

УДК 621.313

С. В. Кіковка¹
В. К. Титюк¹
О. П. Чорний²

ТЕПЛОВІ РЕЖИМИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З БАГАТОЗОННИМИ ОБМОТКАМИ СТАТОРА

¹Криворізький національний університет;

²Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Розроблено теплову модель асинхронного двигуна з несиметричними багатозонними обмотками статора на основі методу багатотільних теплових схем. Запропоновано використання методу простору станів для розв'язання рівнянь теплової моделі. Встановлено, що використання багатозонної обмотки статора зменшує температуру двигуна за постійного моменту опору. Встановлено, що мінімум втрат з багатозонними обмотками статора має місце за умови однакової потужності окремих напівобмоток в асинхронному двигуні.

Ключові слова: асинхронний двигун, теплові режими, багатозонна обмотка статора, втрати, тепла модель.

Вступ

Асинхронні електродвигуни (АД) є найпоширенішим типом електромеханічних перетворювачів. АД споживють до 60 % вироблюваної у світі електроенергії, [1]. Одним з перспективних напрямків підвищення енергетичних характеристик АД є подальше удосконалення конструкції статорів шляхом використання багатозонних обмоток [2]. Розробка завершеного комплексу для проектування АД з багатозонними статорними обмотками (АДБО) вимагає розв'язання задачі аналізу теплових режимів таких двигунів.

Метою роботи є розробка математичної моделі АД з багатозонними обмотками статора, придатної для дослідження його температурних режимів.

Результати дослідження

Статорна обмотка є найскладнішою, відповідальною і технологічно трудомісткою частиною будь-якої електричної машини (ЕМ). Своїми електромагнітними властивостями, технологічністю і вартістю вони визначають всі основні показники ЕМ: енергетичні, віброакустичні, експлуатаційну надійність і термін служби. Відомі вже близько сторіччя трифазні обмотки ЕМ змінного струму досягли високої технологічності і мають прийнятні електромагнітні параметри, але пошуки нових, досконаліших і економічніших схем і конструкцій трифазних обмоток триває і сьогодні. Одним з напрямків подальшого удосконалення АД є використання багатозонних обмоток статора.

Кількість фаз обмежується тільки кількістю пазів статора і парою полюсів. Однак найбільшого поширення набули обмотки з кількістю фаз кратною трьом, які є з'єднаними однаковими комплектами трифазних обмоток. У таких обмотках на кожному полюсному розподілі кожна фаза займає не $1/3$, а тільки $1/m$ загального обсягу паза (m — число фаз), тобто, вони більш зосереджені і їх коефіцієнти розподілу вищі, ніж у стандартних трифазних обмоток [3].

Однак, основним недоліком багатозонних АД є необхідність у відповідному джерелі електричної енергії, який істотно ускладнює і збільшує вартість всієї системи ЕП. Щоби позбутися цього недоліку, запропоновано фази одного комплекту з'єднувати в трикутник, а фази іншого — в зірку. В такому випадку, зрушення фаз напруги живлення кожної фази буде зміщений на $1/12$ періоду, а загальний зсув між комплектами буде дорівнювати 30° . Рівень напруги жив-

лення, перетину провідників і кількість провідників у пазу цих комплектів буде відрізнятися в $\sqrt{3}$ разів. Крім того, ця багатофазна топологія дозволяє не тільки з'єднувати їх паралельно або послідовно, але також і міняти розподіл потужності між двома комплектами трифазних обмоток для пошуку оптимального варіанта в кожному конкретному випадку застосування [4].

Використання такого технічного рішення наразі стримується відсутністю методів дослідження теплових режимів АД запропонованої конструкції. Детальну інформацію про температурне поле АД зручніше отримати теоретичним шляхом.

Відповідно до різноманітності умов тепловідводу для теплового розрахунку електричних двигунів використовуються різні методи [5, 6]:

1. Метод точного або наближеного аналітичного розв'язання рівнянь для три- або двовимірних температурних полів зазвичай застосовується за значної нерівномірності поля. При цьому часто потрібні певні спрощення геометричної форми і граничних умов в математичній моделі.

2. Чисельний метод сіток застосовується в подібних випадках, але не вимагає значних спрощень форми областей простору.

3. Метод одновимірного температурного поля застосовується для розрахунку розподілу температури по довжині обмоток і інших частин електричних машин. Оснований на зведенні три- і двовимірних полів до одновимірного шляхом спрощеного уявлення теплопередачі вздовж всіх осей координат, крім однієї, за допомогою дискретних параметрів (теплових опорів).

4. Метод еквівалентних теплових схем (ЕТС) набув найбільшого поширення завдяки простоті і достатній точності розрахунку. Недолік методу полягає в тому, що він дає неповну картину температурного поля, а тільки деякі середні значення температури для окремих елементів машини.

Для створення доступних інженерних методів аналізу теплових режимів електромеханічного обладнання найприйнятнішим є метод ЕТС, який не вимагає екстремальних обчислювальних потужностей і є достатньо точним, [6]. Цей метод заснований на використанні теплових опорів [3], які з'єднуються в теплову мережу, що імітує реальні шляхи передачі теплових потоків в машині, і передбачає аналогію теплового потоку з електричним струмом, основу на однаковій формі основного закону теплопровідності (закон Фур'є) [7]

$$\Delta P = \frac{\lambda \cdot F_m \cdot \Delta \theta}{\delta} = \frac{\Delta \theta}{R_m}, \quad (1)$$

де F_m — площа перетину, перпендикулярного поширенню теплоти; λ — коефіцієнт теплопровідності; $\Delta \theta$ — падіння температури на довжині δ ; R_m — тепловий опір цієї ділянки на шляху теплового потоку.

Вузли теплової схеми імітують окремі частини двигуна. Якщо в будь-якій частині двигуна присутні розподілені за обсягом джерела теплоти, то для складання еквівалентної теплової схеми вони замінюються зосередженим джерелом (джерелом теплового потоку), поміщеним у вузол, що імітує цю частину. Вузли з внутрішнім тепловиділенням на схемі позначаються кружками, вузли без тепловиділення — точками.

Для детального розрахунку значень температур використовують докладні еквівалентні теплові схеми. Розглянуту машину поділяють на окремі тіла або елементи, тою чи іншою мірою однорідні (матеріал, умови виділення втрат, характер контакту з сусідніми елементами або середовищем).

Окремі тіла характеризуються величиною тепловиділення, власної теплоємністю і тепловими опорами, що визначають умови передачі тепла від розглянутого тіла до інших тіл ТЗ. У практичних розрахунках частіше використовується тепла провідність, рівна зворотній величині від теплового опору.

Розглянемо універсальну ТС електромеханічного перетворювача, що складається в загальному випадку з N окремих тіл. Для отримання загальних виразів припустимо, що N -тілна ТС електромеханічного перетворювача є повнозв'язною, тобто кожне окреме тіло k пов'язане з кожним з решти тіл $j = 1 \dots N$, $j \neq k$ теплової провідністю λ_{kj} , рис. 1, причому з міркувань симетрії впливає рівність $\lambda_{kj} = \lambda_{jk}$.

Кожне окреме тіло k також пов'язано з навколишнім середовищем теплової провідністю λ_{k0} , а також характеризується теплоємністю C_k і містить джерело теплоти потужністю P_k . Поточний стан тіла k характеризується абсолютною температурою Θ_k або перевищенням цієї температури над температурою навколишнього середовища $\tau_k = \Theta_k - \Theta_{env}$, (перегрівом). Зрозуміло, в

практичних випадках частина вищезазначених провідностей і теплових джерел матимуть нульові значення.

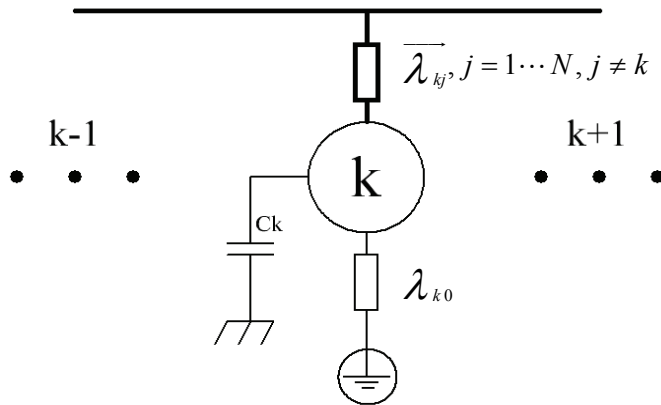


Рис. 1. Узагальнена схема повнозв'язної N -тільної ТС електромеханічного перетворювача

Складемо диференціальне рівняння теплового балансу, що описує зміну температури окремого тіла k в описаній вище ТС.

$$C_k \frac{d\theta_k}{dt} = P_k - a_{k1}(\theta_k - \theta_1) - \dots - a_{kk}(\theta_k - \theta_{env}) - \dots - a_{kN}(\theta_k - \theta_N). \quad (2)$$

Переходячи в (2) від абсолютних значень температури до значень перегріву, отримаємо:

$$C_k \frac{d\tau_k}{dt} = P_k - a_{k1}(\tau_k - \tau_1) - \dots - a_{kk}\tau_k - \dots - a_{kN}(\tau_k - \tau_N). \quad (3)$$

Розкриваючи в (3) дужки і приводячи подібні члени, отримаємо:

$$C_k \frac{d\tau_k}{dt} = P_k + a_{k1}\tau_1 + a_{k2}\tau_2 + \dots - \left(\sum_{i=1}^N a_{ki} \right) \tau_k + \dots + a_{kN}\tau_N. \quad (4)$$

Представимо рівняння (4) в формі Коші

$$\frac{d\tau_k}{dt} = \frac{P_k}{C_k} + \frac{a_{k1}}{C_k}\tau_1 + \frac{a_{k2}}{C_k}\tau_2 + \dots - \frac{\left(\sum_{i=1}^N a_{ki} \right)}{C_k}\tau_k + \dots + \frac{a_{kN}}{C_k}\tau_N. \quad (5)$$

Процеси нагрівання в N -тільній ТС електромеханічного перетворювача описуються системою лінійних диференціальних рівнянь порядку N , яка може бути представлена у відомій формі простору станів

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u; \\ y = C \cdot x, \end{cases} \quad (6)$$

де A — функціональна матриця розміром $n \times n$, названа матрицею стану системи (об'єкта); B — функціональна матриця розміром $n \times r$, названа матрицею управління (входу); C — функціональна матриця розміром $t \times n$, названа матрицею виходу за станом.

Вектор станів ТС являє собою вектор-стовпець довжиною N , окремі компоненти якого дорівнюють значенням перегріву окремих тіл ТС

$$x = [\tau_1 \cdot \tau_2 \dots \tau_N]^T. \quad (7)$$

Компоненти вектора управління дорівнюють величині джерел теплоти окремих тіл ТС

$$u = [P_1 \cdot P_2 \dots P_N]^T. \quad (8)$$

Використовуючи рівняння (5), (7), (8), напишемо вирази для обчислення матриць у рівнянні (6). Для матриці стану системи отримаємо

$$A = \begin{bmatrix} -\sum_{i=1}^N a_{1i}/C_1 & a_{12}/C_1 & \dots & a_{1k}/C_1 & \dots & a_{1N}/C_1 \\ a_{21}/C_2 & -\sum_{i=1}^N a_{2i}/C_2 & \dots & a_{2k}/C_2 & \dots & a_{2N}/C_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k1}/C_k & a_{k2}/C_k & \dots & -\sum_{i=1}^N a_{ki}/C_k & \dots & a_{kN}/C_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N1}/C_N & a_{N2}/C_N & \dots & a_{Nk}/C_N & \dots & -\sum_{i=1}^N a_{Ni}/C_N \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Матриця стану системи є квадратною матрицею розмірності $N \times N$. Матриця управління системи є квадратною діагональною матрицею розмірності $N \times N$

$$B = \begin{bmatrix} 1/C_1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/C_2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1/C_k & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 1/C_N \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Якщо взяти вектор виходу ТЗ рівним вектору станів, тобто $y = x$, то матриця виходу C буде одиничною матрицею розмірності $N \times N$.

Подібне представлення рівнянь ТС електромеханічного перетворювача має низку безсумнівних переваг в порівнянні зі звичайною формою. Значно спрощується зовнішній вигляд моделі, модель ТС легко переносити між різними математичними пакетами, тому що всі основні математичні програми містять бібліотечні елементи для моделювання динамічних систем в формі простору станів. Така форма подання рівнянь ТС полегшить перехід до синтезу систем управління тепловими процесами. Зменшується ймовірність появи помилок під час створення моделі, що складається з окремих елементарних блоків, як це реалізовано в Matlab / Simulink, [9, 10].

У роботі [6] обґрунтовано доцільність використання шеститильної ТС для стандартного асинхронного двигуна, рис. 2а. Для аналізу теплових режимів АДБО ця модель необхідно ускладнити, враховуючи існування двох комплектів взаємно ізольованих статорних обмоток. Остаточою для АДБО отримаємо восьмитильну ТС, рис. 2б.

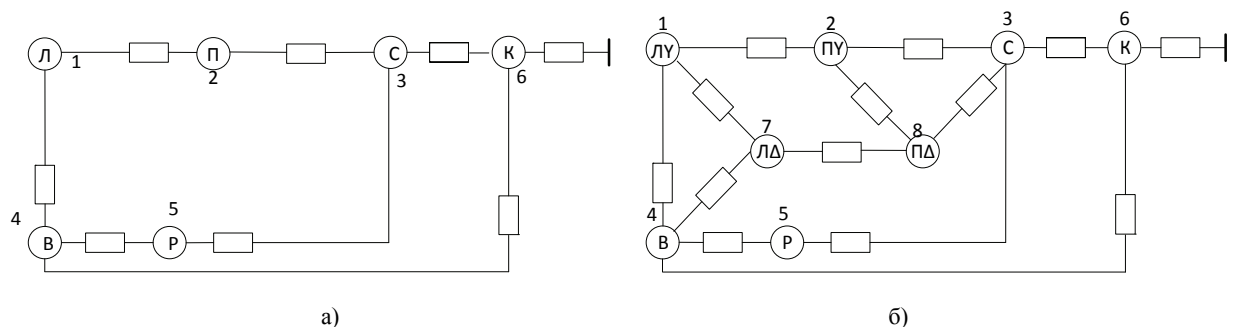


Рис. 2. Теплові схеми асинхронних двигунів: а — стандартний АД, б — АД з багатозонною обмоткою

До складу ТС стандартного АД на рис. 2а входять такі елементи: 1 — лобова частина обмотки; 2 — пазова частина обмотки; 3 — магнітопровід статора; 4 — внутрішнє повітря; 5 — ротор; 6 — корпус. До складу ТС АДБО на рис. 2б входять такі елементи: 1, 7 — лобові частини напівобмоток, з'єднаних Y та Δ ; 2, 8 — пазові частини напівобмоток, з'єднаних Y або Δ ; 3 — магнітопровід статора; 4 — внутрішнє повітря; 5 — ротор; 6 — корпус.

В процесі створення математичної моделі багатотильних ТС визначення теплових провідностей між окремими тілами ТС є найскладнішим. Теплові провідності визначаються геометричними

розмірами елементів і деталей, за якими проходить тепловий потік і тепловими властивостями матеріалів цих елементів.

Методи визначення теплових провідностей детально розглянуті у роботі [6]. За методикою [6] розраховано параметри теплових схем для АД типу 4АМ71А4 з такими технічними характеристиками: $P_n = 0,55$ кВт, $n_n = 1369$ об/хв, $U_n = 380$ В, $\eta_n = 70,5$ %, $\cos \phi_n = 70$ %.

На рис. 3 показано часові діаграми нагрівання лобової частина статорної обмотки розраховані за рівняннями (6), для стандартного АД, та для АДБО з паралельним, послідовним та зустрічними з'єднаннями напівобмоток.

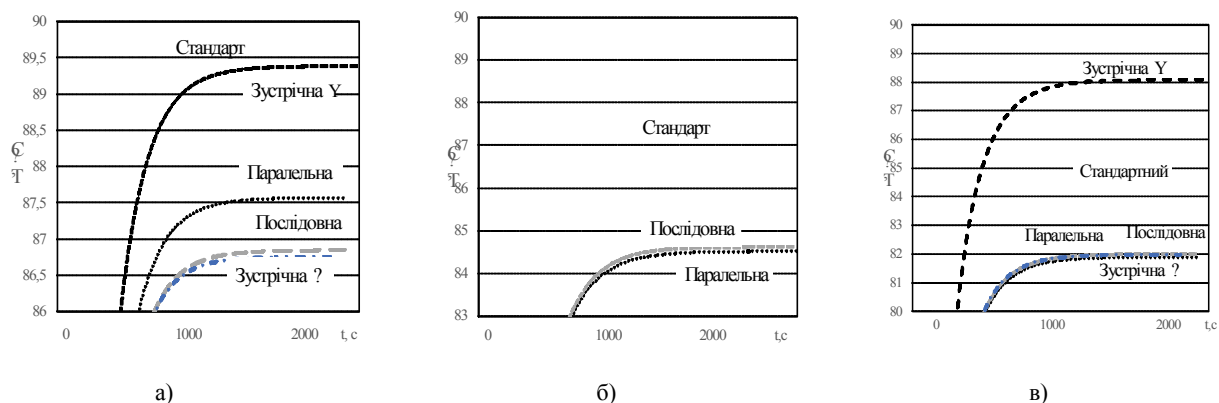


Рис. 3. Порівняльні часові діаграми нагрівання лобової частина статорної обмотки для АД та АДБО з різними типами обмоток: а — одношарова; б — одно-, двошарова; в — двошарова

Числові значення температури елементів АД, отримані під час математичного моделювання, збігаються з паспортними даними двигуна, що підтверджує адекватність запропонованих моделей.

Параметри теплових схем

Стандартний АД			АДБО (варіант)		
Теплові провідності, Вт/°С	Теплоємності, Дж/°С	Втрати, Вт	Теплові провідності, Вт/°С	Теплоємності, Дж/°С	Втрати, Вт
$\lambda_{54} = 1/2,696$	$C1 = 208$	$P1 = 74,5$	$\lambda_{54} = 1/2,696$	$C1 = 104,9$	$P1 = 36,9$
$\lambda_{64} = 1/0,626$	$C2 = 237$	$P2 = 85$	$\lambda_{64} = 1/0,626$	$C2 = 119,8$	$P2 = 42,2$
$\lambda_{35} = 1/0,678$	$C3 = 122$	$P3 = 17,6$	$\lambda_{35} = 1/0,678$	$C3 = 122$	$P3 = 8,2$
$\lambda_{36} = 1/0,094$	$C5 = 270$	$P5 = 76,1$	$\lambda_{36} = 1/0,094$	$C5 = 270$	$P5 = 76,1$
$\lambda_{60} = 1/0,00588$	$C6 = 1887$		$\lambda_{60} = 1/0,00588$	$C6 = 1887$	$P7 = 34,4$
$\lambda_{12} = 1/0,067$			$\lambda_{12} = 1/0,145$	$C7 = 112,7$	$P8 = 39,2$
$\lambda_{23} = 1/0,125$			$\lambda_{78} = 1/0,135$	$C8 = 128,7$	
$\lambda_{14} = 1/0,3$			$\lambda_{14} = 1/0,293$		
			$\lambda_{74} = 1/0,303$		
			$\lambda_{17} = 1/0,000044$		
			$\lambda_{28} = 1/0,000095$		

Важливим питанням є вплив на температурні режими АДБО коефіцієнта розподілу потужності між окремими напівобмотками за їх паралельного та послідовного з'єднання.

Задаючись незмінним моментом статичного опору, розраховані струми у окремих напівобмотках АДБО та обчислено сумарні втрати потужності у АДБО у залежності від перерозподілу потужності між окремими напівобмотками. Також враховано, що в залежності від перерозподілу потужності між окремими напівобмотками змінюється вага міді, а отже — теплоємність окремих елементів ТС. Отримані значення окремих складових втрат використано для розрахунку на математичній моделі усталеного значення температури лобової частини обмотки АДБО. Результати виконаних досліджень показано на рис. 4.

Зазначимо існування мінімуму загальних втрат у АДБО, який має місце за однакової потужності окремих напівобмоток.

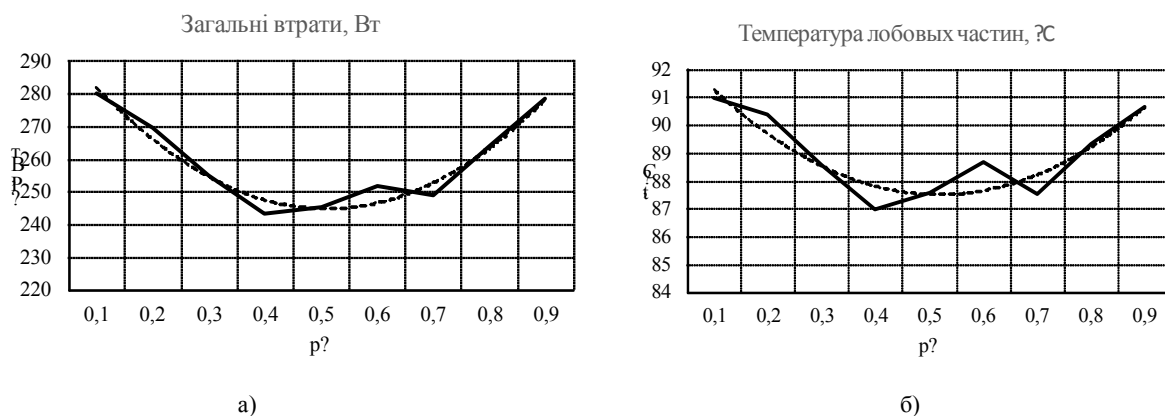


Рис. 4. Залежності: а — загальних втрат у АДБО; б — температури лобових частин обмотки статора АДБО від коефіцієнта перерозподілу потужності між окремими напівобмотками

Висновки

Розроблено математичну модель багатотільної теплової схеми електромеханічного перетворювача в формі простору станів. Використовуючи розроблену методику розрахунку теплових провідностей АД та АДБО, розраховано коефіцієнти рівнянь теплової схеми та виконано розрахунки теплових режимів АД та АДБО за номінального значення моменту опору на валу. Показано, що використання раціональних рішень для конструювання багатозонної обмотки приводить до зменшення усталеної температури порівняно з температурою стандартного АД за того ж навантаження. Встановлено, що втрати потужності у АДБО досягають мінімуму за однакової потужності окремих напівобмоток.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Trigeassou J.-C. *Electrical Machines Diagnosis* / J.-C. Trigeassou. — John Wiley & Sons, 2013. — 352 p.
2. Копылов И. П. *Электрические машины* / И. П. Копылов. — М.: Высшая школа, 2000. — 607 с.
3. Гольдберг О. Д. *Проектирование электрических машин* / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко. — М.: Высшая школа, 1984. — 431 с.
4. Домбровский В. В. *Асинхронные машины: Теория, расчет, элементы проектирования* / В. В. Домбровский, В. М. Зайчик. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 368 с.
5. Борисенко А. И. *Охлаждение промышленных электрических машин* / А. И. Борисенко, А. И. Костиков, А. И. Яковлев. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 296 с.
6. Сипайлов Г. А. *Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах* / Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. — М.: Высшая школа, 1989. — 239 с.
7. Беспалов В. Я. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя / В. Я. Беспалов, Ю. А. Мощинский, В. И. Цуканов // *Электричество*. — 2003. — № 4. — С. 20—26.
8. Математические модели нагрева и охлаждения асинхронных двигателей для микропроцессорного реле тепловой защиты / [Г. А. Бугаев, А. Н. Леонтьев, Е. Ю. Ерохин, Д. А. Павлова] // *Электротехника*. — 2001. — № 2. — С. 31—36.
9. Герман-Галкин С. Г. *Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0* / С. Г. Герман-Галкин. — СПб.: Корона принт, 2001. — 320 с.
10. Дьяконов В. П. *MatLab 6/6.1/6.5+Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя* / В. П. Дьяконов. — М.: СОЛН-Пресс, 2002. — 768 с.

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 30.10.2017

Кіовка Сергій Вікторович — аспірант кафедри електромеханіки;
Титюк Валерій Костянтинович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки,
 e-mail: dinalt2006@gmail.com .

Криворізький національний університет, Кривий Ріг;

Чорний Олексій Петрович — д-р техн. наук, професор, директор інституту електромеханіки, енергозбереження і систем управління.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук

S. V. Kikovka¹
V. K. Tytiuk¹
O. P. Chornyi²

Thermal Modes of Asynchronous Motors with Multi-zone Stator Windings

¹State Institution of Higher Education «Kryvyi Rih National University», Kryvyi Rih;

²Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

A thermal model of an induction motor with asymmetric multi-zone stator windings is developed on the basis of the method of multibodies thermal schemes. The use of the space-state method for solving the equations of the thermal model has been proposed. It has been established that using a multi-zone stator winding leads to a decrease in the engine temperature at a constant resistance moment. It has been established that the minimum losses in induction motor with multi-zone stator windings occur at the same power of the individual half-windings.

Keywords: induction motor, multi-zone stator winding, power losses, thermal model.

Kikovka Serhiy V. — Post-Graduate Student of the Chair of Electromechanics;

Tytiuk Valerii K. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Electromechanics, e-mail: dinalt2006@gmail.com ;

Chornyi Oleksii P. — Dc. Sc. (Eng.), Professor, Director of Institute of Electromechanics, Energy Saving and Control Systems

С. В. Киковка¹
В. К. Тытюк¹
А. П. Черный²

Тепловые режимы асинхронных двигателей с многозонными обмотками статора

¹Криворожский национальный университет, Кривой Рог;

²Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

Разработана тепловая модель асинхронного двигателя с несимметричными многозонными обмотками статора на основе метода многотельных тепловых схем. Предложено использование метода пространства состояний для решения уравнений тепловой модели. Установлено, что использование многозонной обмотки статора приводит к уменьшению температуры двигателя при постоянном моменте сопротивления. Установлено, что минимум потерь в АД с многозонными обмотками статора имеет место при одинаковой мощности отдельных полуобмоток.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, многозонная обмотка статора, потери, тепловая модель.

Киковка Сергей Викторович — аспирант кафедры электромеханики;

Тытюк Валерий Константинович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электромеханики, e-mail: dinalt2006@gmail.com ;

Черный Алексей Петрович — д-р техн. наук, профессор, директор института электромеханики, энергосбережения и систем управления