

ОСОБЕННОСТИ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Цель. Разработка нового эффективного подхода для реализации трехмерной математической модели нестационарных электрических и магнитных полей в асинхронных двигателях с учетом их конструктивных особенностей, нелинейности электрофизических и магнитных свойств активных и конструкционных материалов, обеспечивающего достоверность и высокую точность моделирования.

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 математической модели асинхронного двигателя, отображающей особенности электрических и магнитных процессов преобразования энергии переменного тока в режиме короткого замыкания. Исследованиями установлено, что в зоне лобовых частей асинхронного двигателя малой мощности выделяется до 12,5% энергии его магнитного поля, которая, в основном, локализуется в активной части статора, ротора и воздушном зазоре. В центральной зоне активной части асинхронного двигателя, протяженностью до 60% ее длины, магнитное поле имеет плоскопараллельный характер, но трансформируется в зонах лобовых частей обмоток статора и возле его торцов. Установлены особенности распределения магнитного поля и его энергии, которые оказывают существенное влияние на параметры короткого замыкания асинхронного двигателя малой мощности и режимы его работы.

Научная новизна. Определены закономерности распределения индукции и энергии магнитного поля в режиме короткого замыкания и установлены их количественные соотношения для активной зоны и области лобовых частей обмоток статора асинхронных двигателей малой мощности.

Практическая значимость. На базе метода конечных элементов реализован новый подход для трехмерного моделирования электромагнитных процессов в асинхронном двигателе, который заключается в дифференциации размеров конечных элементов и использовании аппроксимирующих функций в виде полиномов Лагранжа. Это обеспечивает высокую сходимость численной реализации для переходных процессов режима короткого замыкания, сокращение времени расчетов, требований к вычислительным ресурсам и высокую точность моделирования. Сравнение значений энергии магнитного поля асинхронного двигателя в режиме короткого замыкания показывает, что для аппроксимирующих полиномов Лагранжа первой степени относительная невязка не превышает 3,8% по сравнению с аппроксимирующими полиномами третьей степени, при сокращении времени расчетов в 389 раз и требований к вычислительным ресурсам – до 10 раз.

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

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на широкое развитие теории электрических машин, многие вопросы, связанные с особенностями их работы в переходных режимах, процессами электромагнитного и электротеплового преобразования энергии и их взаимного влияния на параметры работы полностью не изучены. Это обуславливает необходимость поиска резервов для повышения энергоэффективности и надежности электрических машин, реализация которых должна обеспечиваться, в первую очередь, за счет применения высокоточных расчетных моделей и методик на этапе проектирования. Также должно обеспечиваться существенное сокращение затрат на разработку новых образцов, соответствующих современным высоким требованиям по энергоэффективности и надежности работы.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Как показывает практика, инженерные методы расчета электрических машин при различных режимах их работы основаны на целом ряде допущений, что может приводить к существенным погрешностям и не удовлетворяют современным требованиям к конструкторской подготовке производства [1–3]. Это характерно как для электрических машин большой мощности со специальным конструктивным исполнением, так и для электрических машин средней и малой мощности со сложными условиями эксплуатации.

Развитие компьютерной техники и специализированных программных комплексов расширило возможности практического использования полевого моделирования и конечно-элементных методов расчета электрических

ких машин с учетом особенностей их конструкции и динамики протекающих электромагнитных процессов, обеспечивая высокую точность проектирования [4]. Моделированию электромагнитных процессов в практической электротехнике и электромеханике посвящен целый ряд работ [5–8]. Однако значительные различия геометрических размеров отдельных узлов и деталей электродвигателей, в том числе, для наиболее массовых асинхронных двигателей (АД), существенно затрудняют численную реализацию пространственных полевых моделей и обуславливают значительные затраты вычислительных и временных ресурсов. Поэтому при моделировании электромагнитных процессов в АД ограничиваются их плоскопараллельными приближениями [5, 7] без учета влияния полей рассеяния в области лобовых частей обмоток статора, краевых эффектов в роторе и статоре (искажений магнитного поля в области торцевых зон) и ряда других эффектов [9]. В ряде работ [6, 8] принимались допущения о линейности магнитных свойств ферромагнитных материалов. Использование таких допущений для моделирования АД не позволяет уточнить их характеристики, не обеспечивает адекватных оценок их параметров при динамически протекающих процессах и приводит к достаточно высоким погрешностям расчетов. Это обуславливает актуальность разработки новых подходов, расширяющих области приложения существующих методов моделирования пространственных электрических и магнитных полей с уче-

том конструктивных особенностей электрической машины, нелинейности электрофизических и магнитных свойств активных и конструкционных материалов, режимов работы и обеспечивающих вычислительную эффективность и точность.

Целью работы является разработка нового эффективного подхода для реализации трехмерной математической модели нестационарных электрических и магнитных полей в асинхронных двигателях с учетом их конструктивных особенностей, нелинейности электрофизических и магнитных свойств активных и конструкционных материалов, обеспечивающего достоверность и высокую точность моделирования.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования проводились для динамического режима короткого замыкания асинхронного двигателя типа 4А50А2 мощностью 0,09 кВт, геометрическая модель и расчетная область которого представлены на рис. 1. Рассматриваемая трехмерная модель АД включает геометрические 3D области сердечника статора 1 ($j = 1$), его обмоток 2 ($j = 2$) с изоляцией 3 ($j = 3$), геометрические 3D области сердечника ротора 4 ($j = 4$), стержней 5 ($j = 5$) и короткозамкнутых колец 6 ($j = 6$) его обмотки, геометрические модели вала 7 ($j = 7$) и корпуса 8 ($j = 8$) (геометрические области корпуса и вала на рис. 1, а не отображены).

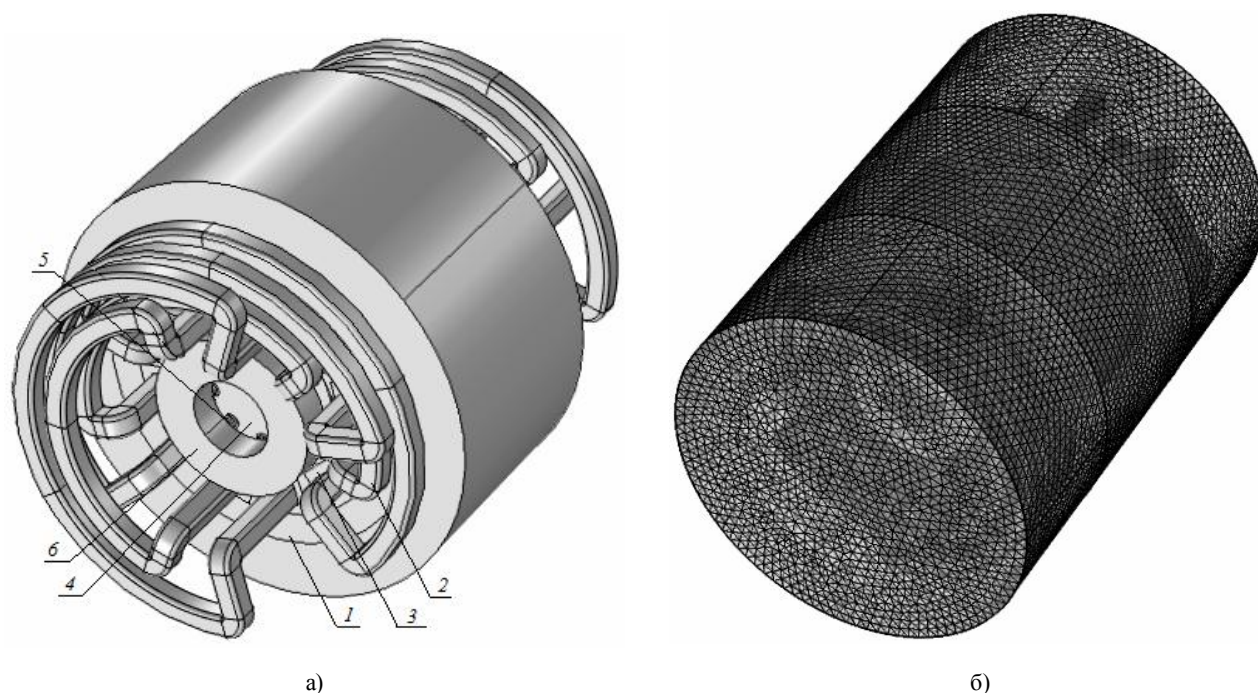


Рисунок 1 – Геометрическая модель (а) и расчетная область (б) асинхронного двигателя типа 4А50А2

При математическом описании электромагнитных процессов принимаются допущения об изотропности электрофизических и электромагнитных свойств материалов, отсутствие токов смещения и свободных зарядов [2]. В этом случае нестационарные электромагнитные процессы в АД в режиме короткого замыкания могут быть представлены сопряженной системой нелинейных уравнений в частных производных [10]:

$$\begin{cases} \sigma_j \partial \mathbf{A}_j / \partial \tau + \sigma_j (\theta_j) \nabla V_j + \\ + \nabla \times [(\mu_0 \mu_j(B))^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_j] = \mathbf{J}_{ej}; \\ - \nabla \cdot \partial (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V_j) / \partial \tau - \\ - \nabla \cdot (\sigma_j (\theta_j) \cdot \nabla V_j - \mathbf{J}_{ej}) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал; V – электрический потенциал; $\sigma(\theta)$ – удельная электропроводность; B – индукция магнитного поля μ – относительная магнитная проницаемость; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость; θ – температура; ω – угловая частота; \mathbf{J}_e – плотность стороннего источника тока; индексы j – соответствует подобластям расчетной области (рис. 1, а)

В соответствии с [10] система уравнений (1) дополняется условием калибровки Кулона $\text{div}(\mathbf{A}) = 0$.

Условия сопряжения для магнитных и электрических полей можно сформулировать в виде:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{i,k} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_k) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k}, \\ \mathbf{H} = (\mu_0 \mu)^{-1} \nabla \times \mathbf{A}, \\ \mathbf{n}_{i,k} \cdot (\mathbf{J}_i - \mathbf{J}_k) = 0 \Big|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k}, \\ \mathbf{J} = \sigma(\theta) \cdot \mathbf{E}, \quad \mathbf{E} = -\nabla V - j\omega \mathbf{A}, \end{cases} \quad (2)$$

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

На внешних границах расчетной области задаются граничные условия

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

Температурный режим АД оценивается в соответствии с данными [2].

Начальные условия соответствуют первому закону коммутации:

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

Трехмерная модель (1) с условиями калибровки Кулона, граничными условиями (2), (3) и начальными условиями (4), реализуется методом конечных элементов [10] в структуре средств Comsol Multiphysics.

Оценка энергии магнитного поля и ее средних значений для каждой j -й зоны расчетной области выполняется с использованием соотношений:

$$\begin{aligned} W|_j &= \frac{1}{2} \iiint_{V_j} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dx dy dz; \\ w|_j &= W|_j / V_j; \quad V_j = \iiint_{V_j} dx dy dz. \end{aligned} \quad (5)$$

Для визуализации данных численного моделирования отображается область локализации магнитного поля для момента времени, когда динамический процесс короткого замыкания приближается к установившемуся режиму $\tau = 0,04$ с. Эта область соответствует диапазону изменений модуля векторного магнитного потенциала, ограниченного значениями $|A_{\min}| = 0,74 \cdot 10^{-3}$ Вб/м и $|A_{\max}| = 3,74 \cdot 10^{-3}$ Вб/м (Рис. 2).

Эквипотенциальные линии векторного магнитного потенциала равного $|A_{\min}| = 0,74 \cdot 10^{-3}$ Вб/м проходят вдоль пазов, коронок зубцов статора и ротора, замыкаясь через торцевые поверхности статора и активную часть ротора с короткозамкнутыми кольцами и, частично, – через лобовые части обмоток статора (рис. 2).

Расположение эквипотенциальных линий для значений модуля векторного магнитного потенциала, которые равны $1,74 \cdot 10^{-3}$, $2,74 \cdot 10^{-3}$, $3,74 \cdot 10^{-3}$ Вб/м, имеет одинаковый характер. Они проходят вдоль коронок зубцов статора и замыкаются через пазы у торцевой поверхности статора на удалении 15...20% длины активной части статора (рис. 2).

Эквипотенциальные линии, соответствующие максимальному значению векторного магнитного потенциала, проходят вдоль пазов с проводниками секций статорных обмоток с наибольшей токовой нагрузкой в заданный момент времени.

Таким образом граничные поверхности области локализации магнитного поля АД проходят вдоль пазов статора и ротора, расширяясь у их торцевых поверхностей, и охватывают коронки зубцов, короткозамкнутые кольца и, частично, лобовые части обмоток статора

(рис. 2). Эти особенности локализации магнитного поля возле торцов статора и ротора обуславливаются с одной стороны их конечными осевыми размерами, которые усиливают эффект взаимного влияния собственных полей в активных зонах статора и ротора АД [9], а с другой стороны – полями рассеяния от токов в лобовых частях обмоток статора.

Также эти факторы определяют характер распределения в расчетной области удельной энергии магнитного поля (рис. 3).

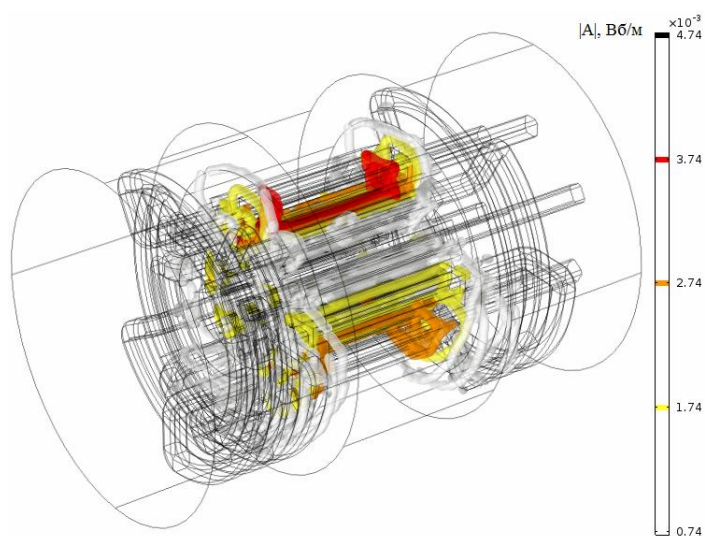


Рисунок 2 – Эквипотенциальные линии векторного магнитного потенциала $|A|$

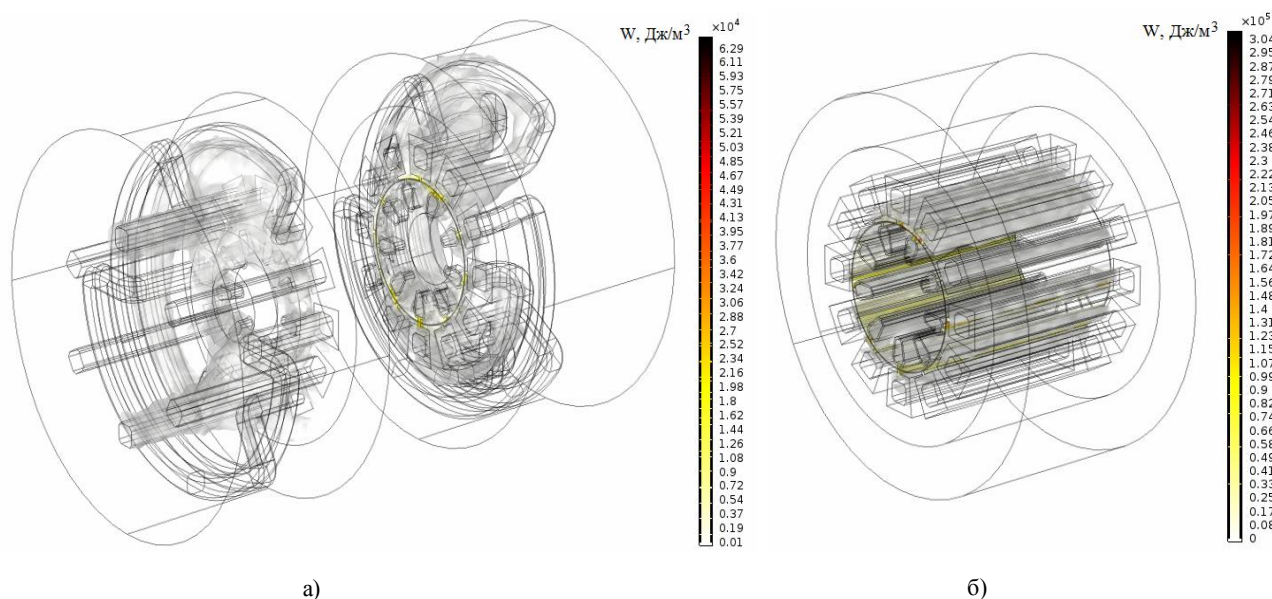


Рисунок 3 – Эквивалентные поверхности энергии магнитного поля W в лобовых (а) и центральной (б) зонах расчетной области

В лобовых подобластях расчетной области АД экиэнергетическая поверхность с начальной удельной энергией магнитного поля равной 10 Дж/м^3 охватывает проводники фазных обмоток статора с наибольшей токовой нагрузкой в заданный момент времени, а также стержни обмотки ротора и, частично, ее короткозамкнутые кольца (рис. 3, а). В этих подобластях АД отмечается рост удельной энергии магнитного поля в интервале значений от $1,4 \cdot 10^4 \text{ Дж/м}^3$ до $6 \cdot 10^4 \text{ Дж/м}^3$ в зонах, прилегающих к воздушному зазору АД и к пазам с секциями фазных обмоток статора с наибольшими в заданный момент токовыми нагрузками (рис. 3, а).

В подобласти активной части статора и ротора АД экиэнергетическая поверхность с начальной удельной энергией магнитного поля равной 100 Дж/м^3 охватывает воздушный зазор, и, частично, проводники обмоток статора с наибольшей токовой нагрузкой в заданный момент времени, расширяется возле торцов подобласти (рис. 3, б). В данной подобласти локализация удельных энергий магнитного поля, достигающих $(0,74 \dots 3) \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^3$, наблюдается в воздушном зазоре, и увеличивается до максимальных значений возле проводников с наибольшей токовой нагрузкой (рис. 3, б).

По данным моделирования установлено, что величина энергии магнитного поля в расчетных подобластях лобовых частей обмоток АД (рис. 3) составляет 12,5% от величины энергии магнитного поля для общей расчетной области АД и в 6,7 раза меньше значения энергии магнитного поля для центральной подобласти АД, включающей сердечники статора и ротора только с пазовыми частями обмоток. Геометрические особенности распределения энергии магнитного поля в расчетной области АД (рис. 3) определяют количественные оценки эффектов само- и взаимоиנדукции обмоток, поверхностного и торцевого эффекта в статоре и роторе и ряд других концевых эффектов [9]. Поэтому соотношения значений энергии магнитного поля в лобовых и центральной подобластях должны учитываться при расчетах параметров АД малой мощности и исследовании режимов их работы.

Для сокращения вычислительных ресурсов и затрат времени реализации трехмерной модели электромагнитных процессов (1) применялась дифференциация размеров конечных элементов в расчетной области (рис. 1, б). В токопроводящих элементах и на границах сопряжения элементов плотность конечных элементов увеличивалась, а по мере приближения к внешним границам расчетной области она снижалась. Также, для эффективного уменьшения затрат временных и вычислительных ресурсов, улучшения сходимости при численной реализации модели (1) рассматривались полиномы Лагранжа первой, второй и третьей степени для аппроксимирующих функций метода конечных элементов [11]. Высший порядок полиномов Лагранжа, как правило, используется при больших дроблениях расчетной сетки, особенно для сложных нелинейных поверхностей и трех-

мерной постановке задачи. Однако применение функций формы высших порядков приводит к усложнению преобразований метода, и, следовательно, к увеличению размерности систем уравнений и их коэффициентов.

Для оценки влияния степени полиномов Лагранжа на точность реализации трехмерной динамической модели (1) методом конечных элементов применяются соотношения для относительной невязки значений энергии магнитного поля (табл. 1):

$$\delta \tilde{W}_i |_{\tau} = \left[\frac{|W_i |_{\tau} - W_{\delta \text{баз}} |_{\tau}|}{\max(W_{\delta \text{баз}})} \right] \cdot 100\% ,$$

для средних значений индукции магнитного поля в воздушном зазоре:

$$\delta \tilde{B}_{\delta i} |_{\tau} = \left[\frac{|B_{\delta i} |_{\tau} - B_{\delta \delta \text{баз}} |_{\tau}|}{\max(B_{\delta \delta \text{баз}})} \right] \cdot 100\% ,$$

а также их средние значения для энергии магнитного поля и индукции в воздушном зазоре для интервала времени $0 \leq \tau \leq 2 \cdot T$

$$\tilde{W}_{\text{ср}i} |_{\tau} = \left[\frac{\sum_{\tau=0}^{\tau=\tau_{\text{max}}} |W_i |_{\tau} - W_{\delta \text{баз}} |_{\tau}|}{\sum_{\tau=0}^{\tau=\tau_{\text{max}}} |W_{\delta \text{баз}} |_{\tau}|} \right] \cdot 100\% ,$$

$$\tilde{B}_{\text{ср}\delta i} |_{\tau} = \left[\frac{\sum_{\tau=0}^{\tau=\tau_{\text{max}}} |B_{\delta i} |_{\tau} - B_{\delta \delta \text{баз}} |_{\tau}|}{\sum_{\tau=0}^{\tau=\tau_{\text{max}}} |B_{\delta \delta \text{баз}} |_{\tau}|} \right] \cdot 100\% ,$$

где $W_{\delta \text{баз}}$ – величина энергии магнитного поля по данным численной реализации системы уравнений (1) с использованием аппроксимирующих полиномов Лагранжа третьей степени; $i = 1, 2$ – степень полинома Лагранжа.

При моделировании оценивались точность, затраты времени и требования к вычислительным ресурсам (объему оперативной памяти) для численно-полевого моделирования с использованием метода конечных элементов и аппроксимирующих функций Лагранжа с полиномами первой, второй и третьей степени, реализованных в структуре средств Comsol Multiphysics (табл. 1).

По данным моделирования относительные значения невязки энергии магнитного поля в расчетной области для линейной аппроксимирующей функции изменяют-

ся от 0,23% до 3,78%, а средневзвешенная невязка равна 3,635%. Для аппроксимирующей функции Лагранжа с полиномом второй степени интервал изменений сужается до 0,09...0,89 % а значение средневзвешенной невязки уменьшается 0,885%. Относительные значения невязки для индукции в воздушном зазоре при линейной аппроксимирующей функции изменяются в диапазоне 0,02...1,12 %, при значении средневзвешенной невязке – 0,781%, а для квадратической аппроксимирующей полиномиальной функции второго порядка – 0,02...0,98 % и 0,778%, соответственно. При использовании квадратической аппроксимации для метода конечных элементов затраты вычислительных ресурсов увеличиваются в 2,51 раза, а для кубической аппроксимации функции формы – на порядок, а продолжительность численно-полевого моделирования возрастает в 17,4 и 389 раз соответственно.

Предложен эффективный подход для реализации трехмерной модели электромагнитных процессов в АД методом конечных элементов, заключающийся в использовании дифференциации плотности конечных элементов в пространстве расчетной области и аппроксимации функции формы полиномами Лагранжа первой степени, что позволяет сократить требования к вычислительным ресурсам до 17 раз, а затраты времени практически до 400 раз при относительной невязке данных расчетов менее 3,8% по сравнению с применением аппроксимирующих полиномов Лагранжа третьей степени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М. : Высшая школа, 2001. – 327 с.
2. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин и др. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.
3. Толочко О. И. Моделирование асинхронного двигателя при обрыве фазы статора / О. И. Толочко, П. И. Розкаряка, И. О. Журов // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – № 15 (91). – С. 262–266.
4. Персова М. Г. О новом подходе к проектированию электрических машин на основе численного моделирования / М. Г. Персова, Ю. Г. Соловейчик, З. С. Темлякова и др. // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 15–21.
5. Васьковский Ю. В. Математическое моделирование электромагнитных полей в короткозамкнутом асинхронном двигателе с поврежденной обмоткой ротора / Ю. В. Васьковский, А. А. Гераскин // Техническая электродинамика. – 2010 – № 2. – С. 56–61.
6. Замчалкин А. С. Численное моделирование процесса пуска асинхронного двигателя / А. С. Замчалкин, В. А. Тюков // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 1 (25). – С. 171–177.
7. Милых В. И. Анализ гармонического состава переменного магнитного поля, связанного с вращающимся ротором турбогенератора, в режиме холостого хода и короткого замыкания / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Электротехника и электроэнергетика. – 2013. – №2. – С. 5–12.

Таблица 1 – Погрешности, требования к вычислительным ресурсам и время численной реализации динамической модели (1) методом конечных элементов

Аппроксимация функции формы	W		B _δ		Расчетное время, о.е	Память ОЗУ, о.е.
	Относительная невязка, %	Средневзвешенная невязка, %	Относительная невязка, %	Средневзвешенная невязка, %		
Линейная	0,23...3,78	3,635	0,02...1,12	0,781	1	1
Квадратическая	0,09...0,89	0,883	0,02...0,98	0,778	17,4	2,51
Кубическая	–	–	–	–	389,02	9,65

Таким образом, если задача математического моделирования электромагнитных процессов в АД входит в систему ограничений, которые устанавливают взаимосвязи между векторами зависимых и независимо варьируемых конструктивных параметров для задачи оптимизации электрической машины, то более предпочтительным является применение для метода конечных элементов линейной аппроксимации функции формы. Расчеты методом конечных элементов и аппроксимации функций формы полиномами Лагранжа второго порядка обеспечивают высокую точность для поверочных расчетов электрических машин с оптимальными значениями конструктивных параметров. Для АД малой и средней мощности численная реализация 3D модели (1) методом конечных элементов с аппроксимирующими полиномами Лагранжа третьей степени практически не улучшает точность по сравнению с полиномами второй степени, но увеличивает время моделирования до двух и более порядков, что не целесообразно.

ВЫВОДЫ

Предложена трехмерная математической модель, описывающая электромагнитные процессы в АД в динамических режимах короткого замыкания, учитывающая конструктивные особенности, нелинейность электрофизических и магнитных свойств активных и конструкционных материалов.

Установлены особенности распределения векторного магнитного потенциала и энергии магнитного поля в расчетном области АД, оказывающие существенное влияние на параметры двигателя в режиме КЗ.

8. Плюгин В. Е. Численное моделирование электромагнитного поля асинхронного двигателя с внешним массивным ротором / В. Е. Плюгин // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 51 (1024) – С. 66–75.
9. Могильников В. С. Асинхронные двигатели с двухслойным ротором и их применение / В. С. Могильников, А. М. Олейников, А. Н. Стрельников. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 120 с.
10. Ярымбаш Д. С. Особенности моделирования электромагнитных процессов в индукторе калибра мундштука пресса / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник // Вісник кременчуцького державного політехнічного університету. – 2007. – №4 (45) Частина 1. – С. 53–55.
11. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация : Пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

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 каф. електричних та електронних апаратів ЗНТУ, Україна

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

ОСОБЛИВОСТИ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Мета. Розробка нового ефективного підходу для реалізації тривимірної математичної моделі нестационарних електричних і магнітних полів в асинхронних двигунах з урахуванням їх конструктивних особливостей, нелінійності, електрофізичних і магнітних властивостей, активних та конструкційних матеріалів, що забезпечує достовірність і високу точність моделювання.

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 математичної моделі асинхронного двигуна, що відображає особливості електричних і магнітних процесів перетворення енергії змінного струму в режимі короткого замикання. Дослідженнями встановлено, що в зоні лобових частин асинхронного двигуна малої потужності виділяється до 12,5% енергії його магнітного поля, яка, в основному, локалізується в активній частини статора, ротора і повітряному зазорі. У центральній зоні активної частини асинхронного двигуна, протяжністю до 60% її довжини, магнітне поле має плоскопаралельний характер, але трансформується в зонах лобових частин обмоток статора, а також поблизу його торців. Встановлено особливості розподілу магнітного поля і його енергії, які мають істотний вплив на параметри короткого замикання асинхронного двигуна малої потужності і режими його роботи.

Наукова новизна. Визначено закономірності розподілу індукції і енергії магнітного поля в режимі короткого замикання, встановлені їх кількісні співвідношення для активної зони і області лобових частин обмоток статора асинхронних двигунів малої потужності.

Практична значимість. На базі методу скінчених елементів реалізований новий підхід для тривимірної моделювання електромагнітних процесів в асинхронному двигуні, який полягає в диференціації розмірів кінцевих елементів та використанні апроксимуючих функцій у вигляді поліномів Лагранжа. Це забезпечує високу збіжність чисельної реалізації для перехідних процесів режиму короткого замикання, скорочення часу розрахунків, вимог до обчислювальних ресурсів і високу точність моделювання. Порівняння значень енергії магнітного поля асинхронного двигуна в режимі короткого замикання показує, що для апроксимуючих поліномів Лагранжа першого порядку відносна нев'язка не перевищує 3,8% в порівнянні з апроксимуючими поліномами третього порядку, при скороченні часу розрахунків в 389 разів і вимог до обчислювальних ресурсів – до 10 раз.

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. 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 THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELDS OF THE ASYNCHRONOUS MOTORS

Purpose. Development of new effective approach for the realization of three-dimensional mathematical model of transient electrical and magnetic fields in induction motors, which based on their design features, the nonlinearity of the electrical and magnetic properties of the active and structural materials, which provides adequacy or high simulation accuracy.

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

The obtained results. Theoretical researches and simulation results, which based on numerical realization of the finite element method of three-dimensional mathematical model of the induction motor are obtained. Theoretical researches

indicate the features of electrical and magnetic processes of AC power conversion in a short circuit mode. In the area of the coil ends of the low power asynchronous motor it is allocated to 12,5% of the total energy of its magnetic field, which is mainly localized in the active part of the stator; the rotor and the air gap. In the central area of the active part of the induction motor; the length is 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 of its core end. The features of the magnetic field and energy distribution, which have a significant effect on the parameters of a short-circuit of small power induction motor and its operating modes are defined.

Scientific novelty. The regularities of the distribution of the induction and magnetic field energy in the short-circuit mode and their quantitative relation for active zone and the area of the coil ends of the stator windings of the low-power asynchronous motors are defined.

Practical significance. A new approach for three-dimensional simulation of the electromagnetic process in the induction motor, which consists in differentiating the size of the finite elements and use of approximation functions of Lagrange polynomials based on finite element method are realized. It provides high convergence of numerical realization of short-circuit mode transient processes, reducing the computation time, the requirements for computing resources and high simulation accuracy. Comparison of the energy values of the induction motor magnetic field in short-circuit mode shows, that for Lagrange polynomials approximating the first degree, the relative error do not exceed 3,8% as compared with approximating polynomials of the third degree, while reducing the calculation time in 389 times and requirements for the computational resources – up to 10 times.

Keywords: three-dimensional simulation, asynchronous motor, short-circuit, electromagnetic field, finite element method, approximating functions, the energy of the magnetic field.

REFERENCES

1. Kopolov I. P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin. Moscow, Vysshaya shkola, 2001, 327 p.
2. Kopolov I. P., Klokov V. K., Morozkin V. P. Proektirovanie elektricheskikh mashin. Moscow, Vysshaya shkola, 2005, 767 p.
3. Tolochko O. I. Rozkaryaka P. I., Zhurov I. O. Modelirovanie asinhronnogo dvigatelya pri obrube fazu statora, *Electrotechnical and computer systems*, No 15 (91), 2014, pp. 262–266.
4. Persova M. G., Soloveychik Yu. G., Temlyakova Z. S. O novom podhode k proektirovaniyu elektricheskikh mashin na osnove chislennogo modelirovaniya, *Elektrotehnika*, No 9, 2007, pp. 15–21.
5. Vaskovskiy Yu. V., Geraskin A. A. Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh poley v korotkozamknutom asinhronnom dvigatele s povrezhdennoy obmotkoy rotora, *Tekhnicheskaya elektrodinamika*, No 2, 2012, pp. 56–61.
6. Zamchalkin, A. S., Tyukov V. A. Chislennoe modelirovanie protsessa puska asinhronnogo dvigatelya. Dokladyi TUSURa, No 1(25), 2012, pp. 171–177.
7. Milyih V. I., Polyakova N. V. Analiz garmonicheskogo sostava peremennogo magnitnogo polya, svyazannogo s vraschayuschimsya rotorom turbogeneratora, v rezhime holostogo hoda i korotkogo zamykaniya, *Elektrotehnika i elektroenergetika*, No 2, 2013, pp. 5–12.
8. Plyugin V. E. Chislennoe modelirovanie elektromagnitnogo polya asinhronnogo dvigatelya s vneshnim massivnyim rotorom, *Vestnik NTU KHPI*, No 51(1024), 2013, pp. 66–75.
9. Mogilnikov B. C., Oleynikov A. M., Strelnikov A. N. Asinhronnyie dvigateli s dvuhsloynnyim rotorom i ih primenenie. Moscow, Energoatomizdat, 1983, 120 p.
10. Yarymbash D. S., Kilimnik I. M. Osobennosti modelirovaniya elektromagnitnykh protsessov v induktore kalibra mundshtuka pressa, // *Visnik kremenchutskogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu*, Vol. 1, No 4(45), 2007, pp. 53–55.
11. Zenkevich O., Morgan K., Konechnyye elementy i approksimatsiya. Moscow, Mir, 1986, 318 p.