

УДК 621.3.013.1

Яримбаш Д.С.¹, Яримбаш С.Т.², Дівчук Т.Є.³

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

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

³ канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ГІСТЕРЕЗИСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНІЧУВАННЯ ЗАСОБАМИ ГАРМОНІЧНОГО АНАЛІЗУ

На сучасному етапі розвитку електроенергетики як для систем її генерації, так і для систем транспортування, розподілу і споживання значна увага має приділятися проблемам зниження реактивної потужності у мережах, сталих складових втрат активної потужності у режимах неробочого

ходу. Важливу роль у вирішенні даної проблематики відіграє впровадження нового і модернізація діючого електрообладнання на основі застосування нових феромагнітних матеріалів із покращеними магнітними характеристиками і технологічними властивостями [1].

Одночасно необхідно вирішувати питання підвищення якості проектних розробок на основі ефективних математичних підходів для високоточного відображення характеристик і властивостей діючого, модернізованого і нового силового електрообладнання. Як правило, перетворення електричної енергії змінного струму одних параметрів в інші параметри потребує локалізації магнітних потоків в осердях електромагнітних перетворювачів електричної енергії. Для цього використовують осердя (остови), які шихтують за різними схемами із розкритих або штампованих листів електротехнічної сталі (гарячекатаної ізотропної, холоднокатаної ізотропної, холоднокатаної анізотропної або аморфної). Застосування у процесі виробництва електротехнічної сталі з покращеними властивостями має супроводжуватися вдосконаленням методів розрахунків на основі високоточного опису гістерезисних характеристик її намагнічування. Тому розробка моделей для математичного опису гістерезисної петлі намагнічування є актуальною задачею як на етапі проектування електрообладнання з покращеними параметрами і характеристиками, так і на етапах моніторингу його роботи і прогнозування залишкового ресурсу під час експлуатації.

Питанням математичного описання гістерезисних характеристик приділяється значна увага. Найбільше поширення у спеціалізованому програмному забезпеченні польових розрахунків отримала модель Джилса-Атертона [2]. Але визначення її параметрів з достатньою точністю ще залишається складною задачею для практиків. Навпроти, у практичних задачах, особливо, для визначення режимів неробочого ходу електрообладнання успішно використовують методи гармонічного аналізу [3]. Це створює підґрунтя для поширення області їх застосування для моделювання гістерезисних характеристик намагнічування сучасних феромагнітних матеріалів.

Метою роботи є розширення області застосування методів гармонічного аналізу для математичного опису гістерезисних характеристик намагнічування феромагнітних матеріалів у польових моделях електромагнітного перетворення електричної енергії змінного струму у режимах неробочого ходу електрообладнання.

Для визначення характеристик намагнічування зразки листової (рулонної) електротехнічної сталі завантажують в апарат Епштейна, який має обмотки збудження і вимірювання. По обмотках збудження, що з'єднуються із однофазним джерелом з регулюванням змінної синусоїдної напруги

живлення, протікає струм збудження. Цей струм вимірюється за допомогою біфілярного шунта з мінімально можливою індуктивністю. Застосування шунтів з мінімально можливою індуктивністю є обов'язковою умовою для мінімізації їх впливу на осцилограми струму. З виходів вимірювальної обмотки отримують сигнали для осцилограм напруги.

За дослідними даними часова форма осцилограм струму збудження істотно відрізняється від синусоїдної та характеризується піковими максимальними значеннями, які у 4-5 разів перевищують діючі значення струму збудження. Форма напруги вимірювальної обмотки є близькою до синусоїдної. Осцилограми вольт амперних характеристик (ВАХ) апарату Епштейна із завантаженими зразками електротехнічної сталі оцифровуються за допомогою програмного забезпечення цифрового осцилографа і отримують дискретне представлення ВАХ.

Для перетворення ВАХ змінні у часі сигнали вимірювальної обмотки інтегрують для перетворення у потокозчеплення. Потім для заданої кількості витків вимірювальної обмотки розраховують магнітний потік та індукцію в електротехнічній сталі. Із застосуванням математичного виразу закону повного струму для заданих розмірів полос з електротехнічної сталі визначають напруженість магнітного поля. Наведені розрахунки дозволяють отримати дискретне представлення гістерезисної характеристики намагнічування електротехнічної сталі. Аналогічно виконуються зворотні розрахунки для синусоїдної форми часової кривої напруженості магнітного поля і кривої індукції з ділянками сплющеної форми. Число членів гармонічних рядів напруженості або індукції визначається розмірністю векторів дискретних даних.

Застосування методів гармонічного аналізу дозволяє на основі дискретних масивів струмів і напруг отримати функціональне безперервне відображення кривих намагнічування із нерозривними похідними від першого до більш високих порядків. Така властивість похідних для гармонічної моделі гістерезисної характеристики намагнічування дозволяє забезпечити стійкість ітераційних процесів у польових розрахунках і зменшити кількість ітерацій на кожному часовому кроці розрахунків.

Верифікація даних прямих і зворотних розрахунків дискретних масивів індукції та напруженості показала, що одна і та ж сама точність досягається для різної розмірності рядів Фур'є. Так для синусоїдної форми індукції число членів ряду Фур'є для змінної у часі напруженості магнітного поля не буде перевищувати 7 з відносною похибкою до 0,5%. Проте для синусоїдної форми напруженості число членів ряду для часової кривої індукції має бути більшим 151 для того ж самого значення похибки.

На підставі викладених результатів дослідження можна зробити висновок, що опис гістерезисних характеристик намагнічування із

застосуванням методу гармонічного аналізу має переваги у забезпеченні стійкості ітераційних процесів для польових розрахунків методом кінцевих елементів [4]. Застосування такого підходу може бути ефективним тільки за умови, що сигнал вхідної напруги наближається до синусоїдної часової форми із мінімальними вищими гармонічними складовими. Однак такі обмеження є прийнятними для більшості практичних задач у режимах неробочого ходу силового електрообладнання різних типів і габаритів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Magnetic Models for ELECTRICAL MACHINES Jeremy Fiennes ©2015, 2019 Jeremy Fiennes All rights reserved JF Pubs, rod. DF250 km 3,5, cond. Euler Paranhos, Paranoá - DF, 73.255-010 Brazil

2. Yarymbash, D. An Application of Scheme and Field Models for Simulation of Electromagnetic Processes of Power Transformers. [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, I. Kylymnyk, T. Divchuk // 14th International Conference: Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), February 20-24, Lviv–Slavske, Ukraine. – 2018. – pp. 308–313. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336209

3. Taghikhani, M. A. Harmonic Modeling of Inrush Current in Core Type Power Transformers Using Hartley Transform [Text] / M. A. Taghikhani // IEEE, 2015. - vol. 11. - no. 2. - pp. 174–183. Available at: <http://ijeece.iust.ac.ir/article-1-741-en.pdf>.

4. Дівчук Т.Є. Уточнюючий підхід до визначення функціональних залежностей відносних магнітних проникностей анізотропних холоднокатаних електротехнічних сталей / Т. Є. Дівчук, Д. С. Яримбаш, С. Т. Яримбаш, І. М. Килимник, М. І. Коцур, Ю. С. Безверхня // Електротехніка та електроенергетика. - 2018. - № 2. - С. 6-15. DOI 10.15588/1607-6761-2018-2-1