

## ДИАГНОСТИКА КОМБИНИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

*Запропоновано методологію діагностики комбінованих дефектів ротора асинхронного двигун, при яких одночасно можуть бути ушкоджені стержні, коротко замикаючі кільця та активна сталь ротора. Сформульовано діагностичні ознаки та рекомендації щодо виявлення комбінованих дефектів ротора.*

*Предложена методология диагностики комбинированных дефектов ротора асинхронного двигателя, при которых одновременно могут быть повреждены стержни, коротко замыкающие кольца и активная сталь ротора. Сформулированы диагностические признаки и рекомендации по выявлению комбинированных дефектов ротора.*

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы объемы работ, выполняемых эксплуатирующими и ремонтными организациями по контролю технического состояния асинхронных двигателей (АД) и диагностике дефектов их конструкции, существенно возросли. Это связано не только с увеличением количества эксплуатируемых АД, но и с требованиями по продлению сроков их эксплуатации, что ведет к их старению и снижению эксплуатационной надежности. Важным узлом наиболее распространенных короткозамкнутых АД является ротор с короткозамкнутой обмоткой (КЗОР). В процессе эксплуатации АД в его роторе возникают повреждения стержней КЗОР (обрывы, сужения сечения, внутренние трещины неполного разрыва, каверны и др.), сегментов короткозамыкающих колец (СКК) КЗОР, активной стали магнитопровода ротора. При этом повреждения, часто носят комбинированный характер, при котором одновременно повреждаются несколько различных элементов. Достоверная диагностика вида повреждения ротора, и особенно комбинированных повреждений, встречает существенные затруднения ввиду сложного характера диагностических сигналов, фиксируемых измерительной системой устройства контроля и диагностики (УКД). В ряде работ [1, 2, 6, 7] предложены УКД, основанные на индукционном методе диагностики. Однако диагностика комбинированных повреждений стержней, колец и стали ротора АД в литературе не описана.

Авторами данной статьи предложено УКД, отличающееся компактностью и достаточной чувствительностью [3, 4]. Эскиз такого УКД представлен на рис. 1, на котором обозначено: 1 – исследуемый ротор; 2 – магнитопровод индуктора УКД; 3 – измерительная обмотка (ИО); 4 – обмотка возбуждения переменным током; 5 – дефект КЗОР (в данном случае показана трещина СКК).

Полюса магнитопровода индуктора УД прикладываются к внешней поверхности ротора АД и подается питание на обмотку возбуждения. Магнитный поток возбуждения замыкается через исследуемый участок ротора и индуцирует в стержнях КЗОР аксиально-направленные токи. При последовательном повороте ротора и появлении дефекта в зоне контроля (между полюсами индуктора) распределение электромагнитного поля в системе "ротор АД – УКД" изменяется, что изменяет величину сигнала ИО.

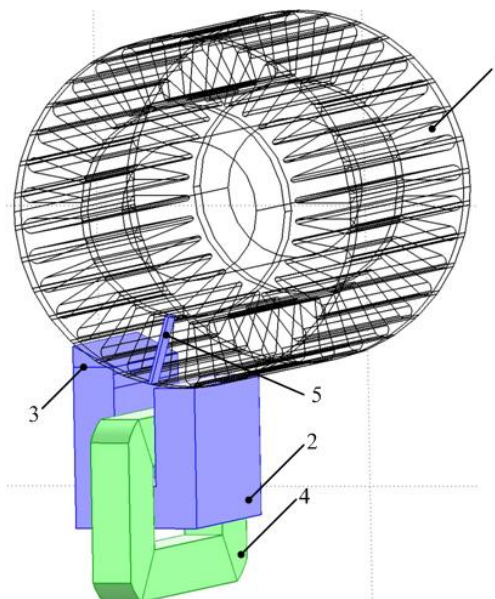


Рис. 1. Эскиз УКД ротора АД

Целью статьи является разработка методологии диагностики комбинированных повреждений короткозамкнутого ротора АД в процессе ремонта двигателя, когда его ротор вынут из статора. Методология базируется на результатах математического моделирования сигналов (ЭДС) ИО УКД. Авторами данной статьи в работе [5] разработана трехмерная полевая математическая модель системы "ротор АД – УКД", позволяющая рассчитать изменение величины сигнала ИО УКД при появлении в роторе АД повреждения. Модель позволяет исследовать различные типы дефектов, а также их комбинации.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель подробно описана в работе [5] и основана на анализе трехмерного электромагнитного поля в системе "ротор АД – УКД" (рис. 1), содержащей поврежденные элементы ротора. Численная реализация модели выполнена методом конечных элементов в пакете COMSOL. Подробнее опишем способы моделирования различных дефектов ротора.

*Дефекты стержней КЗОР.* Трещина в стержне КЗОР моделируется тонким поперечным слоем толщиной 1 мм. При полном разрыве стержня электропроводность слоя принимается равной нулю, что пре-

пятствует замыканию токов через дефектный стержень. При стандартной частоте 50 Гц, они протекают только по половинках разорванного стержня, имея, при этом, разные направления по высоте стержня. При наличии в стержне неполной трещины, глубина которой меньше высоты стержня указанный поперечный 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).

**Дефекты СКК.** Рассматриваются полные разрывы СКК. Разрыв СКК сопровождается изменением распределения токов в КЗОР, и, как следствие, изменением токов в стержнях, которые расположены в зоне контроля УКД. Для анализа изменившихся при разрыве СКК токов КЗОР используется модель системы "ротор АД - УКД", в которой разрыв СКК моделируется тонким радиально ориентированным неэлектропроводным слоем толщиной 1 мм (рис. 2).



Рис. 2. Моделирование дефектов СКК

Величина сигнала в ИО УКД зависит от положения дефекта СКК относительно зоны контроля УКД. Если линия разрыва СКК расположена симметрично относительно середины зоны контроля, то разрыв СКК практически не влияет на распределение токов КЗОР, поскольку индуцированные токи стержней симметрично растекаются в разные стороны от рассматриваемого сегмента и не текут по нему независимо от того, поврежден сегмент или нет. При повороте ротора и смещении линии разрыва влияние разрыва СКК проявляется в изменении сигнала ИО.

**Дефекты активной стали ротора.** При эксплуатации АД возникают повреждения межлистовой изоляции стали магнитопровода ротора, обусловленные тепловыми и механическими перегрузками, дефектами производства и аварийными ситуациями. Факторами, которые ведут к ускоренному износу магнитопровода ротора, являются: повышенные вибрации ротора; повышенный нагрев ротора из-за протекания поперечных токов между стержнями, обусловленных электрическим контактом между стержнями и магнитопроводом. В ряде случаев при повреждении подшипников возникают касания ротора о статор, что ведет к появлению заусениц между листами железа на поверхности ротора. В осевом направлении длина поврежденного участка  $l_{\text{деф}}$  может быть меньше, чем

полная длина магнитопровода ротора  $l_{\text{рот}}$ . При моделировании этого повреждения принимается, что электропроводность поврежденного участка магнитопровода (например, часть длины зубца) равна электропроводности стали магнитопровода ротора.

Среднее время решения одной задачи на ПЭВМ с параметрами: AMD Athlon™ 64 X2 Dual Core 4000+ 2,63 ГГц, 3,00 ГБ ОЗУ, Windows XP Professional SP3, Gygabyte GT440 1Gb, составляет около 730 сек.

## МЕТОДОЛОГИЯ ДИАГНОСТИКИ

С помощью математической модели системы "ротор АД – УКД" могут быть рассчитаны сигналы ИО УКД при различных вариантах повреждений ротора: как при одиночных повреждениях, так и при комбинированных повреждениях различных видов. В результате серии расчетов для каждого варианта поврежденного ротора можно построить зависимость сигнала ИО от углового положения ротора (номера стержня КЗОР). Для этого в серии расчетов ротор последовательно поворачивают на  $\frac{1}{2}$  зубцового деления, в результате чего стержни КЗОР последовательно входят в зону контроля УКД. Такую зависимость будем называть *диагностической диаграммой* (ДД) ротора. Очевидно, что ДД исправного ротора имеет неизменную величину (является константой), а при наличии дефекта ДД содержит зоны увеличения и уменьшения сигнала ИО. Для каждого варианта поврежденного ротора в ДД можно установить характерные (диагностические) признаки, позволяющие идентифицировать дефекты. Совокупность ДД, рассчитанных для наиболее характерных видов повреждений ротора и их комбинаций образует *базу знаний*, которая далее используется в процессе диагностики повреждений. Методология диагностики ротора АД состоит из следующих этапов: 1) построение базы знаний ДД для выбранной серии роторов АД путем математического моделирования; 2) снятие экспериментальной ДД для испытуемого ротора с помощью УКД; 3) сравнительный анализ экспериментальной ДД с совокупностью ДД из базы знаний и идентификация вида дефекта.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Далее приведены некоторые результаты моделирования ДД на примере ротора серийного АД типа 4А112М4УЗ (мощность – 5,5 кВт, число зубцов ротора – 34, диаметр ротора – 125,4 мм, длина ротора – 125 мм, материал КЗОР – алюминий). В качестве диагностического сигнала рассматривается коэффициент чувствительности УКД  $k_e = E_1/E_0$ , где  $E_1$ ,  $E_0$  – ЭДС ИО, соответственно, при наличии и при отсутствии повреждения ротора.

На рис. 3,а показаны ДД ротора (фрагменты ДД в зоне дефектов) для следующих вариантов повреждений: 1 – при разрыве одного стержня № 5; 2 – при разрыве одного СКК № 5; 3 – при совместном разрыве стержня № 5 и СКК № 5.

Из рис. 3 следует: 1) повреждение стержня вызывает существенно большие изменения сигнала ИО, чем повреждение СКК; 2) при повреждении стержня сигнал ИО имеет максимум, если стержень расположен по середине зоны контроля; 3) при разрыве СКК

и расположении линии разрыва по середине зоны контроля сигнал ИО имеет минимальное значение; 4) при одновременном повреждении стержня и СКК (с одним и тем же номером) форма сигнала на ДД имеет более пологие фронты. Отмеченные отличия в ДД можно использовать как диагностические признаки, позволяющие идентифицировать вид повреждения.

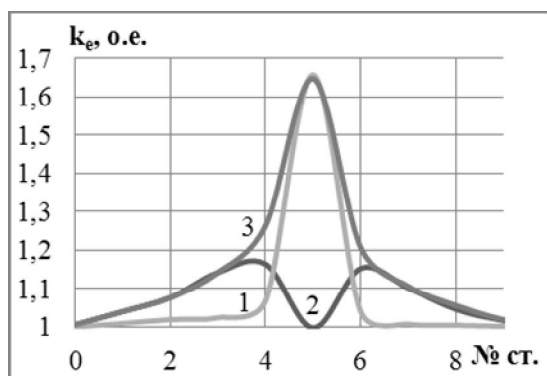


Рис. 3. Фрагмент ДД ротора при повреждении СКК и стержней ротора

На рис. 4 представлены расчетные ДД для следующей совокупности повреждений: 1 – повреждении активной стали участка зубца № 5 ротора длиной 50 мм; 2 – дефект СКК № 11; 3 – полный обрыв стержня ротора № 16; 4 – дефект стали зубца № 24, расположенный рядом с оборванным стержнем № 25.

Из рис. 4 следует, что при дефекте активной стали зубца ротора сигнал ИО снижается на (4...10)% на участке, равном ~ 2 зубцовых деления. Это является характерным диагностическим признаком для идентификации таких повреждений. При наличии рядом расположенных дефектного зубца и разорванного стержня сигнал вначале снижается на (4...10)%, а после поворота ротора на 1/2 часть зубцового деления сигнал возрастает, но при этом имеет меньшую амплитуду, чем при одиночном обрыве стержня.

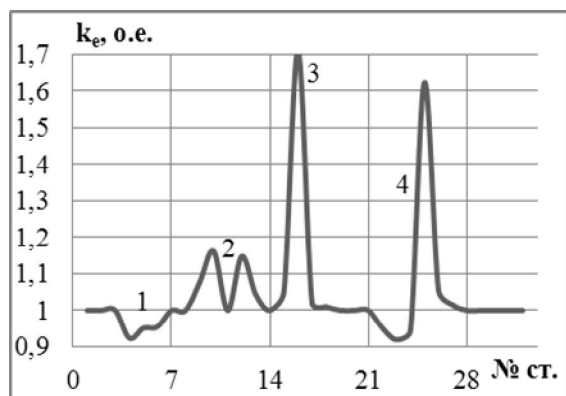


Рис. 4. ДД ротора при повреждении зубца, СКК и стержней ротора

При повреждении стали зубца ротора изменение сигнала ИО зависит от длины поврежденного участка. Путем моделирования установлено, что для надежного выявления повреждений стали зубца ротора (изменение коэффициента чувствительности УКД не менее, чем в 1,05 раза) необходимо, чтобы длина повре-

жденного участка была не менее, чем:

$$l_{\text{деф}} / l_{\text{рот}} \geq 0,38$$

При комбинированном повреждении ротора АД отдельные поврежденные элементы могут располагаться рядом друг с другом или находиться на удалении. Во втором случае взаимное влияние дефектов в ДД проявляется значительно меньше. Поэтому при выявлении удаленных друг от друга дефектов, их можно идентифицировать по диагностическим признакам, характерным для одиночных дефектов, как это продемонстрировано на рис. 4. Для диагностики близко расположенных дефектов необходимо учитывать их взаимное влияние в ДД. На рис. 5 изображен фрагмент ДД для следующих вариантов: 1 – совместный дефект зубца стали №8 и СКК № 8; 2 – дефект только СКК № 8; 3 – совместный дефект зубца ротора № 7, стержня № 8 и СКК № 8.

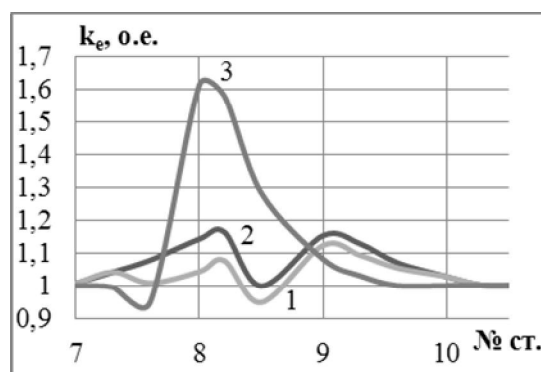


Рис. 5. Фрагмент ДД с близко расположенными дефектами зубца, СКК и стержня ротора

Как видно из рис. 5, при совместном дефекте стали зубца и СКК кривая 1 имеет вид, приближенный к виду кривой 2 при наличии только одного дефекта СКК. Отличие заключается в том, что кривая 1 имеет определенную асимметрию формы в начальной части и несколько меньшую амплитуду сигнала при прохождении дефектного зубца через середину зоны контроля. При разрыве нескольких расположенных рядом стержней  $n_s$  ширина импульса на ДД равна  $t_z \cdot n_s$ , где  $t_z$  – длина зубцового деления ротора.


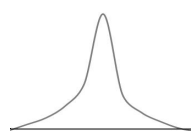
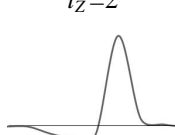
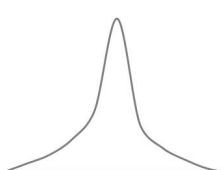
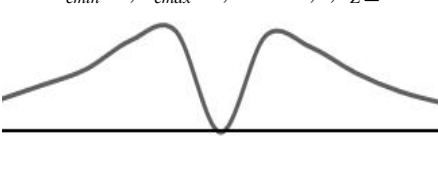
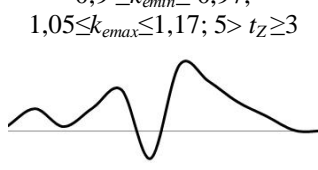
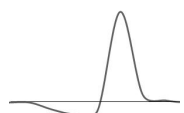
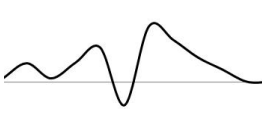
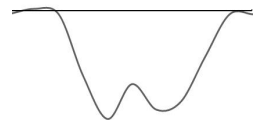
Результаты проведенных исследований ДД при различных вариантах повреждений ротора обобщены в таблице, представляющей собою диагностическую карту, с помощью которой можно идентифицировать как изолированные, так и комбинированные повреждения элементов ротора. В таблице изображены характерные формы фрагментов ДД в зоне дефектов, а также численные значения коэффициентов. В таблице приведены:  $k_e$  – коэффициент чувствительности УКД,  $k_{\text{emin}}$ ,  $k_{\text{emax}}$  – минимальное и максимальное значение коэффициента чувствительности,  $t_z$  – выраженная в зубцовых делениях ширина импульса на ДД.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методология диагностики дефектов короткозамкнутого ротора АД. Диагностика основана на сравнительном анализе экспериментальной и расчетной ДД ротора. На основе результатов модели-

рования электромагнитного поля в системе «ротор АД – УКД» разработана диагностическая карта, позволяющая идентифицировать одиночные и комбинированные повреждения ротора АД: разрывы стержней и СКК, дефекты стали зубца ротора.

2. Использование разработанной методологии позволяет не только расширить функциональные возможности индукционных УКД, но и повысить качество проведенных регламентных и ремонтных работ роторов АД.

| Дефект             | Стержня  | СКК  | Стали зубца ротора   |
|--------------------|--|--|--|
| Стержня            | $k_e \geq 1,35; t_z = n_s$<br>                                | $k_e \geq 1,35; 5 > t_z \geq 3$<br>   | $0,9 \leq k_{emin} \leq 0,97; k_{emax} \geq 1,3; t_z = 2$<br>                   |
| СКК                | $k_e \geq 1,35; 5 > t_z \geq 3$<br>                           | $k_{emin} = 1; k_{emax} = 1,07 \dots 1,2; t_z \geq 3$<br>                      | $0,9 \leq k_{emin} \leq 0,97; 1,05 \leq k_{emax} \leq 1,17; 5 > t_z \geq 3$<br> |
| Стали зубца ротора | $0,9 \leq k_{emin} \leq 0,97; k_{emax} \geq 1,3; t_z = 2$<br> | $0,9 \leq k_{emin} \leq 0,97; 1,05 \leq k_{emax} \leq 1,17; 5 > t_z \geq 3$<br> | $0,9 \leq k_e \leq 1; t_z = 2$<br>  |

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторське свідоцтво СРСР № 1182442 Спосіб контролю якості короткозамкненої 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 двигунів МПК G 01 R 31/02, 1988.
3. Вас'ковський Ю.Н., Коваленко М.А. Исследование устройства контроля короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя / Электротехника і електромеханіка. – 2011. – №6. – С. 18-22.
4. Вас'ковський Ю.Н., Коваленко М.А. Исследование и оптимизация устройства диагностики дефектов обмотки ротора короткозамкнутого асинхронного электродвигателя // Электротехніка та електроенергетика. – 2012. – №2. – С. 12-18.
5. Вас'ковський Ю.Н., Коваленко М.А. Трехмерная полевая математическая модель устройства диагностики короткозамкнутой клетки ротора асинхронных двигателей // Праці ІЕД НАНУ. – 2012. – № 31. – С. 78-83.
6. А. И. Зайцев, М.П. Табинский. Установка для обнаружения литейных дефектов стержней ротора асинхронного двигателя // Электротехніка. – 1966. – №3. – С. 56-58
7. Сивокобыленко В.Ф., Нури Абделбассет. Диагностика состояния короткозамкнутых роторов асинхронных машин // Электричество. – 1997. – № 3. – С. 25-26

**Bibliography (transliterated):** 1. Avtors'ke svidoctvo SRSR № 1182442 Sposib kontrolyu yakosti korotkozamkненої обмотки ротора та пристрій для його здійснення МПК G 01 R 31/02, 1985. 2. Avtors'ke svidoctvo SRSR №1396093 Pristriij dlya viprobuvannya korotkozamknenih rotoriv asinhronnih dviguniv МПК G 01 R 31/02, 1988. 3. Vas'kovskij Yu.N., Kovalenko M.A. Issledovanie ustrojstva kontrolya korotkozamknuтой обмотки ротора asinhronного dvigatelya / Elektrotehnika i elektromehaniка. - 2011. - №6. - S. 18-22.

4. Vas'kovskij Yu.N., Kovalenko M.A. Issledovanie i optimizaciya ustrojstva diagnostiki defektov obmotki rотора korotkozamknuтого asinhronного `elektrodvigatelya // Elektrotehnika ta elektroenergetika. - 2012. - №2. - S. 12-18. 5. Vas'kovskij Yu.N., Kovalenko M.A. Trehmernaya polevaya matematicheskaya model' ustrojstva diagnostiki korotkozamknuтой клетки rотора asinhronnyh dvigatelej // Praci IED NANU. - 2012. - № 31. - S. 78-83. 6. A. I. Zajcev, M.P. Tabinskij. Ustanovka dlya obnaruzheniya litejnyh defektov sterzhnej rотора asinhronного dvigatelya // `Elektrotehnika. - 1966. - №3. - S. 56-58 7. Sivokobylenko V.F., Nuri Abdelbasset. Diagnostika sostoyaniya korotkozamknuтой rotorov asinhronnyh mashin // `Elektrichestvo. - 1997. - № 3. - S. 25-26

Поступила 13.02.2013

Вас'ковський Юрій Николаевич, д.т.н., проф.  
Коваленко Михаил Анатольевич  
Национальный технический университет Украины  
"Киевский политехнический институт"  
кафедра електромеханіки  
03056, Киев, пр. Победы, 37  
тел. (044) 4549518, e-mail: vun157@voliacable.com

Vas'kovsky Y.N., Kovalenko M.A.  
**Diagnostics of induction motor rotor combined defects with an induction method.**  
A diagnostics methodology for combined defects of induction motor rotors is introduced, the defects considered being simultaneous damage of rods, cage rings, and the rotor active steel. Diagnostic features and recommendations on the rotor combined defects identification are formulated.  
**Key words – short-circuited winding, induction motor rotor defects, three-dimensional field mathematical model, device monitoring and diagnostics.**