

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РЕЖИМА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Цель. Разработка новой методики определения параметров асинхронного двигателя посредством реализации трехмерной математической модели нестационарных электрических и магнитных полей, обеспечивающей высокую точность и достоверность результатов при учете особенностей конструкции асинхронных двигателей, нелинейности электрофизических и магнитных свойств активных и конструктивных материалов.

Методика. Численное моделирование сопряженных пространственных нестационарных электрических и магнитных полей асинхронного двигателя в режиме короткого замыкания методами теории электромагнитных полей, конечных элементов, теории электрических машин и электрических цепей.

Результаты. Представлены теоретические исследования и данные моделирования на основе численной реализации методом конечных элементов трехмерной нестационарной математической модели электромагнитных полей в асинхронном двигателе, отображающей особенности процессов преобразования энергии переменного тока в режиме опытного короткого замыкания. Исследованиями установлено, что в асинхронных двигателях малой мощности энергия магнитного поля локализуется в основном в областях сердечников и пазов статора и ротора. Но при этом в зоне лобовых частей обмоток статора выделяется до 15% от энергии магнитного поля асинхронного двигателя. В центральных зонах, протяженность которых достигает 60% длины сердечников статора и ротора, магнитное поле имеет плоскостепенный характер, а в зонах торцов сердечников и лобовых частей обмоток статора существенно трансформируется. Установлено влияние характерных особенностей распределения магнитного поля, его энергии на параметры короткого замыкания асинхронного двигателя малой мощности и режимы его работы. Соотношения между индуктивными сопротивлениями лобовых частей обмоток статора и пазовых частей статора и ротора для исследуемого асинхронного двигателя для режима опытного короткого замыкания составили соответственно 14,7% и 85,3%.

Научная новизна. Установлены закономерности пространственного распределения индукции и энергии магнитного поля в режиме опытного короткого замыкания, определены количественные соотношения между индуктивными сопротивлениями при локализации энергии магнитного поля в области лобовых частей обмоток статора и в областях сердечников и пазов статора и ротора асинхронных двигателей малой мощности.

Практическая значимость. Посредством реализации динамической пространственной модели электромагнитных полей методом конечных элементов и данных численного моделирования динамического режима опытного короткого замыкания асинхронного двигателя определены параметры его схемы замещения с учетом конструктивных особенностей статора и ротора, нелинейности свойств активных материалов в многокомпонентной области моделирования. Обосновано, что новый подход к определению параметров схемы замещения асинхронных двигателей на основе данных полевого моделирования обеспечивает существенное повышение точности по сравнению с общеизвестными итерационно-эмпирическими методами.

Ключевые слова: трехмерное моделирование, асинхронный двигатель, короткое замыкание, электромагнитные поля, метод конечных элементов, аппроксимирующие функции, энергия магнитного поля.

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития теории электрических машин, ряд вопросов, связанных с особенностями их работы в переходных режимах, процессами электромагнитного и электротеплового преобразования энергии и их влияния на параметры электрической машины полностью не изучены [1–2]. Высокий уровень энергоэффективности и надежности асинхронного двигателя (АД) определяется, прежде всего, его рабочими и механическими характеристиками, а также параметрами опытного холостого хода и опытного короткого замыкания (КЗ). При этом параметры КЗ оказывают преобладающее влияние на показатели энергоэффективности ра-

боты АД при переменных режимах нагрузки, уровень потерь и на показатели надежности. Поэтому для разработки новых энергоэффективных и надежных конструктивных исполнений электрических машин требуются высокоточные методы расчета их параметров, в том числе и в режиме КЗ.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В большинстве случаев для исследований и расчетов параметров АД в режиме КЗ применяется схемное моделирование [3–8], когда двигатель представляется электрической схемой замещения, а электрические парамет-

ры ротора приводятся к параметрам статора. На практике применяются инженерные методы расчета этих параметров, которые основываются на целом ряде существенных допущений [2]. Это обуславливает рост расчетных погрешностей и не удовлетворяет современным требованиям к повышению точности на этапе конструкторской подготовки производства, что характерно как для электрических машин большой мощности со специальными конструктивными исполнениями, так и для электрических машин средней и малой мощности со сложными условиями эксплуатации. Известная итерационная методика расчета параметров схемы замещения АД [8], обеспечивающая достаточно высокую точность (за исключением пусковых режимов), характеризуется высокой трудоемкостью из-за ее сложности и громоздкости, что затрудняет ее использование на предварительных этапах проектирования. Достаточно эффективная не итерационная методика расчета параметров схемы замещения, использующая данные каталогов и различные коэффициенты нагрузки АД, имеет высокую погрешность, которая может достигать 15 % [9]. Практическое использование данной методики не всегда возможно, так как в каталогах обычно приводятся параметры АД только номинального режима его работы.

Развитие компьютерных технологий проектирования и специализированных программных комплексов расширяет возможности практического использования полевого моделирования [9–11]. Реализация конечно-элементных методов расчета электрических машин обеспечивает требования высокой точности проектирования, так как позволяет учесть особенности их конструкции и динамики протекающих электромагнитных процессов [10]. Моделированию электромагнитных процессов в практической электротехнике и электромеханике посвящен целый ряд работ [9–17]. Однако значительные различия геометрических размеров основных узлов и деталей электродвигателей, в том числе, для наиболее массовых серий АД, обуславливают значительные затраты вычислительных ресурсов и времени, что существенно затрудняет численную реализацию пространственных динамических полевых моделей. Поэтому при моделировании электромагнитных процессов в АД ограничиваются их плоскопараллельными приближениями [13, 14, 16], которые не позволяют учесть влияние полей рассеяния в области лобовых частей обмоток статора, краевые эффекты в роторе и статоре (искажения магнитного поля в области торцевых зон), а также ряда других известных эффектов [18], в том числе нелинейность магнитных свойств электротехнических сталей. Поэтому в ряде работ [15, 17] принимались допущения о линейности магнитных свойств ферромагнитных материалов. Однако использование данных допущений при моделировании электромагнитных процессов преобразования энергии переменного тока в механическую энергию, не обеспечивает достоверности оценки параметров АД для динамически протекающих процессов, не позволяет уточнить их влияние на характеристики электродвигателя и приводит к достаточно высоким погрешностям расчетов. Это

обуславливает актуальность разработки новых подходов определения параметров схемы замещения АД на основе моделирования пространственных электрических и магнитных полей с учетом конструктивных особенностей электрической машины, нелинейности электрофизических и магнитных свойств активных и конструкционных материалов, нестационарных режимов, обеспечивающих вычислительную эффективность и точность.

Целью работы является разработка новой методики определения параметров асинхронного двигателя посредством реализации трехмерной математической модели нестационарных электрических и магнитных полей, обеспечивающей высокую точность и достоверность результатов при учете особенностей конструкции асинхронных двигателей, нелинейности электрофизических и магнитных свойств активных и конструкционных материалов.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования проводились для динамического режима короткого замыкания асинхронного двигателя типа 4А50А2 мощностью 0,09 кВт. Согласно [2], электрическая схема исследуемого АД для режима короткого замыкания может быть представлена последовательно соединенными активным r_1 и индуктивным x_1 сопротивлениями статора, а также приведенными активным r'_2 и индуктивным x'_2 сопротивлениями ротора (рис. 1).

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, активные и индуктивные сопротивления исследуемого АД в режиме КЗ определяются как:

$$r_k = r_1 + r'_2, \quad x_k = x_1 + x'_2. \quad (1)$$

Для идентификации параметров схемы замещения (активное и индуктивное сопротивление КЗ) на основе полевого моделирования формируется геометрическая модель исследуемого АД (рис. 2) [12]. Рассматриваемая модель АД включает геометрические трехмерные области сердечника статора 1 ($j = 1$) с обмотками 2 ($j = 2$) и изоляцией 3 ($j = 3$), геометрические трехмерные области сердечника ротора 4 ($j = 4$) со стержнями обмоток 5 ($j = 5$) и короткозамкнутыми кольцами 6 ($j = 6$), геометрические трехмерные области вала 7 ($j = 7$), корпуса 8 ($j = 8$) и воздушного зазора ($j = 9$) (корпус, вал и воздушный зазор на рис. 2, не отображены).

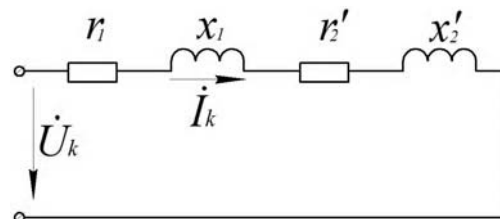


Рисунок 1 – Схема замещения АД для режима короткого замыкания

Принимается допущение об отсутствии токов смещения, свободных зарядов и допущение об изотропности электрофизических и электромагнитных свойств материалов [9, 11, 12]. Это позволяет представить нестационарные электромагнитные процессы в исследуемом АД в режиме короткого замыкания сопряженной системой нелинейных уравнений в частных производных [9]:

$$\begin{cases} \sigma_j \partial \mathbf{A}_j / \partial \tau + \sigma_j (\theta_j) \nabla V_j + \\ + \nabla \times [(\mu_0 \mu_j(B))^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_j] = \mathbf{J}_{ej}, \end{cases} \quad (2)$$

где \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал; V – электрический потенциал; $\sigma(\theta)$ – удельная электропроводность; B – индукция магнитного поля μ – относительная магнитная проницаемость; θ – температура; ω – угловая частота; \mathbf{J}_e – плотность стороннего источника тока; индексы j – соответствует подобластям расчетной области (рис. 2).

Система уравнений (2) дополняется условием калибровки Кулона $div(\mathbf{A}) = 0$ [12].

Для сопряжения магнитных и электрических полей на границах подобластей расчетной области АД (рис. 2) формулируются граничные условия вида [9]:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{i,k} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_k) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k}, \\ \mathbf{H} = (\mu_0 \mu)^{-1} \nabla \times \mathbf{A}, \\ \mathbf{n}_{i,k} \cdot (\mathbf{J}_i - \mathbf{J}_k) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k}, \\ \mathbf{J} = \sigma(\theta) \cdot \mathbf{E}, \quad \mathbf{E} = -\nabla V - j\omega \mathbf{A}, \end{cases} \quad (3)$$

где H – напряженность магнитного поля; E – напряженность электрического поля.

А для внешних границ задаются граничные условия [9]:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_j = 0 \Big|_{\forall j \in (1,4)}, \quad A_j = \bar{k} \cdot A_y(x, z) \Big|_{j=4}, \\ V_j = \phi_j \Big|_{\forall j \in (1,3)}, \\ \mathbf{n}_j \cdot (\mathbf{J}_j) = 0 \Big|_{j=4} \end{cases} \quad (4)$$

Температурный режим исследуемого АД оценивается в соответствии с работой [3].

Начальные условия соответствуют первому закону коммутации для схемы замещения АД (рис. 1) [12]:

$$\begin{cases} i_A|_{0-} = i_A|_{0+} = 0; \\ i_B|_{0-} = i_B|_{0+} = 0; \\ i_C|_{0-} = i_C|_{0+} = 0, \\ u_A|_{0+} = 0; \\ u_B|_{0+} = \sqrt{2}U_\phi \sin(2\pi/3); \\ u_C|_{0+} = \sqrt{2}U_\phi \sin(4\pi/3). \end{cases} \quad (5)$$

Численная реализация трехмерной модели электромагнитных процессов (2) с условиями калибровки Кулона, граничными (3), (4) и начальными условиями (5) осуществляется методом конечных элементов [9] в структуре средств Comsol Multiphysics (рис. 3) на основании подхода, изложенного в работе [12].

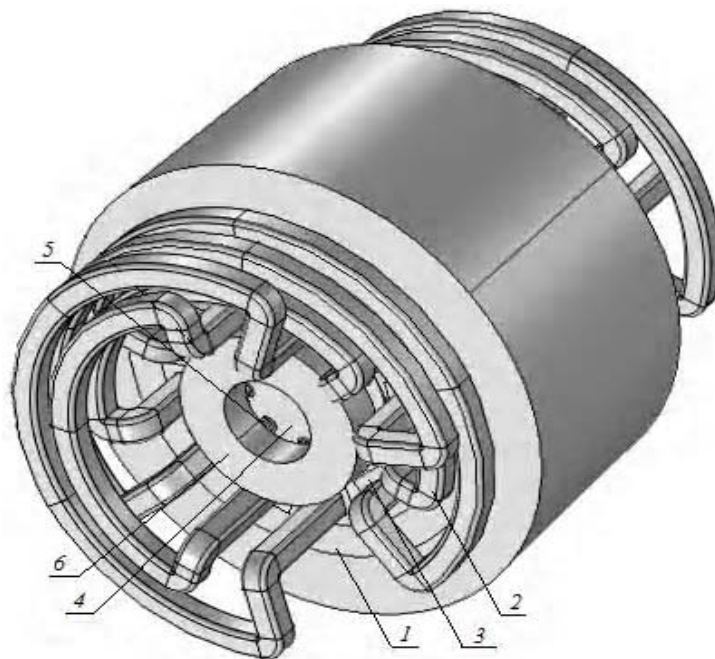


Рисунок 2 – Геометрическая модель асинхронного двигателя типа 4A50A2

По данным моделирования выполнялся расчет энергии магнитного поля и расчет ее средних значений для каждой j -й зоны расчетной области АД (рис. 2)

$$W|_j = \frac{1}{2} \iiint_{V_j} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dx dy dz;$$

$$w|_j = W|_j / V_j; V_j = \iiint_{V_j} dx dy dz. \quad (6)$$

В соответствии с [9], на основании данных расчета значений энергии магнитного поля (6) определялись индуктивные сопротивления для лобовых частей обмоток статора и пазовых частей статора и ротора:

$$x_j|_\tau = \frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot W_j|_\tau}{I_{kj}|_\tau^2}, \quad (7)$$

Для полного и активного сопротивлений АД в режиме КЗ предлагаются выражения вида:

$$z_k = \frac{U_k}{I_k}; r_k = \sqrt{z_k^2 - x_k^2}. \quad (8)$$

Точность и эффективность предложенного подхода оценивалась по данным сравнения с параметрами схемы замещения АД для режима КЗ, рассчитанными на основе общеизвестной методики [2] с данными испытаний АД в режиме опытного КЗ. При использовании предложенной методики (2)–(8) погрешность не превысила 2,1 %, в то

время как при использовании общеизвестной инженерной методики [2] погрешность составила до 17 %.

Для исследуемого АД по данным моделирования с использованием выражений (7) было установлено, что соотношения между индуктивными сопротивлениями лобовых частей обмоток статора и пазовых частей статора и ротора для режима КЗ составляют 14,7% и 85,3%. Это обусловлено выявленными закономерностями пространственного распределения индукции и энергии магнитного поля в режиме опытного короткого замыкания (рис. 3), определяющими количественные соотношения при локализации энергии магнитного поля в области лобовых частей обмоток статора и в областях сердечников и пазов статора и ротора асинхронных двигателей малой мощности. В центральных зонах, протяженность которых достигает 60% длины сердечников статора и ротора, магнитное поле имеет плоскопараллельный характер, а в зонах торцов сердечников и лобовых частей обмоток статора существенно трансформируется (рис. 3). При этом в зоне лобовых частей обмоток статора выделяется до 15% от энергии магнитного поля данного асинхронного двигателя. Достаточно высокие значения энергии магнитного поля в зоне лобовых частей обмоток статора объясняется эффектами само- и взаимоиндукции обмоток статора и ротора, поверхностными и торцевыми эффектами в статоре и роторе.

Новый подход, предложенный для определения параметров АД в режиме опытного КЗ позволяет более точно учесть влияние его конструктивных особеннос-

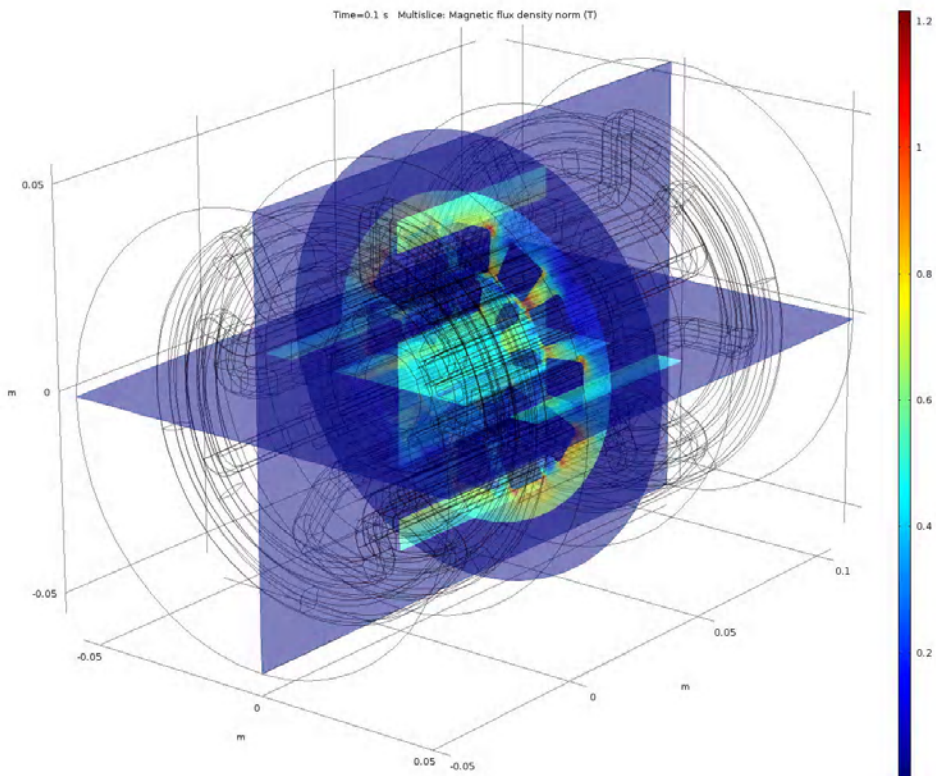


Рисунок 3 – Расчётное распределение нормальной составляющей индукции

тей, нелинейности электрофизических и магнитных свойств активных и конструкционных материалов на электромагнитные процессы в АД в динамических режимах короткого замыкания. Он обеспечивает снижение погрешности расчетов индуктивных сопротивлений обмоток статора и ротора АД в режиме опытного КЗ на 15% по сравнению с известными методами [2, 8, 9].

ВЫВОДЫ

Получил развитие метод схемно-полевого анализа для динамических режимов короткого замыкания АД. Комбинация схемного моделирования и пространственного моделирования электромагнитных полей позволяет учесть влияние конструктивных особенностей АД, эффекты само- и взаимной индукции обмоток, поверхностный и торцевой эффекты в статоре и роторе, нелинейность электрофизических и магнитных свойств активных и конструкционных материалов на электромагнитные процессы и параметры АД в динамических режимах короткого замыкания.

Установлены соотношения между индуктивными сопротивлениями лобовых частей обмоток статора и пазовых частей статора и ротора для режима КЗ, которые составили 14,7% и 85,3% для исследуемого АД.

Установлено, что способ определения параметров АД предложенным схемно-полевым методом, по сравнению с общеизвестным методом проектирования, позволяет повысить точность расчета параметров схемы замещения АД на 15%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
2. Проектирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин и др. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.
3. Коцур М. И. Тепловое состояние асинхронного двигателя при пониженных скоростях вращения [Текст] / М. И. Коцур, // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – 2013. – №2/8(62). – С. 8–10.
4. Коцур М. И. Особенности ударного теплового воздействия на асинхронный двигатель с модифицированной системой импульсного регулирования в условиях частых пусков [Текст] / М. И. Коцур // Электротехника та електроенергетика. – 2014 – №1 – С. 32–36. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2014-1-5>.
5. Коцур М. И. Повышение эффективности режима торможения противовключением асинхронного двигателя с фазным ротором [Текст] / М. И. Коцур, И. М. Коцур, А. В. Близняков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №1/8(73). – С. 27–30. DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36670>
6. Kotsur M. Synchronization methods of the induction motors rotation in energy-efficient electric drive system [Text] / M. Kotsur // Fundamental and Applied Studies in the Modern World: papers and commentaries / The University of Oxford. – Oxford, 2016. – Volume XV. – P. 384–389.
7. Мошинский Ю. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным [Текст] / Ю. А. Мошинский, В. Я. Беспалов, А. А. Кирякин // Электричество – 1998. – №4/98. – С. 38–42
8. Makeev M. S. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным [Текст] / М. С. Makeev, А. А. Кувшинов // Вектор науки ТГУ. – 2013. – № 1 (23). – С. 108–112.
9. Yarymbash D. S., Oleinikov A. M. On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads. Russian Electrical Engineering, 2015, Volume 86, Issue 2, pp. 86–92. DOI: <http://dx.doi.org/10.3103/S1068371215020121>.
10. Ярымбаш Д. С. Особенности визначення параметрів короткого замикання силових трансформаторів засобами польового моделювання [Текст] / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика – 2016. – №1 – С. 12–17. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-2>.
11. Ярымбаш Д. С. Исследование электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах графитации переменного и постоянного тока / Д. С. Ярымбаш / Науковий вісник НГУ – 2015. – №3. – С. 95–102.
12. Ярымбаш Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Электротехника та електроенергетика – 2016. – №2 – С. 43–50. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5>.
13. Персова, М. Г. О новом подходе к проектированию электрических машин на основе численного моделирования [Текст] / М. Г. Персова, Ю. Г. Соловейчик, З. С. Темлякова и др. // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 15–21.
14. Васьковский, Ю. В. Математическое моделирование электромагнитных полей в короткозамкнутом асинхронном двигателе с поврежденной обмоткой ротора [Текст] / Ю. В. Васьковский, А. А. Гераскин // Техническая электродинамика. – 2010 – № 2. – С. 56–61.
15. Замчалкин А. С. Численное моделирование процесса пуска асинхронного двигателя [Текст] / А. С. Замчалкин, В. А. Тюков // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 1 (25). – С. 171–177.
16. Милых В. И. Анализ гармонического состава переменного магнитного поля, связанного с вращающимся ротором турбогенератора, в режиме холостого хода и короткого замыкания [Текст] / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Электротехника и электроэнергетика. – 2013. – №2. – С. 5–12.
17. Плюгин В. Е. Численное моделирование электромагнитного поля асинхронного двигателя с внешним массивным ротором [Текст] / В. Е. Плюгин // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 51 (1024) – С. 66–75.
18. Могильников В. С. Асинхронные двигатели с двухслойным ротором и их применение [Текст] / В. С. Могильников, А. М. Олейников, А. Н. Стрельников. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 120 с.

Статья поступила в редакцию 27.04.17

Ярымбаш Д. С.¹, Коцур М. І.², Ярымбаш С. Т.³, Коцур І. М.⁴

¹Д-р техн. наук, доцент, зав. каф. електричних машин ЗНТУ, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент каф. електричних та електронних апаратів ЗНТУ, Україна

^{3,4}Канд. техн. наук, доцент, доцент каф. електричних машин ЗНТУ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ РЕЖИМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Мета. Розробка нової методики визначення параметрів асинхронного двигуна за допомогою реалізації тривимірної математичної моделі нестационарних електричних і магнітних полів, що забезпечує високу точність і достовірність результатів при врахуванні особливостей конструкції асинхронних двигунів, нелінійності електрофізичних і магнітних властивостей активних та конструкційних матеріалів.

Методика. Чисельне моделювання сполучених просторових нестационарних електричних і магнітних полів асинхронного двигуна в режимі короткого замикання методами теорії електромагнітних полів, кінцевих елементів, теорії електричних машин і електричних кіл.

Результати. Представлені теоретичні дослідження і дані моделювання на основі чисельної реалізації методом кінцевих елементів тривимірної нестационарної математичної моделі електромагнітних полів в асинхронному двигуні, що відображає особливості процесів перетворення енергії змінного струму в режимі дослідного короткого замикання. Дослідженнями встановлено, що в асинхронних двигунах малої потужності енергія магнітного поля локалізується в основному в областях сердечників і пазів статора і ротора. Але при цьому в зоні лобових частин обмоток статора виділяється до 15% від енергії магнітного поля асинхронного двигуна. У центральних зонах, протяжність яких сягає 60% довжини сердечників статора і ротора, магнітне поле наближається до плоскопаралельного поля, істотно видозмінюючись в зонах торців сердечників і лобових частин обмоток статора. Встановлено вплив характерних особливостей розподілу магнітного поля, його енергії на параметри короткого замикання асинхронного двигуна малої потужності і режими його роботи. Співвідношення між індуктивними опорами лобових частин обмоток статора і пазових частин статора і ротора для досліджуваного асинхронного двигуна для режиму дослідного короткого замикання склали відповідно 14,7% і 85,3%.

Наукова новизна. Встановлено закономірності просторового розподілу індукції і енергії магнітного поля в режимі дослідного короткого замикання, визначені кількісні співвідношення між індуктивними опорами при локалізації енергії магнітного поля в області лобових частин обмоток статора і в областях сердечників і пазів статора і ротора асинхронних двигунів малої потужності.

Практична значимість. За допомогою реалізації динамічної просторової моделі електромагнітних полів методом кінцевих елементів і даних чисельного моделювання динамічного режиму дослідного короткого замикання асинхронного двигуна визначено параметри його схеми заміщення з урахуванням конструктивних особливостей статора і ротора, нелінійності властивостей активних матеріалів в багатокомпонентній області моделювання. Обґрунтовано, що новий підхід до визначення параметрів схеми заміщення асинхронних двигунів на основі даних польового моделювання забезпечує істотне підвищення точності в порівнянні з загальновідомими ітераційно-емпіричними методами.

Ключові слова: тривимірне моделювання, асинхронний двигун, коротке замикання, електромагнітні поля, метод кінцевих елементів, апроксимуючі функції, енергія магнітного поля.

Yarymbash D. S.¹, Kotsur M. I.², Yarymbash S. T.³, Kotsur I. M.⁴

¹ScD, Assoc. Prof., Chief of the department of the electrical machine ZNTU, Ukraine

²PhD, Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the department of the electrical and electronic apparatus, ZNTU, Ukraine

^{3,4}PhD, Assoc. Prof., Assoc. Prof. of the department of the electrical machine ZNTU, Ukraine

FEATURES OF PARAMETER DETERMINATION OF THE INDUCTION MOTOR SUBSTITUTION CIRCUIT FOR SHORT-CIRCUIT MODE

Purpose. Development of a new method for determining the parameters of an induction motor, based on a three-dimensional transient mathematical model of the electrical and magnetic fields, that provides high accuracy and reliability of results and considering the design features of induction motors, nonlinearity of the electrophysical and magnetic properties of active and structural materials.

Methods. Numerical simulation of the conjugate spatial transient electrical and magnetic fields of the induction motor in the short-circuit mode, with help methods of the theory of electromagnetic fields, finite element, theory of electrical machines and electrical circuits.

Results. Theoretical researches and simulation results, which based on numerical realization of the finite element method of three-dimensional transient mathematical model of the electrical and magnetic fields in induction motor which displayed the features of the processes of AC energy conversion in the experimental short-circuit mode are obtained.

The magnetic field energy is localized mainly in the area of the cores and slots of the stator and rotor of the low-power induction motors by researches was determined. In the zone of the frontal parts of the stator windings, up to 15% of the magnetic field energy of the induction motor is evolved. In the central area of the active part of the induction motor, a length up to 60% of the total length of the stator and rotor core, the magnetic field has plane-parallel form, but is transformed into zones of coil ends of the stator windings and near its end of the core. The influence of the characteristic features of the magnetic field distribution, its energy on the substitution circuit parameters of the low power induction motor and its

operating modes are defined. The ratios between the resistances inductive coil ends zone of the stator windings and slots zone stator and rotor windings for an induction motor in short-circuit mode were respectively 14.7% and 85.3%.

Originality. The regularities of the spatial distribution of induction and the energy of the magnetic field in the experimental short-circuit mode are defined. When the localization of the magnetic field energy in the frontal parts zone of the stator windings and in the cores and slots regions of the stator and rotor of low-power induction motors, the quantitative relations between the inductive resistances are determined.

Practical value. Through the implementation of the dynamic spatial model of electromagnetic fields by the finite element method and numerical simulation data of the short-circuit dynamic mode of the induction motor, the parameters taking into account the structural features of the stator and rotor, and the nonlinear properties of active materials in the multicomponent modeling domain of its substitution circuit are determined. It is proved, that the new approach to the determination of the substitution circuit parameters of induction motors based on simulation data field provides a significant increase in accuracy compared to conventional iterative-empirical methods.

Keywords: three-dimensional modeling; induction motor; short-circuit mode; electromagnetic field; finite element method; the approximating function; the magnetic field energy.

REFERENCES

- Kopulov, I. P. (2001). *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin*. Moscow, Vysshaya shkola, 327.
- Kopulov, I. P., Klovov, V. K., Morozkin, V. P. (2005). *Proektirovanie elektricheskikh mashin*. Moscow, Vysshaya shkola, 767.
- Kotsur, M. (2013). The thermal state of the ad motor at the reduce rotor speed. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, 2(8(62)), 8–10. doi:http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2013.12421
- Kotsur, M. (2014). Features of the of thermal effect impact on the asynchronous motor with the modified pulse control system in conditions of frequent starts. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 32–36. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2014-1-5
- Kotsur, M. (2015). Increase effectiveness of reversible braking mode realization of the wound-rotor induction motor. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, 1(8(73)), 27–30. doi:http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36670
- Kotsur, M. (2016). Synchronization methods of the induction motors rotation in energy-efficient electric drive system. *Fundamental and Applied Studies in the Modern World: papers and commentaries*. The University of Oxford. Oxford, XV, 384–389.
- Moshhinskij, Ju. A., Bepalov, V. Ja., Kirjakin, A. A. (1998). *Opređenje parametrov shemy zameshhenija asinhronnoj mashiny po kataloghnym dannym*. *Elektrichestvo*, 4(98), 38–42.
- Makeev, M. S., Kuvshinov, A. A. (2013). *Algoritm rascheta parametrov shemy zameshhenija asinhronnogo dvigatelja po kataloghnym dannym*. *Vektor nauki TGU*, 1(23), 108–112.
- Yarymbash, D. S., Oleinikov, A. M. (2015). On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads. *Russian Electrical Engineering*, 2(86), 86–92. doi: http://dx.doi.org/10.3103/S1068371215020121.
- Yarymbash, D., Yarymbash, S., Divchuk, T., Klylmynik, I. (2016). Determination features of the power transformer short circuit parameters through field modeling. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 12–17. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-2
- Yarymbash, D. S. (2015). *Issledovanie elektromagnitnyh i termojelektricheskikh processov v pechah grafitacii peremennogo i postojannogo toka*. *Naukovij visnik NGU*, 3, 95–102.
- Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kotsur, I. (2016). Features of three-dimensional simulation of the electromagnetic fields of the asynchronous motors. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 43–50. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5
- Persova, M. G., Soloveychik, Yu. G., Temlyakova, Z. S. (2007). *O novom podhode k proektirovaniyu elektricheskikh mashin na osnove chislennoogo modelirovaniya*. *Elektrotehnika*, 9, 15–21.
- Vaskovskiy, Yu. V., Geraskin, A. A. (2012). *Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnyh poley v korotkozamknutom asinhronnom dvigatele s povrezhdennoy obmotkoy rotora*. *Tekhnicheskaya elektrodinamika*, 2, 56–61.
- Zamchalkin, A. S., Tyukov, V. A. (2012). *Chislennoe modelirovanie protsessa puska asinhronnogo dvigatelya*. *Doklady TUSURa*, 1(25), 171–177.
- Milykh, V., Polyakova, N. (2013). Analysis of harmonic composition of the alternating magnetic field associated with the rotating rotor of turbogenerator in the no-load and short-circuits modes. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 5–13. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2013-2-1
- Plyugin, V. E. (2013). *Chislennoe modelirovanie elektromagnitnogo polya asinhronnogo dvigatelya s vneshnim massivnyim rotorom*. *Vestnik NTU HPI*, 51(1024), 66–75.
- Mogilnikov, B. C., Oleynikov, A. M., Strelnikov, A. N. (1983). *Asinhronnyie dvigateli s duhsloynnyim rotorom i ih primenenie*, Moscow, Energoatomizdat, 120.