



Бржезицький В. О.,
Гаран Я. О.,
Маслюченко І. М.

ДЕТАЛІЗАЦІЯ РІВНЯНЬ ТРАНСФОРМАТОРА ДО РІВНЯ ОДИНИЧНИХ ВИТКІВ (ГРУП ВИТКІВ) ОБМОТОК

Досліджено розсіювання трансформатора та його вплив на значення індуктивності окремих витків (груп витків) обмоток. Визначено взаємозв'язок розсіювання трансформатора зі спаданням напруги на окремих витках (групах витків) обмоток трансформатора. Запропонований метод розрахунку спадання напруги на окремих витках (групах витків) обмоток трансформатора за допомогою системи рівнянь з використанням понять «часткова індуктивність», «часткова взаємодіюча індуктивність».

Ключові слова: трансформатор, індуктивність, розсіювання, часткова індуктивність.

1. Вступ

Трансформатор — це статичний електромагнітний пристрій, який має дві чи більше індуктивно зв'язаних обмоток, й призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї чи кількох систем змінного струму в одну чи кілька інших систем змінного струму [1]. Трансформатори електромагнітного типу поділяються на кілька категорій, серед яких можна виділити: силові трансформатори, призначені для перетворення електричної енергії значної потужності; трансформатори напруги, призначені для вимірювання високих напруг; трансформатори струму, призначені для вимірювання великих струмів; випробувальні трансформатори, призначені для використання в схемах випробування високовольтного електрообладнання, тощо.

Кожен тип трансформатора має певні особливості конструкції, пов'язані з його застосуванням. Для певних типів трансформаторів існують методи розрахунку їх характеристик. Найбільш відомими та поширеними є методи розрахунку силових трансформаторів, оскільки ці трансформатори відносяться до основного електроенергетичного устаткування. В цих методах значну увагу приділяють розрахункам високовольтної ізоляції, обмоток та магнітної системи, оскільки вони відіграють важливу роль в надійності роботи силового трансформатора. Розрахунком потоків розсіювання хоча й надають значну увагу, проте точність таких розрахунків не є критичною для цього типу трансформаторів. Більш критичними є точні розрахунки потоків розсіювання для вимірювальних трансформаторів — трансформаторів напруги. Конструкція таких трансформаторів відрізняється від конструкції силових трансформаторів значною різницею кількості витків різних обмоток. Ця різниця може сягати кількох порядків. Обмотки зі значною кількістю витків можуть займати дуже великі об'єми, тому потоки розсіювання між витками таких багатовиткових обмоток та витками інших обмоток трансформатора напруги є суттєвими та потребують окремого розгляду.

Для вимірювальних трансформаторів існують методи наближеного розрахунку індуктивності розсіювання для

використання в розрахунках характеристик трансформатора за його схемою заміщення. Проте, ці методи засновані на відомих методах розрахунку індуктивності розсіювання силових трансформаторів й дають значні похибки при розрахунках індуктивності розсіювання багатовиткових обмоток складного перерізу. Деталізація розрахунку індуктивності розсіювання та врахування нерівномірності розподілу потоків розсіювання по витках обмоток трансформатора дозволяє підвищити точність розрахунків характеристик за його схемою заміщення, що обґрунтовує актуальність проведеного дослідження.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Існує багато джерел, в яких розглядаються методи розрахунку характеристик трансформатора. Як правило, ці методи побудовані на використанні векторних діаграм напруг і струмів трансформатора та його схеми заміщення. Векторні діаграми напруг і струмів трансформатора детально розглядаються, наприклад, в [2] та [3]. В цих же джерелах наводяться й схеми заміщення трансформаторів, за якими й розраховуються напруги та струми у обмотках, потоки розсіювання, втрати у обмотках та магнітопроводі, тощо.

Основним недоліком розрахунку характеристик трансформатора за цими методами є те, що вони, як правило, розраховані для визначення характеристик силових трансформаторів, тому в схемах заміщення елементами виступають обмотки, а не окремі витки. В якості прикладу типової векторної діаграми напруг і струмів трансформатора можна розглянути діаграму за рис. 1, у відповідності до [3].

Слід відзначити, що зазначені векторні діаграми використовуються лише для робочих частот силових трансформаторів, оскільки для високих частот значного впливу в трансформаторів набувають емнісні струми в обмотках. Як зазначається в [4], для виконання розрахунків характеристик трансформатора використовують схему заміщення у відповідності до рис. 2 [4].

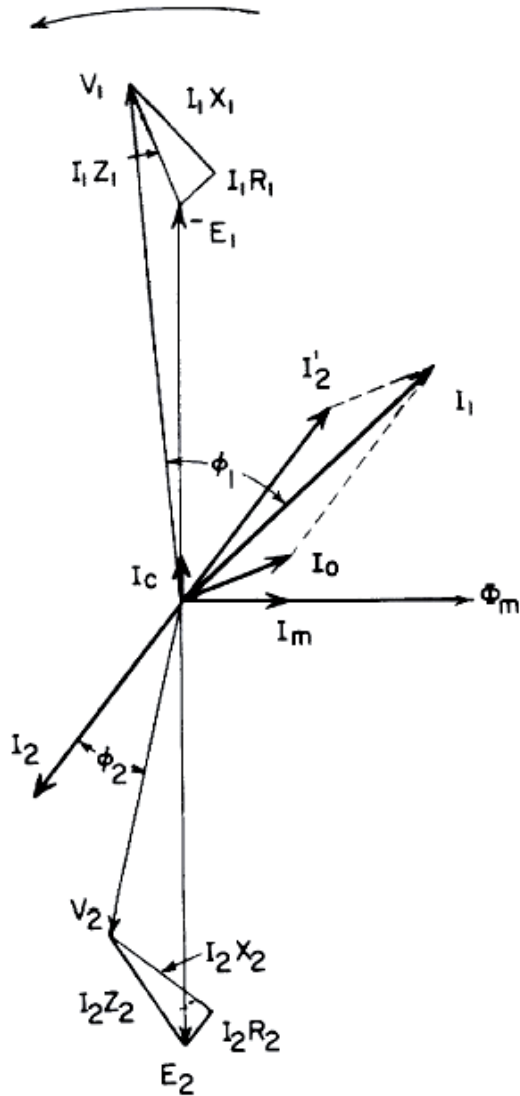


Рис. 1. Векторна діаграма напруг та струмів однофазного двообмоткового трансформатора при відношенні витків первинної та вторинної обмоток 1:1 та індуктивному характері навантаження: Φ_m — основний магнітний потік трансформатора; E_1, E_2 — ЕРС обмоток; I_0 — струм холостого ходу; I_m — намагнічуючий струм; I_c — струм втрат у магнітопроводі; V_1, V_2 — первинна та вторинна напруги на обмотках; I_1R_1, I_2R_2 — активні втрати у первинній та вторинній обмотках; I_1X_1, I_2X_2 — реактивні втрати у первинній та вторинній обмотках; I_1Z_1, I_2Z_2 — комплексні втрати у первинній та вторинній обмотках; ϕ_1, ϕ_2 — кути відставання струмів первинної та вторинної обмоток від напруг первинної та вторинної обмотки, відповідно

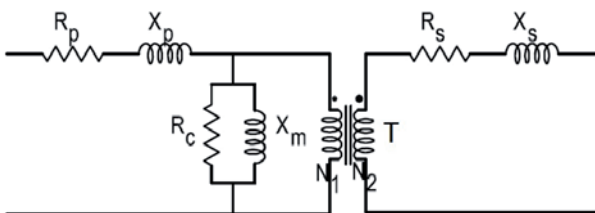


Рис. 2. Схема заміщення однофазного двообмоткового трансформатора за [4]: R_p — активний опір первинної обмотки; R_s — активний опір вторинної обмотки; R_c — визначає активні втрати в магнітопроводі; X_p — визначає реактивні втрати в первинній обмотці; X_s — визначає реактивні втрати у вторинній обмотці; X_m — визначає реактивні втрати в магнітопроводі; T — ідеальний трансформатор з кількістю витків первинної та вторинної обмоток, відповідно, N_1, N_2

Схема за рис. 2 є більш загальною, однак, для зручності, при розрахунках частіше використовують приведені схеми заміщення без ідеального трансформатора. Прикладом такої схеми заміщення може бути схема за рис. 3.

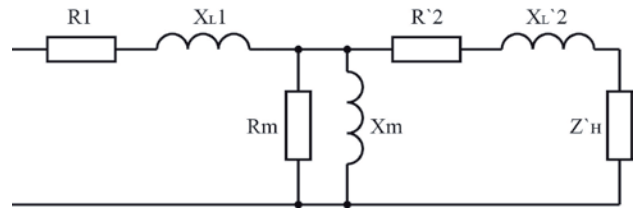


Рис. 3. Приведена схема заміщення однофазного двообмоткового трансформатора: R_1 — визначає активні втрати у первинній обмотці; X_{L1} — визначає реактивні втрати у первинній обмотці; R_m, X_m — визначають активні та реактивні втрати у магнітопроводі; $R'2$ — визначає активні втрати у вторинній обмотці, приведені до кількості витків первинної обмотки; $X_{L'2}$ — визначає реактивні втрати у вторинній обмотці, приведені до кількості витків первинної обмотки; $Z'n$ — комплексний опір навантаження Z_n , приведений до кількості витків первинної обмотки

В схемі рис. 3 для розрахунків значень $R'2, X_{L'2}, Z'n$ використовується коефіцієнт ділення $k = N_1/N_2$ (у відповідності до рис. 2) та формули [2]:

$$R'2 = R_2 \cdot k^2; \tag{1}$$

$$X_{L'2} = X_{L2} \cdot k^2; \tag{2}$$

$$Z'n = Z_n \cdot k^2. \tag{3}$$

Зазначені на рис. 2 та рис. 3 схеми заміщення трансформатора використовуються, коли необхідно визначити загальні характеристики з урахуванням первинної та вторинної обмоток трансформатора. Проте, якщо існує необхідність визначити характеристики окремих витків чи груп витків за такими схемами заміщення, здійснити це за схемами рис. 2 або рис. 3 неможливо. Це виникає внаслідок того, що, якщо вираховування активного опору окремих витків (груп витків) обмоток за їх геометричними параметрами не є складним, визначення їх реактивного опору, яке пов'язане з визначенням індуктивності розсіювання окремих витків (груп витків) обмоток, взагалі є невідомим в літературі, навіть понятійно.

Автори [5] виконали спробу побудови схеми заміщення багатообмоткового трансформатора з метою розрахунку індуктивностей розсіювання між обмотками. При цьому, авторами були виконані дослідження лише 5-обмоткового трансформатора з циліндричними обмотками. В [5] показано, що велика кількість обмоток відповідає великій кількості магнітних зв'язків та потоків розсіювання між цими обмотками та потребує складання відповідних систем рівнянь для знаходження всіх параметрів схеми заміщення.

При цьому, для силових трансформаторів кількість витків (груп витків) є не досить великою, проте для вимірювальних трансформаторів (наприклад, трансформаторів напруги) — кількість витків може сягати сотень тисяч. Цілком очевидно, що при розгляді високовольтної обмотки, що складається зі 100000 витків, навіть якщо розглядати за такою методикою не окремі витки, а групи витків, обсяг розрахунків для вирішення задачі виходить за межі результатів [5].

Існує (крім вищезазначених трансформаторів напруги) не так багато задач, які потребують визначення розподілу напруги по витках обмоток, проте, такі задачі існують. Перш за все, це задачі, пов'язані з визначенням частотних характеристик трансформаторів, а також визначенням ділянок обмоток, на яких ймовірно виникнення резонансних перенапруг.

Наприклад, ферорезонансні явища можуть виникати при роботі як навантажених, так і ненавантажених трансформаторів й залежати від багатьох параметрів електричних кіл, приєднаних до трансформатора [6]. Розподілені по обмотці трансформатора ємності та індуктивності створюють коливальні контури, які впливають на розподіл напруг по обмотці й на певних частотах можуть викликати внутрішньообмоткові резонансні перенапруги та пошкодження ізоляції обмоток [7].

Ще одним важливим прикладом необхідності точного визначення розподілення напруг по окремих витках обмоток трансформатора є розрахунки режимів вимірювальних обмоток випробувальних трансформаторів. Такі обмотки являють собою, фактично, вихідну обмотку індуктивного подільника напруги у складі високовольтної обмотки випробувального трансформатора. Особливості розрахунків таких обмоток та вплив характеру навантаження на коефіцієнт ділення індуктивного подільника напруги таких випробувальних трансформаторів наведені авторами в [8, 9].

3. Об'єкт, ціль та задачі дослідження

Об'єкт дослідження — взаємозв'язок магнітного поля трансформатора зі складовими напруг в обмотках трансформаторів.

Метою даного дослідження є деталізація впливу результуючого магнітного поля трансформатора на виокремленні витки (групи витків) обмоток трансформатора.

Для досягнення мети досліджень вирішувались наступні задачі:

- визначення розподілу потоків результуючого магнітного поля трансформатора шляхом створення математичної моделі його активної частини та вибору способу обчислення характеристик за обраною моделлю;
- умовне виокремлення з загального потоку магнітного поля трансформатора його складових, за якими можна розрахувати реактивні втрати в окремих витках (групах витків) його обмоток;
- виведення рівнянь, за якими можна розрахувати комплексні напруги і струми в окремих витках (групах витків) обмоток трансформатора.

4. Засоби та методи дослідження магнітного поля трансформатора та складових напруги в окремих витках його обмоток

4.1. Деталізація рівнянь трансформатора для окремих витків первинної та вторинної обмоток. Для деталізації рівнянь трансформатора для окремого i -го витка первинної та k -го витка вторинної обмоток необхідно, окрім загальновідомих понять (активні опори витків r_i, r_k ; основний магнітний потік Φ_m і інші), необхідно ввести нові поняття:

- часткова індуктивність розсіювання L_{i1} , яка дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{i1} , зчепленому

з i -м витком при протіканні по первинній обмотці струму 1 А (при використанні для розрахунків $L_{i1}, M_{i2}, L_{k2}, M_{k1}$ значення струму I (А), необхідно одержані результати поділити на I);

— часткова взаємоіндуктивність розсіювання M_{i2} , яка дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{i2} , зчепленому з i -м витком при протіканні по вторинній обмотці струму 1 А (при використанні для розрахунків $L_{i1}, M_{i2}, L_{k2}, M_{k1}$ значення струму I (А), необхідно одержані результати поділити на I);

— часткова індуктивність розсіювання L_{k2} , яка дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{k2} , зчепленому з k -м витком при протіканні по вторинній обмотці струму 1 А (при використанні для розрахунків $L_{i1}, M_{i2}, L_{k2}, M_{k1}$ значення струму I (А), необхідно одержані результати поділити на I);

— часткова взаємоіндуктивність розсіювання M_{k1} , яка дорівнює магнітному потоку розсіювання Φ_{k1} , зчепленому з k -м витком при протіканні по первинній обмотці струму 1 А (при використанні для розрахунків $L_{i1}, M_{i2}, L_{k2}, M_{k1}$ значення струму I (А), необхідно одержані результати поділити на I).

На рис. 4 представлена векторна діаграма напруг при переважуючому активно-індуктивному навантаженні трансформатора.

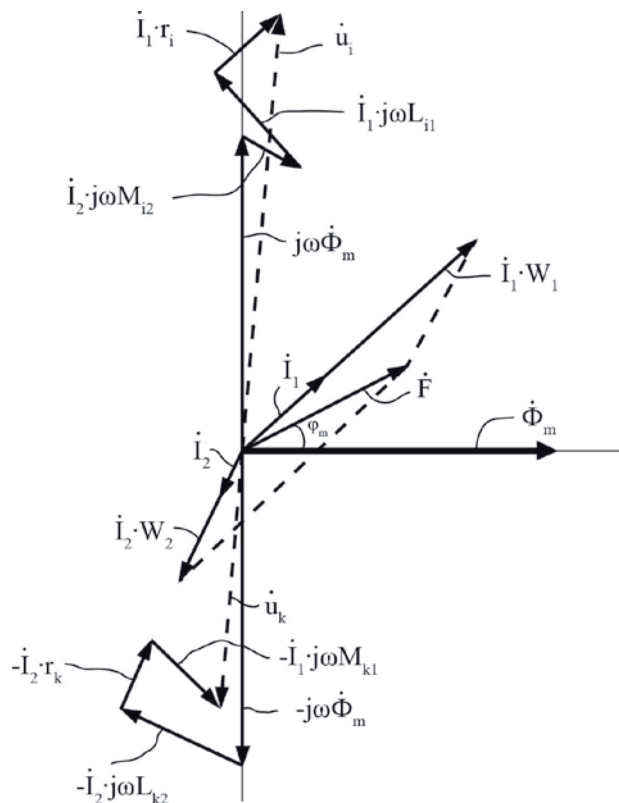


Рис. 4. Векторна діаграма для i -го витка первинної та k -го витка вторинної обмоток трансформатора

Рівняння відносно напруг u_i, u_k витків відповідно до діаграми рис. 4 мають вигляд:

$$u_i = j \cdot \omega \cdot \Phi_m + I_1 \cdot (r_i + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) + j \cdot \omega \cdot I_2 \cdot M_{i2}; \quad (4)$$

$$\dot{u}_k = -j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi}_m - \dot{I}_2 \cdot (r_k + j \cdot \omega \cdot L_{k2}) - j \cdot \omega \cdot \dot{I}_1 \cdot \dot{M}_{k1}, \quad (5)$$

де ω — кутова частота.

4.2. Узагальнення рівнянь трансформатора для окремих груп витків первинної та вторинної обмоток. Якщо групи витків обмоток мають компактне геометричне розташування, можна виділити їх центри та, відповідно, для них визначити параметри r_i , r_k , L_{i1} , M_{i2} , L_{k2} , M_{k1} , умовно розміщуючи один виток в положенні центрів. В цьому випадку відповідні складові векторної діаграми рис. 4 помножуються на кількість витків W_i , W_k у виділених групах. При цьому одержуємо діаграму для груп витків W_i , W_k , представлену на рис. 5, де напруги груп витків визначаються як $\dot{U}_i = W_i \cdot \dot{u}_i$, $\dot{U}_k = W_k \cdot \dot{u}_k$.

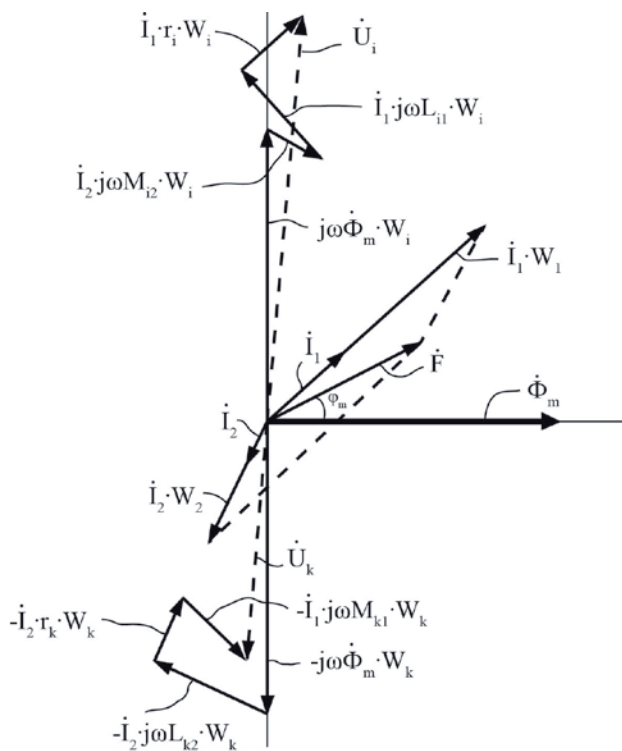


Рис. 5. Векторна діаграма для груп витків W_i , W_k первинної та вторинної обмоток трансформатора

Рівняння (4, 5) для груп витків перетворюються до виду:

$$\dot{U}_i = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi}_m \cdot W_i + \dot{I}_1 \cdot W_i (r_i + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_2 \cdot \dot{M}_{i2} \cdot W_i; \quad (6)$$

$$\dot{U}_k = -j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi}_m \cdot W_k - \dot{I}_2 \cdot W_k (r_k + j \cdot \omega \cdot L_{k2}) - j \cdot \omega \cdot \dot{I}_1 \cdot \dot{M}_{k1} \cdot W_k. \quad (7)$$

5. Складання рівнянь трансформатора з урахуванням напруги груп витків обмоток

Представимо, що первинна обмотка трансформатора має всього m груп витків. Тоді повна кількість витків первинної обмотки:

$$W_1 = W_{11} + W_{12} + \dots + W_{1i} + \dots + W_{1m}. \quad (8)$$

Аналогічно, вторинна обмотка трансформатора має n груп витків:

$$W_2 = W_{21} + W_{22} + \dots + W_{2k} + \dots + W_{2n}. \quad (9)$$

Підсумовуючи рівняння (7, 8) груп первинної та вторинної обмоток, одержимо рівняння для обмоток трансформатора в цілому:

$$\dot{U}_1 = \dot{u}_{11} + \dot{u}_{12} + \dots + \dot{u}_{1i} + \dots + \dot{u}_{1m}, \quad (10)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{u}_{21} + \dot{u}_{22} + \dots + \dot{u}_{2k} + \dots + \dot{u}_{2n}, \quad (11)$$

$$\dot{U}_1 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi}_m \cdot W_1 + \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_{11} + \dot{I}_2 \cdot \dot{Z}_{12}, \quad (12)$$

$$\dot{U}_2 = -j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi}_m \cdot W_2 - \dot{I}_2 \cdot \dot{Z}_{22} - \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_{21}, \quad (13)$$

де

$$\dot{Z}_{11} = \sum_1^m (r_i + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) \cdot W_i, \quad (14)$$

$$\dot{Z}_{12} = j \cdot \omega \cdot \sum_1^m M_{i2} \cdot W_i, \quad (15)$$

$$\dot{Z}_{22} = \sum_1^n (r_k + j \cdot \omega \cdot L_{k2}) \cdot W_k, \quad (16)$$

$$\dot{Z}_{21} = j \cdot \omega \cdot \sum_1^n M_{k1} \cdot W_k. \quad (17)$$

Для вирішення системи рівнянь (6, 7) відносно U_i , U_k необхідні дані r_i , r_k , L_{i1} , M_{i2} , L_{k2} , M_{k1} та, крім того, ще 3 величини: $\dot{\Phi}_m$, \dot{I}_1 , \dot{I}_2 . Їх можна знайти, доповнюючи систему рівнянь (6, 7) додатковими рівняннями:

$$\dot{\Phi}_m = \frac{\dot{I}_1 \cdot W_1 + \dot{I}_2 \cdot W_2}{R_m}, \quad (18)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_n}, \quad (19)$$

де R_m — комплексний магнітний опір магнітопроводу трансформатора для основного магнітного потоку, який розраховується за допомогою тих або інших наближень [10], а Z_n — звичайно відомий опір навантаження вторинної обмотки трансформатора.

Оскільки струм \dot{I}_2 визначається через вторинну напругу трансформатора U_2 (19), необхідно для розв'язання задачі ще використовувати рівняння (10, 11).

Загалом, система лінійних рівнянь відносно складових напруг на групах витків обмоток трансформатора u_i , u_k та $\dot{\Phi}_m$, \dot{I}_1 , \dot{I}_2 , U_2 має порядок $m + n + 4$. Якщо

її вирішувати відносно комплексних величин, представлених проекціями на вісі реальних та уявних чисел, порядок системи збільшиться у 2 рази до $2 \cdot (m + n + 4)$.

6. Обговорення результату — складання системи рівнянь трансформатора до рівня одиничних витків (груп витків) обмоток

Розглянемо перетворення параметрів трансформатора за рівняннями (12–17):

Z_{11} за (14):

$$\dot{Z}_{11} = \sum_1^m (r_i + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) \cdot W_i = \sum_1^m r_i \cdot W_i + \sum_1^m j \cdot \omega \cdot L_{i1} \cdot W_i. \quad (20)$$

Вираз \dot{Z}_{11} має традиційне представлення $\dot{Z}_{11} = R_1 + j \cdot \omega \cdot L_{11}$ [11], де R_1 — активний опір та L_{11} — власне, індуктивність розсіювання первинної обмотки трансформатора. Якщо з визначенням R_1 , звичайно, немає питань, то з визначенням L_{11} існують різні пропозиції [11, 12]. Отже, частина виразу з (20) $L_{11} = \sum_1^m L_{i1} \cdot W_i$ гранично чітко визначає значення даного параметру первинної обмотки трансформатора.

Аналогічну ситуацію маємо з визначенням L_{22} з \dot{Z}_{22} (17): $L_{22} = \sum_1^n L_{k2} \cdot W_k$.

З (15), (17) визначаємо вирази:

$$M_{12} = \sum_1^m M_{i2} \cdot W_i, \quad M_{21} = \sum_1^n M_{k1} \cdot W_k, \quad (21)$$

що конкретизують визначення даних параметрів [12] для обмоток трансформатора.

Звичайно, для силових трансформаторів приймають умову [13] $I_1 \cdot W_1 + I_2 \cdot W_2 = 0$, що при підстановці в (12, 13) та при приведенні вторинної обмотки до первинної приводить рівняння (12, 13) до вигляду:

$$\dot{U}_1 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi}_m \cdot W_1 + \dot{I}_1 \cdot (R_1 + j \cdot \omega \cdot L_{\text{эф1}}), \quad (22)$$

$$\dot{U}_2 = -j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi}_m \cdot W_1 - \dot{I}_2 \cdot (R_2 + j \cdot \omega \cdot L_{\text{эф2}}), \quad (23)$$

де приведені «ефективні» індуктивності розсіювання обмоток мають вигляд [13]:

$$L_{\text{эф1}} = L_{11} - M_{12}, \quad L_{\text{эф2}} = L_{22} - M_{21}. \quad (24)$$

Інша ситуація виникає в так званих індуктивних прецизійних подільниках напруги [14], коли первинна та вторинна обмотки виконуються скрученими ізольованими провідниками. Оскільки такі подільники напруги працюють в режимі холостого ходу, $I_2 = 0$, з (12, 13) маємо:

$$\dot{U}_1 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi}_m \cdot W_1 + \dot{I}_1 \cdot R_1 + \dot{I}_1 \cdot j \cdot \omega \cdot L_{11}, \quad (25)$$

$$\dot{U}_2 = -j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi}_m \cdot W_1 - \dot{I}_1 \cdot j \cdot \omega \cdot M_{21}. \quad (26)$$

При виготовленні первинної та вторинної обмоток скрученими ізольованими провідниками $L_{11} = M_{21}$, та оскільки $R_1 \ll \omega L_{11}$, з (25, 26) одержуємо $|\dot{U}_2| \cong |\dot{U}_1|$.

Таким чином, тестування складеної в роботі системи рівнянь трансформатора (до рівня одиничних витків (груп витків) обмоток) дає співпадіння результатів її застосування з попередньо відомими частковими випадками в теорії трансформаторів.

7. Висновки

1. Вперше виконана деталізація рівнянь трансформатора до рівня одиничних витків (груп витків) обмоток.
2. Застосування запропонованої теорії вперше дозволяє досліджувати розподілення напруги між витками та групами витків обмоток трансформатора.
3. Тестування запропонованої в роботі системи рівнянь дає співпадіння результатів її застосування з попередньо відомими частковими випадками в теорії трансформаторів.

Література

1. Грудинский, П. Г. Электротехнический справочник [Текст] / П. Г. Грудинский, Г. Н. Петрова, М. М. Соколова, А. М. Федосеева, М. Г. Чиликина и др. — М.: Энергия, 1974. — Т. 1. — 776 с.
2. Васютинский, С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов [Текст] / С. Б. Васютинский. — Л.: Энергия, 1970. — 432 с.
3. Heathcote, M. J. The J & P Transformer Book: A Practical Technology of the Power Transformer [Text] / M. J. Heathcote. — Oxford: Newnes, 1998. — 945 p.
4. Biricik, S. A Method for Power Losses Evaluation in Single Phase Transformers under Linear and Nonlinear Load Conditions [Text] / S. Biricik, Ö. C. Özerdem // Przegląd Elektrotechniczny. — 2011. — № 12a — P. 74–77.
5. Alvarez-Marino, C. Equivalent Circuit for the Leakage Inductance of Multiwinding Transformers: Unification of Terminal and Duality Models [Text] / C. Alvarez-Marino, F. de Leon, X. M. Lopez-Fernandez // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2012. — Vol. 27, № 1. — P. 353–361. doi:10.1109/tpwrld.2011.2173216
6. Valverde, V. Ferroresonance Suppression in Voltage Transformers [Text] / V. Valverde, J. Mazón, G. Buigues, I. Zamora // Przegląd Elektrotechniczny. — 2012. — № 1a. — P. 137–140.
7. Никонец, Л. А. Распределение воздействующих на трансформатор напряжений вдоль обмотки ВН [Текст] / Л. А. Никонец, И. Р. Бучковский, Р. В. Бучковский, В. П. Венгер, В. П. Венгер, А. Л. Никонец, М. Б. Сабат // Электрические станции. — 2014. — № 2. — С. 51–56.
8. Бржезицький, В. О. Коригування характеристик високовольтного випробувального трансформатора [Текст] / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран // Технологічний аудит та резерви виробництва. — 2015. — № 3/1(23). — С. 41–46. doi:10.15587/2312-8372.2015.44269
9. Бржезицький, В. О. Розрахунок індуктивності розсіювання обмоток високовольтних трансформаторів напруги за допомогою програм, що використовують метод скінченних елементів [Текст] / В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, О. М. Десятов // Технічна електродинаміка. — 2014. — № 4. — С. 61–63.
10. Зирка, С. Е. Моделирование переходных процессов в трехфазном трансформаторе с учетом топологии и гистерезисных свойств магнитопровода [Текст] / С. Е. Зирка, Ю. И. Мороз, Е. Ю. Мороз, А. Л. Тарчуткин // Технічна електродинаміка. — 2011. — № 5. — С. 25–35.

11. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов [Текст]: учеб. пособие / П. М. Тихомиров. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1976. — 544 с.
12. Петров, Г. Н. Трансформаторы [Текст]. Т. 1. Основы теории / Г. Н. Петров. — М., Л.: Госэнергоиздат, 1934. — 447 с.
13. Лейтес, Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов [Текст] / Л. В. Лейтес. — М.: Энергия, 1981. — 392 с.
14. Hoer, C. A. A 2:1 ratio inductive voltage divider with less than 0.1 ppm error to 1 MHz [Text] / C. A. Hoer, W. L. Smith // Journal of Research of the National Bureau of Standards, Section C: Engineering and Instrumentation. — 1967. — Vol. 71C, № 2. — P. 101–109. doi:10.6028/jres.071c.012

ДЕТАЛИЗАЦІЯ УРАВНЕНЬ ТРАНСФОРМАТОРА ДО УРОВНЯ ЄДИНИЧНИХ ВИТКОВ (ГРУПП ВИТКОВ) ОБМОТОК

Исследовано розсіяння трансформатора, його вплив на значення індуктивності окремих витків (груп витків) обмоток. Виявлено взаємозв'язок розсіяння трансформатора з падінням напруги на окремих витках (групах витків) обмоток трансформатора. Предложено метод розрахунок падіння напруги на окремих витках (групах витків) обмоток трансформатора з допомогою системи рівнянь і використання понять «частична індуктивність», «частична взаємні індуктивність».

Ключові слова: трансформатор, індуктивність, розсіяння, взаємні індуктивність, частична індуктивність.

Бржезицький Володимир Олександрович, доктор технічних наук, професор, виконавч об'язків завідувача кафедри техніки

і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: brzhezitsky@mail.ru.

Гаран Ярослав Олександрович, інженер, кафедра техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна. Маслюченко Ігор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Бржезицький Володимир Олександрович, доктор технічних наук, професор, виконуючий обов'язки завідувача кафедри техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Гаран Ярослав Олександрович, інженер, кафедра техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Маслюченко Ігорь Николаевич, кандидат технічних наук, доцент, кафедра техніки і електрофізики високих напруг, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Brzhezitskyi Volodymyr, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: brzhezitsky@mail.ru.

Haran Yaroslav, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Masluchenko Igor, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

УДК 621.315.006.354

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.59092

**Бржезицький В. О.,
Гаран Я. О.,
Лалоша М. Ю.**

РОЗРОБКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІЗОЛЯТОРІВ НА ДОПУСТИМИЙ РІВЕНЬ РАДІОЗАВАД

В статті проаналізовано існуючі вимоги до структурної схеми та характеристик установки для випробування високовольтних ізоляторів на допустимий рівень радіозавод. Описано принципову схему розробленої установки та методикку випробування високовольтних ізоляторів. Визначені основні параметри та характеристики розробленої установки. Наведені результати вимірювання рівня «фону установки» та визначені рекомендації щодо її використання.

Ключові слова: рівень радіозавод, ізолятор, повітряна лінія, фон установки, селективний мікровольтметр.

1. Вступ

Ізолятори, арматура та обладнання електричних підстанцій можуть бути джерелами радіозавод, а в деяких випадках і телевізійних завод, що може бути викликано різними явищами: коронними розрядами на ізоляторах, арматурі та струмопроводах повітряних ліній (ПЛ), поверхневими розрядами на ізоляторах та іскрінням, викликаним несправними контактами. Явища комутації в перетворювача змінного струму в постійний також можуть бути причиною радіозавод [1].

Заводи від ізоляторів можуть бути викликані різними причинами, більшість яких пов'язані з явищами,

що відбуваються на їх поверхні, наприклад, невеликі розряди, викликані збільшенням локальних градієнтів, коронні розряди, викликані неоднорідностями у вигляді нальотів сухих речовин або крапель води або іскрінням на сухих ділянках, викликаним струмами витоку на забруднених ізоляторах. Тільки в особливих випадках (наприклад, при несправних ізоляторах) заводи можуть бути викликані явищами, що відбуваються всередині ізолятора (іскріння у внутрішніх раковинах або тріщинах). Радіозаводи можуть виникати в результаті розрядів між цементом і порцеляною або склом, якщо на стиках між ними є невеликі повітряні проміжки [2].