

МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ЛОКАЛЬНОЮ ЗМІНОЮ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА

І. А. Колотило, ас.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна

E-mail: i.a.kolotylo@gmail.com

Проведено моделювання магнітного поля асинхронного двигуна методом скінченних елементів у програмному пакеті FEMM з урахуванням локальної зміни властивостей сталі.

Ключові слова: асинхронний двигун, метод скінченних елементів, властивості сталі, сердечник статора.

Вступ. У ході тривалої експлуатації та ремонтів в асинхронних двигунах (АД) змінюються властивості міжлистової ізоляції шихтованих сердечників статорів [1, 2]. При цьому зубцева зона сердечника характеризується більш суттєвою зміною та нерівномірним розподілом властивостей, ніж ярмо. Це призводить до виникнення локальних короткозамкнених контурів за довжиною та об'ємом сердечника з нерівномірним розподілом температури і магнітної індукції. Як наслідок – виникнення перегрівів обмотки на локальних ділянках та збільшення магнітної складової вібрації електричної машини (ЕМ). Невраховання нерівномірності зміни властивостей сердечників призводить до неточного визначення робочих характеристик ЕМ [2, 3], що обумовлює їх невідповідну експлуатацію і, як наслідок, швидкий вихід з ладу через перегрів обмоток та надмірну вібрацію.

Оскільки парк ЕМ фактично не оновлюється, а стан його з кожним роком все більше погіршується, актуальним є питання використання АД з урахуванням ступеню їх зношування, реальних параметрів та характеристик, оскільки такий підхід дозволяє ефективніше використовувати дані АД.

На сьогодні для аналізу електромагнітних процесів в ЕМ переважно використовуються колові методи [4], що передбачають використання схем заміщень, параметри яких у неявному вигляді містять інформацію щодо особливостей конструкції і схем з'єднання обмоток машини, властивостей магнітопроводу тощо. Ці методи базуються на цілому ряді спрощень [3, 4], що суттєво впливає на точність розрахунків. Альтернативою застосування колових методів для дослідження електромагнітних процесів в електричних машинах є використання польових методів [4].

Аналіз попередніх досліджень. Основні процеси в ЕМ пов'язані з магнітним полем [4]. Тому одним із перспективних шляхів діагностики ЕМ є безпосередній його розрахунок. Стрімкий розвиток сучасної обчислювальної техніки, програмних засобів і пакетів прикладних програм обумовлює використання універсального інструменту для розрахунку електромагнітних параметрів ЕМ.

Чисельними методами, що отримали широкого розповсюдження на практиці [4], є диференційні методи – метод скінченних різниць (МСР) і метод скінченних елементів (МСЕ), а також інтегральні методи – метод інтегральних рівнянь (МІР) і метод граничних інтегральних рівнянь (МГІР).

Диференційні методи МСР і МСЕ знайшли широкого використання в електротехніці, причому на даний час більш розповсюдженим є МСЕ. Це пояснюється тим, що у рамках даного методу можна враховувати складну геометрію розрахункової області, нелінійність фізичних характеристик конструктивних елементів та однотипність обчислювальних процедур при відносно простій матриці системи рівнянь, розрахунок якої легко реалізовується на ЕОМ.

Питанням польового аналізу за МСЕ присвячено роботи [4, 5], в яких розглядаються теоретичні основи розрахунку магнітного поля у поперечному перерізі ЕМ; особливості визначення електромагнітних параметрів ЕМ на основі чисельних розрахунків магнітних полів; гармонічний аналіз ЕРС на основі чисельних розрахунків обертових магнітних полів; особливості використання програмного забезпечення для розрахунку магнітних полів ЕМ. Проаналізований матеріал дозволяє зробити висновок, що використання чисельних розрахунків магнітних полів ЕМ дозволяє більш наочно дослідити фізичні явища, що в них протікають, та дає точніший результат у порівнянні з коловими моделями, а розвиток комп'ютерної обчислювальної техніки розширює можливість застосування чисельних методів розрахунку з використанням додатків для двовимірного та тривимірного моделювання магнітних полів в ЕМ.

Згідно з [6–8], для визначення параметрів АД за МСЕ перспективним є використання програм комп'ютерних розрахунків [7].

Мета роботи. Розрахунок магнітного поля АД з урахуванням нерівномірності розподілу властивостей сталі сердечника статора.

Матеріал і результати дослідження. Польові методи базуються на рівняннях поля, сформованих Дж. Максвеллом у 1873 р. [4], що встановлюють взаємозв'язок між векторними польовими функціями, характеристиками джерел поля і фізичними параметрами матеріальних середовищ. Оскільки АД характеризується зміною властивостей середовища поширення магнітного поля, отримати точніший результат можна при використанні методів, що враховують ці зміни.

Польовий підхід дозволяє аналізувати як статичні, так і динамічні режими роботи АД [4]. У статичних режимах роботи струми в обмотках є відомими і незмінними у часі, тому безпосередньо за розрахунками електромагнітного поля визначаються інтегральні електромагнітні параметри та робочі характери-

стики. При дослідженні перехідних процесів і динамічних режимів роботи ЕМ струми в обмотках є невідомими функціями часу, а заданими можуть бути напруги, прикладені до обмоток ЕМ. У такому випадку застосовуються коло-польові математичні моделі (КПММ) [4], які передбачають сумісне використання диференціальних рівнянь електричних кіл обмоток і рівнянь нестационарного електромагнітного поля активних частин ЕМ.

У процесі електромеханічного перетворення енергії в АД виникає єдине силове фізичне поле, окремими складовими якого є поля електромагнітних, теплових і механічних величин. Зростання втрат призводить до нагрівання сердечника і, як результат, до зміни розподілу електромагнітного поля. Тобто, аналізуючи характеристики машини, необхідно враховувати взаємний вплив окремих складових поля машини.

Як було показано в [1, 2], у процесі ремонту відбувається суттєве погіршення електричних та магнітних властивостей сталі сердечників статорів АД, що впливає на зміну параметрів останніх. Було оцінено зміни властивостей ярма і зубцевої зони сердечника статора, що піддавався відпалюванню та досліджувався на механічні пошкодження після відновлення обмотки.

Встановлено, що зміни властивостей ярма є незначними та характеризуються рівномірним розподілом за його об'ємом. Так, спостерігається зменшення магнітної індукції до 7,57% та зростання втрат у сталі до 18,69%. Це пояснюється монолітністю конструкції та жорсткою фіксацією листів ярма.

Навпаки, властивості сталі зубцевої зони змінюються у більшій мірі, спостерігається приріст втрат на окремих ділянках до 75%, що значно перевищує зростання втрат у ярмі.

Отже, дані результати свідчать про нерівномірність розподілу властивостей сталі сердечника статора за його довжиною та об'ємом, особливо у зубцевій зоні.

На даний час для комп'ютерної реалізації МСЕ розроблено програмно-обчислювальні комплекси FEMM, ANSYS, COMSOL та інші [8], що дозволяють досліджувати двовимірні та тривимірні моделі ЕМ.

У результаті аналізу програмних пакетів було обґрунтовано вибір пакету FEMM з міркувань на те, що, по-перше, для моделювання магнітного поля АД та розрахунку електромагнітних параметрів на його основі достатньо двовимірної постановки задачі [4], по-друге, у FEMM інтегровано мову програмування LUA 4.0, що дозволяє автоматизувати та розширити обчислювальний процес, по-третє, на відміну від ANSYS та COMSOL, FEMM вільно поширюється із повним доступом до всіх матеріалів на сайті розробника [7], займає невеликий об'єм та простий у використанні, маючи при цьому відносно потужний математичний апарат.

Об'єктом моделювання обрано трифазний АД 4A90L6Y3, попередній розрахунок якого було проведено за [3] для можливості оцінки отриманих результатів моделювання. Дані двигуна взято згідно з

[9]: потужність $P_n = 1,5 \text{ кВт}$, номінальна лінійна напруга $U_n = 380 \text{ В}$, частота $f = 50 \text{ Гц}$, синхронна частота обертання 1000 об/хв. При розрахунках осердя використано геометричні розміри, конструктивні дані, параметри обмоток, сердечників статора і ротора тощо, взяті відповідно до довідникових даних [3, 9].

Для розрахунку магнітного поля АД у програмному пакеті КОМПАС було реалізовано графічну модель двигуна, яку в подальшому імпортовано в FEMM (рис. 1).

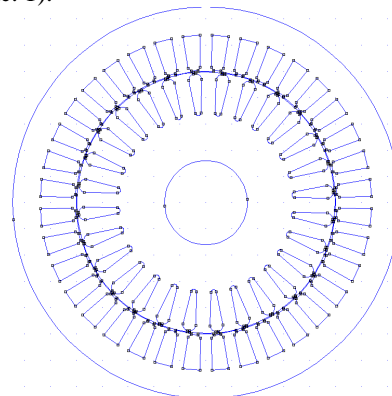


Рисунок 1 – Модель двигуна 4A90L6Y3

Для встановлення властивостей матеріалів складових елементів АД обрано матеріали з бібліотеки FEMM: «Air», яким визначений повітряний проміжок, «Aluminium 1100» – матеріал обмотки ротора, «AWG20» – матеріал обмотки статора. В якості матеріалу магнітної системи статора була вибрана сталь 2013, параметри якої враховуються кривою намагнічування, оскільки у стандартній бібліотеці FEMM така сталь відсутня. З цією метою був заданий ряд значень $B = f(H)$, за якими побудовано криву намагнічування даної сталі (рис. 2). Також було введено параметри, які враховують шихтовку сердечника: коефіцієнт заповнення сталі статора і ротора 0,97 та товщину листа 0,5 мм.

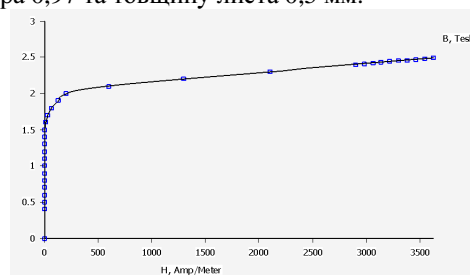


Рисунок 2 – Крива намагнічування сталі 2013, задана у FEMM

Розрахунок розповсюдження магнітного поля обмежувався поверхнею сердечника статора, де для векторного магнітного потенціалу було задано умову Діріхле $A_z = 0$ [6].

При встановленні параметрів обмотки за [9] визначено тип (однослойна, концентрична) і число ефективних провідників на паз (51 виток). Згідно [3], знайдено намагнічуючий струм $I_\mu = 2,217 \text{ А}$, який став основою для моделювання магнітного поля АД

за МСЕ у програмі FEMM. Струми в обмотках під час розрахунків були прийняті синусоїдними для моменту часу, коли струм фази A дорівнює амплітудному значенню $i_{SA} = I_{Sm} = \sqrt{2}I_{\mu} = 3,135A$. Тоді струми у фазах B і C : $i_{SB} = i_{SC} = -0,5I_{Sm}$.

На першому етапі проведено розрахунок магнітного поля моделі, в якій властивості сердечника статора були заданими однаковими на всіх його ділянках, а крива намагнічування задана згідно довідкових даних [3]. При проведенні розрахунку магнітного поля отримана картина силових ліній, наведена на рис. 3. Аналізуючи отриману картину розподілу магнітного поля та результати чисельних розрахунків, було зроблено висновок, що розроблена модель повністю відповідає фізичним уявленням про структуру магнітного поля даного АД.

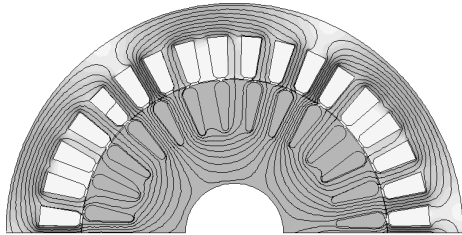


Рисунок 3 – Магнітне поле АД з рівномірними властивостями сталі сердечника статора

На наступному етапі моделювання для врахування нерівномірності властивостей сердечника статора його було розбито на основні блоки: ярмо та зубці (рис. 4).

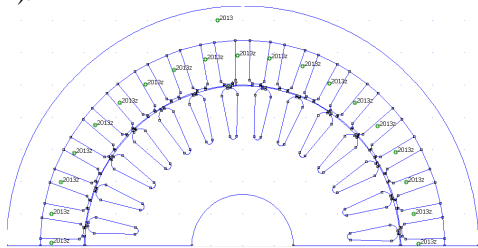


Рисунок 4 – Розбиття пакета статора АД на окремі блоки: ярмо та зубці

Для даних блоків задано криві намагнічування до та після ремонту, що відповідають кривим 1 та 2 на рис. 5, 6. Перша крива в обох випадках задана відповідно до довідкових даних [3] для сталі 2013, друга крива отримана з урахуванням зменшення магнітної індукції після ремонту у ярмі на 10 %, у зубцях – на 70 % [1].

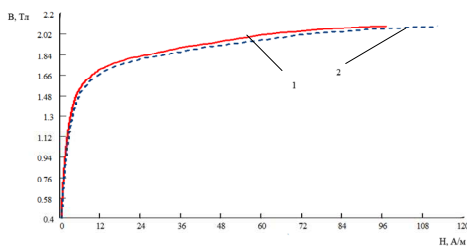


Рисунок 5 – Криві намагнічування сталі 2013 для ярма

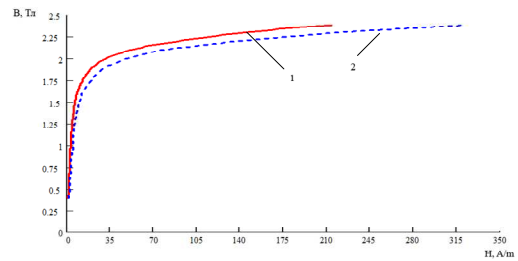


Рисунок 6 – Криві намагнічування сталі 2013 для зубців

Розрахунок електромагнітної сили проводився методом, що заснований на еквівалентній заміні розподілених об'ємних сил у тілі силами поверхневого натягнення на його поверхні [4]. Ключовим у цьому методі є поняття тензора магнітного натягнення \bar{T} [10]. Якщо S – площа поверхні, що обмежує виділений об'єм V електромеханічної системи, то тензор магнітного натягнення вводиться таким чином, щоб виконувалась рівність:

$$\bar{F}_V = \int_V \bar{f}_V dV = \int_S \bar{T} dS, \quad (1)$$

де \bar{F}_V – вектор повної сили, що діє на тіло; \bar{T} – тензор магнітного натягнення.

З виразу (1) виходить, що якщо знайти розподіл тензора магнітного натягнення на поверхні ротора, то вектор повної сили, що діє на нього, визначається інтегруванням тензора по поверхні тіла. Також з (1) витікає загальне співвідношення:

$$\bar{T} = \frac{dF_V}{dS}. \quad (2)$$

Вектор тензора магнітного натягнення представляється у вигляді:

$$\bar{T} = \bar{n}T_n + \bar{\tau}T_\tau, \quad (3)$$

де \bar{n} – орт нормалі, $\bar{\tau}$ – дотичний орт, T_n , T_τ – нормальна та дотична складова тензора магнітного натягнення.

Нормальна складова тензора натягнення знаходиться за виразом:

$$T_n = \frac{1}{2\mu} (B_n^2 - B_\tau^2), \quad (4)$$

де μ – магнітна проникність, B_n – нормальна складова магнітної індукції, B_τ – тангенціальна складова магнітної індукції.

Нормальна складова повної сили знаходиться інтегруванням поверхні, що охоплює ротор:

$$F_n = \frac{1}{2\mu} \int_S (B_n^2 - B_\tau^2) dS. \quad (5)$$

Аналогічно для визначення тангенціальних складових тензора натягнення та повної електромагнітної сили використовують вирази:

$$T_\tau = \frac{B_n B_\tau}{\mu}; \quad (6)$$

$$F_\tau = \int_S B_n B_\tau dS. \quad (7)$$

При проведенні розрахунку для різних властивостей сердечника статора отримано значення для повної електромагнітної сили (табл. 1).

Таблиця 1 – Складові повної електромагнітної сили

| Вектор сили, F_i | Нормальна складова сили F_n , Н | Тангенціальна складова сили F_t , Н | Повне значення сили F , Н |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| F1 | 601.05 | -52.84 | 603,37 |
| F2 | 635.56 | -59.36 | 638.33 |
| F3 | 716.29 | -60.98 | 718.881 |

Просторовий розподіл сил, отриманих при розрахунках, представлено на рис. 7.

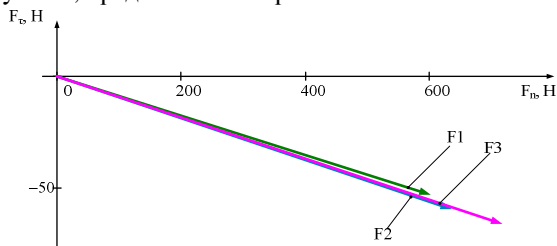


Рисунок 7 – Сили, що виникають на валу АД при різних властивостях сталі статора

Тут F1 – сила, розрахована для рівномірного розподілу властивостей сталі по всьому сердечнику; F2 – сила, отримана для випадку окремого врахування властивостей ярма та зубців, причому властивості ярма та зубцевої зони задано кривими намагнічування 1 (рис. 5, 6); F3 – сила, розрахована з урахуванням зміни властивостей сталі сердечника статора – криві намагнічування 2 (рис. 5, 6).

Отже, при рівномірному завданні властивостей для всього сердечника статора повне значення сили складає $F1 = 603,37 \text{ Н}$. При розбиванні сердечника на ярмо та зубці і окремого завдання їх властивостей кривою намагнічування до ремонту сила F2 зростає на 5,8 %, а з урахуванням зміни кривої намагнічування після ремонту F3 зростає на 19 %.

Висновки. 1. Як показали отримані результати, запропонований спосіб розрахунку магнітного поля

АД дозволяє враховувати нерівномірності властивостей сердечника статора, чого неможливо досягти при використанні суто колових методів.

2. У результаті роботи було отримано розподіл зусиль, що додатково виникають в АД внаслідок нерівномірності розподілу магнітного поля, що буде використано при подальших розрахунках їх вібраційних параметрів.

ЛІТЕРАТУРА

- Петров Р.Н., Прус В.В. Направления и пути повышения эффективности диагностики электро-технической стали пакетов статоров // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ. – Вип. 6/2003 (23). – С. 50–54.
- Максимов М.Н., Родькин Д.И. Обоснование пересмотра объема послеремонтных испытаний асинхронных двигателей // УКРНИЭНТИ, № 1830. – 1993.
- Гольберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1984. – 431 с.
- Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: Навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 192 с.
- Мильх В.И. Расчет электромагнитного поля в поперечном сечении электрических машин // Электротехника. – 1982. – № 12. – С. 46–49.
- Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, October 16, 2010 // <http://www.femm.info/wiki/Documentation/>
- <http://www.femm.info/wiki/HomePage>.
- Ramon Bargallo. Finite Elements Electrical Engineering, 2006// <http://www.aedie.org/eej/webrevista/articulos/EFRBP2006FULL.pdf>
- Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболевская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.
- Тамм И.Е., Основы теории электричества: Учебное пособие для вузов. – М.: Наука, 1989. – 504 с.

Стаття надійшла 30.06.2011 р.
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.
Прусом В.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЛОКАЛЬНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ СВОЙСТВ СТАЛИ СЕРДЕЧНИКА СТАТОРА

И. А. Колотыло, асс.

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина

E-mail: i.a.kolotylo@gmail.com

Проведено моделювання магнітного поля асинхронного двигателя методом конечных элементов в программном пакете FEMM с учетом локального изменения свойств стали.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, метод конечных элементов, свойства стали, сердечник статора.

MODELLING OF MAGNETIC FIELD OF INDUCTION MOTOR WITH LOCAL CHANGE OF STATOR CORE PROPERTIES

I. Kolotylo, ass.

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine

E-mail: i.a.kolotylo@gmail.com

The modeling of magnetic field finite element method using FEMM considering local changes in properties of the steel.

Key words: induction motor, finite element method, properties of steel, stator core.