

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи - вивчити будову, принцип роботи, характеристики і методи дослідження однофазних трансформаторів.

10.1. Основні теоретичні відомості

Трансформатор - найважливіший елемент сучасних енергетичних систем, один із найбільш розповсюджених електротехнічних апаратів. Він призначений для перетворення електричної енергії однієї напруги в електричну енергію іншої при незмінній частоті. Робота трансформатора заснована на використанні явища електромагнітної індукції.

Основні частини трансформатора - замкнутий феромагнітний магнітопровід і обмотки. Магнітопровід зібраний з окремих ізольованих листів трансформаторної сталі, товщина яких на частоті 50 Гц складає 0,35 або 0,5 мм. Магнітопровід зменшує магнітний опір для основного магнітного потоку і збільшує магнітний зв'язок між обмотками.

У залежності від конструкції магнітопровода трансформатори бувають стержневі, броньові і спеціальні.

Обмотки трансформатора виготовляють з ізольованого мідного (алюмінієвого) проводу. Для трансформаторів малої потужності обмотки виконуються концентричними.

Обмотка, яка з'єднана з джерелом електричної енергії, називається первинною; обмотка, до якої приєднується електричне навантаження - вторинною.

На рис. 10.1 показано схему однофазного трансформатора з двома обмотками. Підведена до первинної обмотки від мережі змінна напруга u_1 створює в ній струм i_1 . Магніторухійна сила (МРС) $I_1 W_1$ (W_1 - кількість витків первинної обмотки) збуджує магнітний потік Φ_0 , який зв'язує первинну та вторинну обмотки і називається основним, або робочим, а також потік розсіювання Φ_{1s} , що на відміну від основного охоплює витки тільки первинної обмотки і замикається в немагнітному середовищі. Під дією основного магнітного потоку в обмотках, відповідно до закону електромагнітної індукції, індуються змінні ЕРС:

$$e_{10} = -W_1 \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad e_{20} = -W_2 \frac{d\Phi_0}{dt}$$

де W_2 - кількість витків вторинної обмотки.

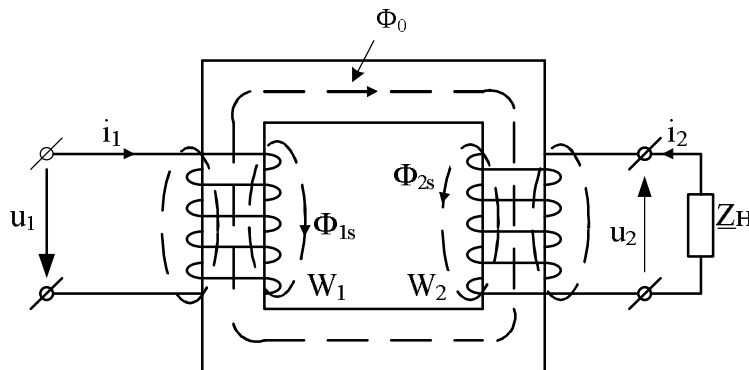


Рис.10.1

Відношення ЕРС первинної обмотки до ЕРС вторинної, яке також дорівнює відношенню числа витків обмоток, називають коефіцієнтом трансформації:

$$\frac{e_{10}}{e_{20}} = \frac{E_{10}}{E_{20}} = \frac{W_1}{W_2} = k .$$

Якщо до вторинної обмотки підключити навантаження, то під дією ЕРС e_{20} у ній виникне струм i_2 . Струм вторинної обмотки бере участь у створенні основного магнітного потоку Φ_0 , а також створює потік розсіювання Φ_{2S} , що замикається в немагнітному середовищі, так само, як і потік розсіювання первинної обмотки Φ_{1S} .

Таким чином, струми i_1 і i_2 створюють МРС i_1W_1 первинної і МРС вторинної i_2W_2 обмоток, спільна дія яких дорівнює МРС i_0W_1 (i_0 - струм первинної обмотки в режимі холостого ходу - коло вторинної обмотки розімкнено і струм $i_2 = 0$).

Тому рівняння $i_0W_1 = i_1W_1 + i_2W_2$ називається рівнянням МРС.

Електромагнітні процеси в трансформаторі описуються рівняннями Кирхгофа для первинної і вторинної обмоток:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 i_1 + L_{1S} \frac{di_1}{dt} - e_{10}, \\ e_{20} &= R_2 i_2 + L_{2S} \frac{di_2}{dt} + u_2, \end{aligned}$$

де R_1, R_2 - активні опори обмоток, що враховують втрати потужності в обмотках (втрати в міді); L_{1S}, L_{2S} - індуктивності розсіювання обмоток, що враховують потокощеплення розсіювання:

$$\Psi_{1S} = W_1 \Phi_{1S}, \quad \Psi_{2S} = W_2 \Phi_{2S}.$$

Нагадаємо, що для немагнітного середовища справедливе співвідношення $\Psi = Li$.

Для зручності розрахунку і порівняння величин, що характеризують процеси в первинній і вторинній обмотках трансформатора, їх приводять до одного числа витків, одержуючи приведений (розрахунковий)

трансформатор. Замінивши дійсні величини приведеними і , враховуючи, що струми, ЕРС та напруги змінюються за синусоїдальним законом, можна записати рівняння рівноваги приведенного трансформатора в комплексній формі:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_{1s}) \\ \dot{E}'_2 &= \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2(R'_2 + jX'_{2s}) \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 \end{aligned} \quad (10.1)$$

Цим рівнянням відповідає еквівалентна схема заміщення трансформатора, яку показано на рис.10.2.

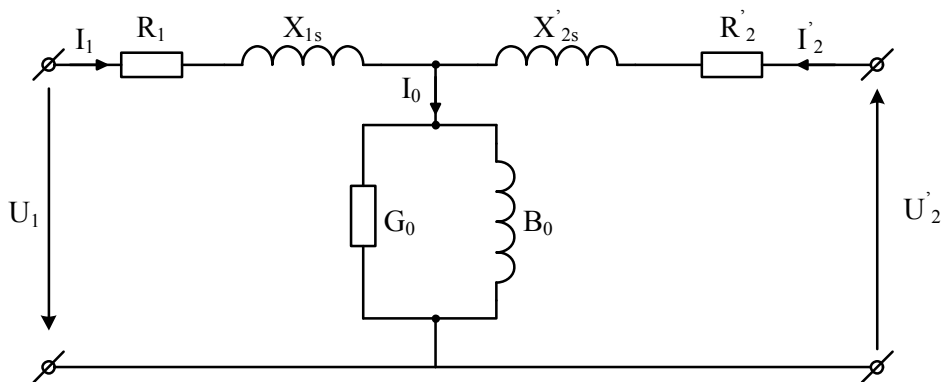


Рис.10.2

В еквівалентній схемі заміщення: G_0 - активна провідність, якою враховують втрати від вихрових струмів і на гістерезис (втрати в сталі); B_0 - реактивна провідність, якою враховують основний магнітний потік; $X_{1s} = \omega \cdot L_{1s}$ і $X_{2s} = \omega \cdot L_{2s}$ - індуктивні опори, якими враховують потоки розсіювання Φ_{1s} і Φ_{2s} ; R_1, R_2 - активні опори обмоток, якими враховують втрати потужності в обмотках (втрати в міді).

Замінюючи реальний трансформатор приведеним, усі параметри первинної обмотки залишаються незмінними. Незмінними, за умовами еквівалентної заміни, є активні, реактивні і повні потужності, а також коефіцієнт потужності вторинної обмотки. З цих умов одержують коефіцієнти приведення (однакові для однойменних величин: ЕРС і напруг - k , струмів - $\frac{1}{k}$ і опорів k^2 (k - коефіцієнт трансформації).

Приведені величини розраховуються з наступних рівнянь:

$$E'_{20} = E_{20} \cdot k, I'_2 = I_2 \cdot \frac{1}{k}, R'_2 = R_2 \cdot k^2.$$

Дослідження трансформатора і аналіз його роботи в різних режимах проводять за допомогою векторної діаграми (рис. 10.3), що представляє собою векторне рішення рівнянь електричної рівноваги (10.1).

Для визначення основних експлуатаційних характеристик трансформатора і параметрів схеми заміщення його досліджують за допомогою дослідів холостого ходу і короткого замикання. В досліді холостого ходу до первинної обмотки трансформатора підводиться напруга, яка дорівнює номінальній: $U_{1X} = U_{1ном}$. Вторинна обмотка трансформатора розімкнена і струм у ній відсутній ($I_2 = 0$).

У первинній обмотці трансформатора протікає струм холостого ходу I_0 . Він зазвичай невеликий і складає 4-10% від номінального значення I_{1H} .

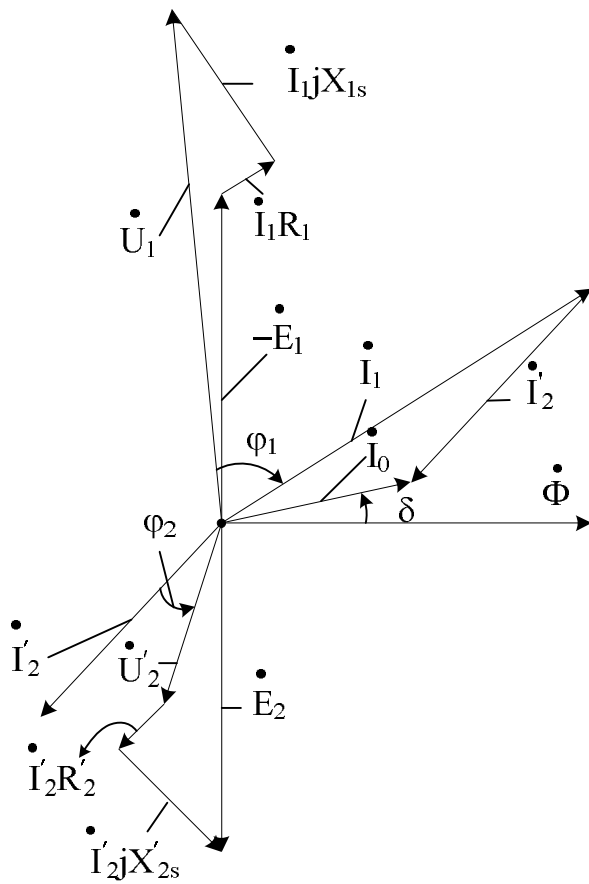


Рис.10.3

.Оскільки активний R_1 та індуктивний X_{1s} опори первинної обмотки, як і струм холостого ходу I_0 незначні, то можна знехтувати спадом напруги на первинній обмотці (складові $R_1 I_0$ і $X_{1s} I_0$ в рівнянні електричної рівноваги первинної обмотки малі в порівнянні з E_{10}). Тому, еквівалентну схему заміщення трансформатора в досліді холостого ходу можна подати в спрощеному вигляді. (рис. 10.4). У

зв'язку з викладеним очевидно, що $U_1 \approx E_{10}$, а $U_2 = E_{20}$. Це дозволяє з досліду холостого ходу визначити коефіцієнт трансформації як відношення первинної напруги до вторинної:

$$k = \frac{E_{10}}{E_{20}} = \frac{U_1}{U_2}.$$

Для діючих значень ЕРС E_{10} і E_{20} справедливі співвідношення:

$$E_{10} = 4.44 f W_1 \Phi_m, \quad E_{20} = 4.44 f W_2 \Phi_m,$$

де f - частота синусоїдного струму; Φ_m - амплітудне значення магнітного потоку трансформатора.

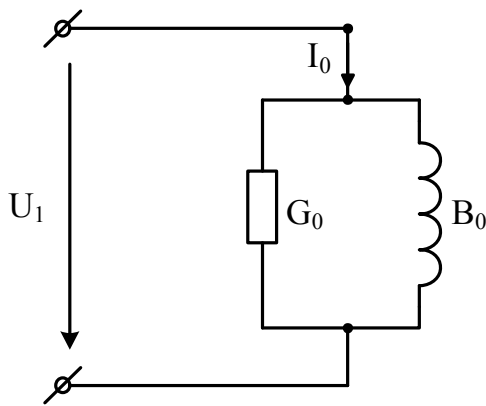


Рис.10.4

Надані вирази дають можливість розрахувати магнітний потік Φ_m , а також магнітну індукцію B_m , якщо відома площа поперечного перетину магнітопроводу S :

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S}$$

Втрати активної потужності в трансформаторі складаються з втрат у магнітопроводі, обумовлені гістерезисом і вихровими струмами (втрати в сталі P_{CT}) та втрат на нагрівання обмоток трансформатора (втрати в міді P_M). Оскільки, за незначного струму холостого ходу втрати в міді первинної обмотки незначні, а у вторинній відсутні зовсім, то приймають, що потужність, яку споживає трансформатор у досліді холостого ходу P_{1X} і вимірюється ватметром, витрачається на втрати в сталі. Тому за даними досліді холостого ходу визначають параметри G_0 та B_0 еквівалентної схеми заміщення (рис. 10.4).

$$\text{Повна провідність схеми заміщення } Y_0 = \frac{I_{1X}}{U_{1X}};$$

$$\text{активна провідність } G_0 = Y_0 \cdot \cos \varphi_{1X};$$

$$\text{реактивна провідність } B_0 = Y_0 \cdot \sin \varphi_{1X};$$

$$\text{де } \varphi_{1X} = \arccos \frac{P_{1X}}{U_{1X} I_{1X}};$$

В досліді короткого замикання трансформатора, на відміну від небезпечного режиму короткого замикання, що виникає в аварійних умовах, до первинної обмотки трансформатора підводиться така напруга, за якої в його обмотках виникають номінальні струми. Оскільки в цьому досліді напруга, що підводиться до первинної обмотки, невелика і дорівнює $U_{1K} \approx E_{1K} = 4,44 f W_1 \Phi_m$, то магнітний потік трансформатора Φ_m , а отже, і магнітна індукція B_m також будуть невеликими. Це означає, що втрати в сталі, які пропорційні квадратові магнітної індукції B_m^2 , мізерно малі і ними можна знехтувати. Таким чином, вважають, що в досліді короткого замикання активна потужність P_{1K} , яку споживає трансформатор, витрачається на втрати в міді.

Відзначимо, що струм I_0 значно менше номінального струму I_{1H} . Тому в схемі заміщення трансформатора, гілкою зі струмом I_0 нехтують, і схема заміщення трансформатора стає спрощеною (рис. 10.5).

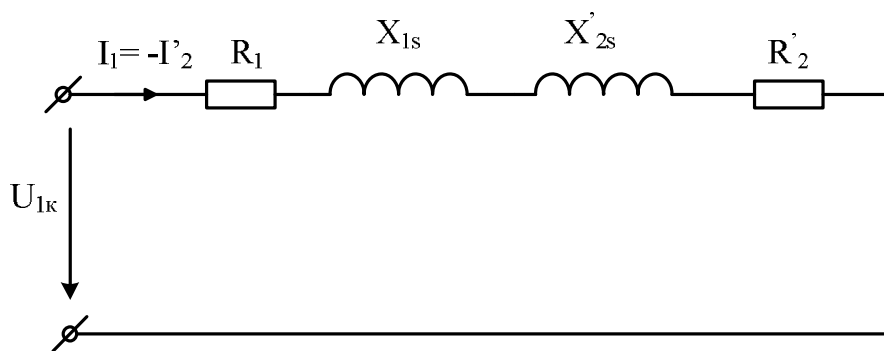


Рис.10.5

Відповідно до викладеного, вимірявши напругу, струм і активну потужність в досліді короткого замикання, визначають параметри R_1 , X_{1S} , R'_2 , X'_{2S} еквівалентної схеми заміщення.

$$\text{Повний опір схеми заміщення : } Z_K = \frac{U_K}{I_K},$$

активний опір $R_K = Z_K \cos \varphi_{1K}$,

реактивний опір $X_K = Z_K \sin \varphi_{1K}$,

де $\varphi_{1K} = \arccos \frac{P_{1K}}{U_{1K} \cdot I_{1K}}$.

Строго розділити R_K та X_K відповідно на R_1 і R'_2 , X_{1S} і X'_{2S} важко.

Звичайно схему заміщення вважають симетричною, тому $R_1 = R'_2 = \frac{R_K}{2}$ та

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_K}{2}.$$

До основних характеристик трансформаторів відносяться зовнішня характеристика, що представляє залежність напруги на затисках вторинної обмотки U_2 від струму навантаження I_2 , і робочі характеристики, що

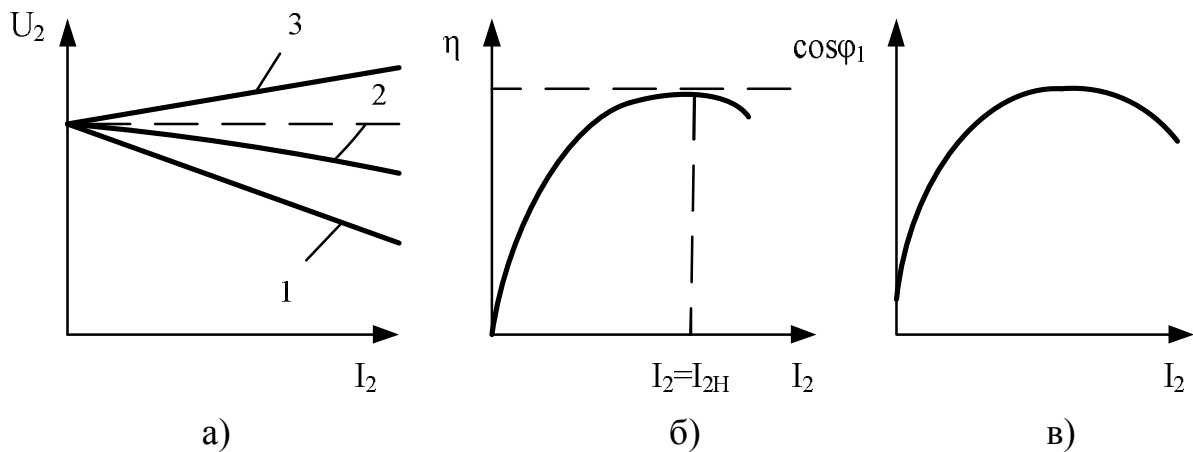


Рис.10.6

представляють залежність коефіцієнта корисної дії (ККД) η і коефіцієнта потужності $\cos \varphi_1$ від струму навантаження I_2 , за умови $U_1 = U_{1H} = const$, $f_1 = f_{1H} = const$, $\cos \varphi_2 = const$. Типовий характер цих залежностей показано на рис. 10.6.

Записавши рівняння електричної рівноваги для вторинної обмотки трансформатора відносно напруги на ній, отримуємо рівняння для зовнішньої характеристики трансформатора $U_2 = f(I_2)$ у векторній формі:

$$\vec{U}_2 = \vec{E}_{20} - (R_2 + jR_{2S})\vec{I}_2.$$

З цього виразу слідує, що зміна струму навантаження I_2 приводить до зміни напруги за рахунок спаду напруги на вторинній обмотці.

Зверніть увагу на те, що вторинна обмотка, відносно навантаження, може бути представлена джерелом електроенергії, а її повний опір $Z_2 = R_2 + jX_{2S}$ внутрішнім опором цього джерела.

Вигляд зовнішньої характеристики залежить від характеру навантаження. Аналізуючи векторну діаграму трансформатора з активно-індуктивним навантаженням (рис. 10.3), можна встановити, що спад напруги на його вторинній обмотці тим більше, чим більше виражено її індуктивний характер (крива 1 на рис. 10.6, а). Можна показати, що у випадку суто активного навантаження зовнішня характеристика буде більш жорсткою (крива 2, на рис. 10.6,а). Коли навантаження трансформатора має ємнісний характер, напруга на затискачах вторинної обмотки зі збільшенням струму навантаження також збільшується (крива 3 на рис. 10.6, а).

Коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора дорівнює відношенню корисної потужності до потужності, яка споживається з мережі:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

ККД трансформаторів дуже високий (0,95...0,995), тобто різниця величин P_1 і P_2 приблизно дорівнює похибці вимірювальних приладів, тому його

рекомендується визначати розрахунковим шляхом (користуючись паспортними даними трансформатора і даними дослідів холостого ходу і короткого замикання). Зазвичай вводять коефіцієнт завантаження трансформатора $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}$ і вираз для ККД, що дозволяє визначати його для різних значень навантаження, записують у такому вигляді:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_C + \beta^2 P_M},$$

де S_H - номінальна потужність трансформатора; P_C - потужність втрат у сталі (її визначають з дослідів холостого ходу); $\beta^2 P_M$ - потужність втрат в обмотках трансформатора (втрати в міді) (тут P_M - втрати в міді при номінальних струмах, які визначаються з дослідів короткого замикання).

Якщо навантаження відсутнє, тобто в режимі холостого ходу, ККД дорівнює нулю, тому залежність $\eta = f(I_2)$ буде виходити з початку координат (рис. 10.6,б). При малих значеннях навантаження, коли втрати в міді незначні, а втрати в сталі приблизно дорівнюють корисній потужності, значення ККД буде невеликим. Відзначимо, що втрати в сталі не залежать від навантаження, у той час як втрати в міді зростають пропорційно квадратові струму. Виявляється, що ККД має найбільше значення коли втрати в міді та сталі однакові, тобто $P_C = P_M$. З подальшим зростанням навантаження ККД трансформатора буде трохи знижуватися.

Характер зміни коефіцієнта потужності трансформатора $\cos \varphi_1 = f(I_2)$ (рис. 10.6,в) пояснюється наступним чином. Характеристика виходить не з початку координат, а з точки з ординатою, що відповідає коефіцієнтові потужності в режимі холостого ходу. Зі збільшенням навантаження ця залежність різко зростає і досягає максимального

значення, а потім трохи зменшується. Характер цієї залежності можна пояснити, аналізуючи векторну діаграму трансформатора (рис. 10,3) приблизно за наступною схемою. Збільшення струму навантаження I_2 викликає одночасне збільшення струму первинної обмотки I_1 . Оскільки коефіцієнт потужності споживача $\cos \varphi_1 = const$, то зі збільшенням струму I_1 відбувається його зсув убік вектора U_1 , тому кут φ_1 зменшується, а $\cos \varphi_1$ відповідно збільшується. Однак зростання $\cos \varphi_1$ відбувається до визначеної межі, тому що подальше збільшення I_2 а, отже, і I_1 , приводить до зростання спаду напруги на первинній обмотці $(R_1 + jX_1)I_1$, що призводить до незначного збільшення кута φ_1 а, отже, і до відповідного зменшення $\cos \varphi_1$.

10.2. Порядок виконання роботи

Виконати зовнішній огляд трансформатора, ознайомитися з розташуванням обмоток вищої і нижчої напруги, конструкцією магнітопровода. Паспортні дані записати в табл. 10.1.

Таблиця 10.1

Інвентарний номер трансформатора	$S_H, \text{ВА}$	$U_{1H}, \text{В}$	$U_{2H}, \text{В}$	Розрахувати	
				$I_{1H}, \text{А}$	$I_{2H}, \text{А}$

2. Ознайомитись з апаратурою і вимірювальними приладами. Установити їхню відповідність виконуваній роботі і записати паспортні дані в табл. 10.2.

Таблиця 10.2

№ з/п	Найменування приладів і апаратів, інвентарний номер	Позначення на схемі	Вимірювальний механізм або тип	Клас точності	Межа вимірювання або номінальні параметри	Ціна поділки	Примітка
1	2	3	4	5	6	7	8
1							
2							
3							
4							
5							
6							

3. Відповідно до принципової схеми (рис. 10.7) зібрати електричне коло для дослідження трансформатора за монтажною схемою (рис. 10.8).

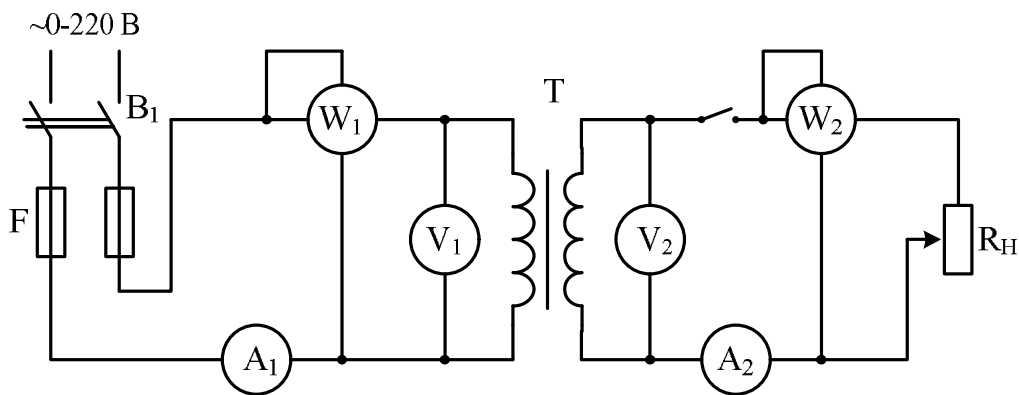


Рис.10.7

Як навантаження, підключити резистори із змінними і постійними параметрами, сумарний опір яких розрахувати з врахуванням того, що струм у вторинній обмотці повинен змінюватися від $I_2 = 0,25I_{2H}$ до $I_2 \cong 1,2I_{2H}$.

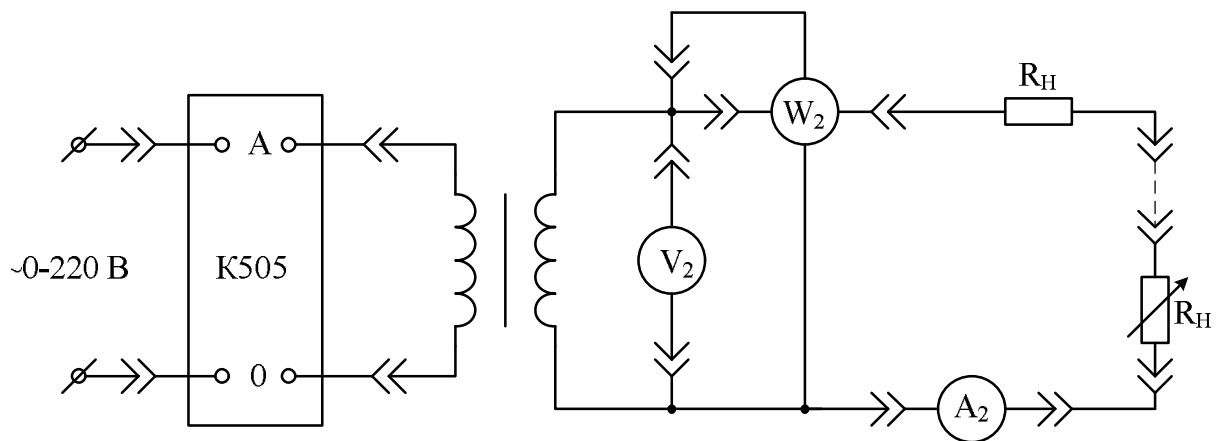


Рис.10.8

4. Виконати дослід холостого ходу. Для цього розімкнути вторинну обмотку і подати на первинну обмотку трансформатора напругу від регульованого джерела синусоїдної напруги, величина якої дорівнює номінальній. Покази вимірювальних приладів записати в графу "холостий хід" табл. 10.3.

5. Випробувати трансформатор при активному навантаженні. Струм навантаження змінювати починаючи з $I_2 = 0,25I_{2H}$ до $I_2 \cong 1,2I_{2H}$ з таким розрахунком, щоб одержати шість вимірювань, серед яких повинно бути $I_2 = I_{2H}$. Покази приладів записати в графу "Навантаження" табл. 10.3 (I_{2H} - номінальне значення струму вторинної обмотки трансформатора).

6. Виконати дослід короткого замикання. Для цього напругу регульованого джерела синусоїдальної напруги встановити рівною нулю. Зібрати електричне коло, принципову схему якого показано на рис. 10.9. Плавню підвищувати напругу на первинній обмотці трансформатора від нуля до значення, при якому струми в обмотках досягнуть своїх

номінальних значень. Покази приладів записати в графу "Коротке замикання" табл. 10.3.

Таблиця 10.3

Режим роботи трансформатора	Результати вимірів						Результати розрахунків		
	I_1, A	$U_1, \text{В}$	$P_1, \text{Вт}$	I_2, A	$U_2, \text{В}$	$P_2, \text{Вт}$	$\cos \varphi_1$	η	β
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Холостий хід									
Навантаження	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								
Коротке замикання									

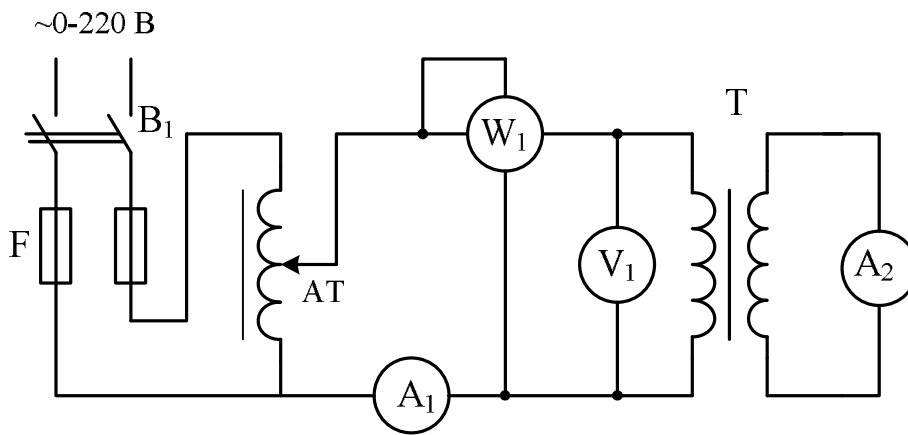


Рис.10.9

10.3. Обробка результатів вимірювань.

1. Виконати розрахунки згідно табл. 10.3.

2. Накреслити еквівалентну схему заміщення трансформатора і визначити її параметри. Визначити також відносне значення струму холостого ходу $I_{1X} \% = \frac{I_{1X}}{I_{1H}} \cdot 100\%$, відносне значення напруги короткого замикання $U_{1K} \% = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} \cdot 100\%$ і коефіцієнт трансформації. Результати записати в табл. 10.4.

Таблиця 10.4

Параметри схеми заміщення						Параметри трансформатора		
$R_1, \text{ Ом}$	$X_{1S}, \text{ Ом}$	$R'_2, \text{ Ом}$	$X'_{S2}, \text{ Ом}$	$G_0, \text{ См}$	$B_0, \text{ См}$	$I_{1X}, \%$	$U_{1K}, \%$	k

3. Побудувати в загальних координатних вісях робочі характеристики $\eta = f(I_2)$ й $\cos \varphi_2 = f(I_2)$, а також зовнішню характеристику $U_2 = f(I_2)$ і визначити відносну зміну напруги на затисках вторинної обмотки:

$$\Delta U \% = \frac{U_{20} - U_{2H}}{U_{2H}} \cdot 100\%$$

де U_{2H} - напруга на затисках вторинної обмотки при номінальному навантаженні,

U_{20} - напруга холостого ходу.

4. Записати основні висновки за результатами роботи.

10.4. Контрольні запитання

1. Призначення, будова та принцип дії однофазного трансформатора.

2. З якою метою і як виконують досліді холостого ходу та короткого замикання?
3. Що таке схема заміщення трансформатора та як визначають її параметри?
4. Від чого залежать ЕРС обмоток трансформатора?
5. Які втрати потужності існують в трансформаторі і від чого вони залежать?
6. Що таке зовнішня характеристика трансформатора та яким чином її отримують?
7. Від чого залежать $\cos \varphi_1$ та η трансформатора?
8. Пояснити характер зміни зовнішньої та робочих характеристик.