

ТРЕХМЕРНАЯ ПОЛЕВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИКИ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ КЛЕТКИ РОТОРА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ю.Н. Васьковский¹, докт. техн. наук, М.А. Коваленко², асп.

1, 2 – Нац. техн. ун-т Украины «КПИ»,
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

Разработана и экспериментально апробирована трехмерная полевая математическая модель устройства контроля и диагностики короткозамкнутой обмотки ротора. Сравняются расчетные данные, полученные двух- и трехмерной полевой моделью с данными эксперимента. Сформулированы перспективы применения рассматриваемого устройства. Библ. 3, рис. 4, табл. 2.

Ключевые слова: устройство диагностики, чувствительность, трехмерная полевая математическая модель, напряжение измерительной обмотки.

Введение. Методы оценки технического состояния короткозамкнутой обмотки ротора (КЗОР) ремонтируемых общепромышленных асинхронных двигателей (АД), которые используются на электроремонтных предприятиях, предусматривают визуальный осмотр ротора для выявления явных повреждений КЗОР (очевидный разрыв стержней или сегментов короткозамыкающих колец, наличие подгаров в местах больших трещин и др.). При отсутствии явных повреждений КЗОР, ротор считается исправным и заново используется в отремонтированном АД. Такой подход, как правило, не позволяет выявить скрытых дефектов КЗОР, например, неразвитых трещин в стержнях. Недостатки “визуальной диагностики” проявляются также в том, что температура КЗОР при ремонте существенно отличается от ее температуры в рабочем состоянии: в холодной КЗОР трещины смыкаются и трудно поддаются визуальному обнаружению. Под воздействием эксплуатационных факторов начальные дефекты КЗОР быстро развиваются, приводя к повреждениям всей КЗОР и затем всего АД. Поэтому достоверная диагностика зарождающихся дефектов КЗОР является актуальной задачей, успешное решение которой имеет важное практическое значение. Для ее решения требуется создание универсальных, высокочувствительных, простых в эксплуатации и недорогих устройств, обеспечивающих диагностику скрытых, начальных дефектов КЗОР в условиях электроремонтных предприятий. Несмотря на то, что указанная проблема известна давно [2, 3], она не решена полностью, поскольку известные устройства не в полной мере удовлетворяют перечисленным требованиям и поэтому не получили широкого распространения. Это обусловлено не только иногда усложненной конструкцией устройств, но и недостаточной оптимизацией их параметров.

В работе [1] предложено устройство диагностики (УД) КЗОР, принцип действия которого основан на оценке изменения реакции токов, индуцированных в стержнях КЗОР. Основными узлами УД являются индуктор, возбуждающий токи в стержнях КЗОР и измерительная обмотка, измеряющая ЭДС $E_{ио}$ от переменного магнитного потока, который проходит через диагностируемый участок КЗОР. При последовательном повороте ротора на зубцовое деление и появлении в зоне проверки поврежденного стержня реакция токов ротора уменьшается, а величина $E_{ио}$ при этом возрастает, что и является диагностическим признаком. Для обеспечения высокой чувствительности устройства требуется оптимизация всех его параметров, что можно сделать только методами математического моделирования. Попытки решить задачу с помощью двухмерной полевой модели не позволили достичь желаемого результата с достаточной точностью, поскольку устройство обладает значительными магнитными потоками рассеяния, оценка которых возможна только при трехмерном полевом анализе. Поэтому целью работы являются разработка и экспериментальная апробация трех-

мерной математической модели УД КЗОР для дальнейшего ее использования при оптимизации параметров устройства.

Математическая модель. Устройство диагностики КЗОР, общий вид которого изображен на рис. 1 *а*, содержит: 1 – диагностируемый ротор; 2 – магнитопровод индуктора УД; 3 – измерительную обмотку (ИО); 4 – обмотку возбуждения УД. На рис. 1 *б* изображено поперечное сечение УД, проходящее через середину толщины индуктора. Между полюсами А и В индуктора располагается диагностируемая часть КЗОР, через которую замыкается тангенциально направленный переменный магнитный поток индуктора. При этом в стержнях КЗОР индуцируются аксиально направленные токи, влияющие на первичный поток индуктора. При появлении в зоне контроля поврежденного стержня изменяются величина токов КЗОР и соответственно величина ЭДС ИО.

Уравнение трехмерного нелинейного электромагнитного поля в УД относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала $\vec{A} = e_x \dot{A}_x + e_y \dot{A}_y + e_z \dot{A}_z$ записывается в следующем виде:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + j\omega\sigma \vec{A} = \vec{J}_c, \quad (1)$$

где μ, σ – магнитная проницаемость и электропроводность; ω – угловая частота изменения переменных во времени; \vec{J}_c – вектор плотности сторонних токов, который задается в обмотке возбуждения УД.

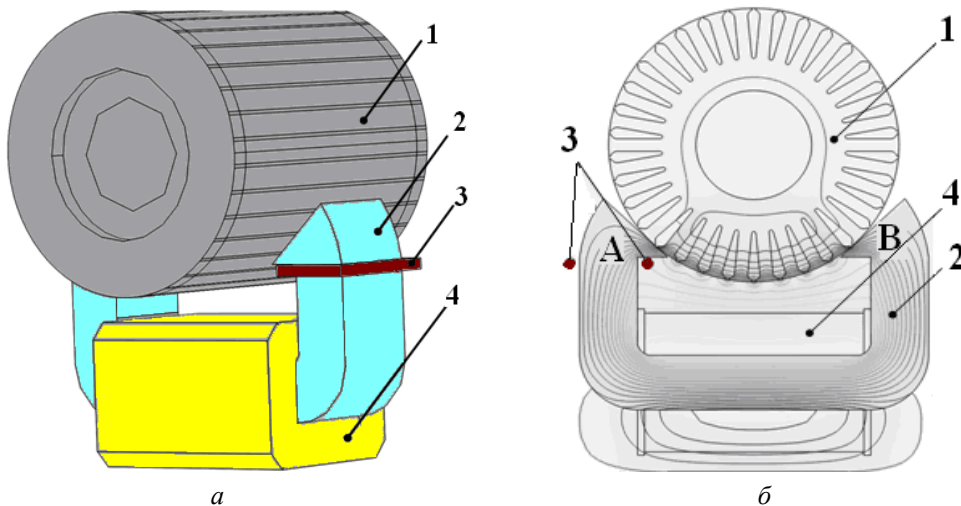


Рис. 1

Расчетная область, состоящая из элементов 1–4, расположена внутри сферы, радиус которой в 1,5 раза превышает максимальный радиус указанных элементов. На поверхности сферы для векторного потенциала задаются однородные (нулевые) граничные условия первого рода. На внешних границах расчетной области задаются условия непрерывности векторов магнитного поля. Повреждение стержней КЗОР моделируется уменьшением электропроводности материала стержня – в предельном случае при разрыве стержня его электропроводность принимается равной нулю.

ЭДС измерительной обмотки может быть рассчитана двумя способами: через значение сцепленного с ИО результирующего магнитного потока

$$U_{io} = \pi\sqrt{2}fW_{io}\Phi = \pi\sqrt{2}fW_{io} \int_{S_{io}} B_n ds, \quad (2)$$

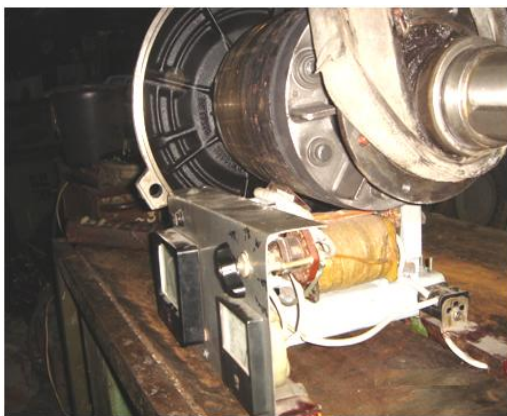
где B_n – нормальная составляющая магнитной индукции в плоскости ИО; W_{io} – число витков ИО; S_{io} – площадь поверхности, на которую опирается ИО, и по второму способу – через сумму объемных интегралов от напряженности электрического поля по каждой стороне ИО:

$$U_{uo} = 2 \left(\int_{V_{uox}} E_x dv + \int_{V_{uoz}} E_z dv \right) W_{uo}. \quad (3)$$

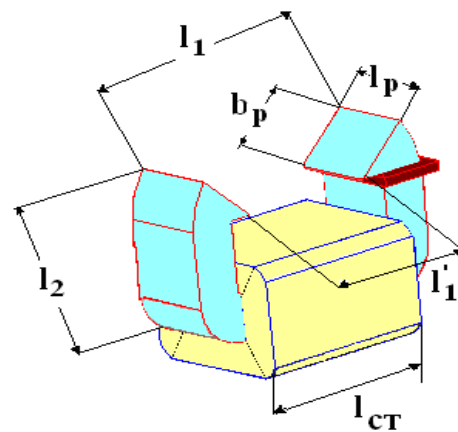
Интегрирование в уравнении (3) проводится по объемам сторон ИО V_{uox} и V_{uoz} , ориентированных соответственно вдоль осей X и Z декартовой системы координат. Совпадение значений, полученных по выражениям (2), (3), служит дополнительной проверкой адекватности полученных результатов.

Численное решение задачи осуществляется методом конечных элементов с помощью вычислительного пакета COMSOL Multiphysics 3.5a. Построенная сетка конечных элементов (СКЭ) содержит 158051 тетраэдров и 33570 граничных элементов, покрывающих границы расчетной области. Точность решения задачи обеспечивается настройкой параметров СКЭ с помощью специальных коэффициентов в каждой из подобластей. Выбирались следующие числовые значения параметров СКЭ: максимальный размер элемента; максимальный коэффициент масштабирования элемента (принято 1,8); скорость роста элемента – 1,45; коэффициент кривизны сетки – 0,8; разрешение узких участков – 0,2. При моделировании использовались следующие методы расчета пространственных матриц: прямой несимметричный многоходовой метод (Direct-UMFPACK), метод сопряженных градиентов (Conjugate gradients) и метод прямого последовательно-параллельного решения разреженных матриц Direct-PARDISO out of core. Наиболее достоверный результат получается при расчете матрицы методом Direct-PARDISO out of core. Использовались следующие установки решателя системы линейных уравнений в методе Direct-PARDISO out of core: возмущение ведущего элемента – 10^{-8} ; величина допустимого отклонения – 10^{-6} ; величина оценки показателя погрешности – 4000. Необходимо отметить, что отклонение от указанных выше величин приводит к некорректному решению рассматриваемой задачи. Время решения данной модели на ПЭВМ с параметрами AMD Athlon™ 64 X2 Dual Core 4000+ 2,63 ГГц, 3,00 ГБ ОЗУ, Windows XP Professional SP3, Radeon X1300 256 Мб составляет 270,9 с, время визуализации – 28 с.

Экспериментальная установка устройства диагностики КЗОР. На рис. 2 а изображена фотография УД совместно с диагностируемым ротором серийного АД типа 4A200L2Y3 мощностью 45 кВт.



а



б

Рис. 2

Устройство диагностики имеет следующие геометрические и обмоточные данные, показанные на рис. 2 б: длина стрежня индуктора, на котором расположена обмотка возбуждения, $l_{ст} = 0,115$ м; длина полюса индуктора $l_p = 0,045$ м; ширина полюса индуктора $b_p = 0,035$ м; размеры зоны контроля $l_1 = 0,13$ м; $l_1' = 0,075$ м; высота ярма индуктора $l_2 = 0,093$ м; количество витков обмотки возбуждения $W_1 = 250$; данные проводника обмотки возбуждения $d/d' = 0,24/0,28$ мм; количество витков измерительной обмотки $W_{uo} = 1250$; данные проводника измерительной обмотки $d/d' = 0,09/0,12$ мм.

Результаты моделирования и экспериментальной проверки. Распределение магнитной индукции в УД показано в виде фоновой закрашки на рис. 3 а (объемное изображение) и рис. 3 б (продольное сечение индуктора УД).

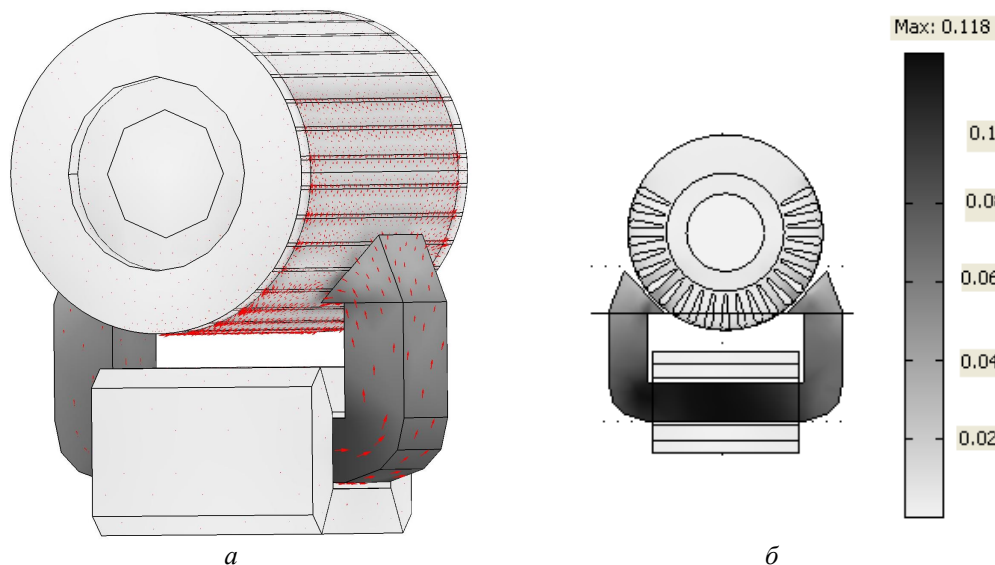


Рис. 3

Проведенные исследования показали, что наибольшей чувствительностью УД обладает при ненасыщенных магнитопроводах как самого устройства, так и проверяемого АД – при этом возникает максимальное изменение сигнала ИО при вхождении поврежденного стержня КЗОР в зону контроля.

На рис. 4 показаны расчетные и экспериментальные зависимости ЭДС ИО, полученные при последовательном повороте ротора АД типа 4А112L4У3 на угол, соответствующий одному зубцовому делению $\Delta\gamma=2\pi/Z_2$. На оси абсцисс обозначены номера стержней ротора. Ротор имеет три поврежденных стержня: стержень № 5 и два рядом лежащих стержня № 13 и 14. Изображены две расчетные кривые, полученные по двухмерной 2D [1] и описанной выше трехмерной 3D полевым математическим моделям УД. Исследуемый ротор характеризуется следующими геометрическими данными: диаметр ротора $d=0,1254$ м; высота паза $h_{\text{п}}=13,6$ мм; ширина широкой части паза $b_1=6,1$ мм; ширина узкой части паза $b_2=3,3$ мм; ширина шлица $b_{\text{ш}}=1$ мм; высота шлица $h_{\text{ш}}=0,5$ мм; материал стержней обмотки ротора – алюминий.

Приведенные кривые позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, при появлении поврежденного стержня возмущение величины $E_{\text{ио}}$ составляет 10...12 %, что обеспечивает достаточную достоверность выявления поврежденных стержней КЗОР. При этом по характеру полученной зависимости можно судить о количестве и числе поврежденных стержней КЗОР. Во-

вторых, моделирование с помощью двухмерной 2D-модели ведет к чрезмерно “оптимистичным” результатам: расчетная погрешность в сторону увеличения сигнала достигает 60 % и более, что в целом снижает адекватность модели. Это

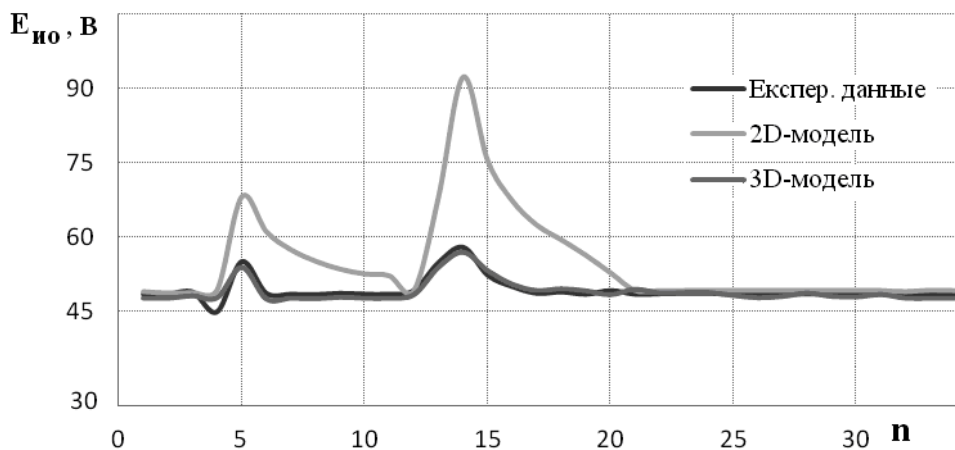


Рис. 4

объясняется недостаточным учетом в 2D-модели значительных магнитных потоков рассеяния УД, выходящих за продольное сечение УД. В-третьих, сравнение экспериментальных данных с полученными по трехмерной 3D-модели расчетными данными показало их хорошее совпадение: расхождение результатов не превышает 4 %. В трехмерной модели в полной мере учитываются краевые эффекты и влияние лобовых частей обмоток на процесс диагностики, поскольку длина лобовых частей обмоток почти в два раза превышает активную длину индуктора УД.

В условиях электроремонтного предприятия с помощью созданного УД проведены испытания роторов АД различных габаритов в диапазоне мощностей 0,75 ... 90 кВт. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Тип двигателя	$k = E_{ион} / E_{иоо}$					
	2-D полевая модель		3-D полевая модель		Эксперимент	
	Количество поврежденных стержней					
	1	2	1	2	1	2
4A71A2Y3 0,75 кВт	1,28	1,43	1,15	1,194	1,11	1,18
4A80A4Y3 1,1 кВт	1,38	1,51	1,161	1,22	1,12	–
4A112L4Y3 5,5 кВт	1,41	1,87	1,134	1,171	1,107	1,178
4A180S4Y3 22 кВт	1,34	1,93	1,191	1,325	1,162	1,28
4A200L2Y3 45 кВт	1,348	1,58	1,245	1,27	1,204	1,31
4A225M4Y3 55 кВт	1,42	1,66	1,277	1,31	1,24	–
4A250M4Y3 90 кВт	1,33	1,72	1,185	1,28	1,146	–

В табл. 1 приведены расчетные и экспериментальные значения коэффициента чувствительности УД $k = E_{ион} / E_{иоо}$, где $E_{ион}$ – максимальная ЭДС в ИО (расчетная или экспериментальная), полученная для ротора, имеющего поврежденные стержни КЗОР; $E_{иоо}$ – ЭДС в ИО, полученная для ротора этого же АД, но не имеющего поврежденных стержней (ее величина не зависит от положения ротора). Приведены расчетные данные, полученные при моделировании соответственно по 2D и 3D-модели, а также экспериментальные. Несколько испытуемых роторов имели по два поврежденных стержня КЗОР, которые были расположены рядом. Данные позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, УД обладает достаточной чувствительностью – ЭДС ИО при повреждении одного стержня КЗОР возрастает на 11...24 %, а при повреждении двух стержней КЗОР ЭДС возрастает на 18...31 %. Во-вторых, очевидно хорошее совпадение экспериментальных данных с расчетными, полученными по 3D-модели. Для всех рассмотренных АД погрешность расчетных данных не превышает 4 %. В-третьих, результаты моделирования по 2D-модели характеризуются значительно большей погрешностью, что снижает их ценность. Расхождение данных увеличивается с увеличением длины ротора АД (т.е. для мощных АД).

В табл. 2 представлены расчетные и экспериментальные данные для ротора АД типа 4A180S4Y3 мощностью 22 кВт, при испытаниях которого последовательно повреждались стержни КЗОР, расположенные в пределах одной группы (от 1 и 5 стержней рядом) в пределах одного полюсного деления.

Таблица 2

Количество дефектных стержней в группе	$k = E_{ион} / E_{иоо}$		
	Расчет 2-D полевой моделью	Расчет 3-D полевой моделью	Экспериментальные данные
1	1,34	1,191	1,162
2	1,93	1,325	1,28
3	2,77	1,48	1,41
4	3,96	1,89	1,804
5	4,44	2,21	2,03

Следует подчеркнуть, что в этой работе рассматривались случаи повреждения КЗОР, связанные с полным разрывом ее стержней. При начальных повреждениях, вызванных скрытыми неразвитыми трещинами стержней, физические эффекты и соответственно диагностические признаки будут менее выражены. С учетом того, что скрытые повреждения имеют тенденцию к быстрому развитию, актуальным является их обнаружение на ранних стадиях. Для этого требуется дальнейшее повышение чувствительности УД, которое можно достичь оптимизацией его параметров, причем такая оптимизация может выполняться на базе разработанной трехмерной полевой математической модели УД.

Выводы. По результатам проведенной работы сформулированы следующие выводы:

1. Созданное устройство диагностики повреждений КЗОР АД обладает достаточной чувствительностью при выявлении одиночных и групповых разрывов стержней обмотки ротора. Экспериментально доказано, что для различных типов АД мощностью 0,75...90 кВт в зависимости от объема повреждений значение коэффициента чувствительности лежит в пределах 1,1...1,15, что достаточно для достоверной диагностики.
2. Разработанная трехмерная полевая математическая модель обеспечивает высокую достоверность результатов моделирования: расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 5 %, что позволяет эффективно использовать ее при усовершенствовании конструкции и оптимизации параметров предложенного устройства диагностики.
3. Разработанное устройство перспективно для выявления дефектов КЗОР на начальной стадии их развития, возникших при изготовлении КЗОР или в процессе ее эксплуатации, в том числе скрытых трещин стержней и короткозамыкающих колец КЗОР, дефектов литья, каверн и др.

1. Васьковський Ю.Н., Коваленко М.А. Исследование устройства контроля короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 6. – С.18–22.
2. Зайцев А.И., Табинский М.П. Установка для обнаружения литейных дефектов стержней ротора асинхронного двигателя // Электротехника. – 1966. – № 3. – С. 56–58.
3. А. с. 1396093 СССР, МПК G 01 R 31/02. Устройство для испытаний короткозамкнутых роторов асинхронных электрических машин; Опубл. 1988.

УДК 621.313.333

Ю.М. Васьковський¹, докт. техн. наук, **М.А. Коваленко²**, асп.

1, 2 – Нац. техн. ун-т України «КПІ»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

Тривимірна польова математична модель пристрою діагностики короткозамкнутої клітки ротора асинхронних двигунів

Розроблено та експериментально апробовано тривимірну польову математичну модель пристрою контролю та діагностики короткозамкнутої обмотки ротора. Порівнюються розрахункові дані, отримані дво- та тривимірною польовою моделлю з даними експерименту. Сформульовано перспективи застосування цього пристрою. Бібл. 3, рис. 4, табл. 2.

Ключові слова: пристрій діагностики, чутливість, тривимірна польова математична модель, напруга вимірювальної обмотки.

Y.M. Vaskovsky¹, **M.A. Kovalenko²**

1, 2 – National Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute”,
Peremogy, 37, Kiev, 03056, Ukraine

Three-dimensional field mathematical model of diagnostics device squirrel-cage induction motors

Developed and experimentally tested three dimensional field mathematic model of control device for rotor squirrel-cage of induction motors. Compare calculated data which obtained by 2D & 3D field model with experimental data. Formulated the perspectives future application of this device. References 3, figures 4, tables 2.

Key words: diagnostic device, sensitivity, three dimension field mathematic model, measuring winding voltage.

Надійшла 02.02.2012

Received 02.02.2012