

РОЗРАХУНОК ІНДУКТИВНОСТІ РОЗСІЮВАННЯ ОБМОТОК ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Бржезицький В.О., Гаран Я.О., Десятов О.М.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»;

пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна brzhezitsky@mail.ru; garan@ua.fm; oleg_desyatov@ukr.net

Розглянуто можливості розрахунку індуктивності розсіювання обмоток високовольтних вимірювальних трансформаторів та автотрансформаторів з метою подальшого використання результатів при визначенні їхніх характеристик за відповідними схемами заміщення. Запропоновано модель розрахунку індуктивності розсіювання для циліндричних обмоток та магнітних систем за допомогою програмного забезпечення, яке використовує чисельні методи скінченних елементів. Визначені формули обчислення індуктивності розсіювання для такої моделі за даними чисельних розрахунків. Одержані розрахункові криві, що відповідають певним рівням індуктивності розсіювання. Розроблений метод розрахунку може бути застосований для електромагнітних систем як трансформаторного, так і автотрансформаторного типу. Бібл. 2, рис. 2.

Ключові слова: індуктивність розсіювання, високовольтний трансформатор напруги, автотрансформатор, метод скінченних елементів, потік розсіювання

Розрахунок індуктивності розсіювання обмоток високовольтних трансформаторів має за мету визначення параметрів схеми заміщення трансформатора, які впливають на його характеристики. Дослідження індуктивності розсіювання високовольтних вимірювальних трансформаторів напруги потребує особливої уваги, оскільки для них мають важливе значення вимоги точності та певних частотних характеристик. На даний момент існують лише спрощені методи розрахунку індуктивності розсіювання трансформаторів, і їх використовують для розрахунків параметрів силових трансформаторів та реакторів [1]. Запропоновані нові підходи до розрахунку індуктивності розсіювання трансформаторів [2], проте вони не стосуються безпосередньо високовольтних вимірювальних трансформаторів, які мають специфічні конфігурації обмоток.

Розрахунок індуктивності розсіювання у тривимірних моделях активних частин трансформаторів є достатньо складним процесом, який на даний час реалізується за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення чисельних розрахунків характеристик магнітного поля. Складність та тривалість таких розрахунків часто не дозволяє використовувати тривимірні моделі, тому, з певними припущеннями, можливо використовувати вісесиметричні моделі, які є прийнятними для моделювання циліндричних обмоток магнітних систем.

Розглянемо процес обчислення індуктивності розсіювання на прикладі активної частини високовольтного автотрансформатора на напругу 19 кВ (приклад виконання моделі в програмному середовищі Comsol Multiphysics та нумерації сегментів частин обмотки наведено на рис. 1, а та 1, б, відповідно).

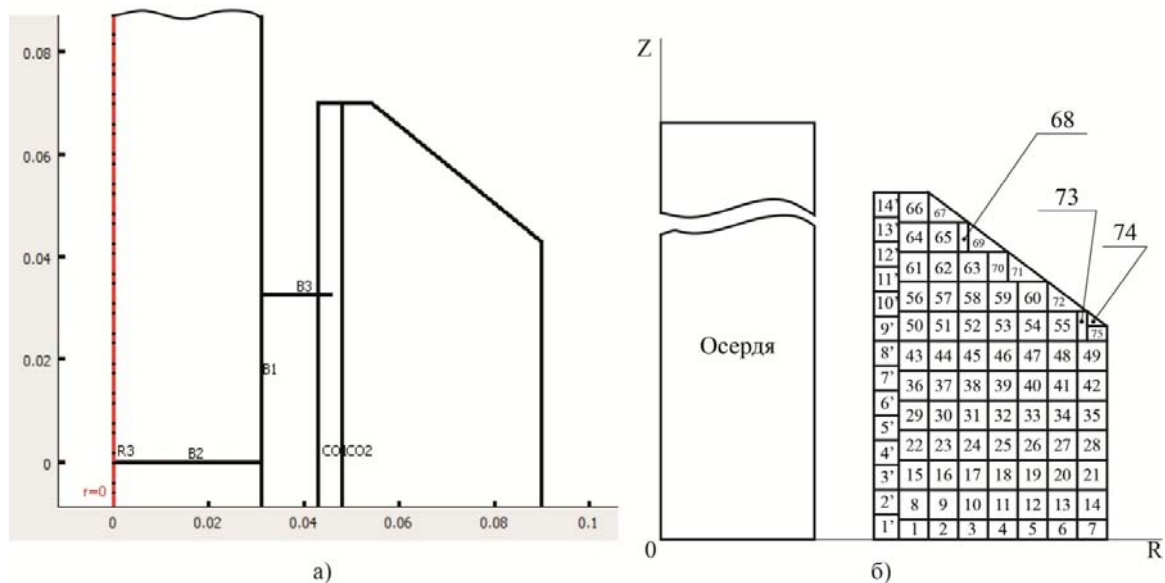


Рис. 1

На етапі створення розрахункової моделі у вісесиметричній системі координат стрижень магнітопроводу з прямокутною або багатогранною формою перетину замінений циліндричним стрижнем з відповідною площею перетину [3]. Для спрощення розрахунків обмотка автотрансформатора напруги представлена умовно розділеною на високовольтну (сегменти 1-75) та низьковольтну (сегменти 1'-14') частини (рис. 1, б), причому в ідеальному випадку кожний сегмент відповідає окремому витку обмотки.

Приймається, що по всій площині перетину обмотки рівномірно розподілений струм I (якщо таке спрощення неприйнятне, необхідно використовувати різну щільність струму для різних сегментів обмотки).

На рис. 1, а магнітопровід моделі висотою 0,256 м зі значенням відносної магнітної проникності $\mu = 10^4$, позначений R3, низьковольтна та високовольтна частини обмотки автотрансформатора позначені CO1 та CO2, відповідно. Лініями B2, B1 та B3 позначені проєкції поверхонь, крізь які розраховується сумарний потік поля для сегменту обмотки, наприклад, позначеного 8' на рис. 1, б (геометричні розміри на рис. 1, а) вказані в метрах). На рис. 1, б наведено один з варіантів нумерації сегментів обмотки (половини, симетричної відносно вісі R частини проєкції) для розрахунків індуктивності розсіювання.

За допомогою відповідного програмного забезпечення одержані чисельні рішення для побудованої сітки скінченних елементів розрахункової моделі та знайдені значення сумарних потоків крізь площини, яким відповідають проєкції, позначені на рис. 1, а лініями B2, B1, B3, причому лінія B2 відповідає площині перерізу магнітопроводу на рівні $z = 0$ (потік крізь цю поверхню позначаємо Φ_0); лінія B1 відповідає площині бокової поверхні магнітопроводу від вісі R до z -координати висоти розташування центру сегменту обмотки, для якого проводяться обчислення магнітного потоку (потік крізь цю поверхню позначаємо Φ_2); лінія B3 відповідає проєкції кільцевого сегмента круга, площа якого є перпендикулярною вісі Z, з внутрішнім радіусом, який дорівнює радіусу стрижня магнітопроводу та з зовнішнім радіусом, який дорівнює R-координаті центру сегменту обмотки, для якого проводяться обчислення потоку (потік крізь цю поверхню позначаємо Φ_1).

Визначаємо питому кількість витків для кожного сегмента обох частин обмотки за формулою

$$\alpha_i = S_i / \sum_{i=1}^n S_i, \quad (1)$$

де S_i – площа перетину i -го сегменту обмотки з загальної кількості n сегментів.

Обчислюємо повне потокозчеплення для всієї обмотки за формулою

$$\Psi_s = W_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^n (\Phi_0 + \Phi_1 - \Phi_2) \cdot \alpha_i \right), \quad (2)$$

де W_1 – загальна кількість витків обмотки автотрансформатора. Аналогічно, за формулами (1), (2) визначаємо потокозчеплення для низьковольтної частини обмотки (враховуючи відповідні j -питомі площини). У підсумку, використовуючи аналогічний [1] підхід, визначаємо ефективну приведену до загальної кількості витків індуктивність розсіювання за формулою

$$L_s = W_1^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n (\Phi_1 - \Phi_2) \cdot \alpha_i - \sum_{j=1}^m (\Phi_1 - \Phi_2) \cdot \alpha_j \right) / I, \quad (3)$$

де m – кількість сегментів низьковольтної частини обмотки.

На рис. 2 представлено результати розрахунків ефективної приведені індуктивності розсіювання для її певних сталих значень відносно величини повної індуктивності обмотки автотрансформатора (y %).

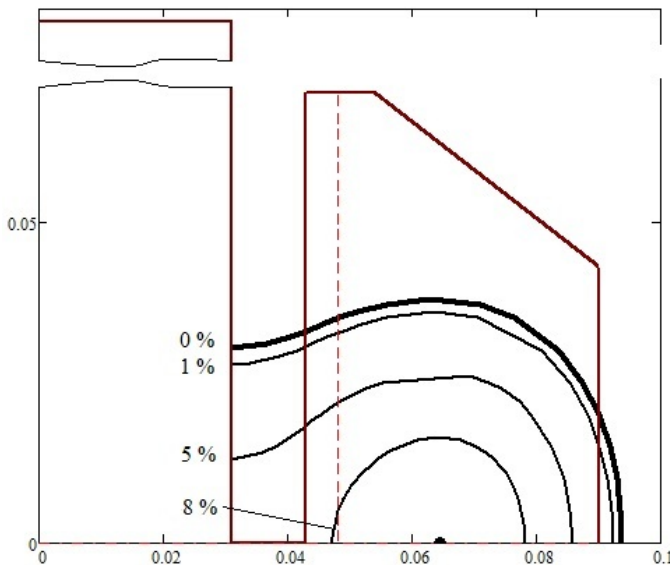


Рис. 2

На рис. 2 побудовані геометричні місця точок, в яких значення ефективної приведені індуктивності розсіювання буде приймати певні фіксовані сталі значення, що може бути використано для вибору форми та розташування вторинної обмотки.

Аналогічно розрахунку для автотрансформатора виконуються розрахунки потоків та індуктивності розсіювання для трансформатора, з урахуванням розташування його обмоток.

Перевагою розробленого методу розрахунку ефективної індуктивності розсіювання є те, що з певними змінами він може бути застосованим для вибору схем заміщення електромагнітних систем як трансформаторного, так і автотрансформаторного типу. При цьому виконано обґрунтування методу на основі сучасних програм математичного забезпечення.

Висновки.

1. Запропонована удосконалена модель дозволяє застосовувати для швидкого чисельного розрахунку індуктивності розсіювання відомі програми, що використовують метод скінченних елементів.
2. За результатом розрахунків можна наперед визначати геометричні місця точок, для яких ефективна індуктивність розсіювання буде приймати певні сталі значення.
3. Особливістю розробленого методу є виключення з підсумкових формул індуктивності розсіювання магнітного потоку магнітопроводу, хоча його непрямий вплив може проявлятися через значення відносної магнітної проникності матеріалу магнітопроводу.

1. *Лейтес Л. В.* Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
2. *Тиховод С. М., Романиченко Г. Н., Афанасьева И. О.* Расчет индуктивностей обмоток трансформатора, обусловленных магнитными потоками в воздухе // Электромеханика і енергозберігаючі системи. – 2011. – Вип. 3. – С. 149-154.
3. *В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран* Визначення картини поля обмоток високовольтного трансформатора напруги // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №3. – С. 21-23.

УДК 621.314.222.8

РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ ОБМОТОК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Бржезицкий В.А., Гаран Я.А., Десятов О.М.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

e-mail: brzhezitsky@mail.ru; garan@ua.fm; oleg_desyatov@ukr.net

Рассмотрены возможности расчета индуктивности рассеяния обмоток высоковольтных измерительных трансформаторов и автотрансформаторов с целью дальнейшего использования результатов при определении их характеристик по соответствующим схемам замещения. Предложена модель расчета индуктивности рассеяния для цилиндрических обмоток и магнитных систем с помощью программного обеспечения, которое использует численные методы конечных элементов. Определены формулы расчета индуктивности рассеяния с использованием данных числовых расчетов. Получены расчетные кривые, которые соответствуют определенным уровням потока рассеяния в обмотках. Библи. 2, рис. 2.

Ключевые слова: индуктивность рассеяния, высоковольтный трансформатор напряжения, автотрансформатор, метод конечных элементов, поток рассеяния

Leakage Inductance Calculation of High-Voltage Transformer Windings by Means of the Software using the Finite Elements Method

Brzhezitsky V.O., Garan Ja.O., Desyatov O.M.

National Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute”

37, pr. Peremogy, 03056, Kyiv-56, Ukraine,

e-mail: brzhezitsky@mail.ru; garan@ua.fm; oleg_desyatov@ukr.net

Possibilities of a leakage inductance calculation of high-voltage measurement transformer and autotransformer windings for the purpose of the further use of results at definition of their characteristics on corresponding equivalent circuits are observed. It is offered a leakage inductance calculation model for cylindrical windings of magnetic systems by means of the software which uses numerical methods of finite elements. It is offered formulas of a leakage inductance calculation with use of the data numerical calculation. Calculated curves which correspond to certain levels of a leakage inductance of windings are gained. The developed method of an effective leakage inductance calculation can be applied to sampling of magnetic systems equivalent circuits both transformer, and autotransformer type. This method allows using various software packages of calculation by a finite elements method. References 2, figures 2.

Key words: leakage inductance, high-voltage transformer, autotransformers, finite elements method, leakage flux

1. *Lejtes L.V.* Electromagnetic calculations of transformers and reactors. – Moskva: Enerhiia, 1981. – 392 p. (Rus)
2. *Tihovod S.M., Romanichenko G.N., Afanasieva I.O.* Calculation of inductance of the transformer windings caused by magnetic fluxes in air // Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy. – 2011. – Rel. 3. – Pp. 149-154. (Rus)
3. *V. O. Brzhezitsky, Ja. O. Garan* Definition of the field pattern of the high-voltage transformer // Elektrotehnika і Elektromekhanika. – 2012. – №3. – p. 21-23. (Ukr)

Надійшла 30.01.2014