

УДК 621.3.013.1

Яримбаш Д.С.¹, Кучерявий А.В.²

¹ д-р техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

² асп. НУ «Запорізька політехніка»

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НЕРОБОЧОГО ХОДУ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРУ

Однофазні трансформатори малої потужності (ОТМП) отримали широке розповсюдження в різних електротехнічних установках, різноманітних пристроях для передачі і переробки інформації, системах автоматики. За своєю фізичною природою процес роботи ОТМП по суті такий же, як в трансформаторах середньої і великої потужності, але деякі параметри і величини, що пов'язані з потужністю трансформатора, є значно відмінними. Зокрема, струм неробочого ходу, який може сягати 50% значення первинного робочого струму трансформатора, величина номінальної напруги короткого замикання.

Втрати при роботі ОТМП поділяють на неробочого ходу і короткого замикання. Втрати неробочого ходу виникають внаслідок перемагнічування активної сталі осердя. Вони вважаються постійною складовою повних втрат потужності і залежать від якості трансформаторної сталі (марки, товщини), технології та якості виготовлення магнітної системи, якості проектування магнітопроводу. Останнім часом всі бі-

льше уваги приділяється саме рівню втрат неробочого ходу, рівень яких закладається ще на етапі конструкторської підготовки виробництва.

Якість конструкторської підготовки виробництва визначається достовірністю математичного опису процесів, що протікають при роботі ОТМП, а саме електромагнітних процесів перетворення електричної енергії змінного струму. Параметри режимів неробочого ходу, окрім конструктивних особливостей магнітної системи, визначаються впливом ефектів гістерезису і вихрових струмів, що обумовлюють гармонійний склад струму неробочого ходу, рівень питомих втрат і питомої потужності намагнічування.

В основному моделювання роботи трансформаторів базується на аналітичних або скінчено-елементних моделях [1]-[5]. Аналітичні моделі характеризуються відносною простотою та обчислювальною ефективністю, але не завжди адекватно і достовірно враховують конструктивні особливості і описують процеси, що протікають в самому трансформаторі [3]. Завдяки розвитку комп'ютерної техніки та спеціалізованого програмного забезпечення, поширення набули скінчено-елементні моделі. Вони дозволяють враховувати конструктивні особливості магнітної системи ОТМП і властивості матеріалів [4]. Їх головний недолік пов'язаний з необхідністю наявності значних обчислювальних ресурсів. Скінчено-елементні моделі не враховують вплив параметрів і процесів у зовнішньому по відношенню до трансформатора ланцюзі. Це обмежує можливості розрахункових моделей трансформаторів і ускладнює комплексний облік всіх факторів. Таким чином, для розробки повної і точної моделі трансформатора, що враховує всі фактори, необхідно подальший розвиток методів, які забезпечать спільну реалізацію схемних і скінчено-елементних моделей.

Метою роботи була розробка розробка і реалізація математичної моделі, яка враховує параметри зовнішнього ланцюга, комплексний вплив ефектів і конструктивних параметрів ОТМП параметри роботи в режимі неробочого ходу.

Комплексна математична модель повинна включати модель зовнішнього ланцюга і модель самого трансформатора. При цьому доцільно модель зовнішнього ланцюга уявити еквівалентною до схемної моделі, а модель трансформатора геометричною моделлю і моделлю електромагнітних полів, що описує процеси перетворення енергії змінного струму. Схемна модель зовнішнього по відношенню до трансформатора ланцюга може бути представлена ЕРС системи і еквівалентним комплексним опором, яке може мати активний, активно-індуктивний або активно-ємнісний характер. Модель електромагнітних процесів описується системою диференціальних рівнянь електромагнітного поля у фор-

мулюваннях напруженості магнітного і електричного поля, векторного магнітного потенціалу та індукції магнітного поля [4].

На внутрішніх границях розрахункової області задаються умови сполучення тангенціальних складових напруженості магнітного поля [4]. На зовнішніх – приймаються однорідні граничні умови [4].

Реалізація запропонованої комплексної моделі для режиму неробочого ходу розглядалася на прикладі однофазного трансформатора ТБС2-0.1 в програмному середовищі FEMM, який є безкоштовним та відрізняється простотою використання та точністю. Основні розміри і параметри трансформатора:

$$\begin{aligned}l_l &= 56 \text{ мм}; \\l_{sy} &= 18 \text{ мм}; \\h_{sy} &= 18 \text{ мм}; \\h_l &= 36 \text{ мм}; \\d &= 36 \text{ мм}; \\l_w &= 50 \text{ мм}; \\U_{HV} &= 380 \text{ В}; \\W_{HV} &= 1360; \\W_{LV} &= 147.\end{aligned}$$

Кістяк трансформатора збирається з пластин гарячекатаної тонколистової сталі марки 1511 товщиною листа 0.3 мм. Магнітна система складена з пластин прямокутної форми з прямими стилями. Властивості цієї сталі задавались кривою намагнічування

Для покращення результатів моделювання та скорочення часу ініціалізації процесу проектування в даній роботі застосовувалось поєднання програмного забезпечення FEMM та Octave [5], [6]. Також це поєднання дозволить при дистанційному керуванні FEMM за допомогою GNU Octave ідеально проектувати і отримувати електромагнітні характеристики.

В роботі за допомогою скрипту, який запускався в програмному середовищі GNU Octave та моделі трансформатора виконувався автоматичний розрахунок вектору струму неробочого ходу. Розрахунок базується на використанні матриці імпедансу трансформатора без навантаження (тобто відкрита вторинна обмотка) з первинної обмоткою, що працює при номінальній проектній напрузі. Приблизний імпеданс використовується для масштабування похибки між необхідним і обчисленим напруженнями для отримання нового наближення вектора струму.

Враховуючи те, що задача є нелінійною, ітераційний розрахунок відбувається до тих пір, поки похибка між необхідною і обчисленою напругою на клеммах не стане меншою ніж 0,1 В.

Запропонована комплексна математична модель трансформатора, що заснована на синтезі схемної моделі зовнішнього електричного

кола, геометричної моделі та моделі електромагнітних полів, дозволила з високою достовірністю описати процеси електромагнітного перетворення енергії в трансформаторі. Завдяки цьому було враховано комплексний вплив ефектів гістерезису, вихрових струмів, конструктивних параметрів і параметрів зовнішньої ланцюга на процеси і параметри трансформатора.

Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними показало високу точність комплексної моделі. Похибка по амплітуді струмів неробочого ходу не перевищує 0,38%, по фазі 0,45%. Похибка по втратах неробочого ходу не перевищує 0,78%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Dommel H. W. Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book); 2nd ed. [Text] / H. W. Dommel, S. Bhattacharya, V. Brandwajn, H. K Lauw, L. Marti. Portland, OR: Bonneville Power Admin., 1992.

2. Kasztenny B. An improved transformer inrush restraint algorithm [Text] // Kasztenny B., Kulidjian A. / 53rd Ann. Conf. Protective Relay Engineers. GER-3989A, College Station, April 11-13. – 2000.

3. Jamali M. Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Transformer and Operating [Text] / M. Jamali, M. Mirzaie, S. Asghar-Gholamian / Elektronika and Elektrotechnika. – 2011. – Vol. 109. – No. 3. – pp. 17–20. DOI: 10.5755/j01.eee.109.3.162.

4. Yarymbash D. Analysis of inrush currents of the unloaded transformer using the circuit-field modelling methods [Text] / D. Yarymbash, S. Yarymbash, M. Kotsur, T. Divchuk \ Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 3. – No. 5/93. – pp. 6–11, DOI: 10.15587/1729-4061.2018.134248

5. Finite Element Method Magnetics: <https://www.femm.info>

6. CNU Octave: <https://octave.org/>