

УДК621.318.1

Яримбаш Д.С.¹, Яримбаш С.Т.²

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

² канд. техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

ВПЛИВ ГАРМОНІЙНОГО СКЛАДУ СТРУМІВ НАМАГНІЧУВАННЯ НА ВИЗНАЧЕННЯ ГІСТЕРЕЗИСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СТАЛЕЙ

На сучасному етапі для розрахунку проектних параметрів і характеристик силових трансформаторів широко застосовується польове моделювання процесів електромагнітного перетворення енергії у дослідних і експлуатаційних режимах роботи. Відомо, що достовірність і точність даних моделювання силових трансформаторів значною мірою визначається, точністю завдання властивостей феромагнітних матеріалів. Тому значна увага має приділятися точності математичних описів їх гістерезисних властивостей. Проте застосування відомих поширених моделей гістерезису [1, 2] для визначення характеристик намагнічування сучасних марок електротехнічних сталей призводить до істотних похибок, значення яких для напруженості магнітного поля може перевищувати 25-30%. Тому задача підвищення точності математичних описів гістерезисних властивостей сучасних марок електротехнічних сталей є актуальною для удосконалення теорії і практики проектування силових трансформаторів.

Математичні моделі Джилса-Аттертона або Чана [1, 2], що описують ефекти гістерезису, потребують розв'язання нелінійних алгебраїчних і диференціальних рівнянь на кожному часовому кроці моделювання. Це збільшує похибки і час розрахунків, особливо для токів намагнічування несинусоїдної часової форми.

Метою роботи є побудова узагальненої математичної моделі, що із високою точністю і обчислювальною ефективністю описує гістерезисні властивості сучасних марок електротехнічних сталей на основі даних експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження магнітних характеристик електротехнічної сталі марки 3408 проводилися на апараті Епштейна, завантаженому стальними пластинами товщиною 0,27 мм, які шихтувалися у рамку із прямими стиками у кутах. Загальна маса завантаження електротехнічної сталі склала 1,032 кг. Апарат Епштейна було обладнано обмотками збудження і вимірювання, кількість витків яких склала 300 і 100 витків відповідно. Обмотка збудження була підключена до джерела

живлення змінного струму з регульованою напругою синусоїдної часової форми. За допомогою багатоканального цифрового осцилографу синхронізовано у часі здійснювалася реєстрація струмів обмотки збудження і напруги вимірювальної обмотки. Також визначався їх гармонійних склад, а саме: амплітуди і фази гармонійних складових.

На основі гармонійного аналізу цифрованих експериментальних даних було встановлено, що напруга вимірювальної обмотки була синусоїдною у часі, а на струм збудження найбільший вплив мали непарні гармоніки: 1-а (63.21%), 3-я (30.61%), 5-а (4.77%) і 7-а (1.91%). Шляхом інтегрування синусоїдної напруги вимірювальної обмотки із врахуванням числа її витків та активної площі поперечного перерізу зразків електротехнічної сталі була визначена часова функція магнітної індукції. Часова функція напруженості магнітного поля визначалася для числа витків обмотки збудження і сумарної довжини осевих ліній прямокутного контуру зразків електротехнічної сталі.

Це дозволило визначити математичний опис гістерезисних нелінійних характеристик намагнічування електротехнічної сталі у параметричній гармонійній формі:

$$\begin{cases} B(\tau) = B[H((\tau))], & B(\tau) = B_{m,1} \cdot \cos(2\pi f\tau + \varphi_B), \\ H(\tau) = \sum_{i=1}^4 H_{m,2i-1} \cdot \sin[2(2i-1)\pi f\tau + \varphi_{H,2i-1}] \end{cases} \quad (1)$$

де поточний час τ є параметром, перший індекс m позначає амплітуди гармонік індукції B і напруженості H , а другий індекс – номер гармоніки.

Верифікація розрахункових характеристик намагнічування і експериментальних даних дозволила встановити, що для 1-ї гармоніки напруженості максимальне значення відносної похибки розрахунків гістерезисної характеристики намагнічування складає 37%, для 1-ї і 3-ї гармонік це значення зменшується до 4%, для 1-ї, 3-ї та 5-ї гармонік – до 1,56%, а додавання 7-ї гармоніки дозволяє обмежити похибку на рівні 0,64%.

Обчислення гістерезисної характеристики у параметричній гармонійній формі виключає додаткові процедури числового інтегрування. Так для миттєвого значення B достатньо визначити параметр часу

$$\tau_\delta = \{\arccos(B/B_m) - \varphi_B\} / (2\pi f)$$

і відповідне йому значення напруженості магнітного поля $H=H(\tau_p)$. З урахуванням 1,3,5, і 7-ї гармонійних складових точність такого визначення не буде перевищувати 1%, що повністю задовольняє практичним потребам

точності проектування силових трансформаторів із застосуванням спеціалізованим програм 3D польового моделювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Modeling Hysteresis Effects. – 13 p. – режим доступу <https://www.comsol.ru/forum/thread/attachment/64177/hysteresisloss-comsol3.5a-10327.pdf>
2. J. P. Bastos, A.N. Sadowski, Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods. Boca Raton: CRC Press, 2003. ISBN 9780203911174. DOI: 10.1201/9780203911174
3. Iványi, A. Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, Akademia Kiadó, Budapest, 1997