знижувальним**, якщо коефіцієнт трансформації більший за одиницю ($k > 1$). У знижувальних трансформаторах вторинна обмотка містить менше витків дроту, ніж первинна.

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

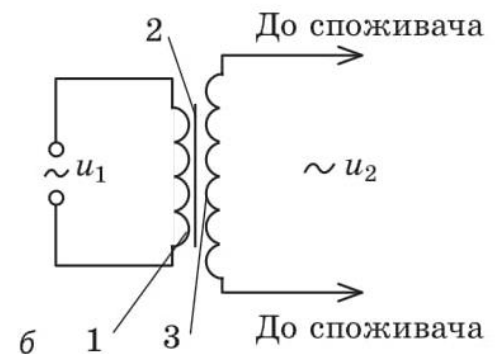
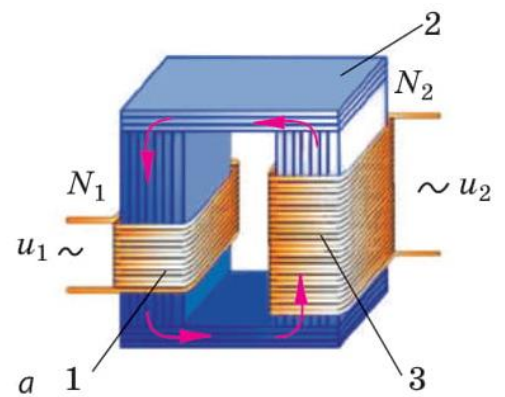


Рис. 21.1. Будова (а) та електрична схема (б) найпростішого (однофазного) трансформатора:
1 — первинна обмотка;
2 — осердя;
3 — вторинна обмотка

3 Холостий хід роботи трансформатора

Розглянемо, як працює трансформатор, вторинну обмотку якого розімкнено, тобто трансформатор не навантажений (рис. 21.2). Роботу ненавантаженого трансформатора називають **холостим ходом**.

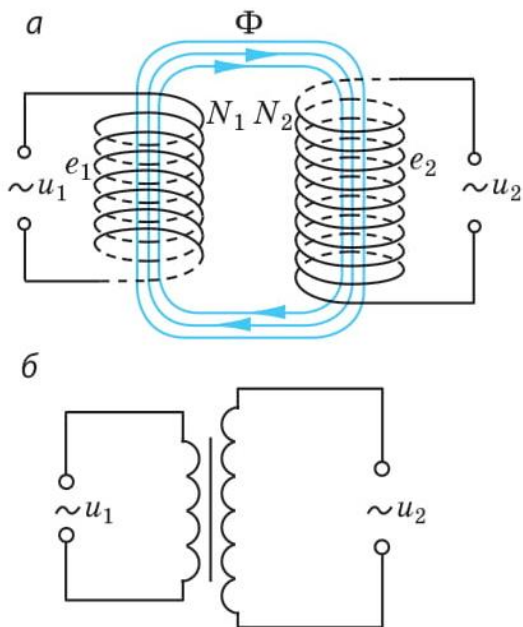


Рис. 21.2. Холостий хід роботи трансформатора: а — схема установки; б — електрична схема

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: $U_1 \approx \mathcal{E}_1$.

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

Таким чином, у режимі холостого ходу справджується 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 і вторинній обмотках, можна в потрібну кількість разів підвищувати або понижувати напругу.

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

Якщо вторинну обмотку трансформатора замкнути на навантаження, то в ній виникне електричний струм (рис. 21.3). Цей струм спричинить зменшення магнітного потоку в осерді і, як наслідок, зменшення ЕРС самоіндукції в первинній обмотці. У результаті сила струму в первинній

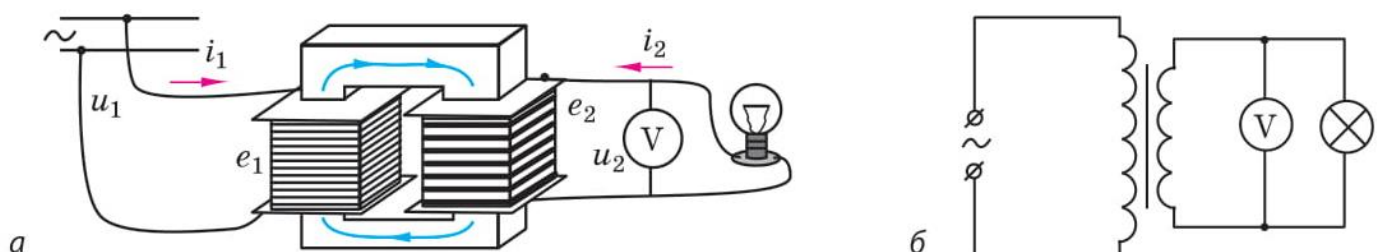


Рис. 21.3. Робота навантаженого трансформатора: а — схема установки; б — електрична схема

обмотці збільшиться і магнітний потік зросте до попереднього значення. Чим більшими є сила струму у вторинній обмотці й потужність, яка віддається споживачеві, тим більшими є струм у первинній обмотці й потужність, яка споживається від джерела.

Під час роботи навантаженого трансформатора для діючих значень напруги і сили струму справджується приблизна рівність:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}.$$

Це означає, що в підвищувальному трансформаторі сила струму більша в первинній обмотці ($U_1 < U_2 \Rightarrow I_1 > I_2$), а в понижувальному трансформаторі сила струму більша у вторинній обмотці ($U_1 > U_2 \Rightarrow I_2 > I_1$). Якщо трансформатор *ідеальний* (втрати енергії дорівнюють нулю), то у скільки разів він збільшує напругу, у стільки ж разів він зменшує силу струму, і навпаки.

5

Як підвищити ККД трансформатора

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

Відношення потужності P_2 , яку трансформатор віддає споживачеві електричної енергії, до потужності P_1 , яку трансформатор споживає з електричної мережі, називають **коефіцієнтом корисної дії трансформатора**:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \%$$

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

Втрати енергії в трансформаторі	Способи зменшення втрат енергії
Виділення теплоти внаслідок проходження електричного струму в обмотках.	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 дроту більшого діаметра.
Виділення теплоти внаслідок виникнення струмів Фуко в осерді, яке весь час роботи трансформатора перебуває у змінному магнітному полі.	Осердя виготовляють із набірних пластин або із феритів, тим самим збільшуючи опір осердя і зменшуючи силу струмів Фуко.
Випромінювання енергії у вигляді електромагнітних хвиль.	Осердя виготовляють замкненим і такої форми, яка не сприяє випромінюванню електромагнітних хвиль.
Втрати енергії на перемагнічування осердя.	Осердя виготовляють із трансформаторної сталі, яка легко перемагнічується.

Завдяки своїй конструкції деякі трансформатори мають ККД понад 99 %.

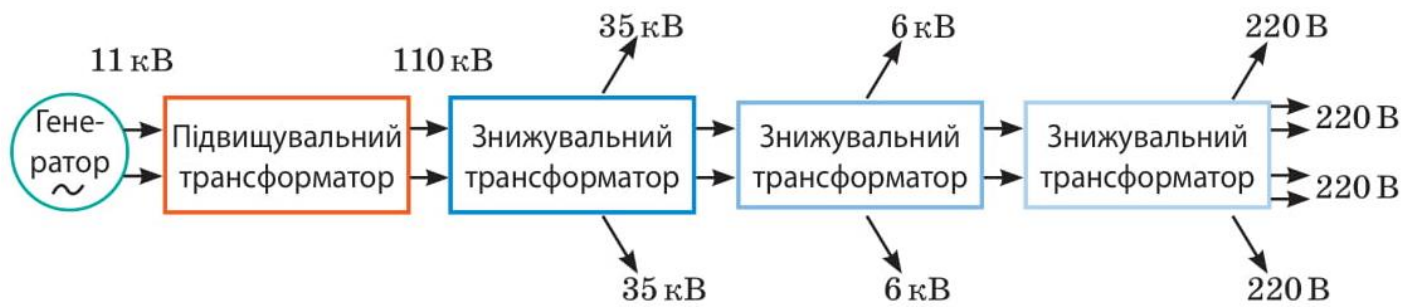


Рис. 21.4. Схема передачі та розподілу енергії в електричній мережі

6 Застосування трансформаторів

Підвищувальні трансформатори розташовують поблизу генераторів змінного струму, встановлених на електростанціях. Це дозволяє передавати електроенергію на великі відстані за високих напруг (понад 500 кВ), завдяки чому втрати енергії в проводах значно зменшуються.

У місцях споживання електроенергії встановлюють знижувальні трансформатори, в яких висока напруга, що подається від високовольтичних ліній електропередачі, знижується до порівняно невеликих значень, за яких працюють споживачі електричної енергії (рис. 21.4).

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

7 Учимося розв'язувати задачі

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

Дано:

$$N_1 = 1500$$

$$U_1 = 220 \text{ В}$$

$$U_2 = 6,3 \text{ В}$$

$$I_2 = 1,5 \text{ А}$$

$$r_2 = 0,20 \text{ Ом}$$

$$N_2 = ?$$

Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.

$$\text{За будь-якого режиму роботи трансформатора } \frac{N_1}{N_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} \quad (1).$$

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 r_2 , тому згідно із

$$\text{законом Ома } I_2 = \frac{\mathcal{E}_2}{R + r_2}.$$

$$\text{Звідси } \mathcal{E}_2 = I_2(R + r_2) = I_2R + I_2r_2 = U_2 + I_2r_2 \quad (3).$$

$$\text{Підставивши (2) і (3) у формулу (1), маємо: } \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2 + I_2r_2} \Rightarrow N_2 = N_1 \frac{U_2 + I_2r_2}{U_1}.$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

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

Аналіз результатів. Трансформатор знижувальний ($U_1 > U_2$), тобто вторинна обмотка має містити менше витків, ніж первинна. Отже, результат є реальним.

Відповідь: $N_2 = 45$.



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 та двох розташованих на ньому обмоток.

- У будь-якому режимі роботи трансформатора відношення діючих значень ЕРС, індукованих у первинній і вторинній обмотках, 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 знижувальний; 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: $\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$.

Якщо трансформатор ідеальний, то $P_1 = P_2$ ($U_1 I_1 = U_2 I_2$), або $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$, тобто у скільки разів трансформатор підвищує напругу, у стільки ж разів він зменшує силу струму.



Контрольні запитання

- У чому перевага електричної енергії порівняно з іншими видами енергії?
- Які основні способи зменшення втрат енергії під час її передачі?
- Що таке трансформатор? Яка його будова? На якому явищі ґрунтується його дія?
- Опишіть фізичні процеси, що відбуваються в трансформаторі в режимі холостого ходу; в режимі навантаження.
- Як визначити коефіцієнт трансформації?
- Який трансформатор називають знижувальним? підвищувальним? Де застосовують такі трансформатори?
- Чому трансформатори не можна під'єднувати до джерел постійного струму?
- Які основні втрати енергії під час роботи трансформатора? Як їх зменшити?
- Як визначити ККД трансформатора?



Вправа № 21

- На рис. 21.3 зображено лампу, приєднану через трансформатор до мережі змінного струму. Який це трансформатор — підвищувальний чи знижувальний? Чому вторинна обмотка виготовлена з товщого дроту, ніж первинна?
- Первинна обмотка трансформатора містить 1000 витків дроту, вторинна — 3500. У режимі холостого ходу напруга на вторинній обмотці — 105 В. Яка напруга подається на трансформатор? Яким є коефіцієнт трансформації?
- Потужність, яку споживає трансформатор, становить 90 Вт, напруга на вторинній обмотці — 12 В. Визначте силу струму у вторинній обмотці, якщо ККД трансформатора 75 %.
- 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 знехтуйте.
- Чому трансформатор гуде? Якою є основна частота звукових коливань, якщо трансформатор підключений до промислової мережі?