

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Ілюк Назар Леонідович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Розробка та дослідження роботи комп'ютерної моделі однофазного
трансформатора в середовищі MULTISIM для лабораторного практикума
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело

Ілюк Н.Л.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Журавльов Валерій Пилипович

(прізвище, ім'я, по батькові)

д.ф-м.н., професор кафедри вищої
та прикладної математики
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Ілюк Н.Л. Розробка та дослідження роботи комп'ютерної моделі однофазного трансформатора в середовищі MULTISIM для лабораторного практикума Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Метою даної роботи є створення та впровадження на базі теоретичних досліджень комп'ютерної моделі однофазного трансформатора в середовищі Multisim для лабораторного практикуму при вивченні електротехнічних дисциплін здобувачами вищої освіти.

Відмічено, що розробка та впровадження комп'ютерної моделі однофазного трансформатора в середовищі Multisim для лабораторного практикуму є важливим кроком у підвищенні якості електротехнічної освіти.

Ключові слова: комп'ютерна модель, математична модель, однофазний трансформатор.

ABSTRACT

Ilyuk N.L. Development and research of a computer model of a single-phase transformer in the MULTISIM environment for laboratory practice Qualification work for a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The purpose of this work is to create and implement, on the basis of theoretical research, a computer model of a single-phase transformer in the Multisim environment for laboratory practice when studying electrical engineering disciplines by higher education students.

It is noted that the development and implementation of a computer model of a single-phase transformer in the Multisim environment for laboratory practice is an important step in improving the quality of electrical engineering education.

Keywords: computer model, mathematical model, single-phase transformer.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРИНЦИП ДІЇ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА	7
1.1 Конструктивне виконання й принцип дії силового трансформатора	7
1.2 Електрична схема заміщення трансформатора	8
1.3 Внутрішня індуктивність трансформатора	12
1.4 Зчеплення потоків з первинною та вторинною обмотками	14
Висновки по розділу 1	16
РОЗДІЛ 2 КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРУ У СЕРЕДОВИЩІ MULTISIM ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ	17
2.1. Схемотехнічна модель однофазного трансформатора	19
2.2. Комп'ютерні моделі однофазних трансформаторів у середовищі Multisim	22
Висновки по розділу 2	26
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА У СЕРЕДОВИЩІ MULTISIM	27
3.1 Основні розрахункові співвідношення при побудові моделі для різних режимів роботи трансформатора	27
3.2. Опис схемотехнічної моделі лабораторного стенду для випробування однофазного трансформатора	33
Висновки по розділу 3	36
ВИСНОВКИ	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	39

ВСТУП

У сучасній електротехнічній освіті використання комп'ютерного моделювання є невід'ємною частиною практичної підготовки фахівців. Створення комп'ютерної моделі однофазного трансформатора в середовищі Multisim для лабораторного практикуму є важливим і актуальним завданням, зумовленим низкою переваг.

По-перше, моделювання дозволяє студентам безпечно та ефективно вивчати принципи роботи та характеристики трансформатора. На відміну від роботи з реальним обладнанням, моделювання виключає ризик ураження електричним струмом і пошкодження дорогого обладнання. Студенти можуть вільно експериментувати з різними параметрами трансформатора (наприклад, числом витків обмоток, індуктивністю розсіювання) і спостерігати за змінами в його роботі в реальному часі.

По-друге, використання Multisim надає можливість проведення досліджень, які важко або неможливо здійснити в реальних лабораторних умовах. Наприклад, можна легко моделювати різні режими роботи трансформатора, включаючи перевантаження та короткі замикання, що сприяє поглибленому розумінню процесів, які відбуваються всередині пристрою.

По-третє, створення комп'ютерної моделі дозволяє значно розширити спектр тем, що вивчаються. Студенти можуть не тільки досліджувати основні характеристики трансформатора, але й вивчати вплив нелінійності магнітопроводу, гармонійних спотворень напруги, а також ефективність різних схем включення та захисту трансформатора.

На закінчення, розробка та впровадження комп'ютерної моделі однофазного трансформатора в середовищі Multisim для лабораторного практикуму є важливим кроком у підвищенні якості електротехнічної освіти. Це дозволить студентам отримати більш глибокі знання та практичні навички, необхідні для успішної роботи в сучасній електроенергетиці.

Крім того слід відмітити, що розробка комп'ютерних моделей в електротехніці є складним процесом, який вимагає не тільки володіння

спеціалізованим програмним забезпеченням, але й глибокого розуміння фундаментальних теоретичних принципів. Теоретичні дослідження відіграють ключову роль у формуванні надійних та ефективних моделей, здатних точно відтворювати поведінку реальних електротехнічних систем.

Відповідно до вище сказаного **метою кваліфікаційної роботи** є створення та впровадження на базі теоретичних досліджень комп'ютерної моделі однофазного трансформатора в середовищі Multisim для лабораторного практикуму при вивченні електротехнічних дисциплін здобувачами вищої освіти.

Основними завданнями, які вирішувались при виконанні роботи були:

- визначення теоретичних основ та принципу дії силового трансформатора;
- опис фізичних процесів при роботі трансформатора в різних режимах роботи;
- побудова схмотехнічної моделі однофазного трансформатора;
- опис схмотехнічної моделі лабораторного стенду для випробування однофазного трансформатора

При виконанні кваліфікаційної роботи були використані наступні **методи дослідження** : опис фізичних процесів на базі теоретичних основ електротехніки, побудова схмотехнічної моделі та використання програмного середовища Multisim.

Перелік публікацій автора за темою дослідження

Ілюк Н. Л., ДЕЯКІ АСПЕКТИ В ПИТАННІ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЇХ ЕФЕКТИВНІСТЬ, НАДІЙНІСТЬ І СТАБІЛЬНІСТЬ РОБОТИ.

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 31 жовтня 2024 року. Житомир: Поліський національний університет, 2024.- С 153-155.

Журавльов В.П., Ілюк Н.Л. ПОБУДОВА ТА ОПИС СХЕМОТЕХНІЧНОЇ
МОДЕЛІ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ
ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. – С 142-145.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРИНЦИП ДІЇ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1.1 Конструктивне виконання й принцип дії силового трансформатора

Трансформатор — це статичний електромагнітний пристрій, призначений для зміни напруги змінного струму при збереженні частоти. Його функціонування ґрунтується на явищі електромагнітної індукції, що відбувається між двома або більше обмотками, електрично ізольованими одна від одної, але магнітно зв'язаними за допомогою спільного магнітопроводу.

Ключовим процесом є створення змінного магнітного потоку Φ в магнітопроводі при подачі змінної напруги u_1 на первинну обмотку. Цей потік, індукований змінним струмом первинної обмотки i_1 , наводить електрорушійну силу (ЕРС) в обох обмотках – первинній e_1 та вторинній e_2 . Величина ЕРС, індукованої в кожній обмотці, пропорційна швидкості зміни магнітного потоку та кількості витків цієї обмотки [9].

$$\begin{aligned} e_1 &= -w_1 \frac{d\Phi}{dt} , \\ e_2 &= -w_2 \frac{d\Phi}{dt} . \end{aligned} \tag{1.1}$$

Відношення кількості витків у вторинній обмотці w_2 до кількості витків у первинній обмотці w_1 визначає коефіцієнт трансформації k . Якщо коефіцієнт трансформації більший за одиницю, трансформатор підвищувальний, якщо менший за одиницю – понижувальний. Важливим аспектом є наявність струмів намагнічування та втрат у магнітопроводі (P_m). Струм намагнічування створює необхідний магнітний потік, а втрати, зумовлені гістерезисом (P_r) і вихровими струмами (P_v), призводять до нагрівання магнітопроводу та зниження ефективності трансформатора.

Отже, електромагнітні процеси в трансформаторі являють собою складний взаємозв'язок змінного струму, магнітного потоку та індукованої ЕРС, що дозволяє ефективно змінювати параметри електричної енергії. Оптимізація

конструкції та матеріалів трансформатора спрямована на мінімізацію втрат і підвищення ефективності перетворення енергії.

Магнітний потік розсіювання трансформатора – це частина магнітного потоку, створюваного обмотками трансформатора, яка не замикається через осердя, а замикається в навколишньому просторі, головним чином у повітрі або оливі. В ідеальному трансформаторі весь магнітний потік, створюваний первинною обмоткою, повинен повністю пронизувати вторинну обмотку, забезпечуючи ефективну передачу енергії. Однак, в реальних трансформаторах частина потоку, в силу різних причин, уникає осердя і "розсіюється" в навколишньому просторі.

Цей потік розсіювання негативно впливає на роботу трансформатора:

- Погіршення регулювання напруги: Потік розсіювання створює індуктивний опір в обмотках трансформатора, що призводить до падіння напруги при збільшенні навантаження.
- Підвищення втрат: Потік розсіювання викликає додаткові втрати в обмотках і сталевих конструкціях трансформатора, знижуючи його ККД.
- Обмеження пропускної здатності: Збільшення потоку розсіювання обмежує максимальну потужність, яку може передати трансформатор.

Для мінімізації потоку розсіювання використовуються різні конструктивні рішення, такі як:

- Використання осердя з високою магнітною проникністю.
- Розташування обмоток близько одна до одної.
- Використання багат шарових обмоток.
- Введення магнітних екранів.

Таким чином, розуміння та контроль магнітного потоку розсіювання є важливим аспектом проектування та експлуатації трансформаторів, що впливає на їх ефективність, надійність і стабільність роботи.

1.2 Електрична схема заміщення трансформатора

Нехай $a = a_1$ — товщина обмотки НН, $b = a_2$ — товщина обмотки ВН, а $\delta = a_{12}$ — відстань між ними, як прийнято на рис. 1.1, де також показано умовні

$\dot{\Phi}_{ct}$) та в міжобмотковому просторі ($\dot{\Phi}_{\delta}$); величина $\dot{\Phi}_{бок}$ — сумарний потік у бокових ярмах. Показано також потоки $\dot{\Phi}_a^a$, $\dot{\Phi}_a^b$ у стикових ярмах до і після міжобмоткового простору. Аналогічно до $\dot{\Phi}_{\delta}$ направлений потік $\dot{\Phi}_a$ всередині обмотки НН та потік $\dot{\Phi}_b$ всередині обмотки ВН.

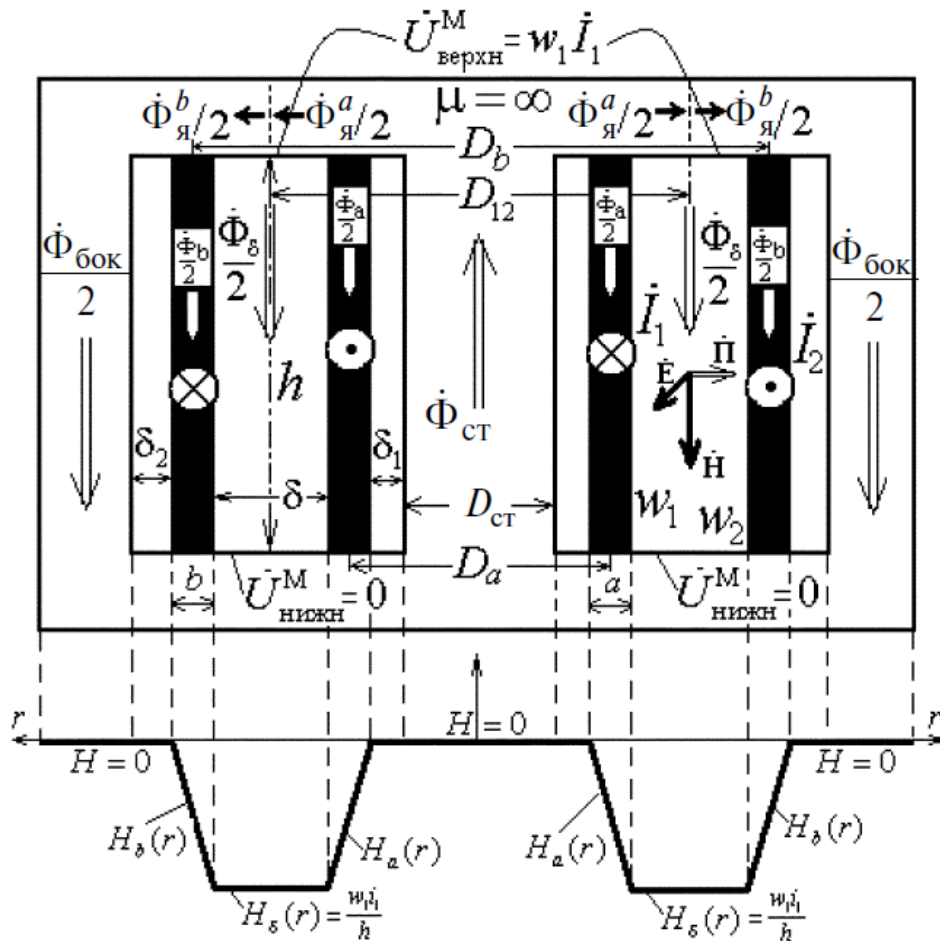


Рисунок 1.1. Розподіл напруженості магнітного поля в певний момент часу в ідеалізованому броньовому трансформаторі з обмоткою НН товщиною a (кількість витків w_1) та обмоткою ВН товщиною b (кількість витків w_2)

Очевидно, що в областях між обмотками та сталлю шириною δ_1 та δ_2 поле дорівнює нулю. Тож потік у вікні трансформатора при усталеному синусоїдальному режимі визначається сумою

$$\dot{\Phi}_{вікно} = \dot{\Phi}_a + \dot{\Phi}_{\delta} + \dot{\Phi}_b, \quad (1.1)$$

в якій всі доданки збігаються за фазою зі струмом i_1

$\dot{U}_1$, прийнемо обмотку НН з активним

опором R_1 . Потокозчеплення з нею позначимо через $\dot{\Psi}_1$, а індуковану в ній напругу (ЕРС $\dot{E}_1$) — як

$$\dot{U}_{01} = j\omega\dot{\Psi}_1. \quad (1.2)$$

Аналогічно, напругу (ЕРС $\dot{E}_2$), індуковану в обмотці ВН потокозчепленням $\dot{\Psi}_2$, представимо у вигляді

$$\dot{U}_{02} = j\omega\dot{\Psi}_2. \quad (1.3)$$

Активний опір обмотки ВН дорівнює R_2 , а під'єднаний до неї опір навантаження — Z_H . Напруга на навантаженні — $U_H = Z_H I_2$. Коефіцієнт трансформації дорівнює

$$n = w_1 / w_2. \quad (1.4)$$

При обході будь-якого контуру в магнітопроводі, що включає шлях вздовж стрбжня бокового ярма (рис. 1.1), згідно із законом повного струму

$$w_1 \dot{I}_1 - w_2 \dot{I}_2 = 0, \quad (1.5)$$

звідки випливає, що в ідеалізованому трансформаторі

$$\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{w_1}{w_2} = n \quad (1.6)$$

(в режимі холостого ходу $\dot{I}_1^{XX} = 0$; $\dot{I}_2^{XX} = 0$ (або $\dot{I}_1^{XX} = \dot{I}_2^{XX} = 0$)).

В загальному випадку, враховуючі перехідні процеси маємо

$$i(t) = i'_2(t) \text{ (де } i'_2(t) = i_2(t)/n : i_1^{XX} = i'_2{}^{XX} = 0); \quad (1.7)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{ст}(t) &= \Phi_{вікно}(t) + \Phi_{бок}(t); \\ \Phi_{вікно}(t) &= \Phi_a(t) + \Phi_\delta(t) + \Phi_b(t), \end{aligned} \quad (1.8)$$

причому всі потоки та індукції у вікні змінюються в часі синхронно з струмом $i_1(t) = i'_2(t)$.

Рівняння для напруги $u_1(t)$ на обмотці НН можна представити у вигляді [9]

$$R_1 i_1 + u_{01} = u_1, \quad (1.9)$$

де згідно з (1.2)

$$u_{01}(t) = \frac{d\Psi_1(t)}{dt}. \quad (1.10)$$

Для індукованої на обмотці ВН напруги маємо два рівняння [10]:

$$u_{02}(t) = \frac{d\Psi_2(t)}{d(t)} \left(\text{або } u'_{02}(t) = \frac{d\Psi'_2(t)}{d(t)} \right); \quad (1.11)$$

$$R_2 i_2 + u_H = u_{02} \quad (\text{або } R'_2 i'_2 + u'_H = u'_{02}). \quad (1.12)$$

Тут

$$u'_{02} = n \cdot u_{02}, \Psi'_2 = n \cdot \Psi_2, R'_2 = n R_2, u'_H = n \cdot u_H. \quad (1.13)$$

Важливим параметром електричної схеми заміщення трансформатора є його *повдовжня внутрішня індуктивність* $L_{\text{внут}}$, що співпадає з індуктивністю КЗ ($L_{\text{внут}} = L_{\text{КЗ}}$). Найбільш просто вона визначається на основі співвідношення для магнітної енергії у вікні трансформатора у довільний момент часу [10]

$$W_{\text{вікно}}^M(t) = W_a^M(t) + W_\delta^M(t) + W_b^M(t) = \frac{L_{\text{внут}} i_1^2(t)}{2},$$

де W_a^M , W_δ^M та W_b^M - значення магнітних енергій відповідно в області обмотки НН, міжобмотковому просторі шириною δ і області обмотки ВН (див. рис. 1.1). З (1.14) випливає, що

$$L_{\text{внут}} \equiv L_{\text{КЗ}} = \frac{2W_a^M}{i_1^2} + \frac{2W_\delta^M}{i_1^2} + \frac{2W_b^M}{i_1^2}$$

Рівність i_1^{XX} підказує, що електротрична схема заміщення трансформатора не може містити поперечних гілок. Вирази (1.9) і (1.12) з урахуванням розкладання (1.15) відібражають схеми заміщення на рис. 1.2 Величини L'_b в [9] позначені як L_{aa} , L'_{bb} . Внутрішній опір трансформатора дорівнює

$$Z_{\text{внут}} \equiv Z_{\text{КЗ}} = r_{\text{КЗ}} + jx_{\text{КЗ}},$$

де

$$r_{\text{КЗ}} = R_1 + R'_2, \quad x_{\text{КЗ}} = \omega L_{\text{КЗ}}.$$

Відповідно до схеми 1.2,б можна записати, що

$$u_{01} = u'_{02} + (L_a + L_\delta + L'_b) \frac{di_1}{dt}.$$

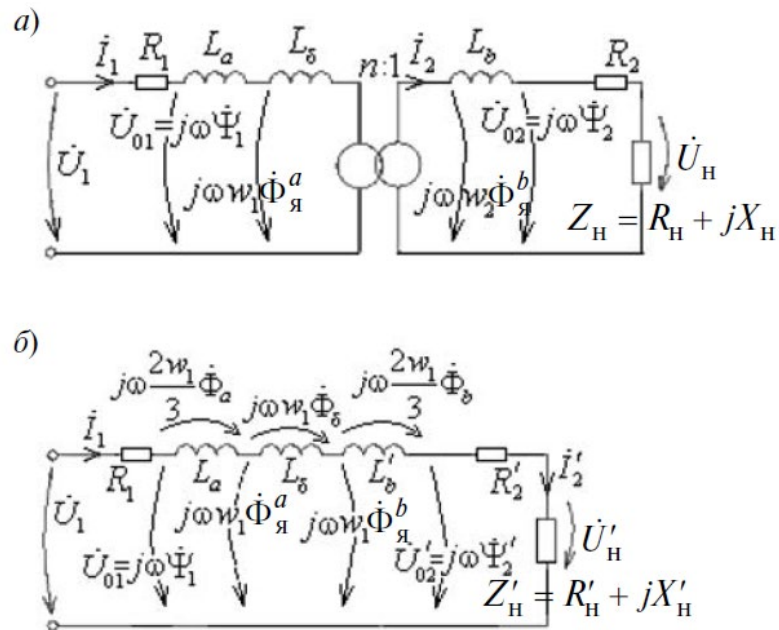


Рисунок 1.2. Електричні схеми заміщення ідеалізованого трансформатора з ідеальним трансформатором (а) та без нього (б)

1.3 Внутрішня індуктивність трансформатора

З (1.15) випливає: щоб виразити величини L_δ , L_a і L_b (або L'_b) через геометричні параметри обмоток, необхідно мати вираженнями для енергії у всіх зонах вікна трансформатора. На підставі кривої розподілу напруженості магнітного поля, показаного у нижній частині рис. 1.1, для миттєвого значення магнітної енергії в міжобмотувальному просторі шириною δ можемо написати [9]

$$\begin{aligned} W_\delta^M(t) &= \frac{\mu_0 H_\delta^2(t)}{2} h \delta \pi D_{12} = \\ &= \frac{\mu_0 \pi \delta D_{12} w_1^2}{2h} i_1^2(t) = \frac{L_\delta i_1^2(t)}{2}. \end{aligned}$$

Енергія магнітного поля в зоні внутрішньої обмотки шириною a буде дорівнювати

$$\begin{aligned}
W_a^M(t) &= \int_{(D_a-a)/2}^{(D_a+a)/2} \frac{\mu_0 H_a^2}{2} h 2\pi r dr = \\
&= \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{6h} a \left(D_a + \frac{a}{2} \right) i_1^2(t) = \frac{L_a i_1^2(t)}{2},
\end{aligned}$$

де $H_a(t, r)$ - напруженість поля в зоні внутрішньої обмотки, що змінюється згідно графіку на рис. 1.1 згідно із законом

$$H_a(t, r) = \frac{w_1 i_1(t)}{h} \frac{r - (D_a - a)/2}{a}.$$

Енергія магнітного поля в зоні зовнішньої обмотки шириною b буде дорівнювати [9]

$$\begin{aligned}
W_b^M(t) &= \int_{(D_b-b)/2}^{(D_b+b)/2} \frac{\mu_0 H_b^2}{2} h 2\pi r dr = \\
&= \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{6h} b \left(D_b - \frac{b}{2} \right) i_1^2(t) = \frac{L'_b i_1^2(t)}{2},
\end{aligned}$$

де $H_b(t, r)$ - напруженість поля в зоні зовнішньої обмотки, що змінюється згідно графіку на рис. 1.1 згідно із законом

$$H_b(t, r) = \frac{w_1 i_1(t)}{h} \frac{(D_b + b)/2 - r}{b}.$$

Вирішуючи (22), (21) и (23) відносно індуктивностей, одержимо

$$\begin{aligned}
L_a &= \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{3h} a \left(D_a + \frac{a}{2} \right) \approx \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \frac{a D_a}{3}; \\
L_\delta &= \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \delta D_{12}; \\
L'_b &= \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{3h} b \left(D_b - \frac{b}{2} \right) \approx \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \frac{b D_b}{3},
\end{aligned}$$

звідки випливає, що вони співвідносяться між собою як

$$L_a : L_\delta : L'_b = \frac{a D_a}{3} : \delta D_{12} : \frac{b D_b}{3},$$

або (грубо), вважаючи приблизно $D_a \approx D_b \approx D_{12}$, як $(a/3) : \delta : (b/3)$. Підсумовуючи співвідношення (1.26), отримуємо

$$L_{\text{внут}} \equiv L_{\text{КЗ}} = L_a + L_\delta + L'_b = \\ = \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \left(\frac{a D_a}{3} + \frac{a^2}{6} + \delta D_\delta + \frac{b D_b}{3} - \frac{b^2}{6} \right).$$

Враховуючи геометричні залежності

$$D_a = D_{12} - \delta - a; D_b = D_{12} + \delta + b, \quad (1.27)$$

неважко отримати також такий вираз для внутрішньої індуктивності (1.15) ідеалізованого трансформатора:

$$L_{\text{внут}} \equiv L_{\text{КЗ}} = \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \times \\ \times \left[D_{12} \left(\delta + \frac{a+b}{3} \right) + \frac{1}{3} (b-a) \left(\delta + \frac{a+b}{2} \right) \right].$$

1.4 Зчеплення потоків з первинною та вторинною обмотками

Магнітні потоки $\Phi_1(t)$ (у стержні) та $\Phi_a(t)$ (в товщі обмотки НН) утворюють зчеплення потоків $\Psi_1(t)$ обмотки НН шириною a (див. рис. 1.1). Щоб отримати вираз для $\Psi_1(t)$, виділимо в ній елементарний шар радіуса r товщиною dr . У цьому шарі протікає елементарний магнітний потік, який на підставі (1.23) можна представити у вигляді

$$d\Phi_a = \mu_0 H_a(r) 2\pi r dr = \\ = \mu_0 \frac{r - (D_a - a)/2}{a} 2\pi r \frac{w_1 i_1(t)}{h} dr.$$

Очевидно, що цей потік зчепляється лише з частиною витків внутрішньої обмотки, що знаходяться за межами елементарного шару, звідки

$$d\Psi_a = \frac{w_1}{a} \left(\frac{D_a + a}{2} - r \right) d\Phi_a.$$

Повне потокозчеплення з внутрішньою обмоткою визначається як

$$\begin{aligned}
\Psi_1(t) &= w_1 \Phi_1(t) - \int_{(D_a-a)/2}^{(D_a+a)/2} d\Psi_a = \\
&= w_1 \Phi_1(t) - \frac{\mu_0 2\pi w_1}{a} \frac{w_1 i_1(t)}{ah} \times \\
&\times \int_{(D_a-a)/2}^{(D_a+a)/2} r \left(r - \frac{D_a-a}{2} \right) \left(\frac{D_a+a}{2} - r \right) dr = \\
&= w_1 \Phi_1(t) - \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \frac{a D_a}{6} i_1(t),
\end{aligned}$$

що з урахуванням (1.26) можна також подати у вигляді

$$\Psi_1(t) = w_1 \Phi_1(t) - \frac{L_a i_1(t)}{2},$$

а з урахуванням

$$\Phi_a(t) = \frac{3}{2} \left(\frac{D_a + a/3}{D_a + a/2} \right) \frac{L_a i_1(t)}{w_1} \approx \frac{3}{2} \frac{L_a i_1(t)}{w_1}.$$

у вигляді

$$\Psi_1(t) = w_1 \Phi_1(t) - \frac{w_1 \Phi_a(t)}{3}.$$

Аналогічним чином можна отримати вираз (див. табл. 1.1) для $\Psi_2(t)$ (або $\Psi'_2(t) = n\Psi_2(t)$).

Таблиця 1.1- Основные соотношения для потоков и потокосцеплений

Зона вікна	Вклад у внутрішню індуктивність	$\Phi(t)$	$\Psi(t)$	$\Psi(t)$ (через потоки)
Обмотка НН	$L_a \approx \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \frac{a D_a}{3}$	$\Phi_a(t) \approx \frac{3}{2} \frac{L_a i_1(t)}{w_1}$	$\Psi_1(t) = w_1 \Phi_1(t) - \frac{L_a i_1(t)}{2}$	$w_1 \Phi_1(t) - \frac{w_1 \Phi_a(t)}{3}$
Між обмотками	$L_\delta = \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \delta D_{12}$	$\Phi_\delta(t) = \frac{L_\delta i_1(t)}{w_1}$	—	—
Обмотка ВН	$L'_b \approx \frac{\mu_0 \pi w_1^2}{h} \frac{b D_b}{3}$	$\Phi_b(t) \approx \frac{3}{2} \frac{L'_b i_1(t)}{w_1}$	$\Psi'_2(t) = w_1 \Phi_2(t) + \frac{L'_b i_1(t)}{2}$	$w_1 \Phi_2(t) + \frac{w_1 \Phi_b(t)}{3}$
Вікно	$L_{K3} = L_a + L_\delta + L'_b,$		$\Phi_{\text{окно}}(t) \approx \left(L_\delta + \frac{3}{2} (L_a + L'_b) \right) \frac{i_1(t)}{w_1}$	

Висновки по першому розділу

Виведено аналітичні співвідношення по обліку впливу кінцевої товщини обмоток та магнітних потоків, що дозволяють правильно пояснювати принцип дії та роботи ідеалізованого трансформатора у будь-яких встановлених та перехідних режимах.

РОЗДІЛ 2

КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРУ У СЕРЕДОВИЩІ MULTISIM ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ

Застосування в навчальному процесі інформаційних технологій при проведенні лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» та ін. у віртуальній комп'ютерній лабораторії дозволяє підвищити якість вивчення електромагнітних пристроїв та електричних машин.

У віртуальних комп'ютерних лабораторіях використовуються пакети моделювання та проектування електронних пристроїв, серед яких найбільшого поширення набув пакет Multisim. При проведенні лабораторної роботи з вивчення принципу дії та характеристик однофазного трансформатора необхідне використання комп'ютерної моделі, що дозволяє адекватно описати електромагнітні процеси в трансформаторі. При розрахунку однофазного трансформатора часто використовується схемотехнічна модель, що представляє собою Т-подібну схему заміщення. Т-подібна схема заміщення трансформатора може бути перетворена до П-подібної або Г-подібної схеми заміщення.

При побудові схеми заміщення однофазного трансформатора робляться наступні припущення [1-3]:

1. Основний магнітний потік, що замикається по магнітопроводу, в режимі холостого ходу і в робочому режимі є постійним.
2. Магнітний потік розсіювання може бути представлений роздільно у вигляді двох магнітних потоків розсіювання первинної та вторинної обмоток.
3. Використовується основна крива намагнічування, не враховується гістерезисний характер кривої.
4. Використовується поняття про гілку намагнічування.

5. Магнітні потоки можуть бути представлені еквівалентними синусоїдами. 6. Передбачається, що енергія магнітного поля концентрується в основному в магнітопроводі і лише невелика частина – в просторі.

7. В Т-подібній схемі заміщення приведенного трансформатора приймається рівність активних опорів та індуктивних опорів розсіювання первинної та вторинної обмоток.

У ряді робіт ця схема заміщення і зроблені припущення піддаються критиці. В роботі [4] піддається сумніву припущення про незмінність магнітного потоку в режимі холостого ходу і в робочому режимі. Показано, що відношення магнітного потоку в режимі навантаження до магнітного потоку в режимі холостого ходу наближено дорівнює $1/(1+\varepsilon_{12})$, де $\varepsilon_{12}=(r_1L_2)/(r_2L_1)$, r_1 , L_1 – активний опір та індуктивність первинної обмотки, r_2 , L_2 включають активний опір та індуктивність навантаження. Якщо активний опір та індуктивність навантаження суттєво більші за активний опір та індуктивність первинної обмотки, то магнітні потоки в режимі холостого ходу і при навантаженні відрізняються незначно.

Наряду з Т-подібною схемою заміщення використовується П-подібна схема, ці схеми для режимів до насичення ідентичні [8-10]. В даних схемах передбачається, що енергія передається від первинної обмотки до вторинної через залізо магнітопроводу і енергія магнітного поля в основному концентрується в магнітопроводі. В [8] запропоновані так звані 2Т-подібні схеми заміщення, що враховують над- і антипотоки в короткозамкненому трансформаторі. Цю модель доцільно застосовувати при оцінці ударних струмів КЗ при дослідженні аварійних режимів. В роботах [9; 10] розробляється модель трансформатора, що використовує вектор Пойнтінга, передбачається, що енергія від первинної до вторинної обмотки передається через зазор між обмотками. Ці роботи носять теоретичний характер. Запропонована модель ще не набула поширення, також відсутня можливість її розрахунку за паспортними даними, порівняння з поширеною Т-подібною

моделлю, тому її використання в лабораторному практикумі на даний момент недоцільне.

2.1. Схемотехнічна модель однофазного трансформатора

Схемотехнічна модель однофазного трансформатора будується на основі приведення параметрів вторинної обмотки до первинної обмотки. При цьому приймається, що потужність, споживана навантаженням, і потужність втрат у трансформаторі залишаються незмінними. Запишемо рівняння однофазного трансформатора в наступному вигляді [9]:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{10} + \dot{z}_1 \dot{I}_1, \quad (2.1)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{20} + \dot{z}_2 \dot{I}_2, \quad (2.2)$$

де $\dot{U}_{10}, \dot{U}_{20}$ – напруги, що відповідають діючим значенням трансформаторних ЕРС, індукованих у первинній та вторинній обмотках основним магнітним потоком у магнітопроводі. Припущення про сталість магнітних потоків при холостому ході та робочому режимі трансформатора дозволяє записати рівняння балансу магніторушійних сил трансформатора:

$$w_1 \dot{I}_{10} = w_1 \dot{I}_1 - w_2 \dot{I}_2, ,$$

де w_1, w_2 – число витків первинної та вторинної обмоток трансформатора. Нехай коефіцієнт трансформації дорівнює $k = U_{10}/U_{20}$, тоді запишемо:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{10} &= \dot{I}_1 - \frac{w_2}{w_1} \dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{10} - \frac{1}{k} \dot{I}_2. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Струм $\dot{I}'_2 = \frac{1}{k} \dot{I}_2$ називається приведеним струмом. Для збереження потужності, що передається в навантаження, має виконуватися умова $\dot{U}_2 \dot{I}_2 = \dot{U}'_2 \dot{I}'_2$, тоді $\dot{U}'_2 = k \cdot \dot{U}_2$. Помножимо рівняння (2.2) на k , отримуємо:

$$\dot{U}_1 = k \dot{U}_{20} - k \dot{z}_2 \dot{I}_2. .$$

Враховуючи, що $\dot{U}_{10} = k \dot{U}_{20}$, запишемо $\dot{U}_{10} = \dot{z}_0 \dot{I}_{10}$. Використовуючи рівняння (2.3), отримуємо:

$$\dot{U}_1 = (\dot{z}_1 + \dot{z}_0) \dot{I}_1 - \dot{z}_0 \dot{I}'_2, \quad (2.4)$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{z}_0 \dot{I}'_1 - \dot{z}_2 \dot{I}'_2. \quad (2.5)$$

Рівнянням (2.4), (2.5) відповідає Т-подібна схема заміщення приведенного трансформатора (Рис. 2.1а). Для Т-подібної схеми передбачається $\dot{z}_1 = \dot{z}'_2$. Оскільки зазвичай виконуються умови $|\dot{z}_1| = |\dot{z}'_2| \ll |\dot{z}_0|$, тому наближено приймається $\dot{z}_0 = \dot{z}_\kappa$, $\dot{z}_1 = \dot{z}'_2 = \dot{z}_\kappa/2$, де $\dot{z}_0, \dot{z}_\kappa$ – комплексні опори холостого ходу та короткого замикання трансформатора.

Позначимо $\dot{z}_{12} = \dot{z}_1 = \dot{z}'_2$. Тоді, рівняння в А-формі для Т-подібної схеми матимуть вигляд [10]:

$$\dot{U}_2 = \left(1 + \frac{\dot{z}_{12}}{\dot{z}_0}\right) \dot{U}'_2 + \dot{z}_{12} \left(2 + \frac{\dot{z}_{12}}{\dot{z}_0}\right) \dot{I}'_2, \quad (2.6)$$

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{\dot{z}_0} \dot{U}'_2 + \left(1 + \frac{\dot{z}_{12}}{\dot{z}_0}\right) \dot{I}'_2. \quad (2.7)$$

Перетворимо рівняння (2.6), (2.7) для Т-подібної схеми в рівняння для Г-подібної схеми. Перейдемо від змінних (напруги та струму) $\dot{U}'_2, \dot{I}'_2$ до нових змінних напруги та струму $\dot{U}''_2, \dot{I}''_2$:

$$\dot{U}''_2 = k_u \dot{U}'_2, \quad (2.8)$$

$$\dot{I}''_2 = k_i \dot{I}'_2, \quad (2.9)$$

де $k_u = \left(\frac{\dot{z}_0 + \dot{z}_{12}}{\dot{z}_0}\right)$ – коефіцієнт перетворення напруги, $k_i = \left(\frac{\dot{z}_0}{\dot{z}_0 + \dot{z}_{12}}\right)$ –

коефіцієнт перетворення струму. В цьому випадку потужність, що передається в навантаження, буде дорівнювати

$$\begin{aligned} \dot{U}''_2 (\dot{I}''_2)^* &= \dot{k}_u \dot{U}'_2 (\dot{k}_i \dot{I}'_2)^* = \dot{k}_u \dot{U}'_2 (\dot{k}_i^* \dot{I}'_2) = \dot{k}_u \dot{k}_i^* \dot{U}'_2 (\dot{I}'_2)^*, \\ \dot{S}''_2 &= \dot{k}_s \dot{S}'_2, \\ \dot{k}_s &= \frac{(\dot{z}_0 + \dot{z}_{12})}{\dot{z}_0} \frac{\dot{z}_0^*}{\dot{z}_0^* + \dot{z}_{12}^*}, \end{aligned}$$

де $\dot{k}_s$ – коефіцієнт перетворення потужності. Використовуючи (2.8), (2.9), перетворимо рівняння для Т-подібної схеми в рівняння для Г-подібної схеми [9]:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2'' + \dot{z}_{12} \frac{(2\dot{z}_0 + \dot{z}_{12})(\dot{z}_0 + \dot{z}_{12})}{\dot{z}_0^2} \dot{I}_2'', \quad (2.10)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{\dot{z}_0 + \dot{z}_{12}} \dot{U}_2'' + \left(1 + \frac{\dot{z}_{12}}{\dot{z}_0}\right)^2 \dot{I}_2''. \quad (2.11)$$

Рівняння для Г-подібної схеми, наведеної на Рис. 2.1б, мають вигляд:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2'' + \dot{z}_a \dot{I}_2'', \quad (2.12)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{\dot{z}_b} \dot{U}_2'' + \left(1 + \frac{\dot{z}_a}{\dot{z}_b}\right)^2 \dot{I}_2''. \quad (2.13)$$

Прирівнюючи коефіцієнти рівнянь (2.12), (2.13) до коефіцієнтів рівнянь (2.10), (2.11), виразимо параметри Г-схеми (Рис. 2.1б) через параметри Т-подібної схеми (Рис. 2.1а):

$$\dot{z}_b = \dot{z}_0 + \dot{z}_{12}, \quad (2.14)$$

$$\dot{z}_a = \dot{z}_{12} \frac{(2\dot{z}_0 + \dot{z}_{12})(\dot{z}_0 + \dot{z}_{12})}{\dot{z}_0^2}. \quad (2.15)$$

Параметри Г-подібної схеми (Рис. 2.1б) можна визначити на основі дослідів холостого ходу та короткого замикання, обчисливши комплексні опори холостого ходу та короткого замикання $\dot{z}_x, \dot{z}_k$:

$$\dot{z}_b = \dot{z}_x, \quad (2.17)$$

$$\dot{z}_a = \frac{\dot{z}_x \dot{z}_k}{\dot{z}_x - \dot{z}_k}. \quad (2.18)$$

Визначивши параметри Г-подібної схеми за дослідом холостого ходу та короткого замикання $\dot{z}_b, \dot{z}_a$ (2.16), (2.17), використовуючи формули (2.14), (2.15), можна обчислити параметри Т-подібної схеми заміщення наступним чином:

$$\dot{z}_0 = \dot{z}_b \sqrt{\frac{\dot{z}_b}{\dot{z}_a + \dot{z}_b}}, \quad (2.18)$$

$$\dot{z}_{12} = \dot{z}_b - \dot{z}_0. \quad (19)$$

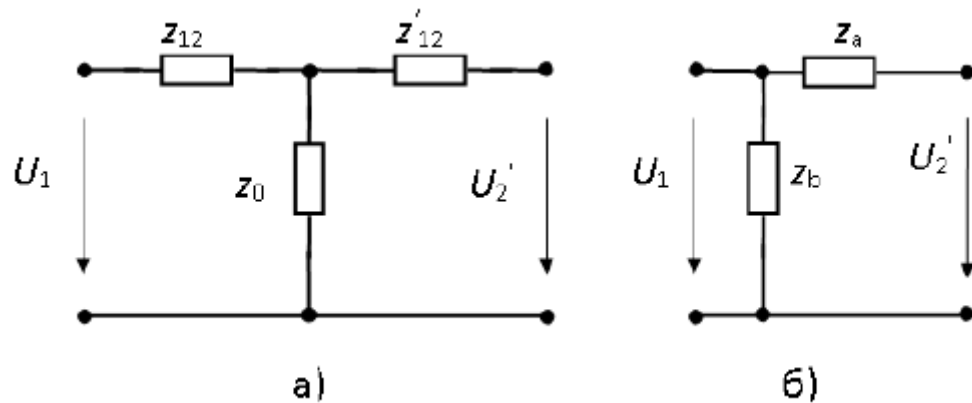


Рисунок 2.1. Т-подібна та Г-подібна схеми заміщення однофазного трансформатора

2.2. Комп'ютерні моделі однофазних трансформаторів у середовищі Multisim

Рівняння та схемотехнічні моделі однофазного трансформатора використовуються для побудови комп'ютерних моделей різного рівня складності та призначення. У пакеті Multisim 10.1 є як найпростіші моделі, що враховують лише деякі з характеристик трансформатора, наприклад, коефіцієнт трансформації, так і складніші, що враховують активні опори обмоток, індуктивності розсіювання обмоток, довжину та переріз магнітопроводу, основну криву намагніченості. Однією з найпростіших моделей трансформатора є модель TS_XFMR1 [2]. Вікно для задання параметрів цієї моделі наведено на Рис. 2.2. У моделі даного трансформатора можна задавати лише коефіцієнт трансформації. Не враховується ціла низка параметрів реального трансформатора, тому використання цієї моделі в лабораторному практикумі – недоцільне.

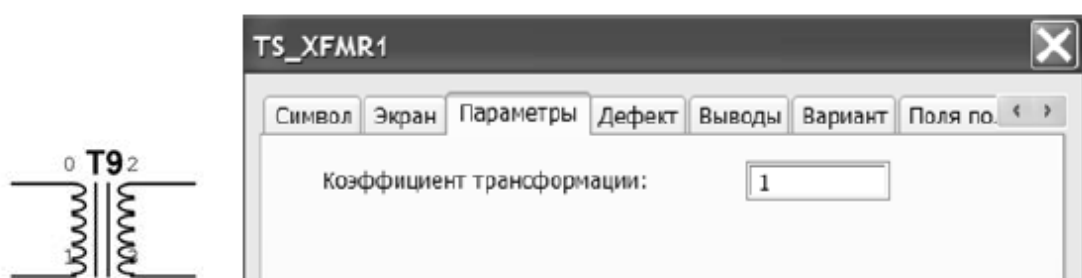


Рисунок 2.2. Вікно для задання параметрів моделі трансформатора
TS_XFMR1

До найпростіших моделей належить модель ідеального трансформатора *TS_IDEAL*. Зображення та вікно для задання параметрів цієї моделі наведено на Рис. 2.3. У моделі передбачено задання лише індуктивностей обмоток та коефіцієнта зв'язку між ними. Не враховуються індуктивності розсіювання, активні опори обмоток та інші параметри, тому для дослідження реальних мережевих трансформаторів цю модель використовувати не можна.

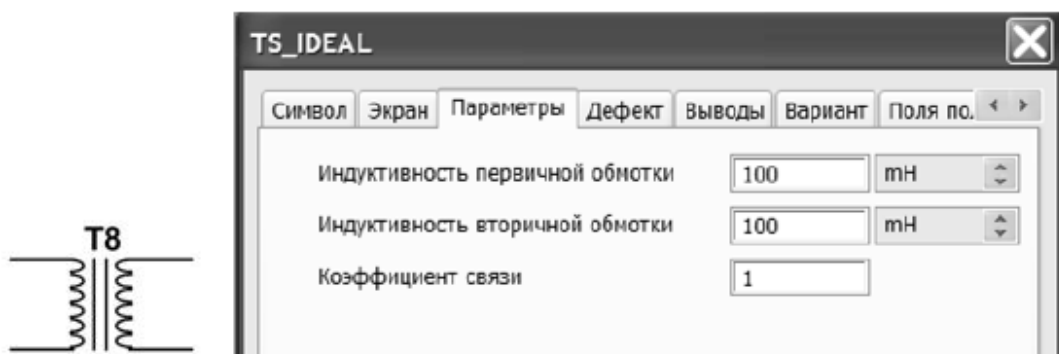


Рис. 2.3. Зображення та вікно для задання параметрів моделі трансформатора *TS_IDEAL*

У моделі віртуального трансформатора *TS_VIRTUAL* (Рис. 2.4) не передбачено задання еквівалентного активного опору втрат у магнітопроводі трансформатора [2].

Також не можна задавати окремо індуктивності розсіювання обмоток. Ці недоліки не дозволяють адекватно досліджувати режими роботи реального однофазного трансформатора.

Модель віртуального силового трансформатора *TS_POWER_VIRTUAL* (Рис. 2.5) практично не відрізняється від моделі просто віртуального трансформатора *TS_VIRTUAL*. Для задання параметрів цього трансформатора необхідно редагувати базову модель у бібліотеці моделей середовища Multisim 10.1, тоді як у просто віртуального трансформатора для цих цілей використовується поле задання параметрів. Також у цій моделі не

враховуються втрати потужності в магнітопроводі, що обмежує її застосування при дослідженні режимів роботи трансформатора.

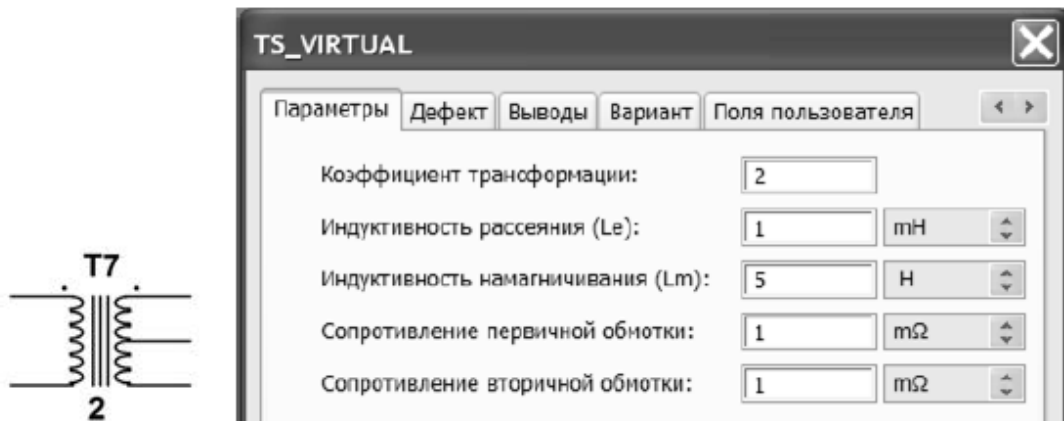


Рисунок 2.4. Графічне зображення та вікно для завдання параметрів моделі віртуального трансформатора *TS_VIRTUAL*



Рисунок 2.5. Зображення та опис макромоделі віртуального силового трансформатора *TS_POWER_VIRTUAL*

На Рис. 2.6 наведено зображення та вікно для задання параметрів віртуального нелінійного трансформатора *Nonlinear Transformer* [2]. Для використання цієї моделі трансформатора необхідно знати числа витків обмоток, їх активні опори та індуктивності, а також площу перерізу, довжину середньої лінії магнітопроводу та основну криву намагнічування його матеріалу (до 15-ти точок).

У паспортних даних трансформаторів, які виготовляються промисловістю, зазначені параметри не входять. Тому дана модель може використовуватися

лише для розробки трансформаторів, а не для дослідження режимів роботи та характеристик трансформаторів, що випускаються промисловістю.

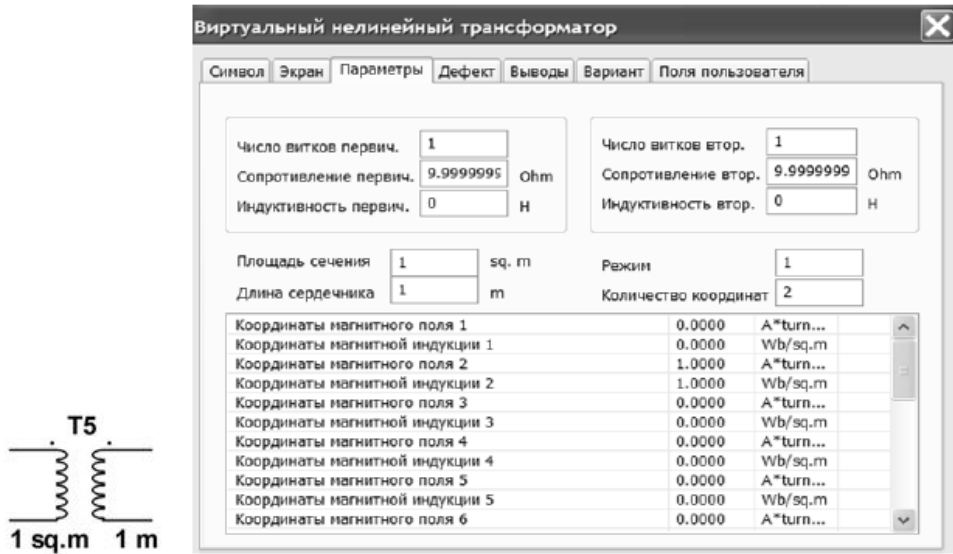


Рисунок 2.6. Зображення віртуального нелінійного трансформатора та вікно для задання параметрів моделі

На основі Г-подібної схеми заміщення побудовано комп'ютерну модель, що враховує всі основні параметри трансформатора: електричні та магнітні втрати, активні опори первинної та вторинної обмоток, індуктивні опори розсіювання обмоток трансформатора. Комп'ютерна модель побудована з використанням джерела напруги, керованого напругою, та джерела струму, керованого струмом.

Кероване джерело напруги перетворює вхідну напругу у вихідну. Джерело струму управляється струмом вторинної обмотки, що протікає в навантаженні, який враховується з відповідним коефіцієнтом у струмі первинної обмотки. Гілка намагнічування винесена на вхідні затискачі трансформатора. Перевагою цієї моделі є те, що її параметри можуть бути розраховані за паспортними даними трансформатора. Керовані джерела напруги та струму описуються рівняннями $u_{vix}=k_y u_{ex}$, $i_{vix}=k_y i_{ex}$, де $k_y=1/k$. Параметри Г-подібної схеми визначаються за формулами (2.16), (2.17) з використанням паспортних даних. Параметри гілки намагнічування R_{x1} , L_{x1} приймаються рівними параметрам поперечної гілки z_b :

$$Rx1 = \text{Real}(\dot{z}_b), Lx1 = \text{imag}(\dot{z}_b).$$

Обчисливши параметри позовжньої гілки z_a за формулою (2.17), параметри комп'ютерної моделі $R1, L1, R2, L2$ визначаємо наступним чином [2]:

$$R1 = \frac{\text{real}(\dot{z}_a)}{2}, L1 = \frac{\text{imag}(\dot{z}_a)}{2},$$

$$R2 = \frac{\text{real}(\dot{z}_a)}{2k^2}, L2 = \frac{\text{imag}(\dot{z}_a)}{2k^2}.$$

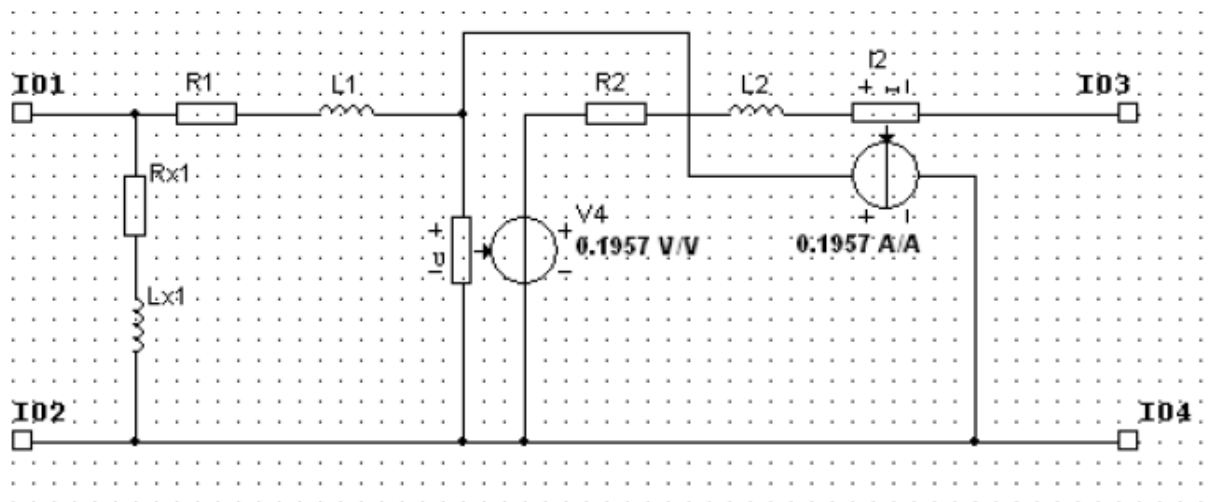


Рисунок 2.7. Комп'ютерна модель однофазного трансформатора для дослідження зовнішніх та робочих характеристик трансформатора

Висновки по другому розділу

Запропоновано комп'ютерну модель однофазного трансформатора для використання в лабораторному практикумі в середовищі Multisim. На відміну від моделей трансформатора, що входять до стандартних бібліотек пакета, запропонована модель враховує всі основні параметри та характеристики трансформатора: активні опори та індуктивні опори розсіювання первинної та вторинної обмоток, електричні втрати, магнітні втрати в магнітопроводі, коефіцієнт трансформації. Комп'ютерна модель побудована на основі Г-подібної схеми заміщення, що дозволяє легко розрахувати її параметри за паспортними даними трансформатора. Модель трансформатора може бути використана при аналізі різних режимів роботи однофазного трансформатора, а також у віртуальній комп'ютерній лабораторії при вивченні основних параметрів і характеристик однофазного трансформатора.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА У СЕРЕДОВИЩІ MULTISIM

3.1 Основні розрахункові співвідношення при побудові моделі для різних режимів роботи трансформатора

Однофазний трансформатор складається з двох обмоток, розміщених на замкнутому феромагнітному осерді (магнітопроводі), зібраному з листів електротехнічної сталі, ізольованих один від одного шаром лаку для зменшення вихрових струмів (рис. 3.1). Обмотка, що підключається до джерела живлення, називається первинною, а обмотка, до якої підключається навантаження, – вторинною. Первинна обмотка характеризується параметрами: w_1 – число витків, u_1 – напруга, i_1 – струм первинної обмотки; вторинна обмотка, відповідно: w_2 – число витків, u_2 – напруга, i_2 – струм вторинної обмотки. Струм i_1 , що протікає по первинній обмотці, створює магнітний потік, який складається з двох складових. Одна складова цього магнітного потоку замикається по повітрю і називається магнітним потоком розсіювання – $\Phi_{s1}(t)$. Інша складова цього магнітного потоку замикається по осердю та перетинає витки вторинної обмотки – $\Phi_{21}(t)$. Струм i_2 , що протікає по вторинній обмотці, також створює магнітний потік, що складається з двох складових: магнітного потоку розсіювання – $\Phi_{s2}(t)$ і магнітного потоку, що перетинає витки вторинної обмотки, $\Phi_{12}(t)$. Таким чином, основний магнітний потік $\Phi_0(t)$, що замикається по осердю, дорівнює алгебраїчній сумі магнітних потоків $\Phi_{21}(t)$ і $\Phi_{12}(t)$.

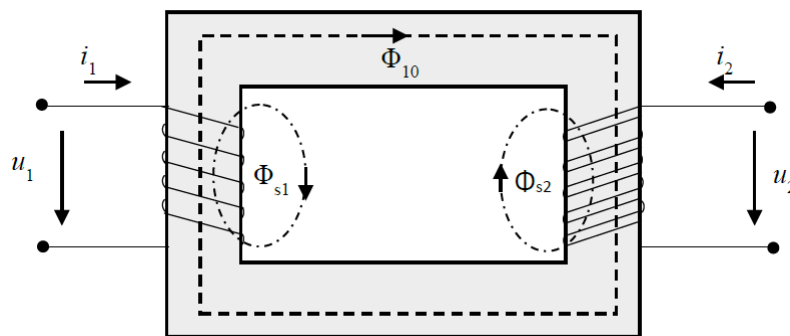


Рисунок 3.1. Однофазний двохобмотувальний трансформатор

Під дією синусоїдальної напруги $u_1(t) = U_{1m}\sin\omega t$ струми в первинній та вторинній обмотках створюють магнітні потоки, які наближено можна замінити еквівалентними синусоїдами. Тоді основний магнітний потік відповідно дорівнює $\Phi(t) = \Phi_m \sin(\omega t)$. Основний магнітний потік індукуює в первинній та вторинній обмотках ЕРС, діючі значення яких дорівнюють $E_1 = 2\pi\sqrt{2}f w_1 \Phi_m = 4.44 f w_1 \Phi_m$,
 $E_2 = 2\pi\sqrt{2}f w_2 \Phi_m = 4.44 f w_2 \Phi_m$.

Коефіцієнт трансформації дорівнює відношенню напруги на первинній обмотці до напруги на вторинній обмотці при холостому ході $k = U_{1x}/U_{2x}$. В режимі холостого ходу (ХХ) $U_{2x} = E_2$, $U_{1x} \approx E_1$ тоді $k = w_1/w_2$.

Синусоїдальний електричний струм викликає змінний магнітний потік з частотою f . Магнітні втрати в магнітопроводі поділяються на втрати на гістерезис (втрати на перемагнічування) та на втрати від вихрових струмів. При цьому струм за фазою випереджає магнітний потік на кут магнітних втрат δ . Активна складова струму холостого ходу $I_{0a} = I_0 \sin\delta$ (I_0 – струм холостого ходу) визначається магнітними втратами, а реактивна складова струму $I_{0p} = I_0 \cos\delta$ йде на створення основного магнітного потоку Φ_0 . Рівняння трансформатора в комплексній формі мають вигляд

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + (R_1 + jX_{s1})\dot{I}_1, \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - (R_2 + jX_{s2})\dot{I}_2,\end{aligned}$$

де $\dot{U}_1, \dot{U}_2$ – напруги на первинній та вторинній обмотках; $\dot{I}_1, \dot{I}_2$ – струми в первинній та вторинній обмотках; $\dot{E}_1, \dot{E}_2$ – ЕРС, індуковані основним магнітним потоком у первинній та вторинній обмотках; R_1, R_2 – активні опори первинної та вторинної обмоток; X_{s1}, X_{s2} – реактивні опори індуктивностей розсіювання первинної та вторинної обмоток.

Для еквівалентного трансформатора справедливі наступні рівняння

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + (R_1 + jX_{s1})\dot{I}_1,$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - (R'_2 + jX'_{s2})\dot{I}'_2,$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + (-\dot{I}'_2),$$

$$\dot{U}'_2 = -Z'_H \dot{I}'_2, Z'_H = R'_H + jX'_H.$$

Схема заміщення еквівалентного трансформатора та векторна діаграма зображені на рис. 3.2 та 3.3. Визначення параметрів схеми заміщення здійснюється за дослідом холостого ходу та короткого замикання.

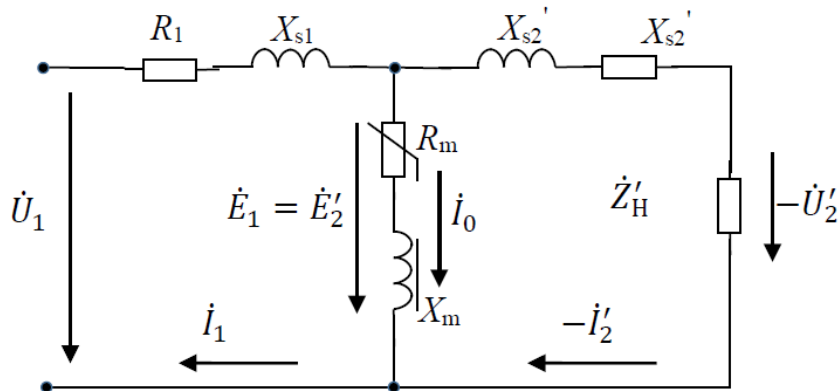


Рисунок 3.2. Електрична схема заміщення трансформатора

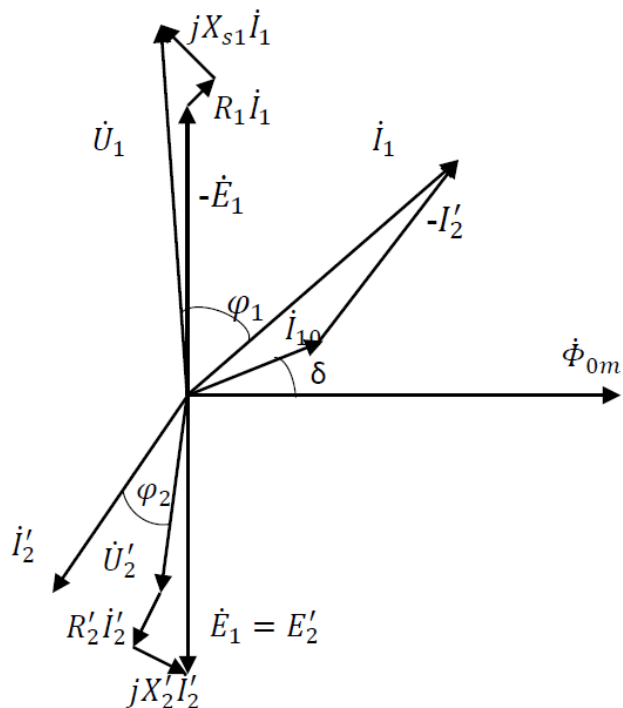


Рисунок 3.3. Векторна діаграма трансформатора

Схема для проведення дослідів холостого ходу та короткого замикання зображена на рис.3. 4.

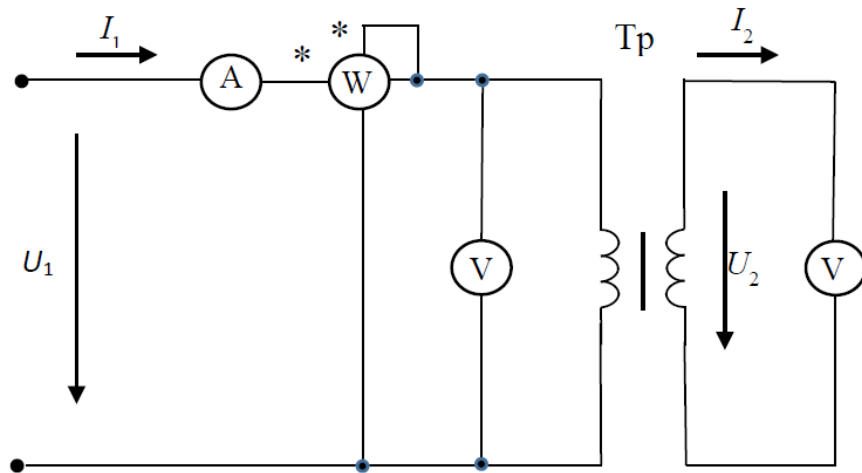


Рисунок 3.4. Схема для проведення дослідів холостого ходу та короткого замикання.

Дослід холостого ходу. У досліді холостого ходу до первинної обмотки підводять номінальну напругу $U_{1н}$. До вторинної розімкненої обмотки підключають вольтметр, яким вимірюють напругу U_{20} . Амперметром і ватметром, підключеними до первинної обмотки, вимірюють струм первинної обмотки I_{10} та активну потужність, споживану трансформатором P_{10} .

За виміряними параметрами, отриманими в досліді холостого ходу, обчислюють коефіцієнт трансформації

$$k \approx \frac{U_{1н}}{U_{20}}.$$

Повний вхідний опір, який дорівнює

$$Z_0 = \frac{U_{1н}}{I_{10}}.$$

Активна потужність P_{10} , споживана трансформатором у режимі холостого ходу, визначається втратами в осерді, оскільки електричні втрати малі (втрати в сталі P_c)

$$P_{10} \approx P_c = R_m I_{10}^2,$$

тоді активний опір вітки намагнічування дорівнює

$$R_m = \frac{P_{10}}{I_{10}^2}.$$

Магнітний потік розсіювання набагато менший порівняно з основним магнітним потоком, тому індуктивний опір вітки намагнічування дорівнює

$$X_m \approx \sqrt{Z_0^2 - R_m^2}.$$

Дослід короткого замикання. Дослід короткого замикання проводять при коротко замкненій вторинній обмотці. До первинної обмотки підключають джерело напруги, діюче значення якого дорівнює такому значенню, при якому струми в обмотках дорівнюють номінальним значенням. У цьому випадку вимірюють напругу первинної обмотки $U_{1к}$ та активну потужність $P_{1к}$. За вимірними значеннями визначають повний вхідний опір та активний опір короткого замикання:

$$Z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1к}}, R_k = \frac{P_k}{I_{1к}^2}.$$

Нехтуючи струмом через вітку намагнічування, який при зниженій напрузі малий, обчислюють активні опори R_1 та R_2' первинної та вторинної обмоток:

$$R_1 = R_2' = R_k/2.$$

Реактивні опори індуктивностей розсіювання первинної та вторинної обмоток дорівнюють:

$$X_{s1} = X'_{s2} = \frac{X_k}{2},$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

Зовнішня характеристика трансформатора. Зовнішня характеристика трансформатора — це залежність вторинної напруги від струму вторинної обмотки $U_2 = f(I_2)$ або від коефіцієнта завантаження ($\beta = I_2/I_{2н}$) $U_2 = f(\beta)$ при $U_1 = U_{1н} = const$, $f = const$ і $\varphi_2 = \arctg(X'_н/R'_н)$. Зовнішні характеристики трансформатора залежать від характеру навантаження. При активному навантаженні напруга U_2 зменшується зі збільшенням I_2 . Більш інтенсивно напруга U_2 знижується зі збільшенням I_2 при активно-індуктивному навантаженні. При активно-ємнісному навантаженні напруга U_2 зі збільшенням I_2 може збільшуватися.

Коефіцієнт корисної дії трансформатора. Коефіцієнт корисної дії трансформатора (ККД) дорівнює

$$\eta = P_2/P_1 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 / (U_1 I_1 \cos \varphi_2),$$

де P_2 – активна потужність, що надходить у навантаження; P_1 – активна потужність, що надходить з мережі. Активну потужність, що надходить у навантаження, можна виразити з використанням коефіцієнта завантаження

$$P_2 = \beta S_{2H} \cos \varphi_2.$$

Електричні втрати в міді трансформатора дорівнюють $P_{\text{мн}} = \beta^2 P_K$.

Втрати в сталі наближено дорівнюють втратам активної потужності в трансформаторі при холостому ході та номінальній напрузі $P_C \approx P_0$. Тоді повні втрати трансформатора дорівнюють $\Delta P = P_0 + \beta^2 P_K$.

Використовуючи наведені вище формули, отримуємо

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{\beta S_{2H} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K}.$$

Максимальне значення ККД відповідає навантаженню, при якому магнітні втрати дорівнюють електричним

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}}.$$

Робочі характеристики трансформатора — це залежність η (ККД), P_1 , $\cos \varphi_1$, U_2 , ΔU_2 від коефіцієнта завантаження трансформатора β . Вигляд робочих характеристик наведено на рис. 3.5.

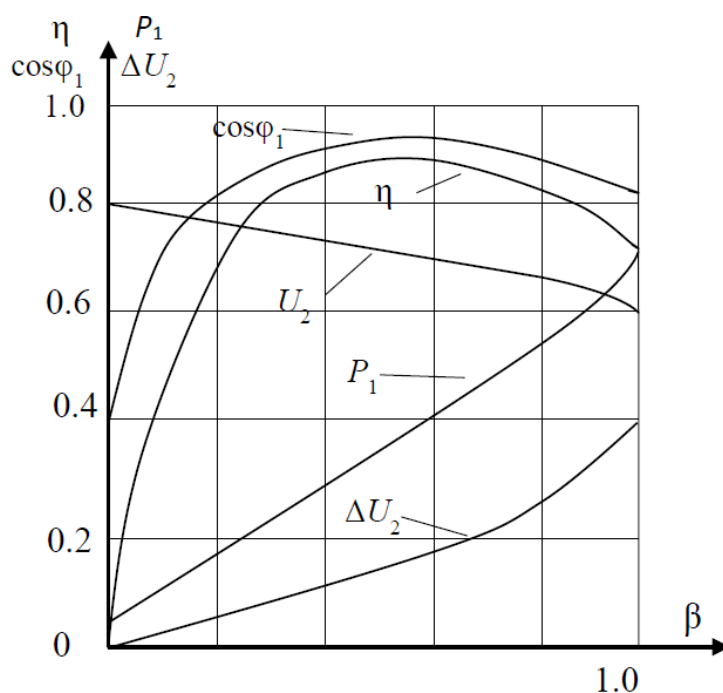


Рисунок 3.5. Робочі характеристики трансформатора

Основні розрахункові співвідношення.

Коефіцієнт завантаження трансформатора $\beta = I_2/I_{2H}$.

Коефіцієнт корисної дії трансформатора $\eta = P_2/P_1$.

Втрати активної потужності в міді $\Delta P_M = \beta^2 \Delta P_{MH}$.

Загальні втрати в трансформаторі дорівнюють сумі магнітних втрат і втрат в міді $\Delta P = \Delta P_{CT} + \Delta P_M$.

Відхилення напруги на вторинній обмотці від напруги холостого ходу (%)

$$\Delta u_2 = \frac{u_{2X} - u_2}{u_{2X}} 100\%.$$

3.2. Опис схемотехнічної моделі лабораторного стенду для випробування однофазного трансформатора

Схемотехнічна модель лабораторного стенду для випробування однофазного трансформатора з віртуальними електровимірювальними приладами та навантажувальними пристроями, включеними в його кола, знаходиться у файлі <Однофазний трансформатор_ОСМ1-0,63> середовища NI Multisim 10.1. Її зображення після відкриття цього файлу показано на рис.3.6.

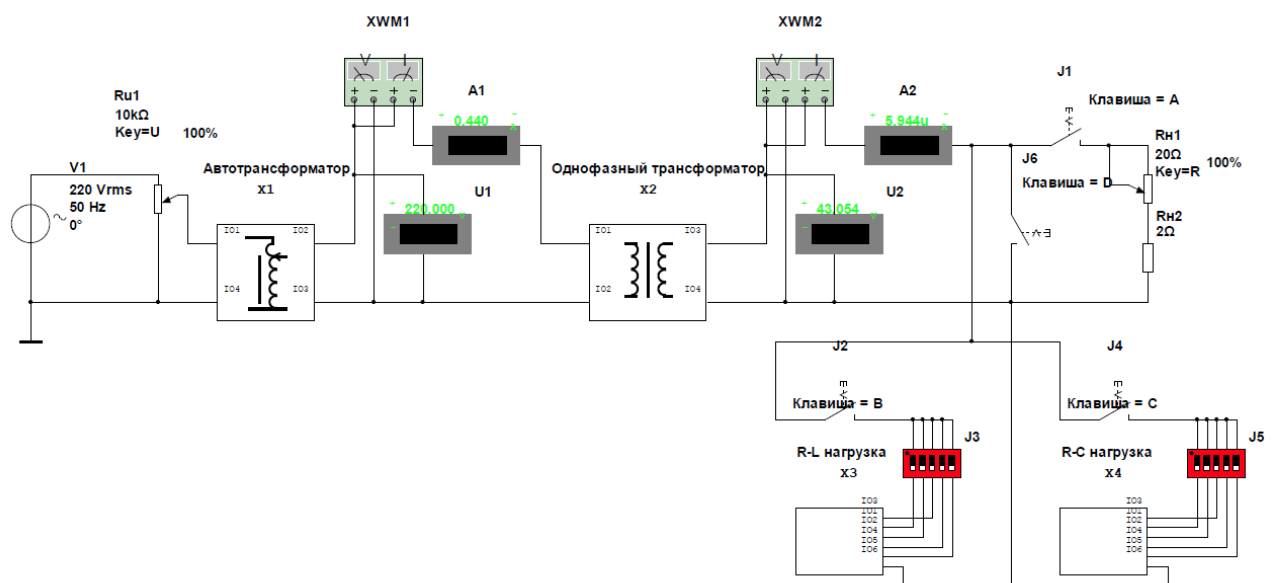


Рисунок 3.6. Схемотехнічна модель лабораторного стенду для випробування однофазного трансформатора

У схемотехнічній моделі лабораторного стенду досліджуваний трансформатор представлено субмоделлю «Однофазний трансформатор», що містить чотири виводи. З них два виводи є виводами первинної обмотки трансформатора, а два інших – виводами вторинної обмотки. У колі обох обмоток трансформатора включено електровимірювальні прилади. Вольтметр $U1$ показує напругу на первинній обмотці трансформатора U_1 , амперметр I_1 – її струм I_1 , а ватметр $XWM1$ – споживану трансформатором активну потужність P_1 та його коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1$. Подібні електровимірювальні прилади включено і в коло вторинної обмотки трансформатора. Напругу на цій обмотці U_2 вимірює вольтметр $U1$, струм її навантаження I_2 показує амперметр $I2$, а споживану навантаженням активну потужність P_2 та його коефіцієнт потужності $\cos\varphi_2$ – ватметр $XWM2$.

Електроживлення первинної обмотки трансформатора здійснюється від регульованого джерела змінної напруги. Воно складається з джерела змінної напруги $V1$ з напругою $U = 220V$ та частотою $f = 50$ Гц, субмоделі автотрансформатора «Автотрансформатор» та потенціометра $Ru1$, за допомогою якого регулюють вихідну напругу автотрансформатора, що подається на первинну обмотку досліджуваного трансформатора. Необхідну напругу на первинній обмотці трансформатора встановлюють переміщенням мишею повзунка біля потенціометра $Ru1$ або почерговим натисканням клавіші «U» («Shift + U»).

У режимі навантаження до вторинної обмотки трансформатора можуть бути підключені навантажувальні пристрої з активним, активно-індуктивним та активно-ємнісним характером опору. Навантажувальний пристрій з активним характером опору складається з послідовно з'єднаних реостата $Rn1$ і резистора $Rn2$. Опір реостата можна змінювати переміщенням мишею повзунка біля цього резистора або почерговим натисканням клавіші «R» («Shift + R»). Ланцюг $Rn1$, $Rn2$ підключають до вторинної обмотки трансформатора замиканням кнопкового вимикача $J1$. Зміну положення цього

вимикача можна виконати натисканням клавіші «А» або наведенням курсора миші на його зображення і подальшим натисканням лівої кнопки миші.

Для підключення до вторинної обмотки трансформатора навантажувальних пристроїв з активно-індуктивним та активно-ємнісним характером опору використовують кнопкові вимикачі J2 і J4, а замикання вторинної обмотки накоротко виконують кнопковим вимикачем J6. Зміну положення цих вимикачів здійснюють натисканням клавіші, відповідно, «В», «С» і «D» або мишею, як зазначено для кнопкового вимикача J1.

Навантажувальний пристрій з активно-індуктивним характером опору складається з субмоделі «RL – навантаження» і пакетного вимикача J3, а навантажувальний пристрій з активно-ємнісним характером опору – з субмоделі «RC – навантаження» і пакетного вимикача J5. Субмодель «RL – навантаження» містить п'ять електричних ланцюгів з послідовно з'єднаними активним та індуктивним елементами. Спільна точка з'єднання цих ланцюгів підключена до одного з виводів вторинної обмотки трансформатора, а їх вільні виводи приєднані до незалежних однополюсних вимикачів пакетного вимикача J3, які підключають їх до кнопкового вимикача J2. Субмодель «RC – навантаження» містить п'ять електричних ланцюгів з послідовно з'єднаними активним і ємнісним елементами, спільна точка з'єднання яких підключена до одного з виводів вторинної обмотки трансформатора. Вільні виводи цих ланцюгів приєднані до незалежних однополюсних вимикачів пакетного вимикача J5, за допомогою яких вони підключаються до кнопкового вимикача J4.

Незалежні однополюсні вимикачі пакетних вимикачів J3, J5, які використовуються для дискретної зміни опору навантаження трансформатора, знаходяться у вимкненому стані при розташуванні їх повзунків біля чорної точки на зображенні відповідного пакетного вимикача. Для переведення окремого однополюсного вимикача у ввімкнений стан необхідно помістити на цей однополюсний вимикач курсор миші, який приймає форму руки, і,

натиснувши ліву кнопку миші, перемістити повзунок вимикача в інше положення. Подібні дії виконують і при вимкненні однополюсного вимикача.

Висновки по третьому розділу

У розділі наведено короткі теоретичні відомості про рівняння, математичну модель та характеристики однофазного трансформатора. Викладено порядок дослідження режимів роботи та характеристик однофазного трансформатора середовищі Multisim.

ВИСНОВКИ

Запропоновано комп'ютерну модель однофазного трансформатора для використання в лабораторному практикумі в середовищі Multisim. На відміну від моделей трансформатора, що входять до стандартних бібліотек пакета, запропонована модель враховує всі основні параметри та характеристики трансформатора: активні опори та індуктивні опори розсіювання первинної та вторинної обмоток, електричні втрати, магнітні втрати в магнітопроводі, коефіцієнт трансформації. Комп'ютерна модель побудована на основі Г-подібної схеми заміщення, що дозволяє легко розрахувати її параметри за паспортними даними трансформатора. Модель трансформатора може бути використана при аналізі різних режимів роботи однофазного трансформатора, а також у віртуальній комп'ютерній лабораторії при вивченні основних параметрів і характеристик однофазного трансформатора.

Використання комп'ютерних моделей однофазного трансформатора в середовищі Multisim у рамках лабораторного практикуму є критично важливим для ефективного та всебічного освоєння теоретичних основ електротехніки та поглибленого розуміння принципів роботи даного пристрою. Ці моделі надають низку незаперечних переваг, недоступних при роботі виключно з фізичними аналогами.

По-перше, моделювання дозволяє безпечно експериментувати з різними параметрами трансформатора, такими як коефіцієнт трансформації, опір обмоток і характеристики осердя, без ризику пошкодження обладнання або створення аварійних ситуацій. Студенти можуть спостерігати миттєвий вплив змін на вихідні характеристики, що сприяє глибшому розумінню взаємозв'язків між параметрами та продуктивністю.

По-друге, Multisim дозволяє візуалізувати внутрішні процеси, що відбуваються в трансформаторі, такі як розподіл магнітного потоку та струмів в обмотках. Ця можливість робить абстрактні концепції більш наочними та доступними для розуміння. За допомогою віртуальних вимірювальних

приладів можна відстежувати значення струмів, напруг і потужностей у різних точках схеми, проводячи детальний аналіз роботи трансформатора.

По-третє, комп'ютерне моделювання значно скорочує час, необхідний для проведення експериментів та аналізу результатів. Студенти можуть швидко протестувати різні режими роботи трансформатора, від холостого ходу до роботи під навантаженням, та отримати графічне представлення результатів, що спрощує процес аналізу та дозволяє зосередитися на інтерпретації отриманих даних.

Зрештою, освоєння Multisim як інструменту моделювання готує студентів до майбутньої професійної діяльності, де комп'ютерне моделювання широко використовується для проєктування, аналізу та оптимізації електричних схем і пристроїв. Таким чином, використання комп'ютерних моделей однофазного трансформатора в лабораторному практикумі є необхідною умовою для підготовки компетентних фахівців у галузі електротехніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дон Н.Л. Використання інформаційних технологій в організації навчального процесу з дисципліни «Електричні машини» / Н.Л. Дон // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2015. – №1(52). – С.141-145.
2. Семенов А.С. Дослідження режимів роботи однофазного трансформатора шляхом математичного моделювання // Міжнародний журнал прикладних і фундаментальних досліджень. – 2016. – № 5-3. – С. 391-395.
3. Хернітер М.Є. Електронне моделювання в Multisim / М.Є. Хернітер. – М.: ДМК, 2010. – 488 с.
4. Загірняк М. В. Електричні машини: підручник / М.В.Загірняк, Б.І.Невзлін. – 2-ге вид., перероб. і доповн. – Київ: Знання, 2009. – 399 с.
5. Онушко В. В. Електричні машини: навч. посібник / В. В. Онушко, О. В. Шефер. – Полтава: ПолтНТУ, 2010. – 487 с.
6. Основи проектування електронних систем: лабораторний практикум / Уклад.: Т.В.Мелешко, В.А. Швець, А.О. Краснопольский, Н.О. Касперович, О.О. Туз. – К.: НАУ, 2014. – К.: НАУ, 2014. – 102 с.
7. Васильєв В.В., Квач Ю.М., Киркач К.В. Математичні методи моделювання та оптимізації систем і процесів: Навчальний посібник. – К.: НАУ, 2012. – 270 с.
8. Математичне моделювання процесів і систем [Електронний ресурс] : Навч. посіб. / А. І. Жученко, Л. Р. Ладієва, М. С. Піргач, Я. Ю. Жураковський; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,6 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 351 с.
9. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: навч. посібник / В.С. Маляр. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 312 с.
10. Форкун Я. Б. Теоретичні основи електротехніки. Частина 1, 2. : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка

та електромеханіка / Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова ; Харків нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 91 с.