

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЕЙ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ЗА ПАСПОРТНИМИ ДАНИМИ

В.Г. Ягуп^{1*}, докт. техн. наук, **К.В. Ягуп**^{2**}, докт. техн. наук

1 – Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна
e-mail: yagup.walery@gmail.com

2 – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна

Статтю присвячено вирішенню питання отримання параметрів заступних схем потужних трансформаторів для їх моделей, які застосовуються в комп'ютерних програмах моделювання електромагнітних процесів в електротехнічних системах. Як вихідні дані використовується система паспортних даних трансформатора, яка є найбільш вживаною в інженерній практиці. На основі проведеного в статті аналізу обґрунтовано просту формулу, яка дає змогу визначити коефіцієнт електромагнітного зв'язку первинної і вторинної обмоток трансформатора через відносні значення напруги короткого замикання і струму неробочого ходу. Такий підхід суттєво спрощує подальший розрахунок всіх інших параметрів заступних схем потужного трансформатора для будь-яких комп'ютерних програм моделювання електротехнічних систем. Приведені теоретичні висновки підтверджено комп'ютерними експериментами на моделях в системі MATLAB. Бібл. 16, рис. 11.

Ключові слова: силовий трансформатор, заступна схема, паспортні дані, параметри моделі.

Вступ і постановка задачі. Трансформатори представляють собою одними з найбільш поширених пристроїв в електроенергетичних і електротехнічних системах. В системах силової електроніки і автоматизованого електропривода трансформатори забезпечують необхідні рівні напруг для функціонування виконавчих механізмів. В електротехнічних системах трансформатори змінюють рівні напруг, що застосовуються для передачі електроенергії на значні відстані і приведення напруг до безпечних рівнів напруги на стороні споживачів. Моделювання електротехнічних систем з трансформаторами представляється актуальним завданням у плані проектування, а також дослідження режимів, що протікають в електротехнічних системах і комплексах. Адекватність моделювання значною мірою залежить від того, наскільки точно вдається відобразити властивості і характеристики реального трансформатора, перетворивши їх у параметри його математичної моделі. Питання відносно параметрів заступних схем трансформаторів активно обговорюється останнім часом [1-5]. У системах моделювання електротехнічних і електронних систем знаходять застосування різні способи представлення моделей трансформаторів. Так, у системах PSPICE, Micro-CAP, EWB-5.12, Desigh-Lab-8.0, OrCAD-9.2, Simscape і PSIM трансформатори представляються у вигляді котушок індуктивностей, магнітно пов'язаних одна з одною [6-8]. При моделюванні силових електротехнічних систем у пакеті Simulink [9-16] у вікно властивостей моделі трансформатора пропонується ввести параметри Т-подібної заступної схеми трансформатора. Тут у розпорядженні користувача є моделі однофазного та трифазного трансформаторів. Трифазні трансформатори подаються у вигляді сукупності трьох однофазних трансформаторів, що можна побачити, розкриваючи маски цих моделей за допомогою опції Look Under Mask. Водночас, у Simulink містяться і моделі магнітно пов'язаних котушок індуктивностей. У системі моделювання тиристорних перетворювачів, складеної на основі застосування теорії сигнальних графів [7], передбачена можливість вводити інформацію про кілька котушок індуктивностей, кожна з яких може бути пов'язана з усіма іншими. Це дає змогу, наприклад, у багатофазному багатообмотковому трансформаторі врахувати зв'язки між обмотками різних осердь трансформатора, беручи до уваги ослаблення магнітного потоку завдяки шунтуванню третім стрижнем. Для трансформатора зазвичай задаються паспортні (каталожні) дані заводу-виробника, які розміщуються на щитку трансформатора, а також повідомляються у відповідних довідниках. У зв'язку з цим у розробника, що користується в процесі проектування або дослідження будь-якої з наявних систем моделювання електро-

технічних систем і комплексів, виникає завдання визначення параметрів трансформатора, яких вимагає застосовувана система моделювання.

Метою статті є розробка нового методу визначення параметрів моделей та реалізація відповідного алгоритму визначення параметрів моделей потужного трансформатора в математичному пакеті MATLAB для швидкої оцінки параметрів моделі за заданими паспортними даними трансформатора з перевіркою адекватності й точності запропонованої моделі трансформатора.

Основна частина дослідження.

Теоретичне обґрунтування методу визначення топології і параметрів моделі трансформатора. Будемо користуватися стандартними вихідними даними, які прописуються у паспорті силового трансформатора: S_H – номінальна потужність трансформатора; U_{1H} – номінальна напруга первинної обмотки; U_{2H} – номінальна напруга вторинної обмотки; u_K – напруга короткого замикання (задається у відсотках, далі будемо використовувати відносне значення); P_K – втрати активної потужності в міді обмоток трансформатора за номінального навантаження при; i_x – струм неробочого ходу (задається у відсотках, далі будемо використовувати відносне значення); P_x – втрати активної потужності в сталі трансформатора

Еквівалентна заступна схема, яка використовується у візуальних моделях трансформаторів у системі SimPower System математичного пакету MATLAB, приведена на рис. 1.

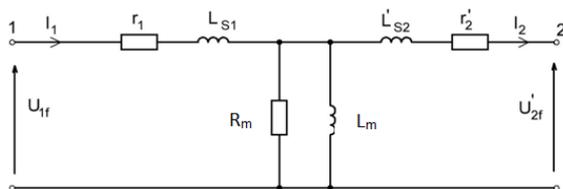


Рис. 1. Еквівалентна заступна схема

У цій моделі активні опори r_1 і r_2 обмоток трансформатора зумовлюють наявність активних потужностей втрат короткого замикання P_K . Активний резистор R_m зумовлює наявність активної потужності втрат неробочого ходу P_x . Зауважимо, що потужності P_K і P_x у

реальному силовому трансформаторі набагато менші відносно повної потужності S_H трансформатора і активної складової цієї потужності. Тому допустимо знехтувати цими потужностями і впливом активних резисторів заступної схеми трансформатора. Опори r_1 і r_2 обмоток в такому випадку слід закоротити, а резистор R_m розімкнути. Такі припущення призводять до спрощеної заступної схеми, яка складається з індуктивностей розсіювання первинної і вторинної обмоток L_{s1} і L_{s2} . Оскільки коефіцієнт зв'язку обмоток у потужному трансформаторі близький до одиничного значення, то, як показано в [7], індуктивність розсіювання первинної обмотки L_{s1} і приведені значення індуктивності розсіювання вторинної обмотки $L'_{s2} = L_{s2} / n_{21}^2$ (n_{21} коефіцієнт трансформації $n_{21} = U_{2H} / U_{1H}$) мають однакові значення: $L_{s1} = L'_{s2}$. Індуктивність намагнічування L_m представляє ту частину магнітного потоку, яка є спільною для обох обмоток трансформатора. Сума $L_{s1} + L_m$, як видно із заступної схеми, буде являти собою індуктивність первинної обмотки. Звернімося за прийнятих припущень до розрахунку параметрів заступної схеми моделі силового трансформатора. Повна потужність трансформатора на одну фазу

$$S_{H1f} = \frac{S_H}{3}. \quad (1)$$

фазна напруга первинної обмотки

$$U_{1f} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}}. \quad (2)$$

Ефективне значення номінального струму первинної обмотки

$$I_{1H} = \frac{S_{H1f}}{U_{1f}} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{1H}}. \quad (3)$$

Напруга короткого замикання

$$U_K = u_K U_{1f} = \frac{u_K U_{1H}}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

Нехтуючи впливом індуктивності намагнічування на режим короткого замикання, знайдено опір сумарної індуктивності розсіювання обмоток

$$X_s = \frac{U_K}{I_{1H}}. \quad (5)$$

Скориставшись формулами (3) і (4), отримаємо:

$$X_s = \frac{u_K U_{1H}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3} U_{1H}}{S_H} = \frac{u_K U_{1H}^2}{S_H}. \quad (6)$$

Опір індуктивностей розсіювання обмоток

$$X_{S1} = X'_{S2} = \frac{X_s}{2} = \frac{u_K U_{1H}^2}{2S_H}. \quad (7)$$

Струм неробочого ходу в первинній обмотці

$$I_{1x} = i_x I_{1H} = \frac{i_x S_H}{\sqrt{3} U_{1H}}. \quad (8)$$

Опір індуктивності первинної обмотки обчислюється за режимом неробочого ходу

$$x_{L1} = \frac{U_{1f}}{I_{1x}} = \frac{U_H}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sqrt{3} U_{1H}}{i_x S_H} = \frac{U_{1H}^2}{i_x S_H}. \quad (9)$$

Опір індуктивності намагнічування обчислюється як різниця між опором первинної обмотки і опором індуктивності розсіювання первинної обмотки:

$$x_m = x_{L1} - x_{S1}.$$

Коефіцієнт зв'язку обмоток трансформатора

$$k_{12} = \frac{x_m}{x_{L1}} = \frac{x_{L1} - x_{S1}}{x_{L1}} = 1 - \frac{x_{S1}}{x_{L1}}. \quad (10)$$

Враховуючи (7) і (9), отримаємо

$$k_{12} = 1 - \frac{u_K U_{1H}^2}{2S_H} \cdot \frac{i_x S_H}{U_{1H}^2}. \quad (11)$$

Скоротивши (11) на S_H і U_{1H}^2 , отримаємо нарешті

$$k_{12} = 1 - \frac{u_K i_x}{2}. \quad (12)$$

Отримана формула (12) видається достатньо важливою, оскільки вона дає змогу одразу визначити суттєвий для представлення моделі трансформатора параметр – коефіцієнт зв'язку обмоток трансформатора, користуючись безпосередньо тільки двома значеннями параметрів із числа паспортних даних, тобто відносним значенням напруги короткого замикання u_k і відносним значенням струму неробочого ходу i_x .

Отже, застосування формули (12) дає змогу легко визначити коефіцієнт зв'язку котушок, що зі свого боку дає можливість побудувати модель із двома магнітнозв'язаними індуктивностями L_1 і L_2 (рис. 2 а, б).

Індуктивність L_1 первинної обмотки може бути знайдена з виразу (9) для її індуктивного опору

$$L_1 = \frac{X_{L1}}{\omega} = \frac{U_{1H}^2}{\omega i_x S_H}, \quad (13)$$

де $\omega = 100\pi$ – кругова частота живильної напруги з частотою 50 Гц. Позначимо коефіцієнт трансформації через відношення кількості витків w_2 вторинної обмотки до кількості витків первинної обмотки w_1 :

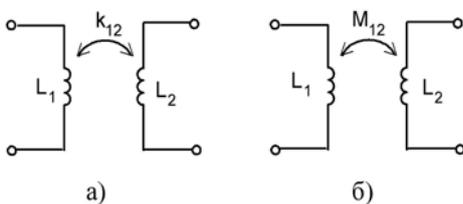


Рис. 2. Модель із двома магнітнозв'язаними індуктивностями

$$n_{21} = \frac{w_2}{w_1}. \quad (14)$$

Цей параметр може вважатися конструктивним параметром. На практиці він часто замінюється відношенням напруг обмоток:

$$n_{21} = \frac{U_{2H}}{U_{1H}}. \quad (15)$$

Оскільки індуктивності обмоток пропорційні квадратам кількостей їхніх витків, то справедливе співвідношення:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{w_2^2}{w_1^2} = n_{21}^2. \quad (16)$$

Звідси індуктивність вторинної обмотки

$$L_2 = n_{21}^2 L_1 = \frac{n_{21}^2 \cdot U_{1H}^2}{\omega i_x S_H}. \quad (17)$$

Таким чином, всі параметри моделі за рис. 2 а визначаються співвідношеннями (12), (13) і (17).

У низці моделюючих систем застосовується модель магнітнозв'язаних котушок індуктивностей за схемою, зображеною на рис. 2 б, де M_{12} – так звана взаємна індуктивність котушок. Вона може бути визначена за виразом:

$$\begin{aligned} M_{12} &= k_{21} \sqrt{L_1 L_2} = k_{12} \sqrt{L_1 \cdot n_{21}^2 L_1} = \\ &= k_{12} \cdot n_{21} L_1 = \left(1 - \frac{u_K i_x}{2}\right) \frac{U_{2H}}{U_{1H}} \cdot \frac{U_{1H}^2}{\omega i_x S_H} = \\ &= \left(1 - \frac{u_K i_x}{2}\right) \frac{U_{1H} U_{2H}}{\omega i_x S_H}. \end{aligned} \quad (18)$$

Для врахування впливу опорів обмоток слід скористатися значеннями активної потужності втрат при короткому замиканні P_K . Втрати на одну фазу трансформатора складуть величину

$$P_{K1} = \frac{P_K}{3}. \quad (19)$$

Ця потужність порівну розподіляється між первинною і вторинною обмотками.

Номінальне ефективне значення струму первинної обмотки I_{1H} визначається за формулою (3). Тоді активний опір первинної обмотки складе величину

$$r_1 = \frac{P_{K1}}{2I_{1H}^2} = \frac{P_K}{2 \cdot 3} \cdot \frac{(\sqrt{3}U_{1H})^2}{S_H^2} = \frac{P_K U_{1H}^2}{2S_H^2}. \quad (20)$$

Для вторинної обмотки приведені опір $r_2' = \frac{r_2}{n_{21}^2}$ дорівнює опорі r_1 первинної обмотки, і тому опір вторинної обмотки обраховується за виразом

$$r_2 = n_{21}^2 r_1 = \frac{n_{21}^2 P_K U_{1H}^2}{2S_H^2} = \frac{P_K U_{2H}^2}{2S_H^2}. \quad (21)$$

Отже, визначення активних опорів r_1 та r_2 обмоток трансформатора дає змогу врахувати їхній вплив у заступній еквівалентній схемі, зображеній на рис. 3.

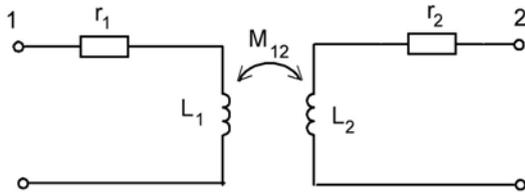


Рис. 3. Вплив навантаження у заступній еквівалентній схемі

втрати на перемагнічування осердя, будемо враховувати резистором R , який вмикається без-

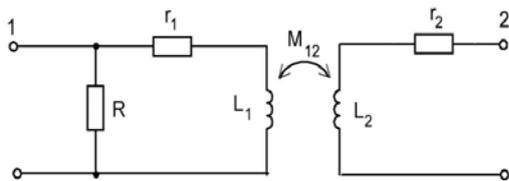


Рис. 4. Втрати на перемагнічування осердя, враховані резистором R

Слід зауважити, що опори обмоток фактично також є конструктивними параметрами. Вони визначаються залежно від довжини проводів, площі їхніх перерізів і питомого опору матеріалу. У деяких каталожних даних ці опори наводяться безпосередньо у відповідних таблицях. Крім того, ці опори можуть бути навіть безпосередньо визначені на практиці вимірювальними приладами.

Втрати в сталі трансформатора, тобто втрати на перемагнічування осердя, будемо враховувати резистором R , який вмикається безпосередньо до затискачів первинної обмотки (рис. 4).

Активна потужність втрат неробочого ходу, що відповідає одній фазі

$$P_{x1} = \frac{P_x}{3}. \quad (22)$$

Опір резистора R , який моделює втрати в осерді на перемагнічування, визначається так:

$$R = \frac{U_{1f}^2}{P_{x1}} = \frac{(U_{1H}/\sqrt{3})^2}{P_x/3} = \frac{U_{1H}^2}{P_x}. \quad (23)$$

Отже, алгоритм розрахунків параметрів моделі трансформатора на основі використання SPS блока взаємно зв'язаних індуктивностей полягає в такому:

1. За формулою (12) визначаємо коефіцієнт зв'язку індуктивностей обмоток трансформатора

$$k_{12} = 1 - \frac{u_K i_x}{2}.$$

2. За формулою (17) визначаємо індуктивність первинної обмотки

$$L_1 = \frac{U_{1H}^2}{\omega i_x S_H}.$$

3. Зважаючи на вираз (2), визначаємо через коефіцієнт трансформації n_{21} та індуктивність вторинної обмотки

$$L_2 = n_{21}^2 L_1 = \frac{n_{21}^2 U_{1H}^2}{\omega i_x S_H}.$$

4. Взаємну індуктивність обмоток визначаємо за формулою (18)

$$M_{12} = k_{21} \sqrt{L_1 L_2} = \left(1 - \frac{u_K i_x}{2}\right) \frac{U_{1H} U_{2H}}{\omega i_x S_H}.$$

5. За формулами (20) і (21) визначаємо активний опір первинної і вторинної обмоток:

$$r_1 = \frac{P_K U_{1H}^2}{2S_H^2}, \quad r_2 = \frac{P_K U_{2H}^2}{2S_H^2}.$$

6. За формулою (23) визначаємо опір резистора R , моделюючи втрати в сталі:

$$R = \frac{U_{1H}^2}{P_x}.$$

За описаним алгоритмом складена програма на мові пакету MATLAB для розрахунку параметрів моделі трансформатора на основі блоку взаємно зв'язаних індуктивностей. Запис цієї програми генерує в робочому просторі відповідні значення змінних параметрів. Іденти-

фікатори змінних зручно безпосередньо вписувати у відповідні поля вікна властивостей блока взаємно зв'язаних індуктивностей.

Тестування розробленої моделі трансформатора. Для перевірки вірності запропонованого метода розраховано параметри моделі потужного трансформатора живлення залізниці змінного струму типа ТДНД 25000/110. Паспортні дані трансформатора: $S_H = 25\text{MVA}$; $U_{1H} = 115\text{кВ}$; $U_{2H} = 27,5\text{кВ}$; $P_K = 120\text{кВт}$; $P_x = 30\text{кВт}$; $u_K = 0,105$; $i_x = 0,007$.

Параметри моделі на основі взаємно зв'язаних індуктивностей, розраховані за допомогою описаного алгоритму, представляють такі значення: $k_{12}=0.9996325$; $L_1=220.088\text{Гн}$; $L_2=13.755\text{Гн}$; $M_{12}=55.0019\text{Гн}$; $r_1=1.1616\text{Ом}$; $r_2=0.0726\text{Ом}$; $R=403333\text{Ом}$.

На рис. 5 у його верхній частині зображено модель трансформатора за пропонованою методикою на основі використання блоку SPS із двома взаємно зв'язаними індуктивностями. Використано однофазний варіант моделі, яка живиться фазною напругою. Вимірювачі первинної напруги і первинного струму генерують відповідні сигнали, що подаються на вимірювачі потужності. Величина активної потужності строюється для приведення потужності до паспортного значення трифазного трансформатора через блок множення на три.

На рис. 5 показано режим неробочого ходу, звідки видно, що значні втрати потужності спостерігаються саме за неробочого ходу. Для порівняння в нижній частині рис. 5 показана модель лінійного трансформатора, заступна схема якого представлена в довідковій інформації MATLAB саме так, як зображено на рис. 1. Параметри цієї точної моделі розраховані за класичною методикою, викладеною в [11] і реалізованою програмою на мові пакету MATLAB. Особливістю цієї програми є точний розрахунок параметрів із урахуванням паралельного увімкнення елементів, що відображають втрати в сталі трансформатора за паралельного з'єднання. Це, до речі, не враховується в [7], де параметри послідовного ланцюжка елементів втрат та намагнічування безпосередньо вставляються на паралельний ланцюг, що є помилковим. Параметри точної моделі лінійного трансформатора із заступною схемою, наведеною на рис. 1, мають такі значення $r_1=1.1616\text{Ом}$; $L_{s1}=0.08079\text{Гн}$; $r_2=0.0726\text{Ом}$; $L_{s2}=0.0050498\text{Гн}$; $R_m=403078.8\text{Ом}$; $L_m=223.32\text{Гн}$.

Ця модель також працює в режимі неробочого ходу. Як видно, контрольне значення потужності неробочого ходу такої моделі співпадає зі значенням, яке дає запропонована модель, і відповідає паспортному значенню.

На рис. 6 зображені ті ж самі моделі, які працюють у режимі короткого замикання. Зауважимо, що для реалізації цього режиму вторинна обмотка закорочується, а на первинну подається знижена напруга відповідно до значення напруги короткого замикання.

Як видно з рис. 6, обидві моделі забезпечують паспортне значення активних втрат за короткого замикання.

Нарешті, обидві моделі досліджено в режимі, близькому до номінального споживання енергії. Для реалізації такого режиму за номінального значення вхідної напруги вторинна сторона навантажується резистором з опором 30 Ом.

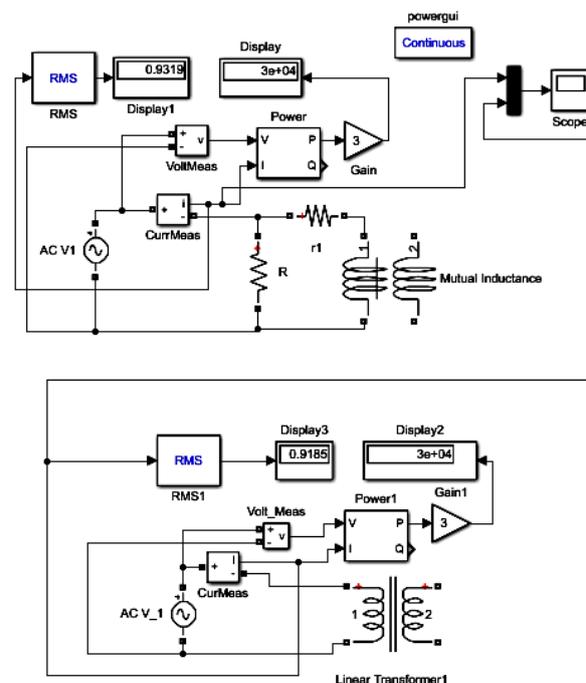


Рис. 5. Модель трансформатора за пропонованою методикою на основі використання блоку SPS із двома взаємно зв'язаними індуктивностями

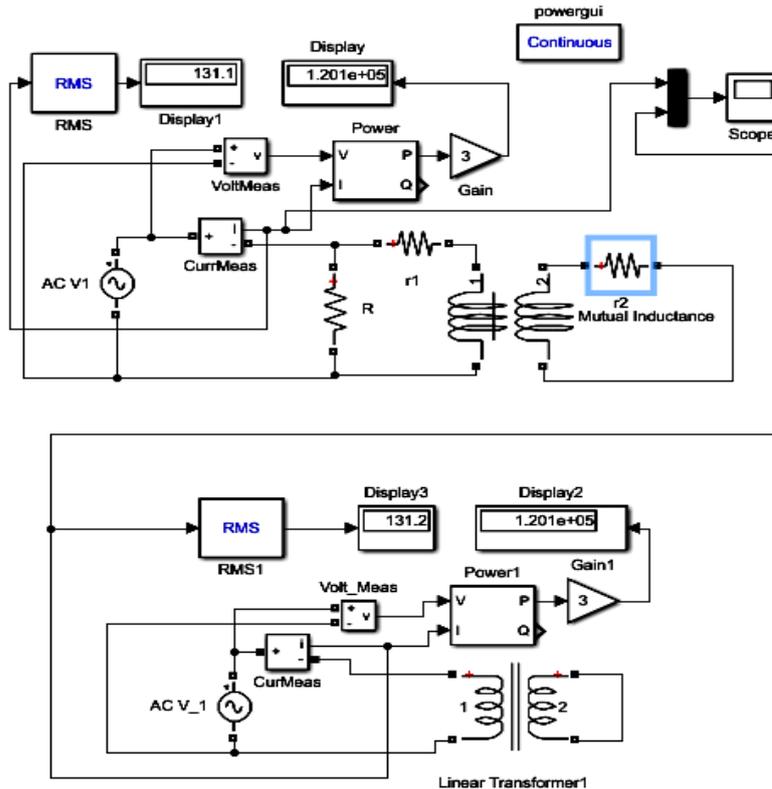


Рис. 6. Моделі, що працюють у режимі короткого замикання

бою модель живлення залізниці змінного струму, в якій трансформатор працює зі значною несиметрією споживання електроенергії.

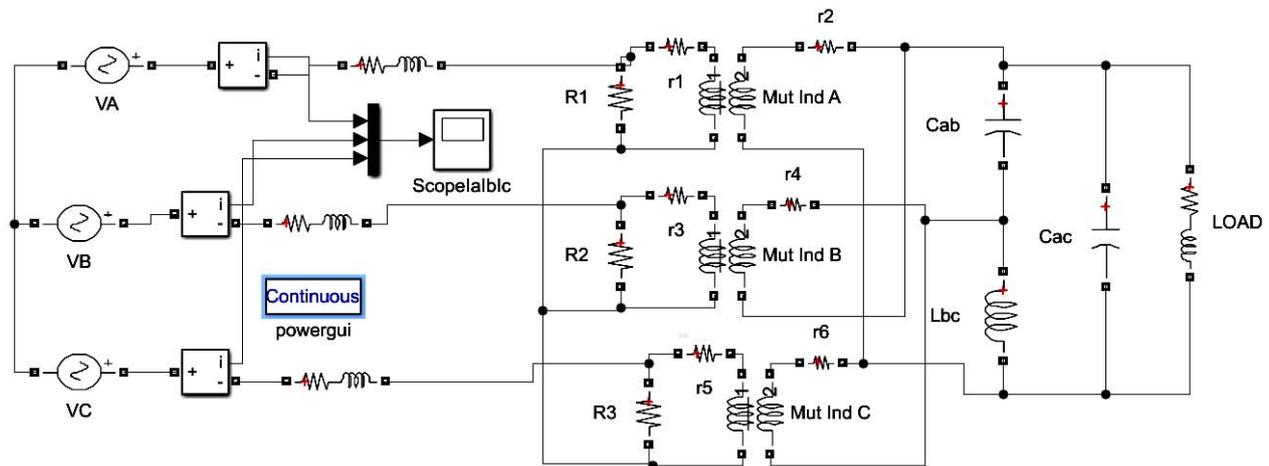


Рис. 7. Візуальна модель системи електропостачання

У цій моделі трифазна високовольтна мережа живлення представлена джерелами напруги VA, VB, VC, що генерують синусоїдальні напруги з частотою 50 Гц, амплітудами 89,915 кВ і зсунуті відповідно на 0,240 і 120 ел. град. Це забезпечує лінійну напругу мережі величиною 110 кВ, комплексний опір лінії електропередачі моделюється активним опором 1 Ом і індуктивністю 0,01 Гн. Сам трансформатор представлений загально прийнятим еквівалентом із трьох однофазних трансформаторів. Модель кожного з них відповідає топології моделі, зображеній на рис. 4, параметри якої визначені за описаною методикою і зазначені вище. Первинні обмотки з'єднані зіркою, а вторинні – трикутником, як це і прийнято на

Для співставлення на віртуальній осцилограмі Scope в цих координатах були досліджені діаграми первинних струмів обох моделей. Розбіжність амплітуд струмів не перевищує 0,001 А, причому самі амплітуди складають величини порядку 185 А. Це свідчить про високу точність і адекватність запропонованого методу визначення параметрів моделей силових потужних трансформаторів.

Застосування розробленої моделі. Візуальна модель системи електропостачання зображена на рис. 7. Вона являє собою

практиці в системах електропостачання залізниць змінного струму. Комплексне навантаження $LOAD$ характеризується опором $(121+90,75j)$ Ом і моделює навантаження від одного поїзду. Воно підключається до одного боку вторинного трикутника і утворює несиметричний режим споживання електроенергії. Часові діаграми первинних струмів трансформатора наведені на рис. 8.

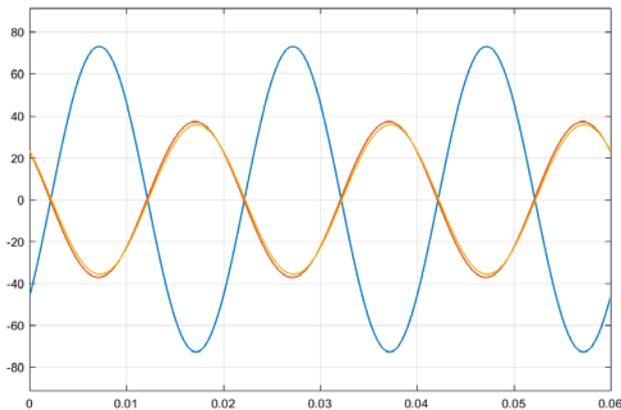


Рис. 8. Часові діаграми первинних струмів трансформатора

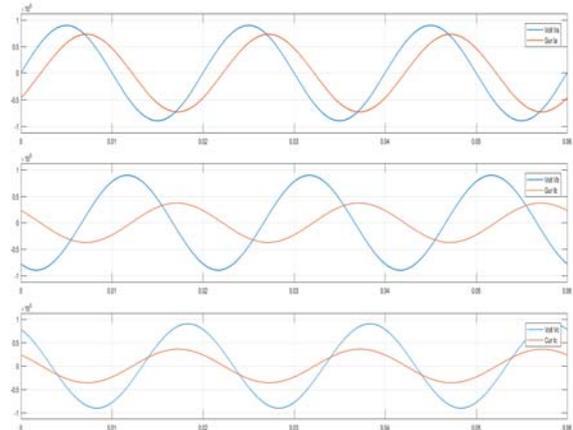


Рис. 9. Зсув струму в фазі В

Амплітуда струму, споживаного фазою А, майже вдвічі перевищує амплітуди струмів у двох інших фазах і досягає значення 76 А, а в двох інших фазах амплітуда струмів досягає майже 40 А (рис. 8). Результатом прояву несиметричного режиму споживання електроенергії від живильної мережі є таке вкрай негативне явище, як зсув струму в фазі В, який взагалі сприймається як генерація електроенергії (рис. 9). Це призводить до неадекватної роботи лічильників, що задіяні для контролю споживання електричної енергії в системі.

Для покращення енергетичних показників електропостачання на моделі застосовано додатково увімкнені реактивні елементи, які підключаються на стороні навантаження на лінійні напруги вторинної сторони трансформатора. Типи цих реактивних елементів і їхні параметри визначаються шляхом пошукової оптимізації [8, 9]. Як цільова функція використовується кульова метрика, що складається з реактивних потужностей, споживаних джерелами живлення. Змінними оптимізації прийняті величини реактивних елементів, що забезпечують симетрування і компенсацію реактивної потужності. Для оптимізації використовується вбудована функція системи MATLAB *fminsearch*, яка реалізує алгоритм деформованого багатогранника Нелдера-Міда. На початку процесу оптимізації всі реактивні елементи компенсатора були задані як ємнісні елементи. У процесі оптимізації провідність конденсатора, увімкненого між фазами В і С, наблизилась до нуля, однак цільова функція нуля не досягла, тобто, процес оптимізації не вдалось завершити. Саме так пошукова оптимізація реагує на необхідність заміни відповідного елементу на дуальний, тобто на індуктивний елемент. Його початкову провідність варто встановити близькою до нуля для забезпечення неперервності зміни цільової функції. Після такої заміни процес оптимізації вдалось завершити за таких параметрів компенсуючого реактивного пристрою: $C_{ab}=1.0031113E-05$ Ф; $L_{bc}=1.0767185$ Гн; $C_{ca}=1.2937435E-05$ Ф.

Часові діаграми струмів, споживаних від джерел при увімкненні симетруючих елементів, зображено на рис. 10.

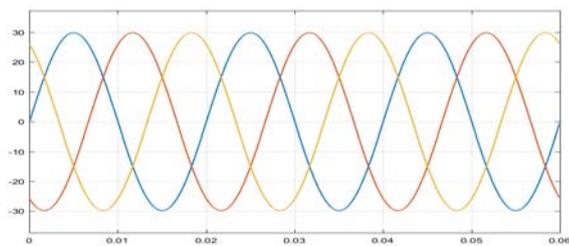


Рис. 10. Часові діаграми струмів, споживаних від джерел при увімкненні симетруючих елементів

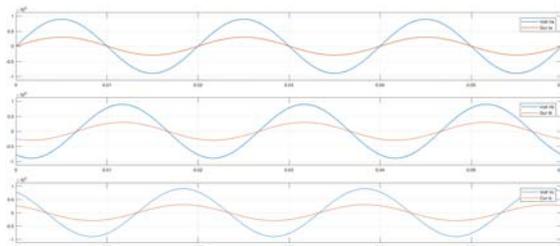


Рис. 11. Співпадіння струмів за фазою із фазними напругами

Із часових діаграм видно, що в разі застосування запропонованої моделі трансформатора в системі електропостачання досягнуто повну компенсацію реактивної потужності. Водночас компенсована не тільки реактивна потужність самого навантаження, а й реактивні потужності, обумовлені лініями електропостачання і самого трансформатора. Амплітуди струмів, що споживаються від джерел, однакові і складають величини порядку 30 А, що значно менше, ніж у варіанті несиметричного режиму. Крім того, струми за фазою співпадають із фазними напругами (рис. 11). Це означає, що від джерел відбирається лише активна потужність, тобто, при повній компенсації реактивної потужності в електротехнічній системі досягається одиничне значення коефіцієнта потужності. Таким чином, запропонована модель трансформатора доводить свою адекватність і високу точність при дослідженні електромагнітних процесів у реальній системі електропостачання залізниці змінного струму з урахуванням як несиметричного режиму, так і режиму повної компенсації реактивної потужності при забезпеченні симетрування споживаних трансформатором струмів.

Висновки. На основі аналізу співвідношень між струмами, напругами і потужностями трансформатора виведено достатньо простий математичний вираз, що дає змогу одразу ж за паспортними даними визначити коефіцієнт зв'язку первинної і вторинної індуктивностей трансформатора. Для цього достатньо скористатися значеннями лише двох паспортних даних, а саме відносними значеннями напруги короткого замикання і струму неробочого ходу. Унаслідок значно спрощується знаходження решти параметрів заступних схем трансформатора, необхідних для визначення параметрів моделей трансформатора для будь-яких комп'ютерних програм моделювання процесів у електротехнічних системах, що містять трансформатори. Запропоновано конкретні алгоритми розрахунків цих параметрів на основі викладеної методики. Розглянуто варіанти використання моделей трансформатора на основі взаємно пов'язаних індуктивностей. Застосування запропонованої моделі трансформатора в системі MATLAB довело високий ступінь адекватності і точності цієї моделі трансформатора на базі формули для швидкого визначення коефіцієнта зв'язку котушок трансформатора лише за двома вказаними паспортними даними. У запропонованій моделі топологія заступної схеми дає змогу уникнути безпосереднього визначення індуктивностей розсіювання, а також позбавитися необхідних для класичної моделі перерахунків параметрів ланцюга намагнічування. Тестування запропонованої моделі показало співпадіння потужностей втрат короткого замикання і неробочого ходу з паспортними даними. Приклад застосування запропонованої моделі для живлення залізниці змінного струму продемонстрував адекватну роботу моделі системи з силовим трансформатором як в несиметричному режимі, так і в режимі повної компенсації реактивної потужності.

1. Pentegov I. V., Rymar S. V., Volkov I. V. Relation between parameters of electromagnetic and schematic circuits and equivalent circuits of double-winding transformers. *Electrical engineering and Electromechanics*. 2006. No 3. Pp. 67–79.
2. Lou J., Bhohe A., Shu Y. and Yu J., Analytical calculation of transformer parameters by S-parameters. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC), Suntec City, Singapore, 2018. Pp. 1310–1313. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2018.8394001>
3. Yarymbash D., Kotsur M., Yarymbash S. and Divchuk T. Electromagnetic Parameters Determination of Power Transformers. IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kharkiv, Ukraine, 2018. Pp. 70–75. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559573>

4. Zhang Z., Kang and N., Mousavi M. J. Real-time transformer parameter estimation using terminal measurements. IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA, 2015. Pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7285958>
5. Bloech M. and Rashid M.H. PSpice Modeling of Three-Phase Transformer. 39th North American Power Symposium, Las Cruces, NM, USA, 2007. Pp. 76–79. DOI: <https://doi.org/10.1109/NAPS.2007.4402289>
6. M. Neumayer M., Bretterkleeber T. and Zangl H. Bayesian estimation of electrical transformer parameters. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, Montevideo, Uruguay, 2014. Pp. 514–518. DOI: <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2014.6860798>
7. Yagup V.G., Yagup E.V. Investigation of magnetically coupled inductances using signal graphs. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No 5. P. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.021>
8. Yagup V.G., Yagup E.V. Research of reactive power compensation modes in the electrical supply system with the cascade of transformers. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2025. No 1. Pp. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.01.082>
9. Yagup V.G., Yagup K.V. Power compensation modes research in generalized electrical supply system. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 6. Pp. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.063> (Ukr)
10. R. Muthyala and A. Dhabale, Analysis of Single Phase Transformer Excited by Superposition of Square and Sine Wave. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Chennai, India, 2018. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDES.2018.8707866>
11. Youssef H., Hassan M.H., Kamel S. and Elsayed S.K. Parameter Estimation of Single Phase Transformer Using Jellyfish Search Optimizer Algorithm. IEEE International Conference on Automation/XXIV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), Valparaiso, Chile, 2021. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAACCA51523.2021.9465279>
12. Patel S., Derwal A., Doshi S. and Rajendra S.K. Utilising Genetic Algorithm and Driving Point Impedance Data to Synthesize High Frequency Circuit Model of Power Transformer Winding, 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), Noida, India, 2018. Pp. 407–412. DOI: <https://doi.org/10.1109/SPIN.2018.8474058>
13. Dirik H., Gezezin C. and Özdemir M. A Novel Parameter Identification Method for Single-Phase Transformers by Using Real-Time Data, IEEE Transactions on Power Delivery, 2014. Vol. 29. No 3. Pp. 1074–1082. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2284243>
14. Abu-Siada A., Mosaad M.I., Kim D. and El-Naggar M.F. Estimating Power Transformer High Frequency Model Parameters Using Frequency Response Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, June 2020. Vol. 35. No 3. Pp. 1267–1277. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2938020>
15. Liu Y. and Pei X. Improved Identification Method for Equivalent Network Parameters of Transformer Windings Based on Driving Point Admittance. IEEE Access, 2025. Vol. 13. Po. 10062–10069. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3528886>
16. Rao T.M., Pramanik S. and Mitra S. On Analytical Estimation of Inductances in Equivalent Ladder Network Model of a Homogeneous Transformer Winding Using FRA Data. IEEE Transactions on Power Delivery, 2025. Vol. 40. No 1. Pp. 472–483. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2024.3504961>

DETERMINATION OF PARAMETERS OF TRANSFORMER MODELS OF ELECTRICAL SYSTEMS USING PASSPORT DATA

V.G. Yagup¹, K.V. Yagup²

1 – Kharkiv National Automobile and Highway University,
Yaroslava Mudrogo str., 25, 61002, Kharkiv, Ukraine
e-mail: yagup.walery@gmail.com

2 – National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute,
Kyrpychova str., 2, 61002, Kharkiv, Ukraine

The article is devoted to solving the problem of obtaining the parameters of equivalent circuits of powerful transformers for their models, which are used in computer programs for modeling electromagnetic processes in electrical systems. The system of passport data of the transformer, which is the most widely used in engineering practice, is used as the initial data. Based on the analysis conducted in the article, a simple formula is substantiated that allows determining the electromagnetic coupling coefficient of the primary and secondary windings of the transformer through the relative values of the short-circuit voltage and the non-operating current. This approach significantly simplifies the further calculation of all other parameters of equivalent circuits of a powerful transformer for any computer programs for modeling electrical systems. The theoretical conclusions presented are confirmed by computer experiments on models in the MATLAB system. Ref. 16, fig. 11.

Key words: power transformer, equivalent circuit, passport data, model parameters.

Надійшла: 24.11.2025
Прийнята: 02.12.2025

Submitted: 24.11.2025
Accepted: 02.12.2025