

V. I. МІЛИХ

ЧИСЕЛЬНО-ПОЛЬОВИЙ АНАЛІЗ МАГНІТНОЇ ПРОВІДНОСТІ ПАЗОВОГО РОЗСІЯННЯ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Вступ. Досліджуються магнітні поля і відповідні магнітні провідності пазового розсіяння обмотки статора трифазних асинхронних двигунів (ТАД). Такі дослідження актуальні при їхньому проектуванні і є однією з основ для розрахунку низки енергетичних параметрів та характеристик двигунів. При класичному проектуванні ТАД, яке є чинним і наразі, зазначені магнітні провідності визначаються аналітично за спрощеною моделлю пазового розсіяння, тому можуть не завжди забезпечити достатню точність через низку припущень і умовностей. **Мета.** Подальший розвиток системи проектування ТАД шляхом чисельно-польового розрахункового аналізу магнітної провідності пазового розсіяння їхньої обмотки статора, а також порівняльна перевірка відповідних аналітичних формул з різних методик класичного проектування. **Результати.** Пазове розсіяння ТАД визначається чисельними розрахунками за програмою FEMM у межах зубцевих кроків статора. Для досліджень прийняти чотири варіанти форм пазів статора, які є поширеними в сучасних ТАД малої та середньої потужності. При розрахунках розглядаються розрахункові моделі як з сильно насиченими, так і ненасиченими в магнітному відношенні зубцями осердя статора. Чисельно-польовим методом показано, що класична методика проектування може давати як достатньо точні результати, так і неприпустимі похибки у визначенні магнітних провідностей пазового розсіяння ТАД. **Обговорення та перспективи подальшого розвитку.** Надана методика чисельно-польового аналізу і отримані результати розрахунку пазового розсіяння обмоток ТАД рекомендуються як основа для удосконалення системи їхнього проектування.

Ключові слова: асинхронний двигун, обмотка статора, магнітні поля пазового розсіяння, магнітні провідності, магнітне насичення, класичне проектування, чисельно-польовий розрахунковий аналіз, різні форми пазів, порівняльний аналіз.

V. I. MILYKH

NUMERICAL-FIELD ANALYSIS OF THE MAGNETIC CONDUCTIVITY OF THE SLOT DISPERSION OF THE STATOR WINDING OF INDUCTION MOTORS

Introduction. The magnetic fields and the corresponding magnetic conductivities of the slot dispersion of the stator winding of three-phase induction motors (IM) are studied. Such studies are relevant in their design and are one of the bases for calculating a number of energy parameters and characteristics of motors. In the classical design of an IM, which is still valid, the specified magnetic conductivities are determined analytically according to the simplified slot dispersion model, therefore they may not always provide sufficient accuracy due to a number of assumptions and conventions. **Goal.** Further development of the IM design system by means of a numerical-field calculation analysis of the magnetic conductivity of the slot dispersion of their stator winding, as well as a comparative check of the relevant analytical formulas from various methods of classical design. **Results.** The slot dispersion of IM is determined by numerical calculations using the FEMM program within the stator tooth steps. For the research, four variants of the shapes of the stator slots, which are common in modern IMs of small and medium power, are accepted. In the calculations, calculation models with strongly saturated and unsaturated in the magnetic relation with the stator core teeth are considered. The numerical-field method shows that the classical design method can give both sufficiently accurate results and unacceptable errors in determining the magnetic conductivities of slot dispersion of IM. **Discussion and prospects for further development.** The provided numerical-field analysis method and the obtained results of the calculation of slot dispersion of IM windings are recommended as a basis for improving the system of their design.

Key words: induction motor, stator winding, magnetic fields of the slot dispersion, magnetic conductivities, magnetic saturation, classical design, numerical-field computational analysis, different forms of slots, comparative analysis

Вступ. Трифазні асинхронні двигуни (ТАД) є найпоширенішими двигунами майже у всіх сферах діяльності людей. Зважаючи на їхню різноманітність і масове виробництво, удосконалення і виготовлення таких двигунів є завжди актуальними. Теж саме можна зазначити і відносно системи їхнього проектування, з умовою забезпечення точності відтворення проектних даних, що необхідно для уникнення тривалих досвідно-експериментальних доробок створюваних зразків.

До важливих параметрів ТАД відносяться індуктивні опори розсіяння і активні опори обмоток статора і ротора. Ці опори розраховуються при проектуванні й є підґрунтям для подальшого визначення низки енергетичних параметрів та характеристик двигунів, таких як робочі, механічні, регульовальні, пускові тощо.

Розрахунки зазначених опорів при проектуванні ТАД виконуються за усталеними класичними методами, які можна знайти, приміром, в [1, 2], причому вони практично не змінюються десятиліттями. За цими методиками при номінальному навантаженні ТАД розрахунки опорів обмоток зазвичай не мають принципових проблем, проте для диференціального, пазового і лобового розсіяння питомі магнітні провідності

визначаються за вельми наближеними формулами. Поперед усього це відноситься до пазового розсіяння, тому що в умовах різноманітних форм пазів статора і ротора потрібні індивідуальні формули, але вони засновані на спрощеній структурі магнітного поля в цих пазах.

У підсумку, дійсна сутність фізичних явищ, властивих ТАД, для їхніх розрахувачів є не зовсім прозорою, що призводить до недостатньо точних результатів розрахунків.

Проте, наразі з'явилися програмні засоби, наприклад, такі популярні, як COMSOL Multiphysics, ANSYS Maxwell, FEMM тощо, які дозволяють при визначенні реактивних опорів розсіяння обмоток ТАД уникнути умовностей завдяки використанню чисельно-польових розрахунків.

Використання різних програмних комплексів, а також інших експериментальних і розрахункових досліджень характеристик та параметрів ТАД відображено у значній кількості робіт, наприклад, у [3–11]. Але, орієнтуючись на виконання власної мети, вони фактично не торкаються аналізу реактивних опорів обмоток ТАД. Це означає, що у таких роботах лише

© V.I. Міліх, 2023

використовуються дані, отримані при проектуванні або створенні ТАД, не звертаючись до проектного аналізу зазначених параметрів. Тому завдання детального аналізу методики розрахунку реактивних опорів розсіювання обмоток ТАД залишається недостатньо вивченим і наразі є актуальним.

Метою роботи є подальший розвиток системи проектування ТАД шляхом чисельно-польового розрахункового аналізу магнітної провідності пазового розсіювання обмотки статора ТАД, а також порівняльна перевірка відповідних аналітичних формул, властивих методикам їхнього класичного проектування.

Аналіз останніх досліджень. Виконані розрахункові і експериментальні дослідження ТАД з використанням активних і індуктивних опорів їхніх обмоток дуже різноманітні як в теоретичному, так і в практичному відношенні.

У роботі [3] запропоновано чисельно-польовий аналіз проектних даних ТАД, які отримуються в результаті проектування за класичними методиками, приміром, [1, 2], який не тільки перевіряє їхню адекватність, але ще надає метод їхнього уточнення, і це вимагало використання зазначених активних і індуктивних опорів його обмоток.

Робота [4] наголошує, що для досягнення ефективного керування приводу з ТАД необхідно точне визначення його активних і реактивних параметрів та глибоке їхнє розуміння. Для підтвердження цього виконано критичний аналіз сучасних методів визначення таких параметрів. Відповідно до цього, на основі Т-подібної схеми заміщення ТАД викладено ефективний метод, що складається з його випробування без наявності ротора, і причому з подвійним навантаженням. Докладні дослідження з вимірювання активних опорів і індуктивностей обмоток робляться з варіюванням частоти і значення струму обмотки статора. Зазначається, що при цьому у повній мірі враховується магнітне насичення осердь, втрати потужності в осердях, а також ефект витіснення струму у стрижнях обмотки ротора, що у підсумку сприяє точності виміру зазначених параметрів ТАД.

Огляд робіт за тематикою даної статті свідчить, що в системі розрахунків відповідних параметрів та характеристик ТАД розвиток відбувався у залежності від наявних комп'ютерного програмного забезпечення та технічних можливостей.

Індуктивності обмоток ТАД і їхнє магнітне розсіювання в роботі [5] визначаються чисельно-польовим методом на основі скінчених елементів. І дослідження виконуються при варіюванні частоти обертання ротора і струмів намагнічування, що забезпечує зміну активно-індуктивних параметрів ТАД. Але ці параметри визначаються лише для його обмоток в цілому без аналізу складових індуктивностей розсіювання і витіснення струму в стрижнях обмотки ротора.

В [6] на основі Т-подібної схеми заміщення ТАД, активно-реактивні параметри якої знаходяться при звичайних припущеннях також чисельно-польовим розрахунком, визначаються загальні параметри двигуна, у якому застосована ускладнена обмотка статора. Метою виконаного аналізу є поліпшення гармонійного складу електромагнітних величин і підвищення ефективності машини в експлуатації.

У статті [7] зроблено оглядовий аналіз методів ідентифікації для уточненого визначення параметрів асинхронного двигуна як офлайн, так і онлайн. При цьому враховуються підвищена температура обмоток і магнітне насичення осердь статора і ротора. При виконанні ідентифікації двигун знаходиться у нерухомому стані, а на обмотку статора подається сигнал або постійної напруги, або змінної однофазної напруги.

У роботі [8] розглянуто аналізатор параметрів асинхронного двигуна, який заснований на адаптивній системі еталонної моделі MRAS. На основі виконаних розробок запропонована оновлена концепція аналізатора PQ-MRAS, яка сприяє розрахунку одночасно активних і реактивних опорів обмоток статора і ротора, що вважають її головною перевагою. Аналізатор використовує активну і реактивну потужності електричної машини, які визначаються за вимірюваними напругою і струмом обмотки статора.

У дослідженні [9] надано алгоритм розрахунку механічних характеристик ТАД з короткозамкненою обмоткою ротора, а також запропоновано методи аналізу їхніх пускових режимів. Представлені методи розрахункового аналізу засновані на математичній моделі асинхронних двигунів, що враховує зміну власних та взаємних диференціальних індуктивних опорів через насичення осердь та активного опору обмотки ротора внаслідок витіснення струму в її стрижнях. Проте власне активні та реактивні опори обмоток не надаються і не аналізуються.

Нова методологія вимірювання активно-реактивних опорів загальнопромислових асинхронних двигунів в процесі масового виробництва розкрита в статті [10]. В ній представлено і проаналізовано залежність індуктивності обмотки статора ТАД від струму намагнічування та від вищих гармонік напруги, а також надано імітаційну модель аналізу стійкості двигуна до їхнього впливу.

У [11] обговорюється адаптивне моделювання ТАД з метою підвищення точності його проектування і відповідності певному призначенню і стандартам захисту. Запропоновано алгоритми реалізації статичного і динамічного моделювання двигунів, які перевірено на базі декількох відомих методів. В основу моделювання покладена Т-подібна схема заміщення ТАД в різних варіантах її структури і завдання активно-реактивних параметрів.

Об'єкт дослідження. Для демонстрації виконуваних досліджень прийнято чотириполюсний ТАД з висотою осі обертання 160 мм на номінальну потужність 15 кВт; фазну напругу 220 В; частоту 50 Гц. За проектним розрахунком цього ТАД в [2] визначено: зовнішні діаметри статора $d_{se}=272$ мм і ротора $d_r=184$ мм; повітряний проміжок $\delta=0,5$ мм; номінальне ковзання $s_N=0,0026$; активна довжина $l_a=130$ мм; діюче значення номінального фазного струму статора $I_{sN}=29$ А; кількості його пазів $Q_s=48$ і послідовних витків на фазу обмотки $N_s=112$, кількості паралельних віток $a_s=2$, обмотковий коефіцієнт $K_{ws}=0,959$; кількість пазів ротора $Q_r=38$.

Обмотка статора одношарова, діаметральна, що характерно для ТАД визначеної потужності.

Загальне компонування електромагнітної системи ТАД надано на рис. 1.

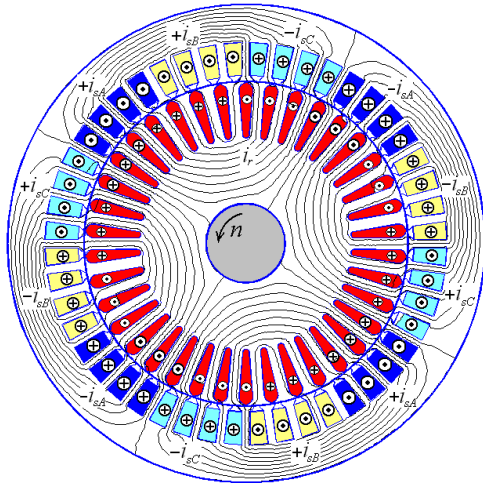


Рис. 1. Електромагнітна система ТАД з розподілом струмів в його обмотках і картиною силових ліній магнітного поля при номінальному навантаженні

В даному ТАД у якості базової застосовані поширена форма пазу статора загальнопромислових ТАД [1, 2], яка показана на рис. 2, а разом з зубцями і позначенням мінімально необхідної для подальших розрахунків кількості розмірів (в мм). Додатково показана частка висоти пазу $h_p = h_s - h_{s1} - h_{s2} = 18,8$ мм, яка заповнена провідниками зі струмом, а також радіус розточення осердя статора $r_{si} = 92,25$ мм.

Крім того, для розширення кола досліджень прийняті модернізовані форми пазів, які рекомендовані в [1, 2] – вони подані на рис. 2, б, в, г.

Для пазів на рис. 2, б, в, г необхідні розміри зберігаються такими самими, як і для базового пазу рис. 2, а, але нові розміри розраховані на основі базових за розробленими автором статті формулами.

У такий спосіб отримано на рис. 2, б $r_s = 4,77$ мм; на рис. 2, в визначальним є кут $\beta = 82,4^\circ$; на рис. 2, г прийнято $b_s = b_{s2} = 7,7$ мм.

Конкретним формам пазів в класичній методиці розрахунків ТАД відповідають конкретні формули питомих магнітних провідностей пазового розсіяння, які прийняті на основі формул з [2, 12] і надані тут формулами (1)-(4). Ці формули відповідають пазам на рис. 2 у тій же послідовності:

$$\lambda_{sn} = \frac{h_p}{3b_{s2}} + \frac{3h_{s2}}{b_{s2} + 2b_{s1}} + \frac{h_{s1}}{b_{s1}}; \quad (1)$$

$$\lambda_{sn} = \frac{h_p}{3b_{s2}} + \frac{3h_{s2}}{b_{s2} + 2b_{s1}} + \frac{h_{s1}}{b_{s1}}; \quad (2)$$

$$\lambda_{sn} = \frac{h_p}{3b_{s2}} + 0,785 - \frac{h_{s1}}{2b_{s2}} + \frac{h_{s1}}{b_{s1}}; \quad (3)$$

$$\lambda_{sn} = \frac{h_p}{3b_s} + \frac{h_{s1} + h_{s2}}{b_s}. \quad (4)$$

Відомо, що ці формули є наближеними, тому що в їхню основу взяли апіорі простішу структуру магнітного поля пазового розсіяння, відповідно до якої усі силові лінії цього поля проходять перпендикулярно осі пазу, а магнітна проникність зубців осердя, які оточують паз, вважається нескінченно великою.

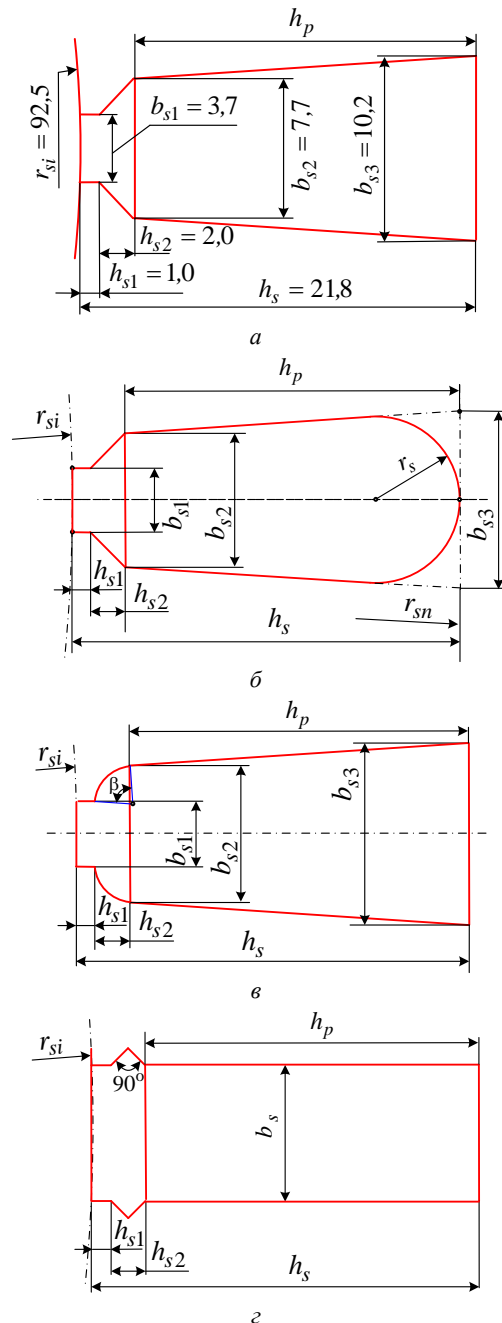


Рис. 2. Форми пазів статора, що розглядаються, з позначенням їхніх розмірів

Результати розрахунків питомої магнітної провідності пазового розсіяння у відносних одиницях (в.о.) за формулами (1)-(4) надані в табл. 1. Тут мова йде не про порівняння значень цієї провідності, тому що пази можна вважати лише частково подібними, незважаючи на те, що за основу прийнято основні розміри пазу базової форми за рис. 2, а. Відмінності пазів можна, приміром, відзначити порівнянням площ поперечного перерізу пазів S_{nut} , значення яких теж надані в табл. 1.

Важливим є те, що підготовлена інформація за класичною методикою проєктування ТАД, адекватність якої підлягає перевірці на основі чисельно-польового розрахунку магнітного поля пазового розсіяння з різними варіантами уточнення.

Таблиця 1 – Значення питомої магнітної провідності пазового розсіяння для трьох варіантів пазу λ_{sn} , а також їхні площі S_{nut}

Модель пазу	1	2	3	4
λ_{sn} , в.о.	1,481	1,481	1,804	1,203
S_{nut} , мм ²	168,3	156,8	168,3	144,8

З результатів табл. 1 відмітимо, що питома магнітна провідність пазу статора ТАД для базового варіанта пазу за класичною формулою (1) $\lambda_{rn1} = 1,481$. З решти результатів насторожує поки те, що для варіанта пазу 3 формула (3) дала результат $\lambda_{rn3} = 1,804$, який помітно «випадає» з низки інших результатів.

Чисельно-польові розрахунки магнітного поля пазового розсіяння.

Магнітні поля в ТАД в цілому, як на рис. 1, і локальні поля в окремих пазу (рис. 2) розраховуються загальновідомим методом скінчених елементів в популярному програмному пакеті FEMM [13]. Побудова їхніх фізико-геометричної моделі в програмному середовищі FEMM, керування розрахунками магнітного поля та визначення необхідних електромагнітних параметрів були автоматизовані. Для цього за прикладом в [14] й інших авторських роботах створений скрипт на алгоритмічній мові Lua [15], інтегрованої до програми FEMM.

Стационарне магнітне поле ТАД в його поперечному перерізі описується загальновідомим двовірним диференціальним рівнянням [13]:

$$\text{rot}[\mu_a^{-1} \text{rot}(\vec{k}A_z)] = \vec{k}J_z, \quad (5)$$

де A_z, J_z – аксіальні складові векторного магнітного потенціалу (ВМП) і густини струму; μ_a – абсолютна магнітна проникність; \vec{k} – орт за аксіальною віссю z.

Поширення магнітного поля обмежується зовнішньою поверхнею осердя статора, де для ВМП задано граничну умову Діріхле: $A_z = 0$. На рис. 1 надано приклад картини силових ліній магнітного поля ТАД при номінальному навантаженні.

Для визначення достатньої зони розрахунку магнітного поля пазового розсіяння в [16] виконано тестові розрахунки. Причому спочатку струм задавався в одному пазу статора і магнітне поле розраховувалося в повній моделі ТАД, яка надана на рис. 1. Потім розрахункова модель була обмежена одним зубцевим кроком статора з захопленням частини спинки осердя статора, повітряного проміжку і умовної зони осердя ротора. У підсумку було виявлено, що питома магнітна провідність пазового розсіяння при переході від першої розрахункової моделі до другої практично не змінюється.

На основі досвіду з [16] у даній роботі була застосована розрахункова модель пазу статора, яка надана на рис. 3. Це, за суттю, фрагмент повної моделі за рис. 1, але у межах зубцевого кроку статора τ_{sa} із захопленням частини спинки осердя статора до радіуса r_{sge} , а з іншого боку обмежена дугою радіуса r_{si} розточення осердя статора. Тобто повітряний проміжок не захоплюється, і все це відповідає умовній зоні розрахунку пазового розсіяння за класичною методикою [1, 2], яка привела до формул (1)-(4), причому там зона розрахунку обмежується тільки пазом без залучення прилеглих частин зубцевої зони, для яких магнітна

проникність вважалася нескінченно великою.

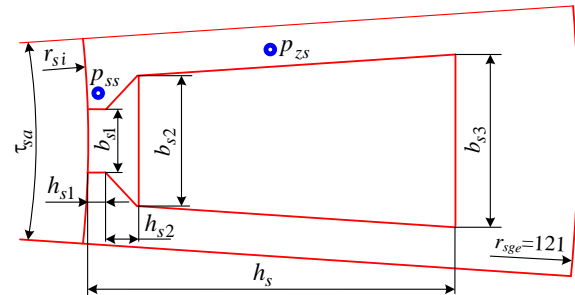


Рис. 3. Розрахункові моделі пазу статора у межах їхнього зубцевого кроку

Таким чином, при розрахунку магнітних полів для пазу статора використовуються розрахункова модель за рис. 3 та рівняння (5).

Оскільки розраховується магнітне поле пазового розсіяння, то вважається, що за зовнішні межі розрахункової моделі за рис. 3 воно не виходить. Тому тут для ВМП задається вже згадувана гранична умова Діріхле, а саме $A_z = 0$.

Розв'язання рівняння (5) для програми FEMM є тривіальною задачею. При цьому в пазу задається сумарний його струм, а в результаті чисельного розрахунку програма надає розподіл ВМП.

Чисельно-польовим розрахункам магнітних полів пазового розсіяння будь-яка форма пазів не робить ускладнень, тому такі розрахунки є універсальними, і при переході від одної форми пазу до іншої математична модель і алгоритм розрахунку не змінюються. У даній роботі не змінюються і зовнішні границі розрахункової моделі за рис. 3.

Приклад скінчено-елементної структури надано на рис. 4 фрагментом розрахункової моделі зубцевого кроку, а усього на усю модель приходилося 4350 вузлів і 8380 трикутників, чого було цілком достатньо для точної апроксимації геометрії пазу.

Розрахунок магнітного поля однієї моделі триває лічені мілісекунди.

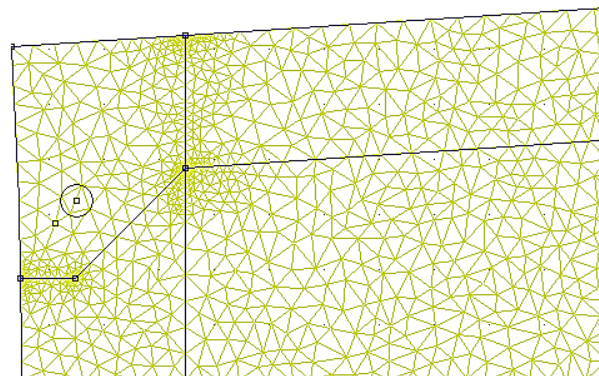


Рис. 4. Фрагмент скінчено-елементної структури в розрахунковій моделі пазу статора

Первісні тестові розрахунки магнітної провідності пазового розсіяння обмотки статора виконано для базової моделі пазу статора 1 (рис. 2, а). При цьому, як і при класичних розрахунках, магнітна проникність елементів осердя, оточуючих паз, спочатку була прийнята нескінченно великою. Але при комп'ютерних розрахунках

магнітного поля треба задавати її конкретне значення, тому відносна проникність μ_r прийнята рівною 10000, що в умовах ТАД можна вважати нескінченно великим значенням. Тобто для значення μ_{rc} для коронок і μ_{rt} для ніжок зубців, а також μ_{ry} для прилеглої частини спинки осердя мали саме таке значення.

При розрахунку магнітного поля в струмонесущій частині паза задається амплітуда повного струму

$$I_{nut} = z_{Qs} \sqrt{2} I_s, \quad (6)$$

де I_s – діюче значення фазного струму обмотки статора; z_{Qs} – кількість ефективних провідників в пазу.

Конкретно отримано силу струму $I_{nut} = 574$ А, який розподіляється з рівномірною густиною в частці паза на висоті h_p (див. рис. 2). В принципі, розрахункові значення питомої магнітної провідності у сформульованих умовах не залежать від значення струму в пазу, але краще оперувати з реалістичним значенням, щоб адекватно оцінювати проміжні параметри магнітного поля, які виходять в процесі роботи програми FEMM.

Отримана картина силових ліній магнітного поля пазового розсіяння надана на рис. 5.

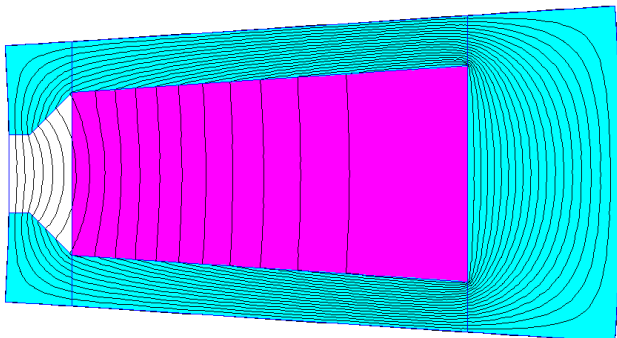


Рис. 5. Картина магнітного поля паза статора базової форми при $\mu_r = 10000$

Після розрахунку магнітного поля за отриманим розподілом ВМП для провідників паза статора визначається їхнє одиничне (на один умовний еквівалентний провідник) магнітне потокозчеплення (МПЗ), Вб:

$$\Psi_{Gns} = \frac{1}{S_{nutc} S_{nutc}} \int A_z dS, \quad (7)$$

де S_{nutc} – площа провідникової частини паза, м².

За МПЗ (7) визначається одинична індуктивність пазового розсіяння провідників паза статора, Гн;

$$L_{Gsn} = \Psi_{Gsn} / I_{nut}. \quad (8)$$

І на такій основі виходить питома магнітна провідність розсіяння паза, в.о.:

$$\lambda_{sn} = L_{Gsn} / (\mu_0 l_a), \quad (9)$$

де μ_0 – магнітна постійна ($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

В результаті при «нескінченній» магнітній проникності осердя за формулами (7)-(9) отримано: $\Psi_{nut} = 1,420 \cdot 10^{-4}$ Вб; $L_{Gsn} = 2,473 \cdot 10^{-7}$ Гн; $\lambda_{sn} = 1,514$.

Далі на базовій розрахунковій моделі за рис. 2, а перевірено, як впливає на результати розрахунків значення магнітної провідності зон розрахунку. Для цього на повній моделі ТАД (рис. 1) за результатами розрахунку магнітного поля в номінальному режимі роботи були визначені середні (av), максимальні (max) і мінімальні (min) значення відносної магнітної проникності для коронок μ_{rc} і ніжок μ_{rt} зубців (розташування таких

точок p_{ss} і p_{zs} показано на рис. 3), а також для прилеглої частини спинки μ_{ry} осердя. Ці значення обиралися по низці зубцевих кроків, і вони наведені в табл. 2, де також надані отримані за допомогою розрахунку магнітного поля значення питомої магнітної провідності пазового розсіяння статора.

Таблиця 2 – Розрахункові варіанти магнітної проникності і відповідні значення питомої магнітної провідності пазового розсіяння λ_{sn}

Тип значення	μ_{rc}	μ_{rt}	μ_{ry}	λ_{sn}
max	2400	2200	4000	1,499
av	1700	1200	2500	1,483
min	1000	300	1200	1,395

Залежність питомої магнітної провідності пазового розсіяння від рівня насичення прилеглої до паза частини осердя наочна: при зміні насичення зубців статора вона змінюється на 7,5%, що при класичному проектуванні ігнорується і така погрішність, в принципі, закладається в проекти ТАД.

Також наочна відмінність значення $\lambda_{sn} = 1,514$ при «нескінченній» магнітній проникності осердя від значення $\lambda_{sn1} = 1,481$ за класичною формулою (1). Відхилення у 2,2% виникає через декілька іншу реалістичну структуру магнітного поля на рис. 5 порівняно з спрощеною структурою, яка прийнята для отримання формул (1)-(4).

Розрахунки магнітного поля пазового розсіяння для інших форм пазів, зображених на рис. 2, виконано при вкрай ненасичених елементах зубців і спинки осердя статора, щоб забезпечити ті ж саме умови, як і для виведення формул (1)-(4). Результати розрахунків магнітних полів для трьох додаткових форм паза надано на рис. 6.

У табл. 3 надано значення питомої магнітної провідності пазового розсіяння λ_{sn} для чотирьох варіантів паза: чисельно-польовий розрахунок при нескінченній ∞ і усередненій av магнітній проникності та при розрахунку за формулами (1)-(4). Показана також відмінність результатів за рядками 2 і 4 цієї таблиці.

Таблиця 3 – Значення питомої магнітної провідності пазового розсіяння λ_{sn} для різних варіантів паза і умовах розрахунків

Модель паза	1	2	3	4	
μ_r , в.о.	∞	1,514	1,468	1,476	1,179
	av	1,483	1,444	1,447	1,164
За формулами	1,481	1,481	1,804	1,203	
Відмінність, %	2,2	-0,9	-18,2	-2,0	

Те застереження, яке було висловлено за даними табл. 1, тут підтвердилася. Тобто для паза за варіантом 3 різниця між чисельно-польовим та аналітичним розрахунками сягає 18,2%. На тлі значно менших відмінностей для інших варіантів пазів можна зробити висновок, що справа не в формі пазів, а в помилковості формули (3). І це прикро, тому що варіант паза 3 є поширеним і багато років проєктанти ТАД використовували помилкову формулу з [2].

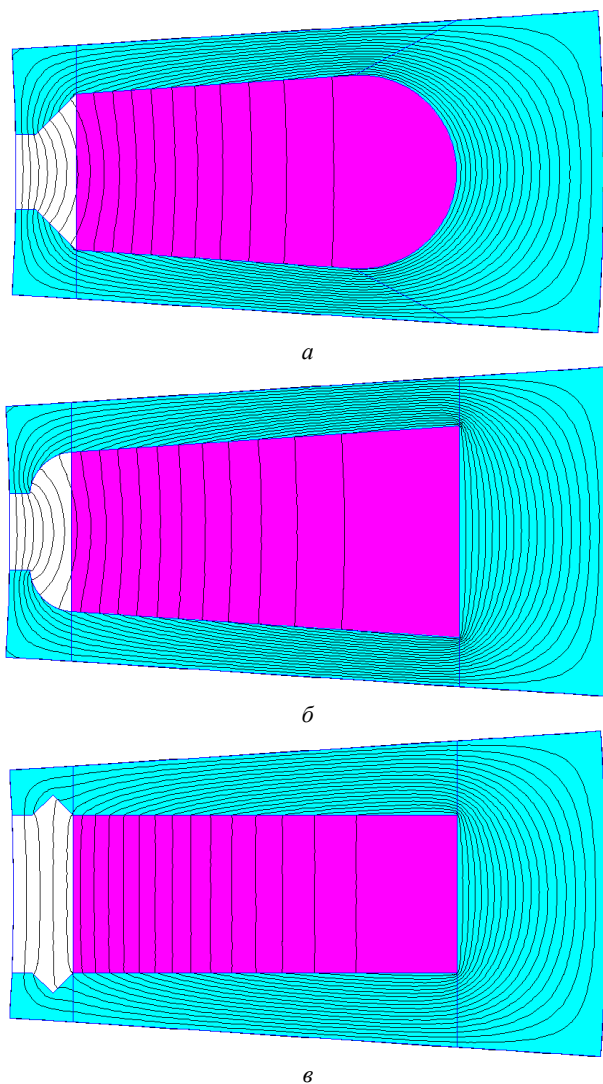


Рис. 6. Картини магнітного поля додаткових варіантів паза статора при $\mu_r = 10000$

Автори підручника з проектування [12], які переказали з [2] на українську мову, а за суттю «клонували» це джерело, з усіх формул внесли корективи тільки в формулу (3), в яку замість $\frac{h_{s1}}{2b_{s2}}$ вписали $\frac{h_{s1}}{b_{s2}}$. Така пі-

дміна змінила λ_{sn} з 1,804 до 1,739, але погрішність у порівнянні з 1,476 все одно залишилася завеликою – 15,1%.

Таким чином, проблема формули (3) залишилася невіршеною, і розв'язати її належить авторам підручників [2] і [12].

Висновки. 1. В системі проектування ТАД важливими є активні і реактивні опори обмоток, але їхнє визначення ще потребує уточнення. Тому ця проблема залишається актуальною і її вирішенню досі присвячується багато теоретичних і експериментальних досліджень.

2. Виявлено, що для розрахунку полів пазового розсіяння статора достатньо використання зони розрахунку у межах їхніх зубцевих кроків із захопленням власне пазів і прилеглої частини спинки його осердя.

3. Чисельно-польові розрахунки магнітних полів пазового розсіяння дають наочні картини їхньої структури для будь-яких форм пазів, що може бути у пригоді

при виборі й коригуванні цих форм.

4. При зміні насичення зубців статора магнітна провідність пазового розсіяння змінюється на 7,5%, що при класичному проектуванні ігнорується, і така погрішність, в принципі, закладається в проекти ТАД.

5. При умові повністю ненасичених зубців осердя статора результати розрахунків магнітної провідності пазового розсіяння пазів статора для різних їхніх форм показали, що дані чисельно-польових і класичних розрахунків доволі близькі: розходження у межах від -2,0 до 2,2%. Але разом з тим виявлено, що для однієї з поширених форм паза класична формула з підручників проектування ТАД явно похибкова, тому що вона дає погрішність 18,2%.

6. Виконані дослідження показали, що чисельно-польові розрахунки магнітної провідності пазового розсіяння є універсальними, тому вони можуть бути запропоновані для аналогічних розрахунків як для пазів статора, так і ротора різних електричних машин. Причому, зважаючи на нескладність програмної реалізації на базі програми FEMM, такі розрахунки можна вбудовувати в автоматизовані методики проектування зазначених машин.

Список літератури

1. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. *Проектирование электрических машин*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2001. 430 с.
2. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. и др. *Проектирование электрических машин*. М.: Юрайт, 2011. 767 с.
3. Мильх В.И. Численно-полевой анализ адекватности проектных данных трехфазных асинхронных двигателей и метод их уточнения на этой основе. *Технічна електродинаміка*, 2018, № 1, с. 47-55. Doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.047>.
4. Chen H., Bi C. An effective method for determination and characteristic analysis of induction motor parameters. *IET Electric Power Applications*, 2022, vol. 16, no. 5, pp. 605-615. Doi: <https://doi.org/10.1049/elp2.12180>.
5. Hachicha M.R., Ben Hadj N., Ghariani M., Neji R. Finite element method for induction machine parameters identification. *2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology*, 2012, pp. 490-496. doi: <https://doi.org/10.1109/REVET.2012.6195318>.
6. Muteba M., Jimoh A.A. Performance analysis of a three-phase induction motor with double-triple winding layout. *2013 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC)*, 2013, pp. 131-136. doi: <https://doi.org/10.1109/IFEEEC.2013.6687492>.
7. Tang J., Yang Y., Blaabjerg F., Chen J., Diao L., Liu Z. Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors: A Review. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 9, art. no. 2194. doi: <https://doi.org/10.3390/en11092194>.
8. Bednarz S.A., Dybkowski M. Estimation of the Induction Motor Stator and Rotor Resistance Using Active and Reactive Power Based Model Reference Adaptive System Estimator. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 23, art. no. 5145. doi: <https://doi.org/10.3390/app9235145>.
9. Malyar V.S., Hamola O.Y., Maday V.S., Vasylychshyn I.I. Mathematical modelling of starting modes of induction motors with squirrel-cage rotor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 2, pp. 9-15. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.2.02>.
10. Dambrauskas K., Vanagas J., Bugenis S., Zimnickas T., Kalvaitis A. Methodology for Asynchronous Motor Impedance Measurement by Using Higher Order Harmonics. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 10, art. no. 2541. doi: <https://doi.org/10.3390/en13102541>.
11. Le Roux P.F., Ngwenyama M.K. Static and Dynamic Simulation of an Induction Motor Using Matlab/Simulink. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 10, art. no. 3564. doi: <https://doi.org/10.3390/en15103564>.
12. *Проектування електричних машин: навч. посіб. / Д. В. Ципленков, О. Б. Іванов, О. В. Бобров, В. В. Кузнецов, В. В. Артемчук, М. О. Баб'як; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка»*. – Д.: НТУ «ДП», 2020. – 408 с.

13. *Finite Element Method Magnetics: OldVersions. FEMM 4.2 21Apr2019 Self-Installing Executable.* – Режим доступу: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions/> (Дата звернення: 23.08.2023).
 14. Мілих В.І. Система автоматизованого формування розрахункових моделей електричних машин для програмного середовища FEMM. *Технічна електродинаміка*, 2018, № 4, с. 74-78. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.074>.
 15. Ierusalimschy R. Reference Manual of the Programming Language Lua 4.0 // R. Ierusalimschy, L. H. de Figueiredo, W. Celes. – Режим доступу: <http://www.lua.org/manual/4.0/>
 16. Мілих В.І. Чисельно-польовий аналіз активних і реактивних параметрів обмоток і механічна характеристика асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором / В.І. Мілих // *Електротехніка і електромеханіка*, 2023, № 4, С. 03-13. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.4.01>
- References (transliterated)**
1. Goldberg O.D., Gurin Ya.S., Sviridenko I.S. *Design of electrical machines. 2nd ed., revised and additional.* Moscow, Higher School Publ., 2001. 430 p. (Rus).
 2. Kopylov I.P., Goryainov F.A., Klokov B.K. *Electrical machines designing.* Moscow, Yurait Publ., 2011. 767 p. (Rus).
 3. Milykh V.I. Numerically-field analysis of the adequacy of the design data of three-phase induction motors and the method of their refinement on this basis. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 1, pp. 47-55. (Rus). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.047>.
 4. Chen H., Bi C. An effective method for determination and characteristic analysis of induction motor parameters. *IET Electric Power Applications*, 2022, vol. 16, no. 5, pp. 605-615. doi: <https://doi.org/10.1049/elp2.12180>.
 5. Hachicha M.R., Ben Hadj N., Ghariani M., Neji R. Finite element method for induction machine parameters identification. *2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology*, 2012, pp. 490-496. doi: <https://doi.org/10.1109/REVET.2012.6195318>.
 6. Muteba M., Jimoh A.A. Performance analysis of a three-phase induction motor with double-triple winding layout. *2013 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC)*, 2013, pp. 131-136. doi: <https://doi.org/10.1109/IFEEEC.2013.6687492>.
 7. Tang J., Yang Y., Blaabjerg F., Chen J., Diao L., Liu Z. Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors: A Review. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 9, art. no. 2194. doi: <https://doi.org/10.3390/en11092194>.
 8. Bednarz S.A., Dybkowski M. Estimation of the Induction Motor Stator and Rotor Resistance Using Active and Reactive Power Based Model Reference Adaptive System Estimator. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 23, art. no. 5145. doi: <https://doi.org/10.3390/app9235145>.
 9. Malyar V.S., Hamola O.Y., Maday V.S., Vasylychshyn I.I. Mathematical modelling of starting modes of induction motors with squirrel-cage rotor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 2, pp. 9-15. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.2.02>.
 10. Dambrasukas K., Vanagas J., Bugenis S., Zimnickas T., Kalvaitis A. Methodology for Asynchronous Motor Impedance Measurement by Using Higher Order Harmonics. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 10, art. no. 2541. doi: <https://doi.org/10.3390/en13102541>.
 11. Le Roux P.F., Ngwenyama M.K. Static and Dynamic Simulation of an Induction Motor Using Matlab/Simulink. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 10, art. no. 3564. doi: <https://doi.org/10.3390/en15103564>.
 12. Tsyplenkov, D.V.; Ivanov, O.B.; Bobrov, O.V.; Kuznetsov, V.V.; Artemchuk, V.V. & Babyak, M.O. Design of electric machines: training. manual. (Proiektuvannia elektrychnykh mashyn: navch. posib.). National technical university "Dniprovska Polytechnic", Dnipro: NTU "DP". 2020. 408 p. [in Ukrainian]
 13. *Finite Element Method Magnetics: OldVersions. FEMM 4.2 21Apr2019 Self-Installing Executable.* – <http://www.femm.info/wiki/OldVersions/>
 14. Milykh V.I. The system of automated formation of electrical machines computational models for the FEMM software environment. *Technical Electrodynamics*. 2018, no. 4, pp. 74-78. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.074>.
 15. Ierusalimschy R. Reference Manual of the Programming Language Lua 4.0 // R. Ierusalimschy, L. H. de Figueiredo, W. Celes, <http://www.lua.org/manual/4.0/>
 16. Milykh V.I. Numerical-field analysis of active and reactive winding parameters and mechanical characteristics of a squirrel-cage induction motor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 4, pp. 3-13. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.4.01>.

Надійшла (received) 23.10.2023

Відомості про авторів / About the authors

Мілих Володимир Іванович (Milykh Volodymyr Ivanovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри електричних машин, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6176-3103>; e-mail: mvikemkpi@gmail.com.