

УДК 621.316.925:681.3

Сергей Владимирович Деркачёв

Донецкий национальный технический университет, кандидат технических наук, руководитель молодежной научной лаборатории «Приборостроение и станкостроение», Россия, Донецк, e-mail: sergey_derkachev@mail.ru

Контроль состояния стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя

Авторское резюме

Состояние вопроса. Обрыв стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя на сегодняшний день является наиболее распространенным видом повреждения ротора, который требует ранней диагностики для предотвращения его полного выхода из строя. Существующие методы контроля фактического состояния короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя, как правило, основываются на применении спектрального анализа, который имеет ряд недостатков, либо на использовании дорогостоящих специальных датчиков, установка которых не всегда представляется возможной в условиях эксплуатации электродвигателя. В связи с этим актуальным является выявление диагностического признака обрыва стержней ротора на основе измеряемых токов и напряжений без использования дополнительных специальных датчиков и анализа полученных спектральных характеристик.

Материалы и методы. Для реализации поставленной задачи использован метод компьютерного моделирования с применением многоконтурной математической модели асинхронного электродвигателя, записанной с помощью системы дифференциальных уравнений.

Результаты. Предложен критерий контроля состояния стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя без вывода его из эксплуатации, который основан на выявлении характерных колебаний величины угла между обобщенным вектором тока статора и обобщенным вектором питающего напряжения, полученной на основе мгновенных измеряемых значений токов и напряжений.

Выводы. Полученные с помощью компьютерного моделирования результаты показывают, что предложенный критерий выявления обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя обладает достаточной чувствительностью, чтобы определить обрыв как одного стержня, так и нескольких стержней. Использование предложенного критерия для контроля фактического состояния стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя позволяет избежать установки на корпус электродвигателей дорогостоящих датчиков и отказаться от проведения сложного спектрального анализа.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, обобщенный вектор тока статора, обобщенный вектор питающего напряжения, короткозамкнутая обмотка ротора, обрыв стержней ротора

Sergey Vladimirovich Derkachev

Donetsk National Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of the Youth Scientific Laboratory "Instrument Engineering and Machine Tool Engineering", Russia, Donetsk, e-mail: sergey_derkachev@mail.ru

Monitoring the condition of the short-circuited rotor winding rods of an asynchronous electric motor

Abstract

Background. The breakage of the short-circuited rotor winding rods of an asynchronous electric motor is currently the most common type of rotor damage, which requires early diagnostics to prevent its complete failure. Existing methods to monitor the actual state of the short-circuited rotor winding of an asynchronous motor are usually based on the use of spectral analysis which has a number of disadvantages, or on the use of expensive special sensors, the installation of which is not always possible under the operating conditions of the electric motor. Thus, it is important to identify a diagnostic sign of a breakage of the rotor rods based on the measured currents and voltages without using additional special sensors and analyzing the obtained spectral characteristics.

Materials and methods. To achieve the set task, a computer modeling method has been applied using a multi-loop mathematical model of an asynchronous electric motor, recorded using a system of differential equations.

Results. The author has proposed a criterion to monitor the condition of the rods of the short-circuited winding of the rotor of an asynchronous electric motor without decommissioning. It is based on identifying characteristic fluctuations of the angle between the generalized vector of the stator current and the generalized vector of the supply voltage, obtained on the basis of instantaneous measured values of currents and voltages.

Conclusions. The results obtained using computer modeling have shown that the proposed criterion to detect a breakage in the short-circuited rotor winding rods of an asynchronous electric motor is sensitive enough to detect a breakage in both one rod and several rods. Using the proposed criterion to monitor the actual state of the short-

circuited rotor winding rods of an asynchronous electric motor allows us to avoid the installation of expensive sensors on the motor housing and refuse to carry out complex spectral analysis.

Key words: asynchronous electric motor, generalized vector of stator current generalized vector of supply voltage, short-circuited rotor winding, rotor bar breakage

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.4.038-043

Введение. Контроль фактического состояния стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя является на сегодняшний день актуальной задачей, поскольку среди общего числа отказов около трети приходится на повреждение ротора, связанных именно с обрывом стержней. Такие повреждения характерны для асинхронных электродвигателей, работающих с частыми пусками, которые проходят в тяжелых условиях, например для электродвигателей, которые являются электроприводами дробилок и мельниц. Работа асинхронных электродвигателей с одним–двумя оборванными стержнями короткозамкнутой обмотки ротора практически не отличается от работы асинхронного электродвигателя с исправной обмоткой ротора, однако длительная работа с поврежденными стержнями сначала приводит к ухудшению механических характеристик электропривода, а впоследствии к его полному выходу из строя, так как работа с оборванными стержнями короткозамкнутой обмотки ротора в процессе эксплуатации может привести к внутренним повреждениям электродвигателя.

Наличие оборванных стержней короткозамкнутой обмотки ротора визуальным способом без остановки и разборки асинхронного электродвигателя выявить невозможно, однако при работе с поврежденной обмоткой ротора происходит увеличение уровня вибраций электропривода, что может быть использовано в качестве диагностирующего признака. В связи с этим получили развитие методы выявления повреждений стержней короткозамкнутой обмотки ротора, основанные на контроле уровня возникающих вибрации асинхронного электродвигателя [1–4]. Однако к недостаткам данного метода выявления оборванных стержней короткозамкнутой обмотки ротора стоит отнести сложность монтажа датчиков вибрации, так как они должны быть достаточно плотно установлены на корпусе электродвигателя, что не всегда представляется возможным в условиях эксплуатации на промышленных предприятиях, а также их высокую стоимость.

Как отмечено в [5], гармонический состав внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора частично совпадает по своему характеру с магнитным полем, возникающим в воздушном промежутке между наружной поверхностью ротора и внутренней поверхностью статора. Используя данную схожесть магнитных полей внутри и снаружи асинхронного электродвигате-

ля, были разработаны методы выявления обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора на основе анализа внешнего магнитного поля [5–8]. Использование данного подхода, как и методов на основе контроля уровня вибрации, сопряжено со сложностью установки специальных датчиков для измерения внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя.

Еще одним направлением в области выявления обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора стало использование методов спектрального анализа токов статора [9–13]. Использование спектрального анализа в целях выявления обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя заключается в выявлении в спектре токов статора характерных частот, которые возникают вследствие повреждения короткозамкнутой обмотки ротора. Однако и методы выявления, основанные на спектральном анализе токов, не лишены недостатков, среди которых необходимо отметить вероятность растекания спектра (поскольку мощные гармонические составляющие распределяются по всему спектру измеряемого сигнала, что может привести к ошибочному определению амплитуды других гармоник [14]), а также сложность оценки полученных результатов.

Исходя из приведенного выше краткого анализа существующих методов выявления обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя, актуальным является выявление диагностического признака обрыва стержней ротора на основе измеряемых токов и напряжений без использования дополнительных специальных датчиков и анализа полученных спектральных характеристик.

Методы исследования. В качестве диагностического признака для выявления обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя предлагается использовать величину угла между обобщенными векторами тока статора и питающего напряжения, полученными на основе измеряемых мгновенных значений. Угол между обобщенным вектором тока статора асинхронного электродвигателя и обобщенным вектором питающего напряжения можно определить по следующей формуле:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{I^2 + U^2 - \Delta}{2 \cdot IU}\right), \quad (1)$$

где I – обобщенный вектор тока статора; U – обобщенный вектор питающего напряжения;

Δ – модуль вектора разности между обобщенными векторами тока статора и питающего напряжения.

Обобщенный вектор тока статора асинхронного электродвигателя определяется по формуле

$$I = \sqrt{\frac{2}{3} (i_A^2 + i_B^2 + i_C^2)}, \quad (2)$$

где i_A, i_B, i_C – мгновенные значения фазных токов статора.

Обобщенный вектор питающего напряжения асинхронного электродвигателя определяется по формуле

$$U = \sqrt{\frac{2}{3} (u_A^2 + u_B^2 + u_C^2)}, \quad (3)$$

где u_A, u_B, u_C – мгновенные значения фазного питающего напряжения.

Модуль вектора разности между обобщенными векторами тока статора и питающего напряжения может быть определен на основе мгновенных значений по формуле

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{3} ((i_A - u_A)^2 + (i_B - u_B)^2 + (i_C - u_C)^2)}. \quad (4)$$

Подставив формулы (2)–(4) в формулу (1), получим выражение для определения мгновенной величины угла между обобщенным вектором тока статора и обобщенным вектором питающего напряжения на основе мгновенных значений фазных токов и напряжений:

$$\varphi = \arccos \left(\frac{i_A u_A + i_B u_B + i_C u_C}{\sqrt{(i_A^2 + i_B^2 + i_C^2) (u_A^2 + u_B^2 + u_C^2)}} \right). \quad (5)$$

Поскольку определение мгновенной величины угла между обобщенным вектором тока статора и обобщенным вектором напряжения питающей сети происходит на основе мгновенных измеряемых значений тока и напряжения, то в целях уменьшения влияния случайных помех на точность определения величины угла предлагается выполнить предварительную фильтрацию измеряемых сигналов тока и напряжения путем их усреднения. Как отмечено в [15], для достижения наибольшей точности следует выполнять усреднение измеряемого сигнала на основе нечетного количества выборок измеряемого сигнала тока или напряжения для середины интервала измерений. Формула для определения мгновенного усредненного значения тока или напряжения для трех выборок измеряемого сигнала для середины интервала измерений будет иметь вид

$$x(t_2) = \frac{1}{A_n} (x(t_1) + x(t_2) + x(t_3)), \quad (6)$$

где A_n – коэффициент усреднения.

Так как функция синуса является нелинейной, то, в соответствии [15], величина коэффициента усреднения определяется как отношение суммы выборок измеряемого сигнала на интервале измерений к центральной выборке интервала измерений:

$$A_n = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} \sin(2\pi f(t_1 + hk) + \varphi)}{\sin\left(2\pi f\left(t_1 + h\frac{n-1}{2}\right) + \varphi\right)}, \quad (7)$$

где f – частота измеряемого сигнала; h – шаг дискретизации измерений; n – количество выборок измеряемого сигнала тока или напряжения.

Таким образом, если принять шаг дискретизации равным 0,001 с, при частоте измеряемого сигнала 50 Гц и использовании трех выборок измеряемого сигнала получим величину коэффициента усреднения, равную 2,902.

На рис. 1 показаны результаты применения приведенного способа усреднения на примере обработки реально измеренного сигнала тока с шагом дискретизации 0,001 с.

Необходимо также отметить, что при использовании приведенного способа усреднения измеряемого сигнала не требуется предварительное определение частоты измеряемого сигнала. Это обусловлено тем, что, в соответствии с ГОСТ 29322-2014, частота сети может отклоняться как в большую, так и в меньшую сторону на 0,2 Гц, а при использовании приведенного способа усреднения измеряемого сигнала тока или напряжения в диапазоне частот от 49,8 до 50,2 Гц не требуется корректировки коэффициента усреднения A_n при шаге дискретизации измеряемого сигнала 0,001 с, что подтверждается результатами применения приведенного способа усреднения при разных частотах измеряемого сигнала тока (рис. 2).

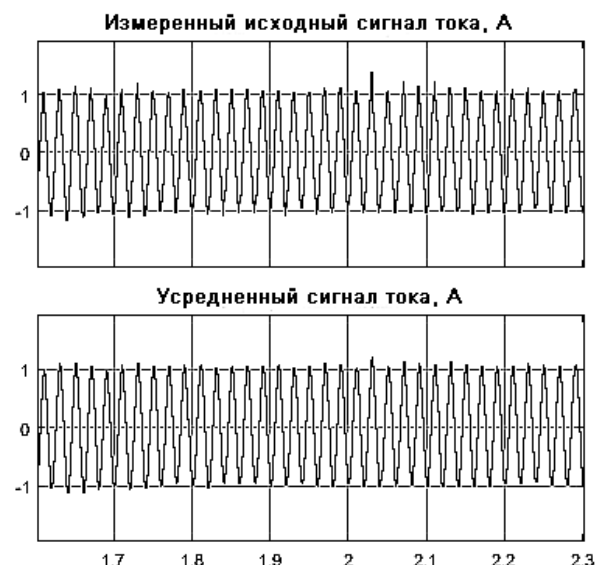


Рис. 1. Результаты применения алгоритма усреднения для измеряемого сигнала тока

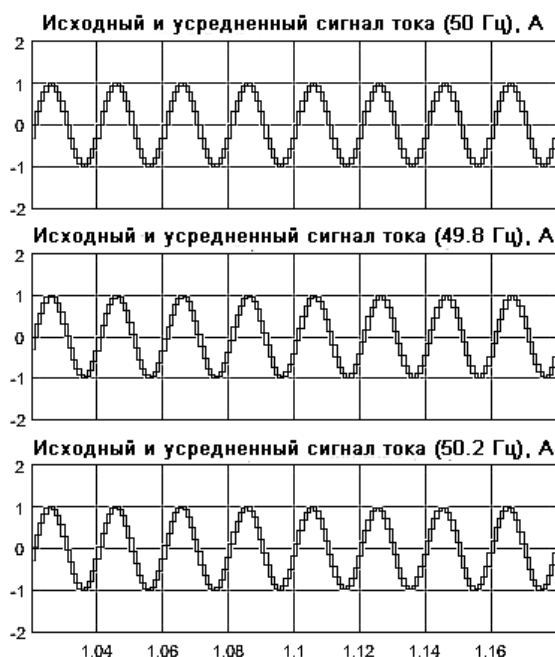


Рис. 2. Результаты применения алгоритма усреднения измеряемого сигнала тока при разных частотах питающей сети

Анализ полученных результатов (рис. 1, 2) показывает, что приведенный способ обработки измеряемых сигналов тока и напряжения обладает достаточной точностью для его использования при разработке критериев контроля фактического состояния стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя в диапазоне частот питающего напряжения, нормируемого ГОСТом.

Для проведения исследования в целях определения критерия контроля состояния стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя воспользуемся математической моделью асинхронного электродвигателя, описанной подробно в [16], которая позволяет выполнять моделирование обрыва любого количества и любой последовательности стержней короткозамкнутой обмотки ротора.

Результаты исследования. На рис. 3 показаны графики изменения токов статора, скорости вращения ротора и величины угла между обобщенным вектором тока статора и обобщенным вектором питающего напряжения при исправной обмотке ротора, полученные с помощью математического моделирования работы асинхронного электродвигателя в режиме пуска и выхода в установившийся режим работы мощностью 1700 кВт. При моделировании нагрузка была принята равной 90 % от номинальной, а количество стержней ротора составило 72.

Анализ результатов моделирования работы асинхронного электродвигателя с исправной короткозамкнутой обмоткой ротора (рис. 3) показывает, что в установившемся режиме величина угла между обобщенным вектором тока

статора и обобщенным вектором питающего напряжения остается постоянной и составляет 22 электрических градуса.

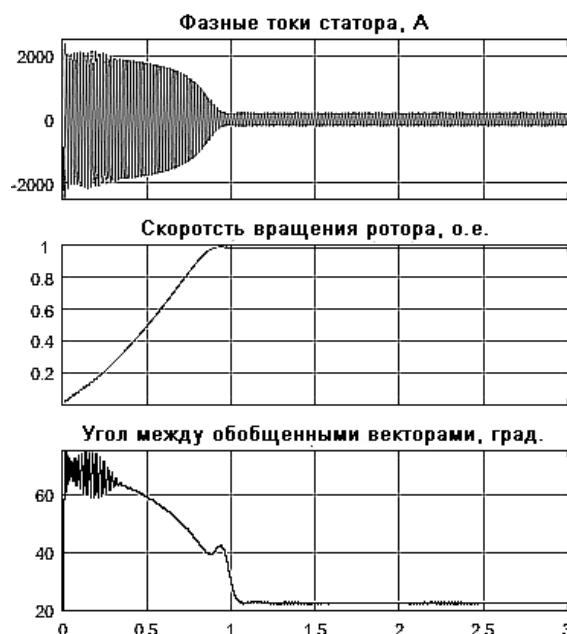


Рис. 3. Графики изменения токов статора, скорости вращения ротора и угла между обобщенным вектором тока статора и обобщенным вектором питающего напряжения при исправной обмотке ротора

На рис. 4, 5 приведены графики изменения токов статора, скорости вращения ротора, а также величины угла между обобщенным вектором тока статора и обобщенным вектором питающего напряжения при обрыве одного и пяти стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя соответственно, полученные с помощью математической модели.

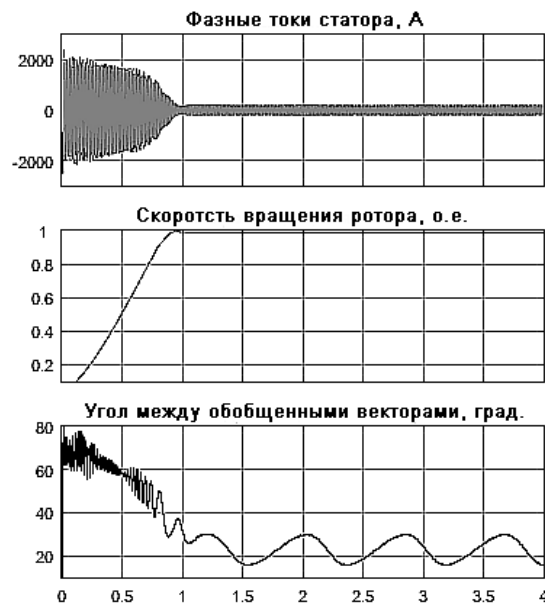


Рис. 4. Графики изменения токов статора, скорости вращения ротора и угла между обобщенным вектором тока статора и обобщенным вектором питающего напряжения при обрыве одного стержня

Анализ результатов математического моделирования (рис. 4) показывает, что при возникновении обрыва одного стержня короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя в установившемся режиме происходит колебание величины угла между обобщенным вектором тока статора и обобщенным вектором питающего напряжения с амплитудой, равной 15 электрическим градусам, и периодом колебаний 0,8 с.

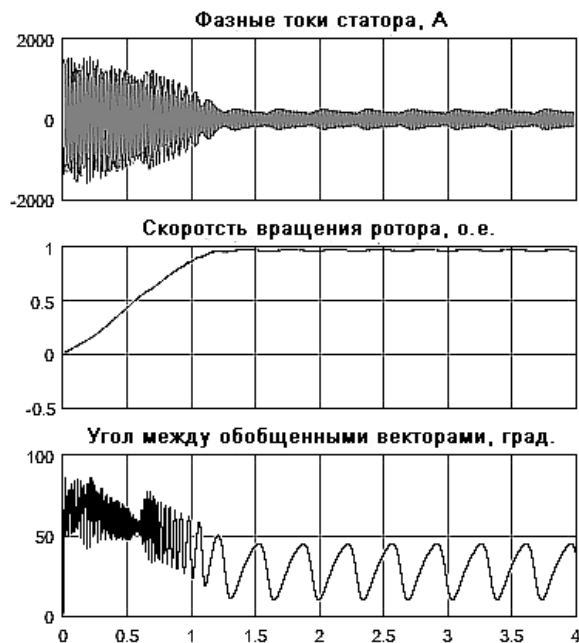


Рис. 5. Графики изменения токов статора, скорости вращения ротора и угла между обобщенным вектором тока статора и обобщенным вектором питающего напряжения при обрыве пяти стержней

Анализ графиков (рис. 5) показывает, что при работе асинхронного электродвигателя с пятью поврежденными стержнями короткозамкнутой обмотки ротора в установившемся режиме величина угла между обобщенным вектором тока статора и обобщенным вектором питающего напряжения колеблется с большей амплитудой, чем при обрыве только одного стержня, и составляет 33 электрических градуса, при этом период колебаний сокращается практически в два раза (до 0,35 с).

Таким образом, результаты моделирования работы асинхронного электродвигателя в установившемся режиме с поврежденными стержнями короткозамкнутой обмотки ротора (рис. 4, 5) показывают, что колебание величины угла между обобщенным вектором тока статора и обобщенным вектором питающего напряжения, вызванное переменным магнитным потоком, может быть использовано в качестве критерия контроля состояния стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя. При этом стоит отметить, что чем меньше период колебаний величины контролируемого угла, тем больше оборванных стерж-

ней содержится в короткозамкнутой обмотке ротора асинхронного электродвигателя.

Выводы. Использование предложенного метода контроля фактического состояния короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя на основе измеряемых фазных токов статора и фазных напряжений питающей сети позволяет выявлять обрыв как одного стержня, так и группы стержней, что делает представленный критерий достаточно чувствительным к возникающим повреждениям ротора.

Использование предложенного метода контроля состояния стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя позволяет избежать установки на корпус электродвигателей дорогостоящих датчиков и отказаться от проведения сложного спектрального анализа.

Список литературы

1. Taghiyarrenani Z., Berenji A. Analysis of Vibrations and Currents for Broken Rotor Bar Detection in Three-phase Induction Motors // PHM Society European Conference. – 2022. – № 7(1). – P. 43–48.
2. Induction motor broken rotor bar detection using vibration analysis – A case study / Ž. Kanović, D. Matić, Z. Jeličić, et al. // Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Valencia, August 2013. – Valencia (Spain), 2013. – P. 64–68.
3. Investigation of motor current signature and vibration analysis for diagnosing rotor broken bars in double cage induction motors / Y. Gritli, A. Tommaso, F. Filippetti, et al. // Conference: Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Sorrento, June 2012. – Sorrento (Italy), 2012. – P. 1360–1365.
4. Oviedo S.J., Quiroga J.E., Borrás C. Experimental evaluation of motor current signature and vibration analysis for rotor broken bars detection in an induction motor // International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Malaga, May 2011. – Malaga (Spain), 2011. – P. 1–6.
5. Перспективы дифференциального контроля состояния обмотки ротора асинхронных двигателей по внешнему магнитному полю / А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, С.Н. Литвинов, А.А. Скоробогатов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Иваново, 27–29 мая 2015 г. – Иваново, 2015. – Т. 1. – С. 250–254.
6. Экспериментально-аналитическое определение диагностического признака дефектов обмотки ротора асинхронного электродвигателя / В.А. Савельев, А.С. Страхов, Е.М. Новоселов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 4. – С. 44–53.
7. Назарычев А.Н., Скоробогатов А.А., Новоселов Е.М. Экспериментальное исследование внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя для контроля обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 1. – С. 10–15.
8. Бельский И.О., Куприянов И.С., Лукьянов А.В. Исследование угловой скорости и магнитного поля при дефектах асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 4(40). – С. 62–69.
9. Метод контроля состояния обмоток роторов асинхронных электродвигателей при пуске по току статора / А.Н. Назарычев, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников и др. // Дефектоскопия. – 2020. – № 8. – С. 49–55.

10. Вейнреб К. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов // *Электричество*. – 2012. – № 7. – С. 51–57.

11. Broken Rotor Bar Fault Diagnosis Techniques Based on Motor Current Signature Analysis for Induction Motor—A Review / S. Halder, S. Bhat, D. Zychma, P. Sowa // *Energies*. – 2022. – No. 15. – С. 8569.

12. Doğan Z. Broken Rotor Bar Fault Detection in Induction Motor Based on Spectral Analysis Balkan // *Journal of Electrical and Computer Engineering*. – 2025. – № 12(4). – С. 357–363

13. Benaida F., Noureddine B. Diagnosis of Broken Rotor Bars in Six-Phases Squirrel Cage Induction Motor // *International Review of Electrical Engineering (IREE)*. – 2022. – № 7(5). – С. 489.

14. Разработка анализатора спектра для исследования сигналов от электродвигателей / А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, С.Н. Литвинов и др. // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса, Иваново, 31 мая – 02 июня 2017 г. – Иваново, 2017. – Т. 1. – С. 126–130.

15. Деркачев С.В. Способы построения измерительных и пусковых органов микропроцессорных устройств быстродействующего автоматического включения резерва // *Вестник ИГЭУ*. – 2021. – Вып. 1. – С. 41–48.

16. Деркачев С.В., Сидоров В.А. Математическое моделирование повреждений асинхронного электродвигателя // *Надежность и безопасность энергетики*. – 2025. – Т. 18, № 1. – С. 59–64.

References

1. Taghiyarrenani, Z., Berenji, A. Analysis of Vibrations and Currents for Broken Rotor Bar Detection in Three-phase Induction Motors. PHM Society European Conference, 2022, no. 7(1), pp. 43–48.

2. Kanović, Ž., Matic, D., Jeličić, Z., Rapaić, M., Jakovljević, B., Kapetina, M. Induction motor broken rotor bar detection using vibration analysis – A case study. *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Valencia, August 2013. Valencia (Spain), 2013, pp. 64–68.

3. Gritli, Y., Tommaso, A., Filippetti, F., Miceli, R., Rossi, C., Chatti, A. Investigation of motor current signature and vibration analysis for diagnosing rotor broken bars in double cage induction motors. Conference: Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Sorrento, June 2012. Sorrento (Italy), 2012, pp. 1360–1365.

4. Oviedo, S.J., Quiroga, J.E., Borrás, C. Experimental evaluation of motor current signature and vibration analysis for rotor broken bars detection in an induction motor. *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Malaga, May 2011. Malaga (Spain), 2011, pp. 1–6.

5. Strakhov, A.S., Novoselov, E.M., Litvinov, S.N., Skorobogatov, A.A. Perspektivy differentsial'nogo kontrolya sostoyaniya obmotki rotora asinkhronnykh dvigateley po vneshnemu magnitnomu polyu [Prospects for differential monitoring of the rotor winding state of asynchronous motors using an external magnetic field]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplo tekhnologii"*, Ivanovo, 27–29 maya 2015 g. [Proceedings of international scientific and technical conference "Current state and trends of the development of electrical and thermal technology", Ivanovo, May 27–29, 2015]. Ivanovo, 2015, vol. 1, pp. 250–254.

6. Savel'ev, V.A., Strakhov, A.S., Novoselov, E.M., Skorobogatov, A.A., Sulynenkov, I.N. Eksperimental'no-

analiticheskoe opredelenie diagnosticheskogo priznaka defektov obmotki rotora asinkhronnogo elektrodvigatelya [Experimental and analytical determination of the diagnostic feature of defects in the rotor winding of an asynchronous electric motor]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 4, pp. 44–53.

7. Nazarychev, A.N., Skorobogatov, A.A., Novoselov, E.M. Eksperimental'noe issledovanie vneshnego magnitnogo polya asinkhronnogo elektrodvigatelya dlya kontrolya obryva sterzhney korotkozamknutoy obmotki rotora [Experimental study of the external magnetic field of an asynchronous electric motor to control the breakage of the rods of a short-circuited rotor winding]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 1, pp. 10–15.

8. Bel'skiy, I.O., Kupriyanov, I.S., Luk'yanov, A.V. Issledovanie uglovoy skorosti i magnitnogo polya pri defektakh asinkhronnykh elektrodvigateley [Investigation of angular velocity and magnetic field in case of defects of asynchronous electric motors]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2018, no. 4(40), pp. 62–69.

9. Nazarychev, A.N., Novoselov, E.M., Polkoshnikov, D.A., Strakhov, A.S., Skorobogatov, A.A. Metod kontrolya sostoyaniya obmotok rotorov asinkhronnykh elektrodvigateley pri puske po toku statora [Method for monitoring the condition of rotor windings of asynchronous electric motors during stator current starting]. *Defektoskopiya*, 2020, no. 8, pp. 49–55.

10. Veynreb, K. Diagnostika neispravnostey rotora asinkhronnogo dvigateleya metodom spektral'nogo analiza tokov [Diagnostics of rotor faults of asynchronous motor by the method of spectral analysis of currents]. *Elektrichestvo*, 2012, no. 7, pp. 51–57.

11. Halder, S., Bhat, S., Zychma, D., Sowa, P. Broken Rotor Bar Fault Diagnosis Techniques Based on Motor Current Signature Analysis for Induction Motor—A Review. *Energies*, 2022, no. 15, p. 8569.

12. Doğan, Z. Broken Rotor Bar Fault Detection in Induction Motor Based on Spectral Analysis Balkan. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2025, no. 12(4), pp. 357–363.

13. Benaida, F., Noureddine, B. Diagnosis of Broken Rotor Bars in Six-Phases Squirrel Cage Induction Motor. *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 2022, no. 7(5), p. 489.

14. Strahov, A.S., Novoselov, E.M., Litvinov, S.N., Konovalov, N.N., Skorobogatov, A.A. Razrabotka analizatora spektra dlya issledovaniya signalov ot elektrodvigateley [Development of a spectrum analyzer for studying signals from electric motors]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplo tekhnologii"* (XIX Benardosovskie chteniya), posvyashchennoy 175-letiyu so dnya rozhdeniya N.N. Benardosa, Ivanovo, 31 maya – 02 iyunya 2017 g. [Proceedings of international scientific and technical conference "Current state and trends of the development of electrical and thermal technologies (XIX Benardos Readings) dedicated to the 175th anniversary of N.N. Benardos, Ivanovo, May 31 – June 2, 2017]. Ivanovo, 2017, vol. 1, pp. 126–130.

15. Derkachev, S.V. Sposoby postroeniya izmeritel'nykh i puskovykh organov mikroprotsessornykh ustroystv bystrodeystviyushchego avtomaticheskogo vklucheniya rezerva [Methods for constructing measuring and starting elements of microprocessor devices of fast acting automatic transfer switch]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 1, pp. 41–48.

16. Derkachev, S.V., Sidorov, V.A. Matematicheskoe modelirovanie povrezhdeniy asinkhronnogo elektrodvigatelya [Mathematical modeling of damage in an asynchronous electric motor]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*, 2025, vol. 18, no. 1, pp. 59–64.