

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ КРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Запропонований пристрій для контролю і діагностики короткозамкнутої обмотки ротора асинхронного двигуна в умовах його ремонту. Розроблена польова математична модель і досліджена чутливість пристрою для двигунів різної потужності і різній конфігурації зубцево-пазової зони ротора.*

*Предложено устройство для контроля и диагностики короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя в условиях его ремонта. Разработана полевая математическая модель и исследована чувствительности устройства для двигателей разной мощности и различной конфигурации зубцево-пазовой зоны ротора.*

### ВВЕДЕНИЕ

Надежность эксплуатации короткозамкнутых асинхронных двигателей (АД) после их ремонта определяется эффективностью выполненных ремонтных работ, планирование которых базируется на результатах комплексной диагностики всех повреждений, которые необходимо устранить в процессе ремонта. Один из наиболее распространенных видов капитального ремонта АД связан с перемоткой его обмотки статора (ОС), поскольку повреждение ОС составляет около 40 % всех повреждений АД. Этот вид повреждений достаточно легко диагностируется при оценке технического состояния АД. Несложно определяются и устраняются повреждения подшипников, эксцентриситет ротора и др. Значительно сложнее выявляются скрытые дефекты короткозамкнутой обмотки ротора (КЗОР), обусловленные трещинами и разрывами стержней и сегментов короткозамыкающих колец (СКК), нарушением целостности пайки стержней к СКК и др. Как правило, при ремонте АД осуществляется визуальный осмотр ротора и при отсутствии очевидных повреждений КЗОР ротор далее используется в составе отремонтированного АД. Такая практика не отвечает современным требованиям по обеспечению гарантированной надежности работы электрооборудования. Известны случаи, когда после перемотки ОС двигателя после непродолжительной эксплуатации снова выходили в ремонт из-за повторного повреждения ОС, вызванного работой с дефектной КЗОР, что приводило к существенным экономическим потерям. Поэтому, большое значение имеет контроль технического состояния КЗОР и создание простого, недорогого и универсального устройства для выявления возможных дефектов обмотки ротора еще на этапе первичной диагностики состояния разобранного электродвигателя. Целью статьи является разработка и исследование устройства контроля и диагностики (УКД) короткозамкнутой обмотки ротора АД на стадии его ремонта.

### ОПИСАНИЕ И ПРИНЦИП РАБОТЫ УКД КЗОР

Основными требованиями к УКД КЗОР являются: 1) высокая чувствительность и достоверность; 2) универсальность; 3) простота конструкции и методики диагностики.

Эскиз предлагаемого УКД КЗОР изображен на рис. 1. Устройство состоит из шихтованного разомкнутого магнитопровода индуктора 1; обмотки возбу-

ждения (ОВ) 2, которая питается переменным напряжением (220 В, 50 Гц); измерительной обмотки (ИО) 3, размещенной на одном из полюсов магнитопровода индуктора. Исследуемый ротор (4) размещается между полюсами индуктора таким образом, чтобы часть пазов ротора с исследуемыми стержнями КЗОР располагалась между полюсами индуктора на путях замыкания магнитного потока. Ротор фиксируется на валу (5) приспособлением (6). Помещенная между полюсами индуктора часть ротора с КЗОР выполняет роль вторичного элемента (якоря), в стержнях которого индуцируются вихревые токи, возбужденные переменным магнитным потоком индуктора.

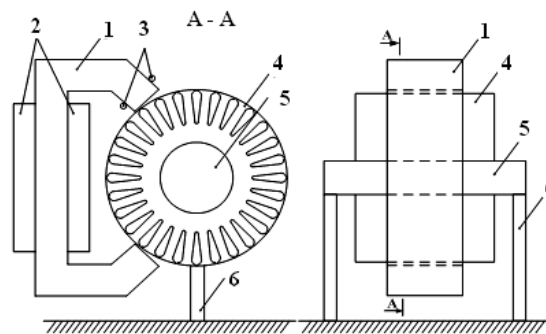


Рис. 1. Эскиз устройства для контроля и диагностики обмотки ротора

Принцип работы предлагаемого устройства основан на изменении магнитного сопротивления магнитному потоку индуктора при появлении дефектного стержня. Если в контролируемой зоне ротора находятся все исправные стержни КЗОР, то индуцированные в них токи вытесняют магнитный поток на поверхность ротора, увеличивая магнитное сопротивление на пути потока. При этом ЭДС, индуцированная в ИО, минимальна. При наличии дефектного стержня, в котором ток не протекает, магнитный поток в зоне дефектного стержня глубоко проникает в ярмо ротора, в результате чего результирующее магнитное сопротивление на пути потока индуктора уменьшается, а ЭДС в ИО увеличивается.

В отличие от известных устройств диагностики КЗОР АД в ремонтных условиях [1-3] предлагаемое УКД отвечает требованиям универсальности, конструктивной простоты и не требует сложных измерений. При этом требуется исследовать чувствительность предлагаемого УКД и оценить влияние его кон-

структивных параметров. Такое исследование целесообразно провести методами математического моделирования.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для изменяющихся гармонически во времени величин, в поперечном сечении А-А устройства уравнение электромагнитного поля относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала имеет следующий вид [4]:

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_z}{\partial y^2} - j\omega_1 \mu \gamma \dot{A}_z = -\mu \dot{J}_{z\text{стор}} + \mu \gamma \frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial z}, \quad (1)$$

где  $\omega_1$  – угловая частота переменных токов в обмотке возбуждения;  $\mu$ ,  $\gamma$  – магнитная проницаемость и электропроводность;  $\dot{J}_{z\text{стор}}$  – заданная плотность сторонних токов в сечении ОВ.

Слагаемое  $\mu \gamma \frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial z}$  в правой части характеризует источники поля, обусловленные появлением свободных электрических зарядов на торцах ротора из-за повреждения стержня КЗОР. Приближенно предполагая  $\frac{\partial \dot{\varphi}}{\partial z} \approx \frac{\Delta \dot{\varphi}}{\Delta z} = \frac{\Delta \dot{\varphi}}{L_R}$ , где  $L_R$  – активная длина ротора, при решении уравнения (1) следует задать разность потенциалов  $\Delta \dot{\varphi}$  между торцами ротора. Решение задачи должно удовлетворять требованию: сумма интегралов плотностей токов  $\dot{J}_k$  по сечению всех стержней клетки  $Z_2$  должна равняться нулю:

$$\sum_{k=1}^{k=Z_2} \int_{S_k} \dot{J}_k ds = 0, \quad (2)$$

т.е. с физической точки зрения суммарный ток, протекающий в одном направлении поперечного сечения короткозамкнутого ротора, должен быть равен суммарному току, текущему в обратном направлении. Величина  $\Delta \dot{\varphi}$  находится методом последовательных приближений до тех пор, пока невязка полного тока, определяемая выражением (2), не станет меньше заданной погрешности  $\varepsilon$ . Как правило, итерационный процесс достаточно быстро сходится, и для приведенного ниже примера АД типа 4А80А4У3 найденная величина разности потенциалов равна  $\Delta \dot{\varphi} = 0,057(1+j)$  В. Если в пазу находится поврежденный стержень и ток в пазу не протекает, то при моделировании поврежденного стержня достаточно принять в пазу ротора электропроводность  $\gamma = 0$ . Численное решение уравнения (1) выполняется в среде COMSOL Multiphysics 3.5a методом конечных элементов.

На границах расчетной области задаются однородные граничные условия первого рода. Измерительная обмотка разомкнута и в ней рассчитывается ЭДС. Для расчета ЭДС ИО необходимо проинтегрировать рассчитанную величину напряженности электрического поля  $E_z$  по площади поперечного сечения ИО  $S_{ио}$ :

$$U_{ио} = \frac{W_{ио} L_u}{S_{ио}} \int_{S_{ио}} E_z ds, \quad (3)$$

где  $W_{ио}$  – число витков ИО,  $L_u$  – длина индуктора (в плоскость чертежа).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2 представлено распределение магнитной индукции (фоновая закрашка) и изолиний векторного магнитного потенциала для ротора АД типа 4А80А4У3 при двух его состояниях: без поврежденных стержней КЗОР (рис. 2,а) и с одним поврежденным стержнем (рис. 2,б). Из рис. 2 следует существенное различие в распределении электромагнитного поля в этих двух случаях. В роторе без поврежденных пазов индуцированные в стержнях токи вытесняют магнитный поток к поверхности и поток замыкается в пределах небольшой глубины проникновения. При наличии хотя бы одного поврежденного стержня магнитный поток глубоко проникает в магнитопровод ротора в зоне поврежденного стержня, что приводит к уменьшению магнитного сопротивления магнитному потоку индуктора и к росту индуцированной ЭДС ИО.

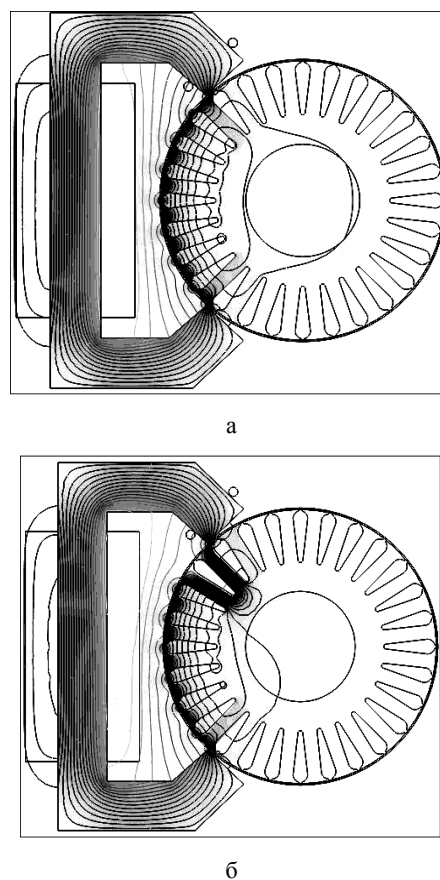


Рис. 2. Распределение магнитной индукции и векторного магнитного потенциала

Индукция по ширине полюса индуктора в месте расположения ИО распределяется неравномерно, что обусловлено геометрией исследуемого ротора и полюса. На рис. 3 показано распределение модуля индукции вдоль ширины полюса индуктора для двух рассматриваемых случаев: кривая 1 – при отсутствии поврежденных стержней в роторе, кривая 2 – при наличии одного поврежденного стержня.

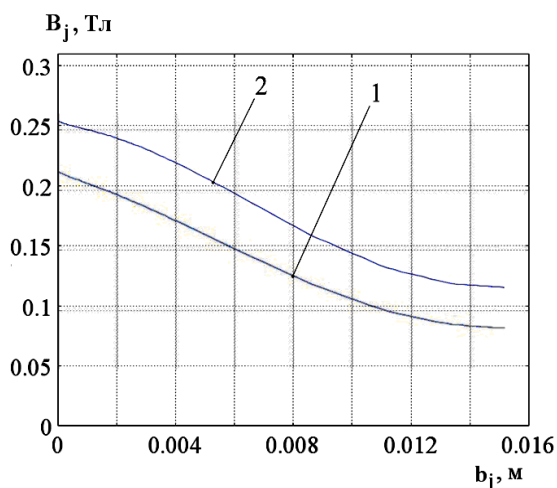


Рис. 3. Распределение индукции по ширине полюса УКД

Среднее значение модуля индукции определяется интегралом  $B_{jcp} = \left( \int_0^{b_j} B dl \right) / b_j$ , где  $b_j$  – ширина полюса

индуктора. Результаты расчета средней индукции:  $B_{jcp0} = 0,139$  Тл – индукция в полюсе без поврежденных стержней;  $B_{jcp1} = 0,177$  Тл – индукция при наличии одного поврежденного стержня. Соотношение между индукциями в двух случаях составляет  $B_{jcp1} / B_{jcp0} = 1,27$ .

Расчет действующего значения ЭДС по выражению (3) в измерительной обмотке на один виток для двух рассматриваемых случаев дал следующие результаты:  $U_{uo0} = 0,0637$  В,  $U_{uo1} = 0,0838$  В. Требуемое значение величины ЭДС, необходимое для обеспечения необходимой точности измерений, достигается за счет выбора соответствующего количества витков ИО. Таким образом, при появлении в контролируемой зоне ротора одного дефектного стержня ЭДС ИО увеличивается в  $k_u = U_{uo1} / U_{uo0} = 1,31$  раза. Такое изменение ЭДС вполне достаточно для достоверного выявления поврежденного стержня КЗОР, что подтверждает достаточно высокую чувствительность рассматриваемого УКД.

Процедура контроля и диагностики повреждений стержней КЗОР состоит в пошаговом повороте ротора на угол, соответствующий одному зубцовому делению  $\Delta\gamma = 2\pi/Z_2$ . При каждом положении ротора регистрируются показания подключенного к ИО измерительного прибора. В результате измерений находится зависимость  $U_{uo}(n)$ , где  $n$  – текущее значение шага поворота ротора ( $n = \overline{1, Z_2}$ ).

На практике часто встречаются случаи повреждения КЗОР, при которых обмотка содержит несколько поврежденных стержней, причем поврежденные стержни могут одновременно находиться в контролируемой зоне ротора. Разработанная математическая модель позволяет смоделировать различные варианты повреждения КЗОР и соответствующие значения ЭДС в измерительной обмотке.

На рис. 4 в относительных единицах представлены зависимости  $U_{uo}(n)$  для двух разных вариантов повреждения КЗОР. За базисную единицу принято

значение ЭДС ИО при неповрежденной КЗОР. Кривая 1 представляет характер изменения ЭДС ИО при наличии только одного поврежденного стержня, при этом максимум ЭДС соответствует такому положению ротора, при котором дефектный стержень (стержень № 8) находится в зоне контроля возле полюса индуктора УКД с измерительной обмоткой (рис. 2,б). Кривая 2 соответствует наличию двух поврежденных стержней КЗОР (стержни № 3 и № 7), удаленных друг от друга на расстояние в 4-х пазовые деления. Наличие двух максимумов в измеренной зависимости  $U_{uo}(n)$  свидетельствует о наличии в КЗОР двух дефектных стержней, а также позволяет установить их взаимное положение.

Аналогичные исследования проведены для разных вариантов серийных АД, отличающихся мощностью, габаритами и конфигурацией зубцово-пазовой зоны ротора. В последнем случае моделировалось повреждение пусковой обмотки. Варьировалось количество поврежденных стержней в пределах от 1 до 3, причем предполагалось, что все поврежденные стержни расположены рядом. Такое повреждение стержней КЗОР является достаточно характерным [5]. Результаты моделирования представлены в таблице.

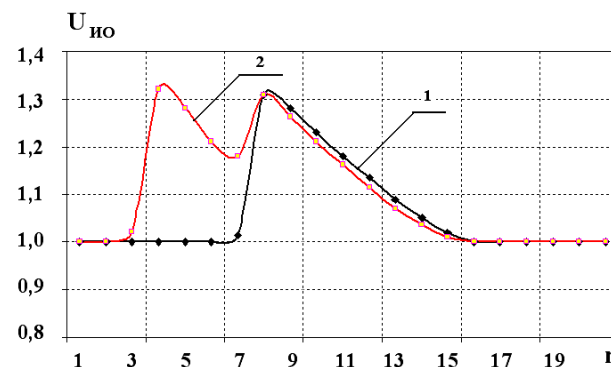


Рис. 4. Зависимости  $U_{uo}(n)$  при различных вариантах повреждения стержней

В таблице приведены значения ЭДС ИО в вольтах на один виток, а также дано отношение  $U_{uo1} / U_{uo0}$ , равное отношению ЭДС ИО при одном поврежденном стержне к ЭДС ИО при неповрежденном роторе.

Таблица

Тип двигателя	$U_{uo}$ , В/виток				Отношение $U_{uo1} / U_{uo0}$ , о.е.
	Количество поврежденных стержней				
	0	1	2	3	
4A71A2Y3	0,051	0,05	0,08	0,11	1,179
4A80A4Y3	0,064	0,08	0,11	0,15	1,295
4A180S4Y3	0,136	0,18	0,26	0,38	1,343
4A225M4Y3	0,14	0,19	0,29	0,47	1,423
4A225M2Y3	0,19	0,26	0,38	0,59	1,374
4A250M4Y3	0,159	0,20	0,29	0,36	1,257
4A200M6Y3	0,2	0,23	0,28	0,38	1,165

Из таблицы следует, что для всех типов рассмотренных роторов наблюдается высокая чувствительность предлагаемого УКД КЗОР: при появлении даже одного дефектного стержня ЭДС ИО возрастает в 1,16–1,42 раза, что вполне достаточно для достоверной ди-

агностики повреждения. Если же число поврежденных стержней больше одного, то ЭДС ИО возрастает существенно больше. Например, при трех поврежденных стержнях ЭДС ИО возрастает в 2,3-3,4 раза. Также, из полученных результатов следует, что величина индуцируемой ЭДС в ИО возрастает по мере увеличения диаметра ротора и уменьшения количества пазов.

На рис. 5 представлены расчетные кривые изменения ЭДС ИО (в о.е.) в зависимости от количества  $N$  поврежденных стержней КЗОР, расположенных рядом в виде единой группы. Кривые соответствуют электродвигателям, представленным выше в таблице.

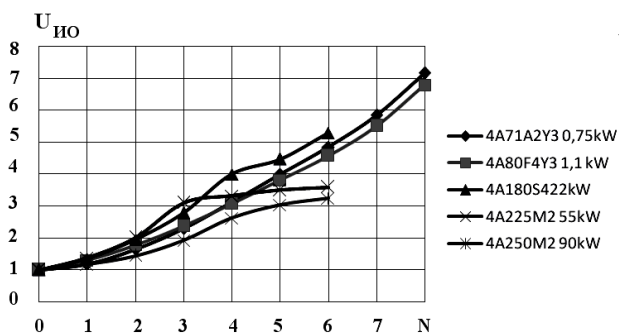


Рис. 5. Зависимости  $E_{ио}$  от числа поврежденных стержней для роторов различных электродвигателей

Для большинства рассмотренных АД наблюдается монотонный рост ЭДС ИО при увеличении количества дефектных стержней. Для роторов электродвигателей мощностью свыше больше 50 кВт, при увеличении количества поврежденных стержней свыше 3-4 ЭДС ИО изменяется незначительно, что объясняется насыщением магнитной цепи устройства диагностики.

## ВЫВОДЫ

1. Предложено устройство и методика контроля и диагностики повреждений короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя, позволяющие выявить поврежденные стержни КЗОР в процессе ремонта АД. Диагностическим признаком является изменение величины ЭДС, индуцированной в измерительной обмотке, расположенной на одном из полюсов магнитопровода устройства.

2. Разработана полевая математическая модель, позволяющая рассчитать величину ЭДС измерительной обмотки при различном количестве поврежденных стержней. Модель позволяет не только выявить количество поврежденных стержней, но и определить их взаимное расположение.

3. Результаты моделирования продемонстрировали высокую чувствительность выходного сигнала измерительной обмотки устройства к появлению дефектов КЗОР, что обеспечивает достаточную достоверность диагностики ее технического состояния. Величина изменения ЭДС ИО, выраженная в о.е., зависит от мощности и габаритов АД, конфигурации зубцово-пазовой зоны исследуемого ротора и его типа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторське свідоцтво СРСР № 1182442. Спосіб контролю якості короткозамкнутої обмотки ротора та пристрій для його здійснення МПК G 01 R 31/02, 1985.
2. Авторське свідоцтво СРСР № 1396093 Пристрій для випробування короткозамкнених роторів асинхронних електричних машин МПК G 01 R 31/02, 1988.
3. Беляев В.И. Контроль клетки ротора асинхронного электродвигателя - В кН. Труды ВНИИ технологии электромашино - и аппаратостроения. - М.-Л.: Энергия, 1965.
4. Васьковский Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: Навч. Посіб. - К.: НТУУ "КПІ", 2007. - 192 с.
5. Васьковский Ю.М., Гайдено Ю.А. Дослідження методами теорії поля характеристик асинхронних двигунів при несиметрії параметрів ротора // Електротехніка і електромеханіка. - № 3. - 2007. - С.19-22.

**Bibliography (transliterated):** 1. Avtors'ke svidoctvo SRSR № 1182442. Sposib kontrolyu yakosti korotkozamknoї obmotki rotoru ta pristrіj dlya jogo zdіysnennya MPK G 01 R 31/02, 1985. 2. Avtors'ke svidoctvo SRSR № 1396093 Pristrіj dlya viprobuvannya korotkozamknenih rotoriv asinhronnih elektrichnih mashin MPK G 01 R 31/02, 1988. 3. Belyaev V.I. Kontrol' kletki rotoru asinhronnogo `elektrodvigatelya - V kN. Trudy VNIИ tehnologii `elektromashino - i apparatostroen iya. - M.-L.: `Energiya, 1965. 4. Vas'kovs'kij Yu.M. Pol'ovij analiz elektrichnih mashin: Navch. Posib. - K.: NTUU "KPI", 2007. - 192 s. 5. Vas'kovs'kij Yu.M., Gajdenko Yu.A. Doslidzhennya metodami teorii polya karakteristik asinhronnih dviguniv pri nesimetriї parametriv rotoru // Elektrotehnika i elektromehaniка. - № 3. - 2007. - S.19-22.

Поступила 07.07.2011

*Васьковский Юрий Николаевич, д.т.н., проф.*

*Коваленко Михаил Анатольевич*

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт"

кафедра электромеханики

03056, Киев, пр. Победы, 37

тел. (044) 454-95-18, e-mail: vun157@voliacable.com

*Vas'kovsky Y.N., Kovalenko M.A.*

### **Research on a control device for a short-circuited winding of an asynchronous motor.**

A device for control and diagnostics of the rotor short-circuited winding in an asynchronous motor under its repair is offered. A field mathematical model is developed; the device sensitivity is investigated for motors of different power and with different rotor tooth-slot area configuration.

**Key words – squirrel-cage induction motor, control and diagnostics device, mathematical model.**