

ДИАГНОСТИКА СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

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

¹ – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,

² – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.
e-mail: vun157@voliacable.com

Разработана трехмерная полевая математическая модель устройства контроля и диагностики дефектов короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя. С помощью разработанной модели исследована чувствительность предложенного устройства при обнаружении и диагностике скрытых дефектов короткозамкнутой обмотки на начальной стадии их развития. Библи. 6, рис. 6.

Ключевые слова: короткозамкнутая обмотка ротора асинхронного двигателя, трехмерная полевая математическая модель, дефекты обмотки ротора, устройство контроля и диагностики.

Введение. Известно, что наличие структурных неоднородностей в материале (зерен, микро-трещин, дислокаций) приводит к снижению его прочности в десятки–сотни раз по сравнению с идеальным молекулярным порядком, что ведет к быстрому разрушению материала. Появление дефектов (трещин, каверн) в стержнях короткозамкнутой обмотки ротора (КЗОР) асинхронного двигателя (АД) ведет к быстрой деградации КЗОР и дальнейшему аварийному выходу АД из строя. Поэтому своевременное обнаружение дефектов КЗОР на начальных стадиях их развития является актуальной задачей мониторинга технического состояния короткозамкнутых АД, особенно мощных двигателей, выполняющих ответственные технологические функции. Решение этой задачи требует применения эффективных методов диагностики и разработки соответствующих диагностических устройств, обладающих достаточной чувствительностью при выявлении слаборазвитых дефектов в стержнях КЗОР. Такую диагностику КЗОР необходимо проводить при ремонте АД, а также при изготовлении ротора. Среди известных методов диагностики наибольшее распространение получил индукционный метод, основанный на электромагнитном возбуждении токов в элементах КЗОР и оценке изменения магнитного поля в зоне дефекта с помощью диагностического устройства [1,5].

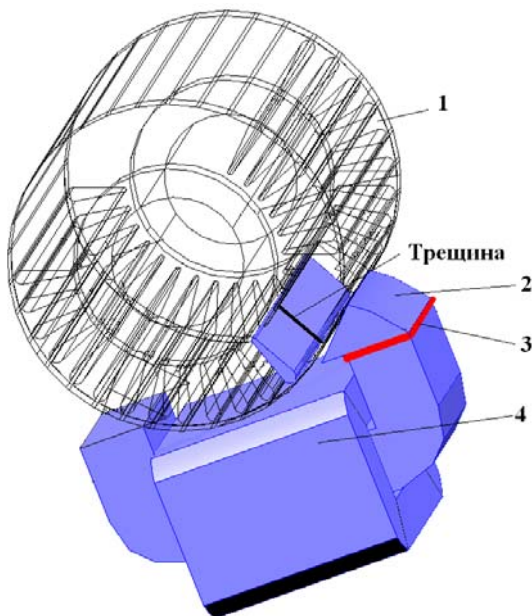


Рис. 1

В работах [3,4,6] авторами данной статьи предложено устройство контроля и диагностики (УКД) КЗОР, позволяющее оценить техническое состояние ротора АД при его ремонте или изготовлении. На рис. 1 схематически обозначено: 1 – исследуемый ротор; 2 – магнитопровод индуктора УКД; 3 – измерительная обмотка (ИО); 4 – обмотка возбуждения переменным током. Ротор размещается между полюсами магнитопровода индуктора УКД. На рис. 1 также выделен один поврежденный стержень КЗОР с трещиной, находящийся между полюсами УКД. Магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, замыкается через исследуемый участок ротора, индуцируя в стержнях КЗОР аксиально направленные токи. При последовательном повороте ротора на одно зубцовое деление и появлении в зоне контроля дефектного стержня распределение токов в стержнях и магнитной индукции в зубцово-пазовой зоне изменяется, что в итоге влияет на сигнал ИО.

Целью статьи является исследование возможности диагностики с помощью предлагаемого УКД скрытых дефектов стержней КЗОР на начальной стадии их

развития. В качестве дефектов стержня в статье рассматриваются: трещина нормального отрыва, в том числе неполная трещина, не разрывающая всего сечения стержня, а также внутренняя каверна (раковина) в стержне, вызванная технологическими причинами.

Поставленная цель достигается с помощью математического моделирования электромагнитного поля в системе, содержащей УКД и ротор АД с дефектным стержнем КЗОР. Чувствительность УКД к появлению повреждения существенно зависит от оптимального выбора параметров устройства: неправильный выбор геометрии УКД многократно снижает его чувствительность. В статье рассматривается высокочувствительное УКД, для которого проведена параметрическая оптимизация.

Математическая модель. При диагностике роторов АД средней и большой мощности длина ротора АД, как правило, существенно превышает аксиальный размер УКД. При этом УКД имеет значительные магнитные потоки рассеяния, которые не возбуждают токи в стержнях КЗОР. В целом характер распределения магнитного поля в системе “УКД–ротор АД” носит существенно трехмерный характер, что требует для его исследования трехмерной полевой модели. Система уравнений трехмерного электромагнитного поля в УКД записывается в следующем виде:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \dot{\vec{A}} \right) + j\omega\sigma \dot{\vec{A}} + \sigma \nabla \varphi = \dot{\vec{J}}_c, \quad \nabla \cdot \left(j\omega\sigma \dot{\vec{A}} + \sigma \nabla \varphi - \dot{\vec{J}}_c \right) = 0, \quad (1)$$

где $\dot{\vec{A}} = \dot{e}_x A_x + \dot{e}_y A_y + \dot{e}_z A_z$ – комплексная амплитуда векторного магнитного потенциала; φ – скалярный электрический потенциал, μ, σ – магнитная проницаемость и электропроводность, ω – угловая частота

изменения переменных во времени; $\dot{\vec{J}}_c$ – вектор плотности сторонних токов, который задается в обмотке возбуждения УКД. Расчетная область УКД, 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 граничные условия первого рода. На внешних границах области задаются условия непрерывности векторов магнитного поля.

ЭДС измерительной обмотки рассчитывается через значение сцепленного с ИО результирующего магнитного потока

$$U_{ИО} = \pi\sqrt{2}f w_{ИО} \Phi = \pi\sqrt{2}f w_{ИО} \int_{S_{ИО}} B_n ds, \quad (2)$$

где B_n – нормальная составляющая магнитной индукции в плоскости ИО; $w_{ИО}$ – число витков ИО; $S_{ИО}$ – площадь поверхности, на которую опирается ИО.

Для оценки изменения сигнала ИО при появлении в зоне контроля дефектного стержня вводится коэффициент чувствительности УКД

$$k_e = E_1 / E_0, \quad (3)$$

где E_1, E_0 – ЭДС ИО, соответственно, при наличии и при отсутствии поврежденного стержня.

Модель трещины. Стержень КЗОР с трещиной располагается в середине исследуемого участка ротора, находящегося между полюсами индуктора УКД. Трещина представлена тонким поперечным слоем толщиной 1 мм, обладающим собственным значением электропроводности (рис. 1). При полном разрыве стержня электропроводность слоя принимается равной нулю, что препятствует замыканию токов между короткозамыкающими кольцами КЗОР через дефектный стержень. При стандартной частоте индуцированных токов (50 Гц) они протекают на половинах разорванного стержня, имея разные направления на разных участках по высоте стержня. При этом характер распределения электромагнитного поля в зоне дефекта существенно изменяется.

Не вдаваясь в тонкости механики распространения трещин, отметим, что в неразвитой трещине при частично нарушенных межатомных связях между ее краями существуют микроконтакты, по которым токи могут частично протекать через трещину. При моделировании таких неразвитых трещин однородным электропроводным слоем эквивалентную электропроводность слоя принимают отличной от нуля. Хотя взаимосвязь между эквивалентной электропроводностью слоя трещины и степенью ее развитости однозначно не установлена, можно предположить, что величина эквивалентной электропроводности пропорциональна отношению суммарной площади микроконтактов к полной площади края трещины. Были выполнены исследования чувствительности УКД при вариации электропроводности слоя трещины. Важное значение имеет исследование чувствительности УКД при наличии в стержне неполной трещины, глубина которой меньше высоты стержня. Для моделирова-

ния таких трещин указанный слой разделяется по высоте на два участка. Электропроводность одного участка принимается равной нулю (разошедшиеся края трещины), а электропроводность второго принимается равной электропроводности материала стержня (целый участок). Такая модель позволяет исследовать чувствительность УКД не только от высоты трещины, но и в зависимости от места ее зарождения – на поверхности стержня, обращенной к зазору АД, или в районе дна паза. Численное решение задачи выполняется методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics 3.5a.

Результаты моделирования. Моделирование проводилось на примере серийного АД типа 4A112M4Y3 (мощность – 5,5 кВт, частота вращения – 1440 об/мин, напряжение питания – 220/380 В). Исследуемый ротор характеризовался следующими геометрическими данными: диаметр ротора $D_2=125,4$ мм; высота паза ротора $h_{п}=13,6$ мм; ширина широкой части паза $b_1=6,1$ мм; ширина узкой части паза $b_2=3,3$ мм; ширина шлица $b_{ш}=1$ мм; высота шлица $h_{ш}=0,5$ мм; материал стержней обмотки ротора – алюминий. Данные УДК: длина стержня индуктора, на котором расположена обмотка возбуждения, $l_{ст}=115$ мм; длина полюса индуктора $l_p=45$ мм; ширина полюса индуктора $b_p=35$ мм; количество витков обмотки возбуждения $W_1=250$; количество витков измерительной обмотки $W_{ио}=1250$.

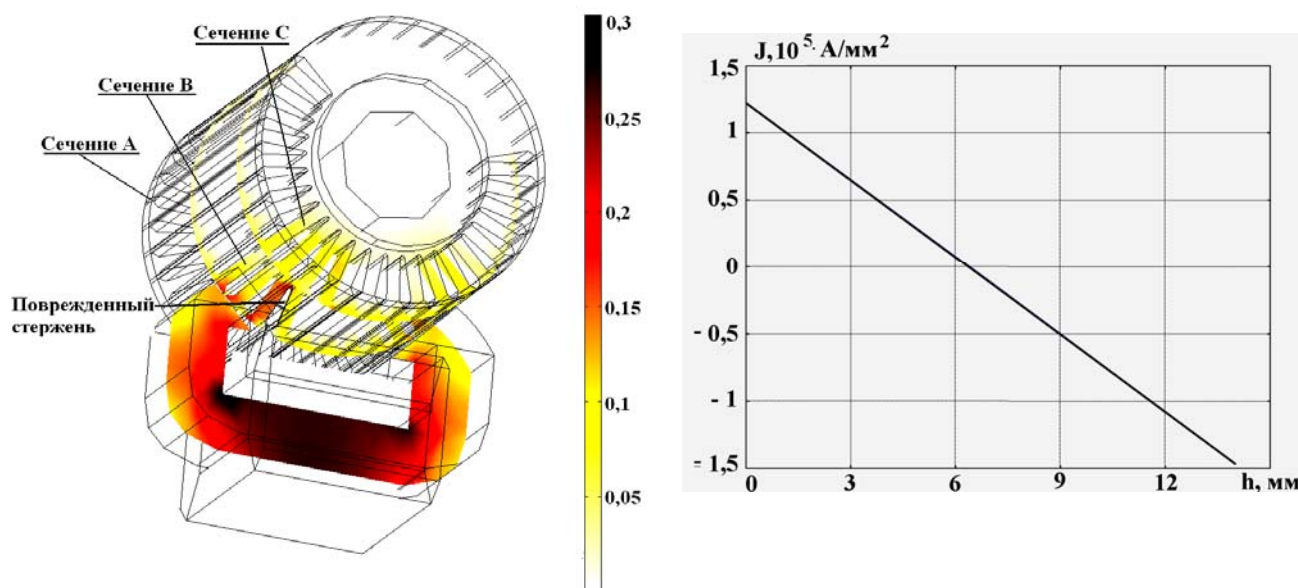


Рис. 2, а, б

На рис. 2, а фоновой закраской изображено распределение магнитной индукции в трех поперечных сечениях модели при полном разрыве стержня, в том числе в сечении В, проходящем через середину магнитопровода индуктора. Максимальная индукция в УКД равна примерно 0,3 Тл, что обеспечивает независимость ЭДС ИО от насыщения магнитопровода. На рис. 2, б показано распределение плотности тока по высоте поврежденного стержня в сечении С, удаленном от сечения В, в котором расположена трещина, на расстоянии 50 мм. Из рис. 2, б следует, что в половинках разорванного стержня протекают существенные по величине токи (амплитуда плотности тока достигает значения $0,15 \text{ A/mm}^2$), причем распределение плотности тока по высоте стержня имеет линейный знакопеременный характер, что подтверждает необходимость учета их влияния на результирующее электромагнитное поле в рамках трехмерной полевой модели.

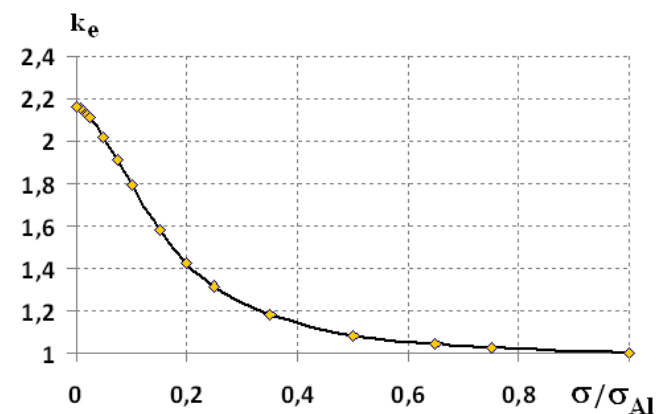


Рис. 3

На рис. 3 дана расчетная зависимость коэффициента чувствительности УКД k_e от эквивалентной электропроводности слоя трещины, выраженной в долях от электропроводности алюминия. Из представленной зависимости следует, что только при снижении электропровод-

ности слоя на 50% ЭДС ИО увеличивается на 10% (коэффициент чувствительности увеличивается до значения 1,1), что достаточно для надежного выявления трещины измерительными приборами. При полностью разорванном стержне коэффициент k_e достигает значения 2,19, что свидетельствует о высокой чувствительности рассматриваемого УКД при диагностике полностью разорванных стержней КЗОР.

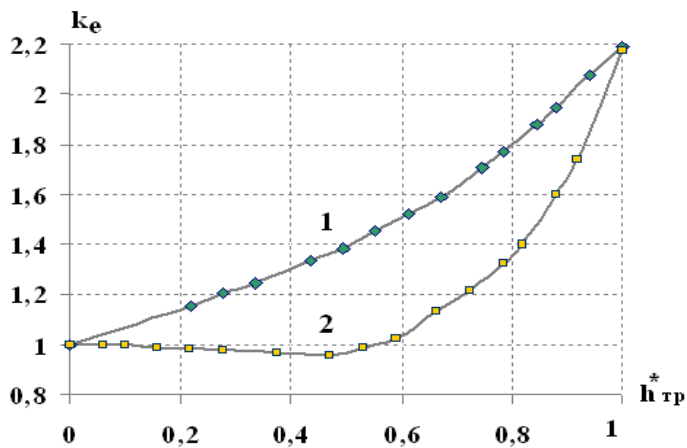


Рис. 4

Трещина в стержне КЗОР может возникать и далее развиваться как от дна паза (внутренняя трещина), так и от внешней поверхности, обращенной к воздушному зазору (наружная трещина). На рис. 4 представлены зависимости коэффициента k_e от относительной высоты трещины $h_{тр}^* = h_{тр}/h_{п}$, где $h_{тр}$ – высота трещины. Кривая 1 соответствует случаю наружной трещины, кривая 2 – случаю внутренней трещины.

Для наружной трещины характерна почти линейная зависимость между сигналом ИО и глубиной трещины, что позволяет надежно выявить не только ее наличие, но и определить ее размер. Для внутренней трещины рассматриваемая зависимость имеет

существенно иной характер. На начальном этапе роста трещины наблюдается не только увеличение сигнала ИО, но даже небольшое (до 5%) его уменьшение. В случае, если относительная глубина трещины $h_{тр}^* \approx 0,6$, то такая трещина становится “невидимой” для УКД. Это объясняется тем, что токи в нижней части стержня, обходя внутреннюю трещину, вынужденно смещаются к воздушному зазору, усиливая эффект вытеснения магнитного потока из ротора и, как результат, снижение сигнала ИО. В дальнейшем при $h_{тр}^* > 0,7$, когда происходит существенное увеличение сопротивления поврежденного стержня и, следовательно, снижение в нем тока, влияние поврежденного стержня на поле уменьшается и наблюдается быстрое увеличение коэффициента k_e . Таким образом, с помощью ИО УКД не во всех случаях возможно гарантированно выявить неполные внутренние трещины, рассекающие стержень на 50...60% его высоты. Вместе с тем, снижение сигнала ИО на 3...5% может свидетельствовать о наличии внутренней трещины в стержне КЗОР с относительной глубиной $h_{тр}^* \approx 0,3...0,5$.

Аналогичные выводы были получены расчетами и на других примерах АД различных мощностей и габаритов, в частности, для серийных двигателей 4A80A4Y3 мощностью 1,1 кВт и 4A180S4Y3 мощностью 22 кВт. При этом для более мощного АД, который имеет большую глубину пазов ротора данный эффект оказался более выраженным: если для двигателя 4A80A4Y3 существенное увеличение коэффициента k_e возникало уже при $h_{тр}^* > 0,5$, то для двигателя 4A180S4Y3 с более глубокими пазами это происходило только после $h_{тр}^* > 0,7$. Еще более существенной является эта величина в специальных глубокопазных АД, а также в двухклеточных двигателях, предназначенных для создания повышенного пускового момента.

Далее исследовалась возможность выявления с помощью рассматриваемого УКД скрытого дефекта стержня КЗОР – внутренней каверны, возникшей при изготовлении КЗОР АД.

При интенсивной эксплуатации двигателя каверна постепенно увеличивается в размерах, окончательно разрушая стержень. Для удобства анализа каверна моделировалась фигурой, поперечное сечение которой по форме подобно поперечному сечению паза ротора и расположено симметрично в центре сечения стержня (рис. 5, а, на котором цифрами обозначено 1 – каверна, 2 – стержень). Для оценки величины каверны вводится относительная площадь каверны, равная отношению площади поперечного сечения каверны S_K к площади поперечного сечения паза $S_{п}$: $S_K^* = S_K / S_{п}$. На рис. 5, б показана зависимость коэффициента чувствительности УКД от относительной площади каверны. Эта кривая во многом похожа на представленную на рис. 4 кривую 2 для внутренней трещины. При $0,2 < S_K^* < 0,6$ наблюдается небольшое снижение сигнала ИО (до 5%), при $0,6 < S_K^* < 0,7$ каверна становится “невидимой” для УКД и только каверна значительных размеров ($S_K^* > 0,8$) может быть надежно выявлена с помощью предлагаемого УКД.

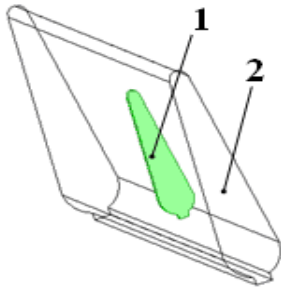


Рис. 5, а

Таким образом, диагностика скрытых (внутренних) неразвитых дефектов стержней КЗОР индукционным методом с помощью УКД при стандартной частоте напряжения питания встречает затруднения, что не позволяет гарантировать высокий уровень надежности последующей работы АД. Простое объяснение этого факта состоит в том, что при стандартной частоте питания f глубина проникновения индуцированных токов в стержень оказывается меньше высоты паза (стержня) ротора. В результате индуцированные токи, концентрируясь в верхней части стержня, практически не обтекают дефекты, расположенные ниже глубины проникновения, что усложняет или даже делает невозможным их выявление индукционным методом.

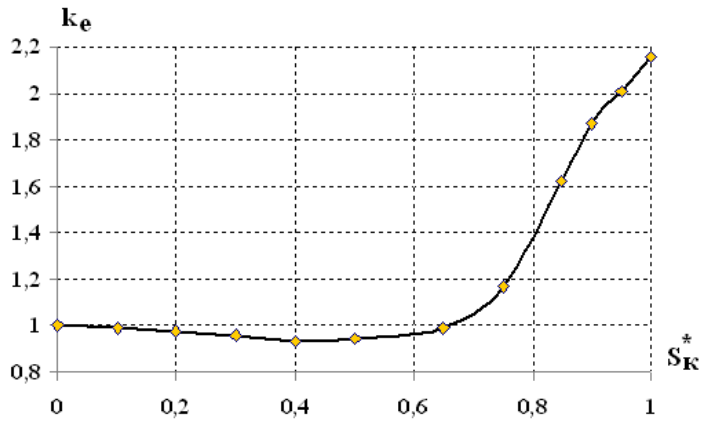


Рис. 5, б

Для количественного анализа этого фактора целесообразно использовать известную формулу для эквивалентной глубины проникновения вихревых токов в электропроводную среду $\delta = \sqrt{2/\gamma\mu_0\omega}$, где γ – электропроводность материала стержня, $\omega = 2\pi f$. Для алюминиевых стержней она равна $\delta = 11,7$ мм, для медных – $\delta = 9,3$ мм. В АД средней и большой мощности высота паза может существенно превышать указанные величины. Этот вывод подтвержден расчетами для рассматриваемого АД типа 4А112М4У3 при вариации глубины паза ротора. В серии расчетов глубина паза уменьшалась от $h_n = 13,6$ мм до 6 мм. Одновремен-

но при этом изменялась глубина внутренней трещины таким образом, чтобы оставалась неизменной ее относительная глубина $h_{тр}^* = 0,6$. Оказалось, что если при $h_n = 13,6$ мм коэффициент чувствительности $k_e \approx 1$ (т.е. трещина “не видна” для УКД), то при $h_n < 9$ мм начинается заметное увеличение коэффициента чувствительности, а при $h_n = 6$ мм $k_e = 1,6$.

В результате численного анализа вариантов ряда различных АД установлено, что диагностика скрытых внутренних трещин с чувствительностью УКД на уровне $k_e \geq 1,1$ возможна при выполнении следующего условия:

$$\delta/h_n \geq 1,15. \quad (4)$$

При заданных свойствах материала стержня увеличить глубину проникновения токов в стержень и, соответственно, уменьшить зону нечувствительности индукционного УКД можно путем уменьшения частоты питающего напряжения. На рис. 6 показана зависимость коэффициента k_e от $h_{тр}^*$ для внутренней трещины при частоте питающего напряжения 20 Гц. При этой частоте глубина проникновения токов в стержень увеличивается до 18,5 мм. В отличие от кривой 2 на рис. 4 данная зависимость имеет монотонно возрастающий характер, причем уже при $h_{тр}^* = 0,25$ коэффициент чувствительности возрастает до значения 1,1, что позволяет выполнить надежную диагностику трещины.

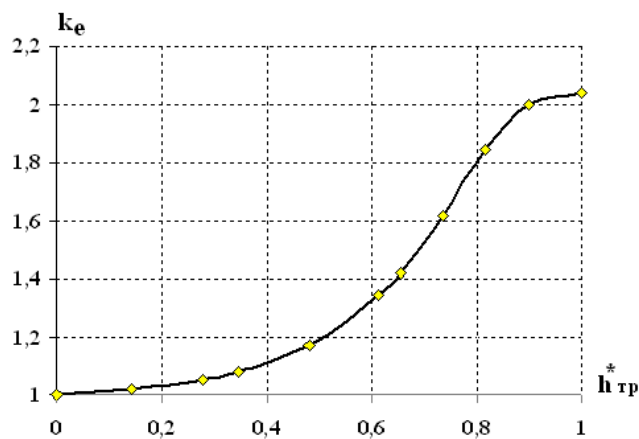


Рис. 6

Следует указать, что с уменьшением частоты питающего напряжения пропорционально снижается величина индуцированной в ИО ЭДС. Однако этот фактор можно компенсировать увеличением числа витков ИО. Таким образом, выбором частоты напряжения питания можно добиться выполнения условия (4) и тем самым существенно увеличить чувствительность УКД при диагностике скрытых внутренних трещин стержней КЗОР. Аналогичный вывод получен и относительно диагностики каверн в стержнях.

Выводы. 1. Предложено устройство контроля и диагностики дефектов стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя и разработана трехмерная полевая математическая модель для исследований коэффициента чувствительности устройства k_e . **2.** На примере АД мощностью 5,5 кВт показано, что при полностью разорванном стержне коэффициент k_e достигает значения 2,19, что свидетельствует о высокой чувствительности рассматриваемого УКД при выявлении дефектных стержней КЗОР. **3.** Предложенное УКД позволяет выявлять скрытые дефекты в стержнях (неполные трещины, каверны), находящиеся на начальной стадии развития. Для получения требуемой чувствительности устройства при диагностике внутренних трещин и каверн необходимо выполнение условия (4), при котором индуцированные токи достаточно полно обтекают дефекты, и которое может быть обеспечено изменением частоты питающего напряжения УКД.

1. АС СРСР № 1396093. Устройство для испытания короткозамкнутых роторов асинхронных электрических машин МПК G 01 R 31/02, 1988.

2. Васьковский Ю.М. Польовий аналіз електричних машин. – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. – 191 с.

3. Васьковский Ю.Н., Коваленко М.А. Исследование устройства контроля короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя // Электротехніка і електромеханіка. – 2011. – №6. – С. 18–22.

4. Васьковский Ю.Н., Коваленко М.А. Трехмерная полевая математическая модель устройства диагностики короткозамкнутой клетки ротора асинхронных двигателей // Праці ІЕД НАНУ. – 2012. – Вип. 31. – С. 78–83.

5. Зайцев А.И., Табинский М.П. Установка для обнаружения литейных дефектов стержней ротора асинхронного двигателя // Электротехника. – 1966. – №3. – С. 56–58.

6. Патент 69276 Україна, МПК G01R 31/02. Пристрій для діагностики дефектів литої короткозамкненої обмотки ротора асинхронного двигуна / Васьковский Ю.М., Коваленко М.А. – Чинний від 25.04.2012.

УДК 621.313.333

ДІАГНОСТИКА ПРИХОВАНИХ ДЕФЕКТІВ КОРОТКОЗАМКНЕНОЇ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ІНДУКЦІЙНИМ МЕТОДОМ

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

¹ – Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,
e-mail: vun157@voliacable.com

² – Національний технічний університет України, "КПІ", пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

Розроблено тривимірну польову математичну модель пристрою для контролю і діагностики дефектів короткозамкненої обмотки ротора асинхронного двигуна. За допомогою розробленої моделі досліджено чутливість запропонованого пристрою при виявленні і діагностиці прихованих дефектів короткозамкненої обмотки на початковій стадії їхнього розвитку. Бібл. 6, рис. 6.

Ключові слова: короткозамкнена обмотка ротора асинхронного двигуна, тривимірна польова математична модель, дефекти обмотки ротора, пристрій контролю і діагностики.

DIAGNOSTICS OF LATENT DEFECTS OF THE SHORT-CIRCUITED ROTOR WINDING OF ASYNCHRONOUS MOTOR BY AN INDUCTION METHOD

Ju.M.Vaskovskiy¹, M.A.Kovalenko²

¹ – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,
e-mail: vun157@voliacable.com

² – National technical university of Ukraine "Kyiv polytechnic institute", pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

The three-dimensional field mathematical model of device for control and diagnostics of defects of short-circuited rotor winding of asynchronous motor is worked out. By means of these model the sensitiveness of the offered device is investigational at diagnostics of latent defects of short-circuited rotor winding on the initial stage of their development. References 6, figures 6.

Keywords: short-circuited rotor winding of asynchronous motor, three-dimensional field mathematical model, defects of puttee of rotor, device of control and diagnostics.

1. Patent USSR № 1396093. Device for the test of short-circuited rotors of asynchronous electric machines, МПК G 01 R 31/02, 1988. (Rus)

2. Vaskovskiy Ju.M. Field analysis of electric machines. – Kyiv: Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy "KPI", 2007. – 191 p. (Ukr)

3. Vaskovskii Ju.N., Kovalenko M.A. Research of device of control of short-circuited rotor winding of asynchronous motor // Elektrotehnika i elektromekhanika. – 2011. – №6. – Pp. 18–22. (Rus)

4. Vaskovskii Ju.N., Kovalenko M.A. Three-dimensional field mathematical model of diagnostics device squirrel-cage induction motors // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky natsionalnoi akademii nauk Ukrainy. – 2012. – №31. – Pp. 78–83. (Rus)

5. Zaitsev A.I., Tabinskii M.P. Fluidizer finding out the casting defects of bars of rotor of asynchronous motor // Elektrotehnika. – 1966. – №3. – С. 56–58. (Rus)

6. Patent Ukraine № 69276, МПК G01R 31/02. Device for diagnostics of defects of the short-circuited rotor winding of asynchronous motor / Ju.M. Vaskovskiy, M.A. Kovalenko. From 25.04.2012.

Надійшла 11.06.2012

Received 11.06.2012