

УДК 621.318.132:621.3.012.7

Килимник І.М.

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

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ГАРМОНІЙНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОПИСУ ГІСТЕРЕЗИСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СТАЛЕЙ

Розширення області застосування методів польових розрахунків для проектування електричних машин і силових трансформаторів ставить питання підвищення точності та спрощення алгоритмів побудови математичних моделей гістерезисних характеристик електротехнічних сталей.

Для опису характеристик електротехнічних сталей велике поширення отримала модель Джилса-Атертона. Деякі дослідники висловлюють думку, що ця модель дозволяє з високою точністю відобразити основну криву намагнічування. Проте точність моделі Джилса-Атертона залежить, насамперед, від точності визначення її коефіцієнтів. Це у свою чергу стає досить складною задачею і потребує розробки спеціальних підходів, у тому числі, розробки складних алгоритмів іноді для окремих характеристик електротехнічних сталей.

Крім того у програмному забезпеченні польового моделювання із статусом freeware, до якого мають вільний доступ викладачі і студенти закладів вищої освіти, як правило, відсутня можливість застосування моделі Джилса-Атертона у розрахунках електромагнітних полів в електричних машинах і трансформаторах. Тому актуальною стає задача уточненого опису гістерезисних характеристик на основі відомих методів і засобів гармонічного аналізу.

В задачах польового моделювання електричних машин і силових трансформаторів з урахуванням гістерезисних характеристик електротехнічної сталі можливі два способи їх визначення. В першому випадку ці характеристики визначаються як залежність індукції магнітного поля від його напруженості, а в іншому випадку як залежність напруженості магнітного поля від його індукції.

Для апробації обчислювальної ефективності відображення гістерезисних характеристик, які представлені моделлю Джилса-Атертона з відомими вже визначеними коефіцієнтами, здійснювалися розрахунки за обома параметричними підходами, де параметром був поточний час.

У першому випадку була задана часова крива індукції магнітного поля, яка визначалася основною гармонікою з частотою 50 Гц і за моделлю Джилса-Атертона розраховувалася часова крива напруженості для заданих моментів часу на протязі одного періоду змінного струму.

У другому випадку першою гармонікою змінного струму описувалася напруженість магнітного поля, а часова крива індукції магнітного поля розраховувалася за тією ж моделлю Джилса-Атертона (розраховувалася для тих самих моментів часу на протязі того ж самого періоду змінного струму).

Для розрахованих масивів даних при несинусоїдних кривих індукції або напруженості магнітного поля будувалися функції кубічної сплайн-інтерполяції, що дозволяло отримати часові функціональні залежності з неперервними другими часовими похідними.

Отримані часові функції сплайн інтерполяції розкладалися у гармонічні ряди Фур'є із складовими для непарних гармонік. Верифікація обох параметричних підходів здійснювалася засобами Comsol Multiphysics з подальшою нормалізацією розрахованих значень індукції і напруженості магнітного поля, які обмежувалися інтервалом $[-1;1]$.

Числова ефективність кожного із параметричних способів математичного опису гістерезисних характеристик намагнічування на основі гармонічних рядів оцінювалася по кількості гармонік, які були необхідні для зменшення відносної похибки розрахунків до 1%.

Для гістерезисних характеристик, представлених залежністю напруженості магнітного поля від його індукції в феромагнітному матеріалі, для зменшення відносної похибки до 1% достатньо було обмежитися 11-ю гармонікою. Тобто гармонійний ряд мав 5 непарних гармонійних складових.

У випадку залежності індукції від напруженості магнітного поля для зменшення похибки до 1% необхідно було використовувати 41 гармоніку, а отже кількість непарних гармонік збільшувалася до 21, що відповідало розмірності вектора значень часу.

Порівняння обох підходів дозволило зробити висновок, що застосування методів гармонічного аналізу для опису гістерезисних характеристик електротехнічних сталей, дозволяє зробити висновок, що у разі завдання вихідних синусоїдних напруг живлення в задачах моделювання індукторів або силових трансформаторів параметричний метод опису гістерезисної характеристики намагнічування забезпечує точність і числову ефективність, яка відповідає точності та ефективності метода Джилса-Атертона.

За таких умов параметричний підхід забезпечує істотне спрощення числової реалізації польових моделей індукторів і силових трансформаторів, дозволяє зменшити витрати часу і ресурсів, використовувати програмне забезпечення із статусом freeware як у навчальному процесі, у наукових дослідженнях і для вирішення складних інженерних задач на практиці