

В. І. МЛІХ, Л. В. ШИЛКОВА

ЧИСЕЛЬНО-ПОЛЬОВИЙ АНАЛІЗ ПОТУЖНОСТІ МАГНІТНИХ ВТРАТ В ТРИФАЗНОМУ ІНДУКТОРІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Представлено принципи і результати чисельно-польового розрахунку потужності магнітних втрат (ПМВ) в індукторі магнітного поля, подібному до статора асинхронного двигуна. Метод розрахунку заснований на пошуку максимумів значень магнітної індукції в безлічі міні-секторів, на які ділиться один період структури зубців і ярма осердя статора, що повторюється. За розподілом знайдених максимумів визначаються їх середньоквадратичні значення на вказаних ділянках осердя, і по них обчислюється ПМВ. Метод дозволяє відображувати розрахункові моделі осердя практично будь-якої форми. Проведено порівняльний аналіз ПМВ в режимі неробочого ходу для варіантів осердя статора за відсутності і з одним рядом аксіальних вентиляційних каналів. Порівняльні розрахунки зроблені на прикладі конкретного індуктора при різних кількості і діаметрах каналів.

Ключові слова: індуктор магнітного поля, статор асинхронного двигуна, осердя, вентиляційні канали, магнітна індукція, потужність магнітних втрат, чисельно-польові розрахунки, порівняльний аналіз.

Представлены принципы и результаты численно-полевого расчета мощности магнитных потерь (ММП) в индукторе магнитного поля, подобном статору асинхронного двигателя. Метод расчета основан на поиске максимумов значений магнитной индукции во множестве минисекторов, на которые делится один период повторяющейся структуры зубцов и ярма сердечника статора. По распределению найденных максимумов определяются их среднеквадратичные значения на указанных участках сердечника, и по ним вычисляется ММП. Метод позволяет отображать расчетные модели сердечников практически любой формы. Проведен сравнительный анализ ММП в режиме холостого хода для вариантов сердечника статора при отсутствии и с одним рядом аксиальных вентиляционных каналов. Сравнительные расчеты сделаны на примере конкретного индуктора при разных числах и диаметрах каналов.

Ключевые слова: индуктор магнитного поля, статор асинхронного двигателя, сердечник, вентиляционные каналы, магнитная индукция, мощность магнитных потерь, численно-полевые расчеты, сравнительный анализ.

The principles and results of the numerical-field calculation of the magnetic loss power (MLP) in a magnetic field inductor similar to an asynchronous motor stator are presented. The calculation method is based on the search for the maxima of the magnetic induction values in a multitude of minisectors into which one period of the repeating geometric structure of the teeth and the stator core yoke are divided. The maximum for each minisector is selected by its analogues in all periods of this structure. According to the distribution of the maxima found, their rms value is determined for a specified period of the core areas. And the MLP is already calculated by the rms value. The method allows to display the calculation models of cores of any shape and practically doesn't require the simplification of their geometric structure. Comparative analysis of the MLP in idle mode for variants of the stator core in the presence and absence of axial ventilation ducts is carried out. Using the example of a specific inductor with one row of circular ducts, comparative calculations are made for their different numbers and diameters. The presented method is the basis for targeted variation of almost any ducts structure when choosing the optimal variant in terms of MLP level and inductor cooling conditions.

Keywords: magnetic field inductor, asynchronous motor stator, core, ventilation ducts, magnetic induction, magnetic loss power, numerical field calculations, comparative analysis.

Вступ. В низці галузей для забезпечення технологічних процесів перемішування різних сумішей або розділення дрібних об'єктів з різними електромагнітними властивостями використовують магнітні перемішувачі та сепаратори [1–3]. Структура та характер магнітних полів, які забезпечують ці процеси, вельми різноманітні. Серед них знаходять своє місце обертові магнітні поля, що збуджуються індуктором, подібному статору трифазного асинхронного двигуна (ТАД).

Відмінністю такого індуктора магнітного поля (ІМП) від ТАД є те, що ротор відсутній, а порожнеча всередині статора є робочою зоною, через яку пропускається рідка суміш, яка потребує обробки. Це здійснюється за допомогою дрібних феромагнітних елементів, які рухаються з обертотним магнітним полем в робочій зоні і створюють так звані «вихровий шар» у робочій речовині, яка зазнає необхідну технологічну обробку.

Ефективність зазначеного технологічного процесу залежить від рівня магнітного поля (МП), магнітна індукція (МІ) якого у створених ІМП сягає 0,15 Тл і потребує подальшого підвищення. Проблема в тому, що, на відміну від ТАД, де немагнітний проміжок має лічені міліметри, немагнітний циліндричний простір робочої зони у ІМП має діаметр на два порядки більше. Тому електромагнітні

навантаження в ІМП, природно, виявляються теж підвищеними і, відповідно, ускладнюється проблема нагріву та охолодження ІМП. Для її оцінки та розв'язання необхідні адекватні розрахунки потужності втрат. І якщо для електричних втрат в обмотці статора теоретична основа є досить простою, як і в ТАД, то для магнітних втрат не все так очевидно.

Ускладнення розрахунку потужності магнітних втрат (ПМВ) в осерді статора ІМП пов'язано, по-перше, з відміною розподілу МП, порівняно з ТАД, а по-друге, з можливою необхідністю застосування в ярмі осердя статора аксіальних вентиляційних каналів (АВК).

Тому, для розрахунку ПМВ в ІМП з достатньою точністю, та обґрунтованого вибору системи АВК необхідно застосування оновлених підходів. Базою для них можуть бути теоретично-розрахункові дослідження МП в ІМП такого типу [4, 5], що розглядається, а також адекватний метод розрахунку ПМВ, який представлено в [6] на прикладі двигуна постійного струму, суть якого має і більш давню історію [7].

Загальною основою для робіт [4–7] є чисельні розрахунки МП, які, на відміну від спрощених класичних підходів [1, 8, 9], дають можливість суттєвого підвищення точності результатів

розрахунків завдяки адекватному врахуванню геометрії електромагнітної системи електричних машин (ЕМ) взагалі, і ІМП зокрема.

Робочим інструментом для чисельного розрахунку ІМП тут, як і в [4–6], прийнята загальнодоступна і поширена програма FEMM [10].

Отже, **метою даної роботи** є представлення чисельно-польового методу розрахунку ПМВ в зазначеному ІМП з обертовим магнітним полем, а також виконання тестового аналізу ПМВ в осерді статора при відсутності та наявності АВК.

Об'єкт дослідження. Електромагнітна система ІМП є такою, як і в [4], і тут вона подана на рис. 1 лише її поперечним перерізом, чого достатньо для досягнення мети даної роботи. З технологічних міркувань були задані вихідні параметри ІМП: радіус робочої зони всередині індуктора $r_{re} = 0,15$ м і активна довжина $l_a = 0,3$ м, а МІ в центрі – 0,24 Тл.

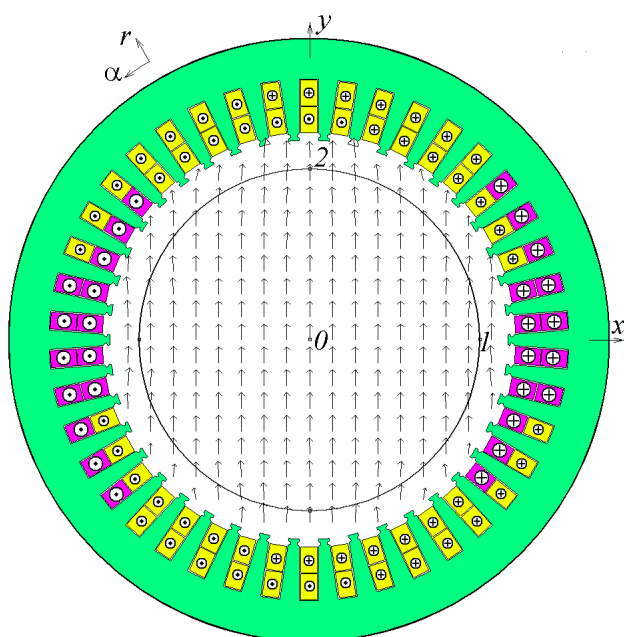


Рис. 1 – Поперечний переріз електромагнітної системи ІМП

Решта параметрів індуктора розрахована за методикою, наближеною до класичної для ТАД [8, 9] з основною відмінністю – відсутність ротора. З основних параметрів індуктора представимо: номінальні фазні напруга $U_{sN} = 220$ В і струм $I_{sN} = 950$ А, частота $f_s = 50$ Гц. Він має кількості фаз $m_s = 3$ і пар полюсів $p = 1$, кількість пазів $Q_s = 42$; кількість послідовних витків фазної обмотки $N_s = 28$. Радіус розточення осердя індуктора r_{si} становив 0,175 м, тому що він повинен бути декілька більшим за радіус робочої зони, щоб виключити з неї кільцевий шар з суттєво неоднорідним МП. Обмотка індуктора двохарова, розподілена, укорочена з відносним коефіцієнтом укорочення $\beta_s = 18/21$, схема з'єднання – «зірка».

Осердя ІМП виконано з електротехнічної сталі марки 2013, товщина листів 0,5 мм, коефіцієнт заповнення $K_{Fe} = 0,97$.

На рис. 1 позначена і далі використовується полярна система координат (r, α) з початком в геомет-

ричному центрі індуктора 0 , а також прямокутна система (x, y) .

На даному етапі дослідження ІМП його розрахунки виконувались в режимі неробочого ходу, тобто без впливу феромагнітних елементів в робочій зоні, що буде наступною більш складною уточнюючою задачею, яка розв'язується також на основі, що тут представляється.

На рис. 1 всередині ІМП представлено масштабоване векторне поле МІ, отримане за методикою, викладеною в [4] за допомогою програми FEMM. Таке однорідне МП в робочій зоні є однією з головних вимог до ІМП, і забезпечується, як видно, індуктором саме цього типу, що розглядається.

Аналіз джерел щодо досліджень ПМВ.

При проектуванні електричних машин (ЕМ) обчислення потужності магнітних втрат проводиться за емпіричними формулами, які засновані на використанні експериментально визначених величин [8, 9]. З давніх часів і понині для ПМВ в сталевих феромагнітних осердях ЕМ поширеною є формула:

$$P_{mag} = K_{mag} p_{1,0/50} \left(\frac{f_s}{50} \right)^\beta m_{Fe} B_m^2, \quad (1)$$

де f_s – частота перемагнічування, Гц; β – показник ступеню; B_m – амплітуда МІ, Тл; $p_{1,0/50}$ – довідникові питомі втрати, Вт/кг, при МІ 1 Тл та частоті 50 Гц; m_{Fe} – маса осердя, кг; K_{mag} – коефіцієнт для врахування низки технологічних чинників.

Значення величин β і K_{mag} залежать від типу ЕМ і ділянки її магнітопроводу і визначаються дослідним шляхом в умовах конкретного виробництва. Як правило, в ЕМ ПМВ знаходиться окремо для зубців і спинки (яра) осердь ротора і (або) статора. Від розрахувача конкретної ЕМ при застосуванні формули (1) залежить те, наскільки правильно визначена величина МІ B_m .

У класичній системі проектування ЕМ [8, 9] розподіл МІ по ділянках магнітопроводу знаходиться методом магнітного кола, і на кожному з них як B_m фігурує лише деяке середнє значення МІ B_{mid} , що властиво цьому методу. Реально ж в зубцях і, особливо, в ярах МІ розподілена дуже нерівномірно. Для ярем ситуація ще ускладнюється наявністю АВК, оскільки врахування їх реальної структури методом магнітного кола не представляється можливим.

Уточнити ПМВ можна врахуванням нерівномірного розподілу МП, і для цього вже є умови – високопродуктивні комп'ютери і програмне забезпечення для чисельних розрахунків МП. Такі розрахунки досить точно відображують реальну геометрію ЕМ і нелінійні магнітні властивості феромагнітних осердь.

Формула (1) нехтує складною залежністю зміни МІ в часі, яка в реальності не є гармонійною ані в машинах постійного [11], ані в машинах змінного [12] струму. Новим же в цій статті є істотне уточнення: амплітуда МІ береться не одна, та й то – дуже умовна для цілої ділянки магнітопроводу, а використовується реалістичний розподіл амплітуд МІ по таких ділянках.

Незважаючи, здавалося б, на усталену теорію і практику, виконуються нові дослідження магнітних

втрат у феромагнітних матеріалах, а також в електротехнічних пристроях з їх використанням, що важливо в сучасних умовах енергозберігаючих технологій.

Так, наприклад, в [13, 14] і інших роботах розглядається загальна методологія аналізу і розрахунків ПМВ в електротехнічних сталях, м'яких і аморфних магнітних сплавах і з'єднаннях. Дослідження ПМВ часто присвячені конкретним ЕМ різним типів [15-21].

Актуальність вивчення ПМВ в ЕМ пов'язана з використанням постійних магнітів, нових магнітних матеріалів, підвищених частот, нових конструкцій та ін. [15–21]. Приклади публікацій [15–21] становлять далеко не повний перелік вивчених робіт з даної тематики. Але серед цих публікацій не зустрілося розрахункових досліджень магнітних втрат в таких складних умовах, як, наприклад, в осердях з АВК.

Загальні принципи розрахунку магнітних полів в ІМП. Основою дослідження, що надається, є чисельні розрахунки МП методом скінчених елементів за програмою FEMM [10] з керуванням нею створеним скриптом Lua на основі [22, 23].

У поперечному перерізі ІМП (рис. 1) двовимірне МП описується відомим диференціальним рівнянням:

$$\operatorname{rot} \left[\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} (\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z, \quad (2)$$

де A_z , J_z – аксіальні складові векторного магнітного потенціалу (ВМП) і густини струму; \vec{k} – орт за аксіальною віссю z ; μ – абсолютна магнітна проникність, яка для феромагнітних осердь визначається по їх кривим намагнічування.

На зовнішній поверхні осердя статора для ВМП приймається умова Дирихле: $A_z=0$.

Одна з базових величин МП – МІ обчислюється за розподілом ВМП на основі виразу $\vec{B} = \operatorname{rot}(\vec{k} A_z)$. Тоді в прямокутних координатах складові і модуль МІ:

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}; \quad B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x}; \quad B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}. \quad (3)$$

Щоб в шихтованих осердях отримати МІ безпосередньо для сталевих листів, враховується коефіцієнт заповнення ними цих осердь K_{Fe} .

Розрахункові моделі ІМП і розподілення магнітних полів.

Для прояснення проблематичності ситуації з розрахунками ПМВ, спочатку проаналізуємо розподіл МП в осерді статора ІМП, як її основу.

Вихідним для наступного порівняння є варіант осердя ІМП без АВК, який і був показаний на рис. 1.

Розраховане МП додатково приведено на рис. 2 силовими лініями ($A_z = \text{const}$) і тонованим розподілом модуля МІ B (3), а також на рис. 3 його координатним розподілом. Останнє має дуже складний характер, який представити одним, незрозуміло яким, усередненим значенням для всієї ділянки магнітопроводу (зубців або ярма), що прийнято в класиці проектування [8, 9], є дуже грубим допущенням.

Ще більшою мірою це відноситься до ситуації з розподілом МП, який виникає за наявності АВК, що показано, наприклад, в [6], а також далі за текстом.

Відзначимо, що на рисунках показано модулі МІ, і вони, за визначенням, не мають знаку. Але в процесі обертання МП при його повороті на полюсний крок на ділянках магнітопроводу напрямки векторів МІ міняються на протилежні. Тому можна вважати, що максимуму модуля МІ, що виявляється, відповідає як додатний максимум МІ, так і від'ємний максимум, що природно для зміни МІ за петлями гістерезису.

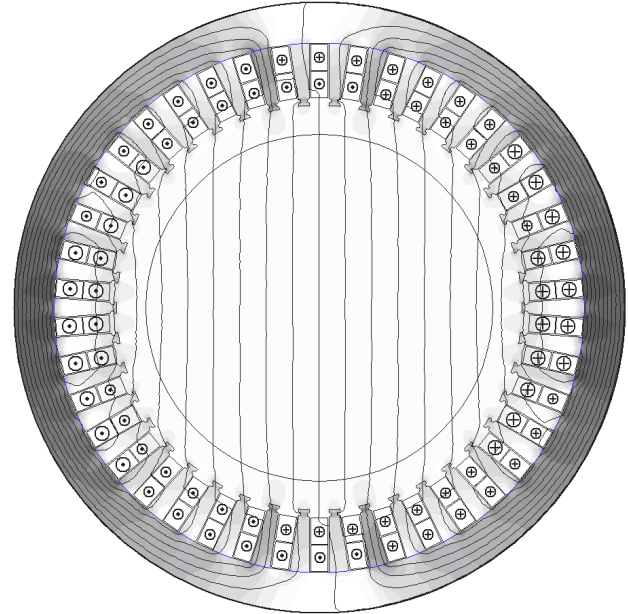


Рис. 2 – Картина МП у вигляді силових ліній і тонованого розподілу модуля МІ B

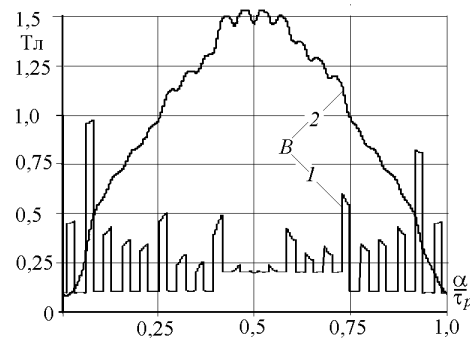


Рис. 3 – Розподіл модуля МІ B в осерді статора на дугах кола в межах полюсного кроку τ_p : 1 – на середньому рівні по висоті зубців; 2 – на середньому рівні ярма

Розрахункові моделі ІМП, що розглядаються далі, відповідають рис. 1 і зберігають його електромагнітну структуру, за винятком ярма осердя статора. І тут прийнято три варіанти, які разом з силовими лініями МП показані на рис. 4: загальним для них являється структура з одним рядом АВК, розташованих на середньому рівні ярма.

Для порівняльного аналізу з урахуванням цього прийняті наступні позначення розрахункових варіантів ІМП: W1 (рис. 2) – без АВК; W2 (рис. 4, а) – кількість каналів в два рази менша кількості зубців; W3 (рис. 4, б) і W4 (рис. 4, в) – кількість каналів дорі-

внює кількості зубців. При цьому відмінності ще полягають в тому, що для варіантів W2 і W3 діаметр каналів d_{vk} складає 10 мм, а для W4 – 15 мм: це все при тому, що висота спинки ярма дорівнює 35 мм.

Відмінність варіантів осердь статора вплине не лише на ПМВ, що буде наведено далі, але і на МІ в робочій зоні індуктора, яка на рис. 2 і рис. 4 виділена колом в його внутрішній порожнині. Це проявляється порівнянням МІ в табл. 1 для трьох точок 0–2: перша знаходиться в центрі робочої зони, друга і третя – на вказаному колі вгорі і справа – на координатних лініях у і х, відповідно (див. рис. 1).

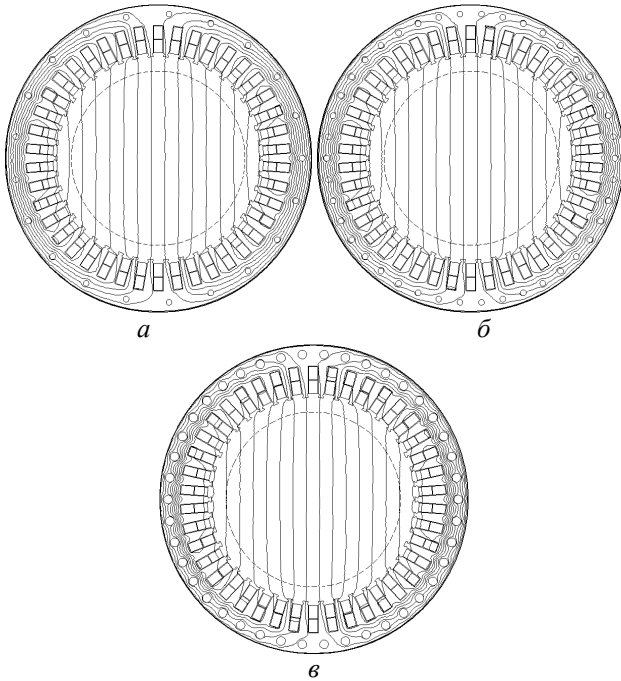


Рис. 4 – Конструкції ІМП з різними варіантами АВК

Таблиця 1 - Порівняння МІ (Тл) в різних точках робочої зони ІМП (рис. 1) для різних варіантів осердя статора

Варіант розрахунку	Магнітна індукція в точках		
	0 – центр	1 – праворуч	2 – вгорі
W1	0,236	0,247	0,240
W2	0,235	0,244	0,240
W3	0,234	0,241	0,239
W4	0,221	0,219	0,231

З табл. 1 видно, що зміни МІ є, але не принципові. Їх, за потреби, можна усунути збільшенням висоти спинки осердя статора, або збільшенням струму в обмотці. Але тут це не робиться – з метою збереження основи для порівняння приведених на рис. 2 і рис. 4 варіантів ІМП.

Метод уточненого розрахунку ПМВ в осерді статора на основі розподілу середньоквадратичних максимумів значень модуля магнітної індукції.

Після чисельного розрахунку МП, на основі знайденого його розподілу, необхідний для розрахунку ПМВ (1) максимум МІ визначався вдосконалим

методом, принципіві основи якого дано в [6] і вони базуються на ще ранній роботі [7], але на прикладі машини постійного струму.

Викладемо цей метод стосовно ІМП, який розглядається в цій роботі. Для цього використовуємо його конструкцію і позначення, показані на рис. 5. Тут є один ряд АВК, розташованих через два зубці осердя, що відповідає варіанту W2 на рис. 4, а. Але суть методу така, що він буде правомірним й для інших варіантів АВК і при будь-якому їх розташуванні. Головною при цьому є наявність спільної кутової періодичності структур зубців і каналів.

Вдосконалений уточнюючий метод, відповідно до розробленої методики, що представляється далі, полягає у виявленні середньоквадратичного значення максимумів модуля МІ з безлічі мінісекторів, розподілених по поперечному перерізу зубця або сектора ярма, що виділяється. Ці максимуми знаходяться вибіркою значень модуля МІ з безлічі однопозиційних – споріднених мінісекторів.

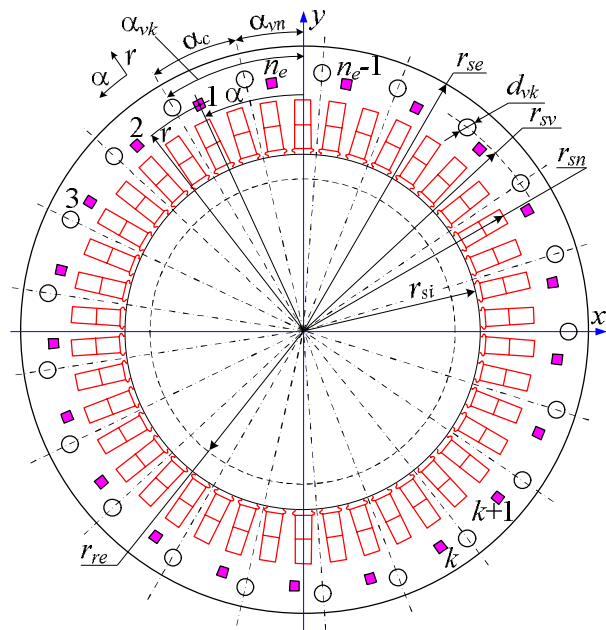


Рис. 5 – Розрахункова модель ІМП для визначення ПМВ

У кутовому напрямі в осерді статора (рис. 5) період повторення структури $\alpha_c = 360/n_{va}$ (у градусах) визначається по низці каналів з їх кількістю n_{va} . Цей період повинен включати цілу кількість зубцевих кроків τ_s . Так через симетрію і періодичність в осерді між колами з радіусами r_{si} і r_{se} виділяється сектор з кутовим розміром α_c , який розташований між двома радіальними лініями. Перша визначається заданим кутом розташування центру одного з каналів α_{vm} , очевидна і друга: $\alpha_{vk} = \alpha_{vm} + \alpha_c$.

Виділений сектор розбивається на кільцеві мінісектори з радіальним і кутовим розмірами:

$$dr = (r_m - r_{ri}) / k_r; \quad d\alpha = \alpha_c / k_a, \quad (4)$$

де k_r, k_a – їх кількості, що задаються по відповідних напрямках.

Один з мінісекторів з номером 1 в зоні сектора ярма приведено на рис. 5, а також на рис. 6 з більш деталізованими позначеннями. Центр мінісектора має полярні координати r, α і пов'язані з ними прямокутні координати:

$$x = -r \cdot \sin \alpha; \quad y = r \cdot \cos \alpha, \quad (5)$$

які використовуються в програмі Lua.

Зважаючи на симетрію і періодичність, початковому мінісектору відповідає структура з n_e його "родичів", які в повному наборі показані на рис. 5. При циклічному суцільному переборі усіх інших мінісекторів, в поперечному перерізі ярма осердя вони можуть потрапляти і на сталеві, і на немагнітні ділянки. Для ідентифікації цього після розрахунку МП визначається спеціальною функцією Lua відносна магнітна проникність μ_r в даній точці. Якщо $\mu_r > 1$, то мінісектор належить осердю, якщо ні, то немагнітній ділянці всередині АВК.

Для феромагнітної ділянки в тому ж мінісекторі за допомогою функції Lua "витаються" значення координатних складових МІ B_x, B_y , і за (3) обчислюється модуль МІ B , а також відповідно до рис. 6 – площа поточного мінісектора:

$$dS = \pi r dr d\alpha / 180. \quad (6)$$

Значення B перераховується, як вже було відмічено, безпосередньо для сталевих листів з урахуванням коефіцієнта заповнення осердя статора K_{Fer} , а саме $B = B / K_{Fer}$.

Для сім'ї з n_e споріднених мінісекторів, що зображені на рис. 5, їх перебором у відповідному циклі шукається максимальне значення модуля МІ B_m . Кутові координати таких мінісекторів відповідають формулі $\alpha_k = \alpha + \alpha_c(k-1)$, причому від $k=1$ до n_e кут α береться по базовому мінісектору, що знаходиться в головному секторі.

Для виділеною в ярмі на рис. 5 сектору з кутовою шириною α_c аналогічні дії проводяться для усієї безлічі мінісекторів, що перебираються подвійним циклом: j від 1 до k_r , і i від 1 до k_a . Полярні координати таких мінісекторів обчислюються по формулах:

$$r = r_{si} + (j - 0,5)dr; \quad \alpha = \alpha_{vn} + (i - 0,5)d\alpha. \quad (7)$$

При цьому для мінісекторів сталевих ділянок послідовно додаються квадратичні максимальні значення модуля МІ з урахуванням площ мінісекторів (це по суті чисельне інтегрування за площею), починаючи з $B_{m2s}=0$, а саме:

$$B_{m2s} = B_{m2s} + B_m^2 \cdot dS. \quad (8)$$

Це ж робиться для наступних контролю і ілюстрацій і для максимумів модуля МІ, починаючи з $B_{ms}=0$ і накопичуючи суму:

$$B_{ms} = B_{ms} + B_m \cdot dS. \quad (9)$$

Накопичується і сумарна площа мінісекторів:

$$S_{Fe} = S_{Fe} + dS, \quad (10)$$

починаючи з $S_{Fe}=0$.

Після завершення перебору мінісекторів у виділеному головному секторі ярма обчислюється середньоквадратичне значення максимумів модуля МІ:

$$B_{mav2} = B_{m2s} / S_{Fe}, \quad (11)$$

а також середнє значення просто максимумів модуля МІ:

$$B_{mav} = B_{ms} / S_{Fe}. \quad (12)$$

Саме значення B_{mav2} (11) і використовується в формулі (1) замість B_m для обчислення ПМВ.

Обчислюються також необхідна для (1) маса ярма осердя статора:

$$m_{Fey} = K_{Fer} S_{Fey} l_a \gamma_{Fe}, \quad (13)$$

де $S_{Fey} = n_e S_{Fe}$ – сумарна площа в поперечному перерізі осердя по сталі; γ_{Fe} – питома маса сталі.

Чим більша кількість мінісекторів, тим більш точно буде виділена феромагнітна частина осердя на його поперечному перерізі. Ці мінісектори фактично як мозаїка відображують форму сталеві частини осердя, виключаючи пази і канали.

Формування розрахункових геометричних та фізичних моделей ІМП для програми FEMM, організація розрахунку нею МП, а також уся наступна обчислювальна робота по "витаганню" цілої низки різних параметрів і ПМВ виконується створеним скриптом Lua, аналогічним скрипту, приведеному в [23] для трифазного асинхронного двигуна.

Все викладене про метод можна відразу використовувати для розрахунку ПМВ і супутніх параметрів усього осердя статора. Але при необхідності можна розрахунки зробити окремо для зубців між колами з радіусами r_{si} і r_{sn} і ярма – між колами з радіусами r_{se} і r_{se} (рис. 5).

Порівняльний аналіз потужності магнітних втрат в різних розрахункових варіантах осердя статора ІМП.

Було розглянуто зображені на рис. 2 і рис. 4 розрахункові варіанти осердя статора ІМП.

Спочатку було перевірено, наскільки скінченно-елементна структура впливає на результати розрахунків, і виявлено, що в зубцях і ярмі обмеження максимального розміру боків трикутників в 1-3 мм виявляється цілком достатнім. При цьому загальна кількість скінчених елементів - трикутників в усій розрахунковій моделі ІМП склало близько 66 тисяч.

Перевірено ще, наскільки «мозаїчна» структура мінісекторів адекватно відображує зубці осердя і вентиляційні канали в його ярмі. Дані розрахунків ІМП при різній кількості мінісекторів дроблення $k_r \times k_a$ зубців і сектора ярма статора представлені в табл. 2 для чотирьох заданих варіантів

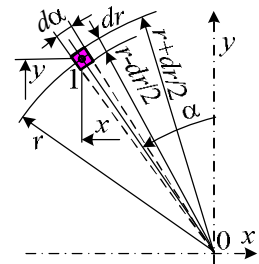


Рис. 6 – Мінісектор з позначенням координат і розмірів

W1–W4 (тут і далі точність подачі результатів може бути завищеною, але це робиться для "чистоти" обчислювальних експериментів).

В табл. 2 дані "чисті" площі зубців S_{bFet} і сталевій частині ярма S_{bFey} , а також їх "мозаїчні" площі S_{Fet} і S_{Fey} , визначені за формулою (10). Достатня близькість других до перших і свідчить про адекватне відображення геометричних форм реальних осердь і їх "мозаїчною" апроксимацією.

Аналіз результатів табл. 2 показує, що параметри дроблення 50×50 дають досить точну апроксимацію і зубців, і сектора ярма осердя. Це і було прийнято далі для усіх розрахунків.

Таблиця 2 - Оцінка рівня відображення форми зубців і ярма осердя сукупністю мінісекторів при різних варіантах їх дроблення (площі в $см^2$)

Варіант дроблення $k_r \times k_a$	Зубці	Варіанти виконання ярма			
		W1	W2	W3	W4
	S_{bFet}	S_{bFey}			
	294,5	540,8	524,5	508,2	467,4
S_{Fet}	S_{Fey}				
10×10	261,8	542,8	520,8	510,0	465,9
30×30	293,4	542,8	525,7	511,1	469,7
50×50	293,8	542,8	527,0	509,9	468,7

Сумарні ПМВ визначалися за формулою (1), де замість умовної амплітуди магнітної індукції B_m підставлялося знайдене за (11) середньоквадратичне значення модуля магнітної індукції B_{mav2} . При цьому прийнято рекомендовані в [8, 9] значення коефіцієнтів $K_{mag}=2,3$ і $\beta=1,3$, хоча при частоті 50 Гц значення β , в принципі, байдуже.

Дані основних розрахунків ПМВ і інших супутніх параметрів приведено в табл. 3. Тут проводиться порівняння значень різних величин МІ, а також ПМВ в зубцях P_{magt} , ярмі P_{magy} і на все осердя статора P_{mag} за відсутності або наявності низки різних АВК. Відмітимо, що при введенні цих каналів маса ярма змінювалася, що частково стримувало зростання ПМВ на противагу збільшенню МІ, а ось маса всіх зубців, які не змінювалися, в усіх варіантах була однаковою і складала $m_{Fert} = 64$ кг

Крім того, введення АВК зменшувало загальний рівень МІ в ІМП, про що можна судити за даними табл. 1 відповідно до рис. 1. Так, наприклад, при переході від варіанту W1 до варіанту W4 в центральній точці 0 МІ зменшилася на 6,4 %, в точці 1 справа – на 11,3 % і в точці 2 вгорі – на 3,8 %.

При введенні в ярмо осердя різних структур каналів МІ в зубцях і, як наслідок, ПМВ змінюються трохи. Справа у тому, що падіння магнітної напруги в осерді взагалі і в ярмі, зокрема, залишається все однаково відносно малим порівняно з падінням напруги в досить великому немагнітному просторі всередині розточування осердя статора.

В розглянутих варіантах конструкції на ПМВ в зубцях доводиться 17,0–18,3 % від сумарної ПМВ P_{mag} , і, відповідно, основна частина ПМВ доводиться на ярмо, де частка ПМВ складає 81,7–83,0 %.

Таблиця 3 - Порівняння ПМВ в зубцях і ярмах та в цілому за відсутності і наявності аксіальних вентиляційних каналів, при різній кількості каналів і різних їх діаметрах (магнітна індукція в Тл, маса в кг, потужність в Вт)

Варіант ярма	Зубці			Ярмо			Разом		
	B_{mav}	B_{mav2}	P_{magt}	m_{Fery}	B_{mav}	B_{mav2}	P_{magy}	m_{Fer}	P_{mags}
W1	1,02	1,04	293	118	1,62	2,63	1371	182	1665
W2	1,02	1,04	295	115	1,66	2,78	1408	179	1703
W3	1,03	1,06	300	111	1,72	2,99	1467	175	1767
W4	1,02	1,06	299	102	1,68	2,95	1328	166	1627

Порівняно з вихідним варіантом осердя W1, зростання ПМВ в ярмі при введенні АВК не таке вже і значне. Це пояснюється деяким зменшенням загальній зростання МІ, зважаючи на зменшення площі поперечного перерізу ярма. Стримуючим чинником виявляється ще зменшення маси сталі осердя (табл. 3), яка входить до формули (1). Природним є збільшення ПМВ зі збільшенням кількості АВК в ярмі осердя статора. Так, введення одного ряду каналів підвищило тут ПМВ на 10,5 %. Проте показово і те, що ПМВ у варіанті W4 навіть дещо зменшилася.

Висновки.

1. Чисельно-польовий розрахунок дозволяє досить точно враховувати геометричні форми осердя статора ІМП, його нелінійні магнітні властивості і реальний розподіл магнітної індукції в ньому. Усе це, у поєднанні із запропонованим методом розрахунку ПМВ на основі середньоквадратичного значення максимумів модуля магнітної індукції, дає основу для уточнення результатів розрахунку в порівнянні з класичним методом визначення цих же величин.

2. Зроблене введення в ярмо осердя статора аксіальних вентиляційних каналів привело до зміни ПМВ в ІМП, але не принципової. Це пояснюється дією суперечливих чинників: зменшення загального рівня магнітного поля і маси сталевго осердя на противагу локальному зменшенню площі перерізу його ярма.

3. Запропонований метод розрахунку ПМВ є універсальним з точки зору різних геометричних форм зубцево-пазової структури і ярма осердя статора, оскільки не вимагає спрощень геометрії розрахункових моделей цих частин конструкції. Це є досить адекватною основою для цілеспрямованого варіювання практично будь-якою структурою АВК при виборі оптимального варіанту з точки зору рівня ПМВ і умов охолодження ІМП.

Список літератури

1. Логвиненко Д. Д. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем / Д. Д. Логвиненко, О. П. Шеляков. – К. : Техника, 1976. – 144 с.
2. Загирияк М. В. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования : Монография / М. В. Загирияк, Ю. А. Бранспиз, И. А. Шведчикова; Под ред. М. В. Загирияка. – К. : Техніка, 2011. – 224 с.
3. Компания GlobeCore / Аппарат Вихревого Слоя ABC-100. – Режим доступу: <https://avs.globecore.ru/products/avs-100.html>. – Дата звертання: 30 вересня 2017.
4. Мілих В. І. Чисельний аналіз магнітного поля циліндричного трифазного індуктора магнітного сепаратора / В. І. Мілих, Л. В. Шилкова, С. А. Ревуженко // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ"

- : зб. наук. пр. Сер. : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2017. – №1(1223). – С. 76-82.
5. Мілих В. І. Чисельно-експериментальний аналіз магнітного поля індуктора магнітного сепаратора на базі асинхронного двигуна / В. І. Мілих, Л. В. Шилкова // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2018. – №5(1281). – С. 104-109.
 6. Милых В. И. Сравнительный численно-полевой анализ мощности магнитных потерь в двигателе постоянного тока / В. И. Милых, С. Е. Дзенис // Технічна електродинаміка. – 2019. – №2. – С. 23-33. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.02.023>
 7. Милых В. И. Сравнительный анализ электромагнитных и тепловых параметров сердечника якоря тягового электродвигателя с различными аксиальными вентиляционными каналами / В. И. Милых, Ю. А. Климов, Е. И. Штангеев // Электротехника. – 1990. – №5. – С. 36-42.
 8. Гольдберг О. Д. Проектирование электрических машин / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко. – М.: Высш. шк., 2001. – 430 с.
 9. Копылов И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков и др. – М.: Юрайт, 2011. – 767 с.
 10. Finite Element Method Magnetics: OldVersions. FEMM 4.2 11Oct2010 Self-Installing Executable. – Режим доступу: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions/>. – Дата звертання: 15.06.2017.
 11. Милых В. И. Численно-полевой анализ эффективности эксцентриситета зазора под главными полюсами в двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением / В. И. Милых, С. Е. Дзенис // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2018. – № 5(1281). – С. 4-13.
 12. Милых В. И. Численно-полевой анализ магнитного поля трехфазного асинхронного двигателя в статике и динамике / В. И. Милых, Л. В. Шилкова // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2016. – №11(1183). – С. 80-87. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/24440>
 13. Banach A. Specific power loss of typical dynamo steel sheets / A. Banach, W. Mazgaj // Technical Transactions. – 2015. – Vol. 1-E(8). – Pp. 291-299. DOI: <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.15.050.3850>
 14. Ismagilov F. R. Determination of Specific Losses in Stator Core of Electromechanical Energy Converter / F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, V. I. Bekuzin and V. V. Ayguzina // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 23–24 March 2017. Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation. – 2017. – Vol. 87. Power supply of mining companies. 032011. – Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/3/032011>
 15. Asef P. Iron Loss Prediction Using Modified IEM-Formula during the Field Weakening for Permanent Magnet Synchronous Machines / P. Asef, R. Bargallo and A. Laphorn // Machines (Open Access Journal of Engineering). – 2017. – Vol. 5., No. 4. – Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines5040030>
 16. Gonzalez A. Magnet losses in inverter-fed two-pole PM machines / A. Gonzalez, J. Millinger, J. Soular // XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), IEEE, 4-7 Sept. 2016, Lausanne, Switzerland. – 2016. – Pp. 1854-1860. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2016.7732776>
 17. Kowal D. Comparison of Iron Loss Models for Electrical Machines With Different Frequency Domain and Time Domain Methods for Excess Loss Prediction / D. Kowal, P. Sergeant, L. Dupré and L. Vandenbossche // IEEE Transactions on Magnetics. – Jan. 2015. – Vol. 51. No. 1. – Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2338836>
 18. Leivsdottir V. Investigation of Loss Calculation Methods for PMSMs and Implementation of Loss Functionality on a Developed FEM Model. Master thesis / V. Leivsdottir // NTNU. – Spring 2016. – Pp. 1-14. URL: <http://hdl.handle.net/11250/2433742>
 19. Okamoto S. Core Loss Reduction of an Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Using Amorphous Stator Core / S. Okamoto, N. Denis, Y. Kato, M. Ieki and K. Fujisaki // IEEE Transactions on Industry Applications. – May-June 2016. – Vol. 52., No. 3. – Pp. 2261-2268. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2532279>
 20. Wrobel R. Power Loss Analysis in Thermal Design of Permanent Magnet Machines: A Review / R. Wrobel, P. H. Mellor, M. Popescu and D. A. Staton // IEEE Transactions on Industry Applications. – March-April 2016. – Vol. 52., No. 2. – Pp. 1359-1368. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2489599>
 21. Zhang Y. Loss Calculation and Demagnetization Analysis for a High Speed Permanent Magnet Electrical Machine / Y. Zhang, W. Cao, S. McLoone // 21st International Conf. on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag 2017), 18-22 June 2017, Daejeon, South Korea. – 2017. – Pp. 351-352. URL: [http://www.compumag.org/CMAG2017/\[PB-A5-1\]_22.pdf](http://www.compumag.org/CMAG2017/[PB-A5-1]_22.pdf)
 22. Мілих В. І. Система автоматизованого формування розрахункових моделей електричних машин для програмного середовища FEMM / В. І. Мілих // Технічна електродинаміка. – 2018. – №4. – С. 74-78. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.074>
 23. Милых В. И. Автоматизированное формирование расчетных моделей трехфазных асинхронных двигателей для программной среды FEMM / В. И. Милых // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2017. – № 1(1223). – С. 03-15. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/30481>

References (transliterated)

1. Logvinenko D. D., Sheljakov O. P. *Intensifikacija tehnologicheskikh processov v apparatah s vihrevym sloem* [Intensification of technological processes in apparatus with a vortex layer]. Kiev, Tehnika Publ, 1976, 144 p. (Rus.)
2. Zahyrnyak M. V., Branspiz Ju. A., Shvedchikova I. A. *Magnitnye separatory. Problemy proektirovaniya*. [Magnetic separators. Design issues]. Kiev, Tehnika Publ, 2011, 224 p. (Rus.)
3. Kompanija GlobeCore. *Apparat Vihrevogo Sloja AVS-100*. [Company GlobeCore. Vortex Layer Machine ABC-100]. Available at: <https://avs.globecore.ru/products/avs-100.html>. (accessed 30.09.2017).
4. Milykh V. I., Shilkova L. V., Revuzhenko S. A. Chislennyj analiz magnitnogo polja cilindricheskogo trehfaznogo induktora magnitnogo separatora [Numerical analysis of the magnetic field of a cylindrical three-phase magnetic separator inductor]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion"*. 2017, no. 1(1123), pp. 76-82. (Ukr.)
5. Milykh V. I., Shilkova L. V. Chyselno-eksperymentalnyi analiz mahnitnoho polia induktora mahnitnoho separatora na bazi asynkronnoho dvyhuna [Numerical-experimental analysis of the magnetic field of a magnetic separator inductor on the basis of an asynchronous motor]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion"*. 2018, no. 5(1281), pp. 104-109. (Ukr.)
6. Milykh V. I., Dzenis S. E. Sravnitelnyy chislenno-polevoy analiz moschnosti magnitnykh poter v dvigatele postoyannogo toka [Comparative numerical-field analysis of power magnetic losses in a dc motor]. *Tehnichna Elektrodinamika*. 2019, no. 2, pp. 23-33. (Rus.) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.02.023>
7. Milykh V. I., Klimov Yu. A., Shtangeev E. I. Sravnitelnyy analiz elektromagnitnykh i teplykh parametrov serdchnika yakorya tyagovogo elektrodvigatelya s razlichnyimi aksialnyimi ventilyatsionnyimi kanalami [Comparative analysis of the electromagnetic and thermal parameters of the traction electric motor armature core with different axial ventilation channels]. *Elektrotehnika*. 1990, no. 5, pp. 36-42. (Rus.)
8. Gol'dberg O. D., Gurin Ja. S., Sviridenko I. S. *Proektirovanie jelektricheskikh mashin* [The design of electrical machines]. Moscow, Vysshaja shkola, 2001, 430 p. (Rus)
9. Kopylov I. P., Goryainov F. A., Klovov B. K. et al. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [The design of electrical machines]. Moscwa: Yurait, 2011, 767 p. (Rus)
10. Finite Element Method Magnetics: OldVersions. FEMM 4.2 11Oct2010 Self-Installing Executable. Available at: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions/> (accessed 15.06.2017).
11. Milykh V. I., Dzenis S. E. Chislenny-polevoy analiz effektivnosti ekscentrisiteta zazora pod glavnymi polyusami v dvigatele postoyannogo toka s posledovatelnyim vzbuzhdeniem [A numerical-field analysis of the eccentricity efficiency of the gap under the main poles in a DC motor with series excitation]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion"*. 2018, no. 5(1281), pp. 4-13. (Rus)
12. Milykh V. I., Shilkova L. V. Chislenny-polevoy analiz magnitnogo polya trehfaznogo asynkronnogo dvigatelya v statike i dinamike [Numerical-field analysis of the magnetic field of a three-phase induction motor in statics and dynamics]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion"*. 2016, no. 11(1183), pp. 80-87. (Rus) <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/24440>

13. Banach A., Mazgaj W. Specific power loss of typical dynamo steel sheets. *Technical Transactions*. 2015, vol. 1-E(8), pp. 291-299. DOI: <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.15.050.3850>
14. Ismagilov F. R., Vavilov V. E., Bekuzin V. I. and Ayguzina V. V. Determination of Specific Losses in Stator Core of Electromechanical Energy Converter. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 23–24 March 2017, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation. 2017, vol. 87. Power supply of mining companies. 032011, pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/3/032011>
15. Asef P., Bargallo R. and Laphorn A. Iron Loss Prediction Using Modified IEM-Formula during the Field Weakening for Permanent Magnet Synchronous Machines. *Machines* (Open Access Journal of Engineering). 2017, vol. 5, no. 4, pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines5040030>
16. Gonzalez A., Millinger J., Soulard J. Magnet losses in inverter-fed two-pole PM machines. *XXII International Conference on Electrical Machines* (ICEM), IEEE, 4-7 Sept. 2016, Lausanne, Switzerland. 2016, pp. 1854-1860. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2016.7732776>
17. Kowal D., Sergeant P., Dupré L. and Vandenbossche L. Comparison of Iron Loss Models for Electrical Machines With Different Frequency Domain and Time Domain Methods for Excess Loss Prediction. *IEEE Transactions on Magnetics*. Jan. 2015, vol. 51, no. 1, pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2338836>
18. Leivsdottir V. Investigation of Loss Calculation Methods for PMSMs and Implementation of Loss Functionality on a Developed FEM Model. Master thesis. *NTNU*. Spring, 2016, pp. 1-14. URL: <http://hdl.handle.net/11250/2433742>
19. Okamoto S., Denis N., Kato Y., Ieki M. and Fujisaki K. Core Loss Reduction of an Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Using Amorphous Stator Core. *IEEE Transactions on Industry Applications*. May-June 2016, vol. 52, no. 3, pp. 2261-2268. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2532279>
20. Wrobel R., Mellor P. H., Popescu M. and Staton D. A. Power Loss Analysis in Thermal Design of Permanent Magnet Machines: A Review. *IEEE Transactions on Industry Applications*. March-April 2016, vol. 52, no. 2, pp. 1359-1368. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2489599>
21. Zhang Y., Cao W., McLoone S. Loss Calculation and Demagnetization Analysis for a High Speed Permanent Magnet Electrical Machine. *21st International Conf. on the Computation of Electromagnetic Fields* (Compumag 2017), 18-22 June 2017, Daejeon, South Korea. 2017, pp. 351-352. URL: [http://www.compumag.org/CMAG2017/\[PB-A5-1\]_22.pdf](http://www.compumag.org/CMAG2017/[PB-A5-1]_22.pdf)
22. Milykh V. I. Systema avtomatyzovanoho formuvannia rozrakhunkovykh modelei elektrychnykh mashyn dlia programnoho seredivyshcha FEMM [The system of automated formation of electrical machines computational models for the FEMM software environment]. *Tekhnichna Elektrodinamika*. 2018, no. 4, pp. 74-78. (Ukr.) <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.074>
23. Milykh V. I. Avtomatizirovannoe formirovanie raschetnykh modeley trehfaznykh asinhronnykh dvigateley dlya programmnoy sredy FEMM [Automated formation of calculation models of a three-phase induction motors for software environment FEMM]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion"*. 2017, no. 1(1223), pp. 3-15. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/30481>

Поступила (received) 18.03.2019

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Чисельно-польовий аналіз потужності магнітних втрат в трифазному індукторі магнітного поля / В. І. Мілих, Л. В. Шилкова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 99-106. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2409-9295.

Численно-полево́й анализ мощности магнитных потерь в трехфазном индукторе магнитного поля / В. И. Милых, Л. В. Шилкова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 99-106. – Библиогр.: 23 назв. – ISSN 2409-9295.

The Numeral-field analysis of power of magnetic losses is in the three-phase inductor of magnetic-field / V. I. Milykh, L. V. Shilkova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2019. – No. 4 (1329). – P. 99-106. – Bibliogr.: 23. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мілих Володимир Іванович, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електричних машин, тел. (057)707-65-14; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Милых Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедрой электрических машин, тел. (057)707-65-14; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Milykh Vladimir Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Chair of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-65-14; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.

Шилкова Лариса Василівна, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електричних машин, тел. (057)707-68-44, e-mail: larisa_lv@ukr.net.

Шилкова Лариса Васильевна, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры электрических машин, тел. (057)707-68-44, e-mail: larisa_lv@ukr.net.

Shilkova Larisa Vasilivna, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Senior Lecturer of the Department of Electrical machines, tel. +38 (057) 707-68-44, e-mail: larisa_lv@ukr.net.