

УДК 621.313

*М. В. ЗАГИРНЯК, Ж. И. РОМАШИХИНА, А. П. КАЛИНОВ***АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЕЙВЛЕТ-СПЕКТРОВ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ ПОВРЕЖДЕНИИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Запропоновано діагностичний коефіцієнт, який є функцією середнього значення суми коефіцієнтів вейвлет-перетворення сигналу електродвижущей силы в обмотках статора асинхронного двигуна (АД) для області середніх частот. Розроблено метод декомпозиції з використанням теорії зворотного z-перетворення. Запропонований метод дозволив уточнити діагностичні ознаки пошкодження стрижнів ротора АД в режимі самовибігу двигуна та визначити ступінь пошкодження ротора.

Ключові слова: асинхронний двигун, вейвлет-перетворення, зворотне z-перетворення, пошкодження стрижнів ротора, режим самовибігу, електродвижущая сила.

Предложен диагностический коэффициент, являющийся функцией среднего значения суммы коэффициентов вейвлет-преобразования сигнала электродвижущей силы в обмотках статора асинхронного двигателя (АД) для области средних частот. Разработан метод декомпозиции с использованием теории обратного z-преобразования. Предложенный метод позволил уточнить диагностические признаки повреждения стержней ротора АД в режиме самовыбега двигателя и определить степень повреждения ротора.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, вейвлет-преобразование, обратное z-преобразование, повреждения стержней ротора, режим самовыбега, электродвижущая сила.

Purpose. Specification of diagnostic signs of the broken rotor bars in electromotive force (EMF) signal of induction motor (IM) by the analysis of the totality of wavelet-coefficients values with the use of diagnostic coefficients decomposition. **Materials and results of the research.** During the research reverse z-transform was used. After decomposition EMF signals in the stator winding elements are obtained and their wavelet transform is performed. The analysis of wavelet-spectra of the obtained signals resulted in singling out of information signs of broken bars. However, when EMF signals decomposition method is used, it is difficult to determine the degree of rotor breakage. That is why in this paper decomposition of diagnostic coefficient is proposed to simplify the procedure of singling out information signs of the broken bars. A diagnostic coefficient, being the function of the average value of wavelet-decomposition coefficients sum for medium-frequency domain is proposed. A method for its decomposition with the use of the theory of reverse z-transform is worked out. The proposed method made it possible to specify diagnostic signs of IM broken rotor bars in the motor self-running-out mode and determine the degree of the rotor breakage. The method of decomposition of IM stator winding phase EMF signal with the use of the theory of reverse z-transform allowed one to specify the reliability of diagnostics of IM broken bars due to singling out information signs existing in EMF signals of one active side of the coil. **Practical value.** The proposed method can be applied to decomposition of the diagnostic coefficient obtained as a result of wavelet-analysis of the phase EMF experimental signal measured in the mode of self-running-out of the motor. Application of this method makes it possible to specify the diagnostic signs of IM broken rotor bars and to determine the degree of breakage.

Key words: induction motor, wavelet transform, reverse z-transformation, damage to rotor rods, self-running-out mode, electromotive force.

Введение. Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором являются наиболее распространенным видом электрических машин. Ежегодно из-за неисправностей выходит из строя около 20-25 % от общего количества АД. Неисправности двигателей возникают по разным причинам [1]. Самыми распространенными из них являются повреждения подшипников, обмоток статора и ротора. Повреждения обмоток приводят к значительному ухудшению характеристик АД и, как следствие, к выходу его из строя.

Практически любое повреждение АД приводит к появлению магнитной и электрической несимметрии. Так, обрывы стержней короткозамкнутого ротора вызывают повышенную вибрацию АД, уменьшение частоты вращения под нагрузкой, возникновение пульсаций тока статора во всех фазах, увеличение потерь в обмотках статора и ротора. Поэтому вопрос диагностики АД является актуальным. Диагностика двигателей и дальнейший ремонт во многих случаях являются экономически более эффективными, чем замена АД с повреждениями [2]. Исследователями достигнуты значительные успехи в поиске эффективных методов диагностики АД, которые являются наиболее приемлемыми для конкретных условий и режимов работы оборудования [2-6].

В работе [7] представлен метод диагностики повреждений стержней ротора АД на основании анализа распределения электродвижущей силы (ЭДС) в обмотках статора в режиме самовыбега двигателя. Повреждения стержней ротора вызывают искажения электромагнитного поля в зазоре АД. При такой диаг-

ностике обмотка статора используется в качестве датчика магнитного потока. Измерение и анализ сигнала ЭДС обмоток статора позволяет определить информационные признаки повреждений стержней. Преимуществами метода являются: возможность диагностики без выведения АД из технологического процесса, отсутствие влияния качества напряжения питания [1] и уровня нагрузки на результаты диагностики.

Для данного метода характерны следующие особенности. Измеряемые ЭДС представляют собой нестационарные затухающие сигналы. Анализ вейвлет-спектров сигналов ЭДС позволяет определить количество и взаимное расположение поврежденных стержней ротора. Также на формирование сигналов ЭДС в обмотках статора влияют такие факторы, как количество пар полюсов АД, схема соединения катушек и катушечных групп в фазе обмотки, тип обмотки статора. В результате анализа при различных схемах соединения элементов обмотки статора показано, что при определении ЭДС фазы информационные признаки повреждений взаимно накладываются из-за суммирования сигналов ЭДС. Это не позволяет достоверно определить расположение поврежденных стержней [8].

Перечисленные особенности метода обуславливают необходимость повысить достоверность диагностики АД с помощью выделения сигналов ЭДС катушки (одной активной стороны катушки) из сигнала ЭДС фазы [8]. Этапы выполнения декомпозиции для исследуемого АД представлены на рис. 1.

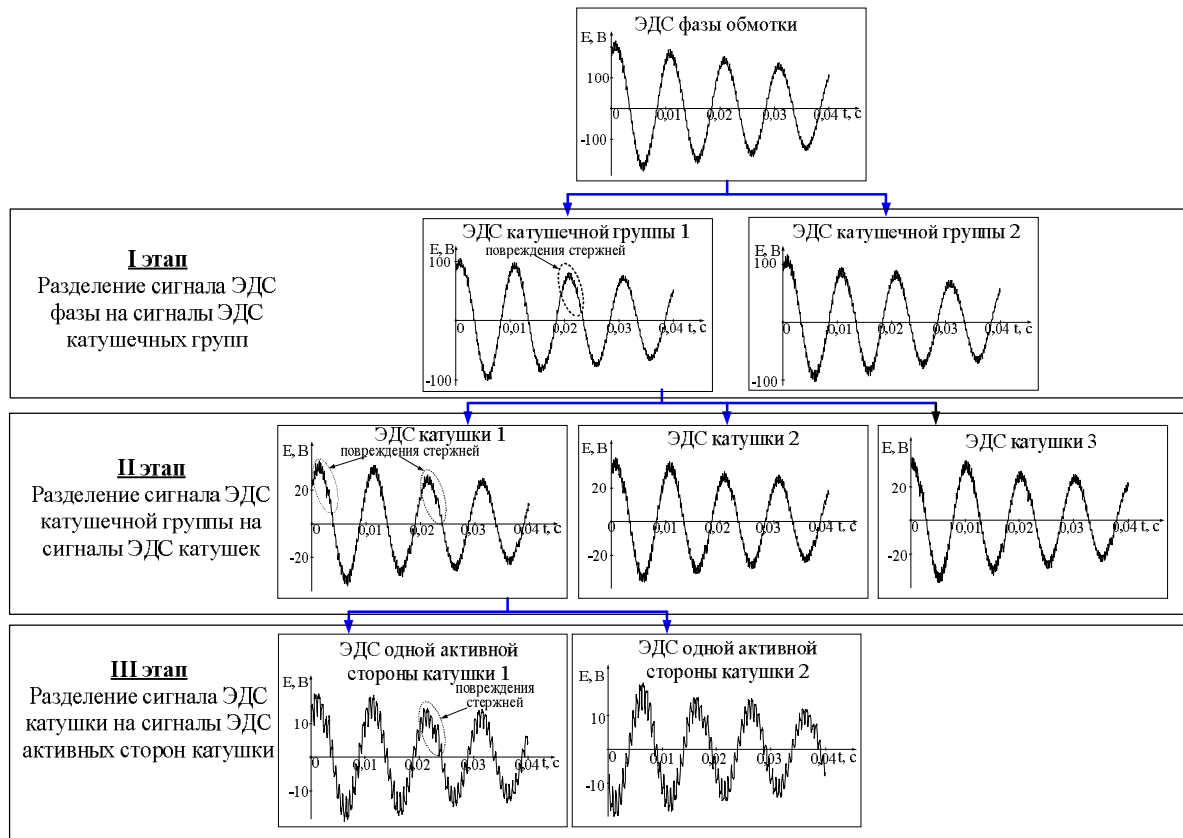


Рис. 1 – Этапы выполнения декомпозиции сигнала ЭДС фазы на сигналы ЭДС активных сторон катушки

Декомпозиция сигналов ЭДС выполняется с использованием теории обратного z -преобразования поэтапно для каждого из элементов обмотки статора. Сигнал ЭДС фазы обмотки статора сначала разделяется на сигналы ЭДС катушечных групп этой обмотки. Далее сигнал ЭДС одной из катушечных групп при известных углах сдвига между катушками в пазах статора разделяется на сигналы ЭДС катушек. Сигнал ЭДС одной из катушек, в свою очередь, разделяется на сигналы ЭДС двух активных сторон катушки. Таким образом, метод декомпозиции сигналов ЭДС с использованием обратного z -преобразования позволил выделить информационные признаки повреждений, присутствующие в сигнале ЭДС одной активной стороны катушки. Однако при декомпозиции сигналов ЭДС по полученным вейвлет-спектрам затруднительно определить степень повреждения ротора.

Цель работы. Уточнение диагностических признаков повреждений стержней ротора в сигнале ЭДС по анализу совокупности значений вейвлет-коэффициентов с использованием декомпозиции диагностических коэффициентов.

Материалы и результаты исследования. Согласно предлагаемому методу диагностики должен учитываться тип соединения обмоток статора АД. В случае соединения обмоток статора по схеме «звезда» (рис. 2) при подключении датчика напряжения к зажимам двух фаз измеряется значение межфазной ЭДС $\underline{E}_{AB} = \underline{E}_A - \underline{E}_B$. Для соединения обмоток статора по схеме «звезда» справедливо уравнение электродвижущих сил $\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0$. Когда обмотки статора

соединены по схеме «треугольник», то необходимо учитывать, что $\underline{E}_{AB} + \underline{E}_{BC} + \underline{E}_{CA} = 0$.

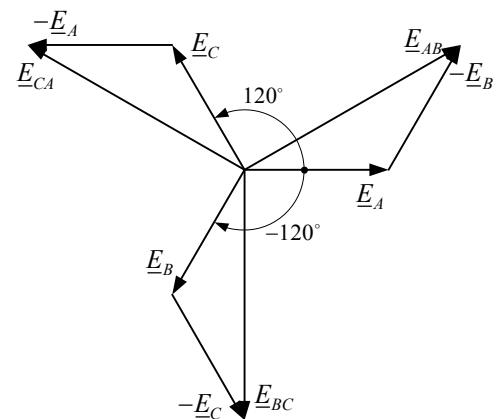


Рис. 2 – Векторная диаграмма ЭДС при соединении обмоток статора по схеме «звезда»

Также для выделения сигнала ЭДС одной активной стороны катушки из сигнала ЭДС фазы необходимо учитывать угловые соотношения между элементами обмотки статора. Так, для исследуемого АД катушечная группа обмотки состоит из трех катушек. Следовательно, при декомпозиции учитывается пространственный угловой сдвиг между катушками обмотки.

В ходе исследований использовалось обратное z -преобразование, которое представляет собой разложение функций в ряды показательных полиномов по z .

Значение z в z -полиноме является оператором единичной задержки по координатам функции.

Прямое z -преобразование сигналов ЭДС элементов обмотки имеет вид [8]:

$$e(k) = e(k\Delta t) \Leftrightarrow TZ[e(k\Delta t)] = \sum_{k=0}^K e_k z^k = E(z), \quad (1)$$

где $k = 0, 1, \dots, T$ – период дискретизации; $z = \sigma + j\omega$ – произвольная комплексная переменная; $E(z)$ – z -изображение сигнала ЭДС $e(k)$.

Для декомпозиции сигналов ЭДС элементов обмотки статора использовалось обратное z -преобразование:

$$e_{inv}(k) = Z^{-1}[E(z)], \quad (2)$$

где Z^{-1} – оператор обратного z -преобразования.

На рис. 3 приведены результаты для одного из этапов декомпозиции (разделение сигнала ЭДС катушечной группы на сигналы ЭДС катушек). После декомпозиции получены сигналы ЭДС в элементах обмотки статора и выполнено их вейвлет-преобразование (рис. 4). Для исследований использовался АД ($P_N=1,5$ кВт, $n_n=1395$ об/мин, $\eta=77\%$, $\cos\varphi=0,81$) с учетом различного количества поврежденных стержней ротора и их взаимного расположения.

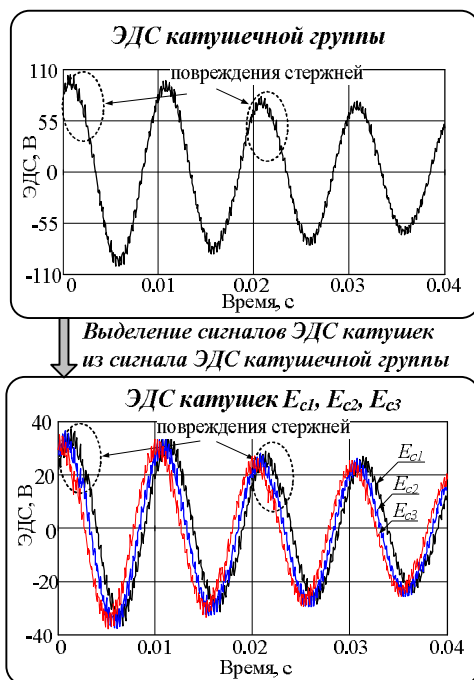


Рис. 3 – Выделение сигналов ЭДС катушек из сигнала ЭДС катушечной группы

В результате анализа вейвлет-спектров полученных сигналов были выделены информационные признаки повреждений стержней. На рис. 4 – это характерные участки с вейвлет-коэффициентами на вейвлет-спектре, выделенные пунктиром. Однако, при использовании метода декомпозиции сигналов ЭДС затруднительно определить степень повреждения рото-

ра [8]. Поэтому в данной работе для упрощения процедуры выделения информационных признаков повреждений стержней предложена декомпозиция диагностического коэффициента $K_{\Sigma a}$. Он представляет собой функцию среднего значения суммы коэффициентов вейвлет-разложения для области средних частот [7]:

$$K_{\Sigma a} = \frac{\sum_a^A k_a}{n}, \quad (3)$$

где k_a – значение коэффициентов вейвлет-разложения; a и A – начальное и конечное значение масштабов вейвлет-спектра, соответственно, $A = a + (5..10)$; n – число коэффициентов вейвлет-разложения.

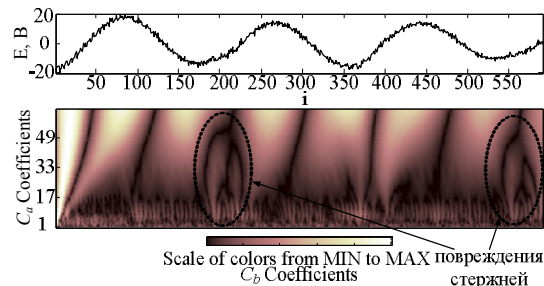


Рис. 4 – Сигнал ЭДС одной активной стороны катушки, выделенный из суммарного сигнала в результате z -преобразования и его вейвлет-спектр с повреждениями стержней ротора

Диапазон значений масштаба a в выражении (3) определен на основании исследования вейвлет-спектров с использованием математического моделирования, в частности численных расчетов магнитного поля [9]. Для исследования метода диагностики в [7] с использованием программы FEMM был проведен расчет электромагнитного поля в поперечном сечении АД. Используя результаты этого расчета, были получены сигналы ЭДС в элементах обмотки статора. Вейвлет-анализ полученных сигналов ЭДС показал, что повреждения стержней ротора находятся в области средних частот, между основной частотой сигнала и зубцовыми частотами, обусловленными наличием стержней ротора (рис. 4). На рис. 4 показаны следующие обозначения: Функция $K_{\Sigma a}(t)$ может быть получена при анализе вейвлет-спектров смоделированных сигналов ЭДС для всех элементов обмотки статора: фазы, катушечной группы, катушки, одной активной стороны катушки. Из анализа экспериментальных данных можно получить только зависимости диагностического коэффициента для фазы обмотки. Поэтому одной из задач исследования в данной работе является также сравнение диагностических признаков в сигнале ЭДС, выделенных в результате декомпозиции, с диагностическими признаками, которые выявлены в результате моделирования.

Используя выражение (3), рассчитаны значения коэффициентов вейвлет-разложения $K_{\Sigma a}$ для исправ-

ного АД и АД с повреждениями стержней ротора и построены соответствующие кривые (рис. 5). В дальнейшем они анализировались в относительных единицах. Приведение значения проводилось к максимальному значению масштаба вейвлет-спектра $a_{\max} = 64$ для исследуемого АД с повреждением стержней ротора: $K_{\Sigma a}^* = (K_{\Sigma a} / a_{\max}) 100 \%$.

Декомпозиция диагностического коэффициента $K_{\Sigma a}$ выполнялась аналогично декомпозиции сигнала ЭДС фазы обмотки [8].

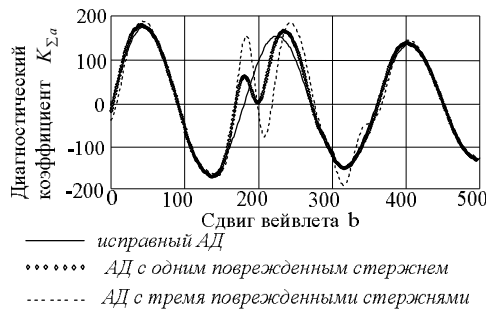


Рис. 5 – Функции средних значений сумм коэффициентов вейвлет-разложения для области средних частот

Результаты исследования для этапа декомпозиции диагностического коэффициента $K_{\Sigma a}$ катушечной группы приведены на рис. 6. Рассмотрение временных зависимостей на рис. 6 показало, что диагностический коэффициент $K_{\Sigma a}$ содержит информационные признаки повреждений, которые «дублируются» из-за суммирования сигналов активных сторон катушки. Следовательно, анализ значений полученного коэффициента не позволяет однозначно определить диагностические признаки повреждений. Поэтому, при декомпозиции коэффициента $K_{\Sigma a}(t)$ была удалена составляющая, которая описывается затухающей синусоидой (рис. 7, кривая 1). Были получены временные зависимости диагностических коэффициентов $K_{\Sigma a}$ элементов обмотки статора для АД с повреждением ротора (рис. 7, кривая 2 и рис. 8).

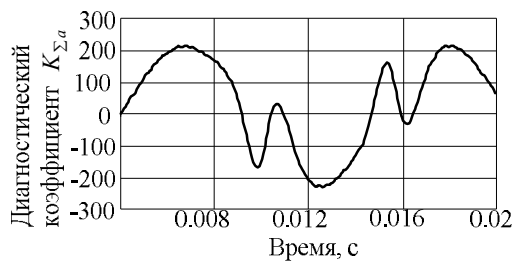


Рис. 6 – Временная зависимость диагностического коэффициента $K_{\Sigma a}$ катушки, полученная в результате декомпозиции

Как видно из анализа зависимостей (рис. 8), использование метода декомпозиции дает удовлетворительные результаты, что подтверждается высокой степенью совпадения полученных кривых. Кроме того,

декомпозиция диагностического коэффициента фазы обмотки позволила определить величину амплитуды всплеска, которая отображает степень повреждения ротора. Так, на рис. 9 показано, что значение коэффициента $K_{\Sigma a}$ при наличии нескольких поврежденных стержней возрастает приблизительно пропорционально их количеству.

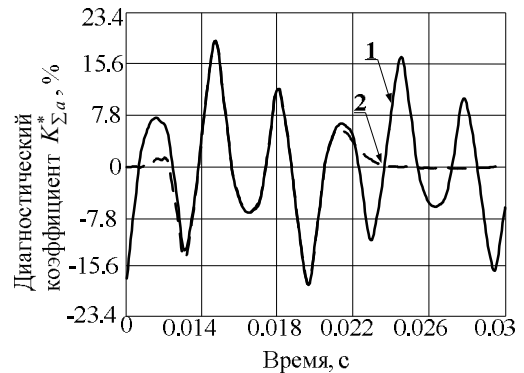


Рис. 7 – Временные зависимости диагностических коэффициентов $K_{\Sigma a}$: 1 – расчет по формуле (3) согласно результатам моделирования поля и анализа вейвлет-спектра сигнала ЭДС фазы; 2 – выделение из кривой 1 сигнала катушечной группы

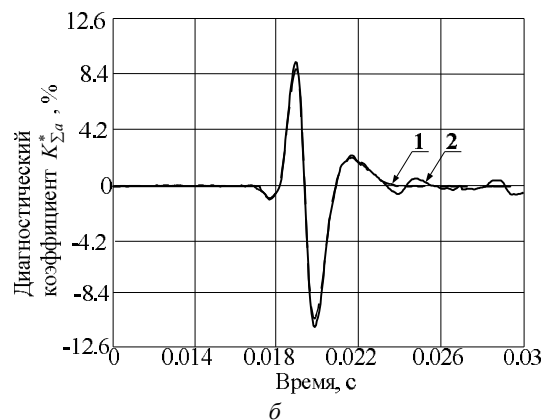
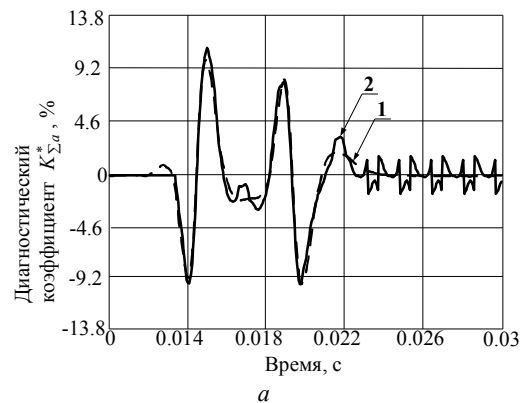


Рис. 8 – Временные зависимости диагностических коэффициентов $K_{\Sigma a}$ а – для катушки; б – одной активной стороны катушки: 1 – расчет по формуле (3) согласно результатам моделирования поля и анализа вейвлет-спектров сигналов ЭДС элементов обмотки; 2 – декомпозиция диагностического коэффициента фазы (кривая 1 на рис. 7)

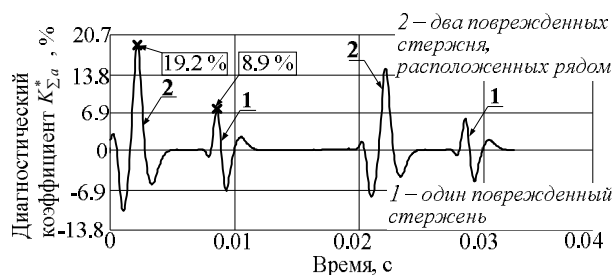


Рис. 9 – Временная зависимость диагностического коэффициента $K_{\Sigma a}$ одной активной стороны катушки при определении степени повреждения ротора

Таким образом, удалось уточнить диагностические признаки повреждений, а следовательно, повысить достоверность диагностики АД в режиме самовыбега.

Выводы.

Метод декомпозиции сигнала ЭДС фазы обмотки статора АД с использованием теории обратного z-преобразования позволил повысить достоверность диагностики повреждений стержней ротора АД за счет выделения информационных признаков, которые присутствуют в сигнале ЭДС одной активной стороны катушки.

Разработан метод декомпозиции диагностического коэффициента $K_{\Sigma a}$, который является функцией среднего значения суммы коэффициентов вейвлет-разложения для области средних частот. Адекватность метода подтверждена результатами моделирования поля и анализа вейвлет-спектров сигналов ЭДС элементов обмотки. Предложенный метод может быть применим для декомпозиции диагностического коэффициента, полученного в результате вейвлет-анализа экспериментального сигнала ЭДС фазы, измеренного в режиме самовыбега двигателя. Применение этого метода позволяет уточнить диагностические признаки повреждений стержней ротора АД и определить степень повреждения.

Список літератури

1. Ухань Ж. И. Класифікація методів діагностики пошкоджень обмоток ротора асинхронних двигунів / Ж. И. Ухань, А. П. Калінов // Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ ім. Михайла Остроградського. – 2010. – Вип. 3/2010 (62), част. 2. – С. 138-144.
2. Drobnic K. Simple detection of broken rotor bars using field-oriented control / K. Drobnic, M. Nemes, R. Fiser, V. Ambrozic // [Power Electronics and Motion Control Conference \(EPE/PEMC\), 2012 15th International](#), 4-6 Sept. 2012.
3. Мильх В. И. Анализ магнитного поля асинхронного двигателя в различных режимах работы с использованием метода конечных элементов / В. И. Мильх, Е. А. Сидоренко, Л. В. Шилкова // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск. Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2007. – №24. – С. 54-61.
4. Faiz J. A New Pattern for Detecting Broken Rotor Bars in Induction Motors During Start-Up / J. Faiz, B. M. Ebrahimi // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2008, vol. 44, no. 12. –pp. 4673-4683.
5. Vaimann T. Detection of Broken Rotor Bars in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor Using Fast Fourier Transform / T. Vaimann, A. Kallaste // 10th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering», Pärnu, Estonia, 2011, pp. 52-56.

6. Akuner C. Symmetrically broken rotor bars effect on the stator current of squirrel-cage induction motor / *Caner Akuner, Ismail Temiz* // *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2011, no. 3, pp. 313-314.
7. Загирняк М. В. Диагностика повреждений стержней ротора в асинхронном двигателе на основании анализа его магнитного поля / М. В. Загирняк, Ж. И. Ромашихина, А. П. Калинов // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск. Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2012. – №49 (955). – С. 38-48.
8. Ромашихина Ж. И. Декомпозиція сигналу електрорушійної сили обмоток статора для діагностики пошкоджень стержнів ротора асинхронного двигуна / Ж. И. Ромашихина, А. П. Калинов, І. А. Луценко // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал*. – Кременчук: КрНУ. – 2013. – Вип. 4/2013 (22). – С. 27-36.
9. Мильх В. И. Численно-полевой анализ магнитного поля трехфазного асинхронного двигателя в статике и динамике / В. И. Мильх, Л. В. Шилкова // *Вісник НТУ «ХПБ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії"*. – Х. : НТУ «ХПБ», 2016. – № 11 (1183). – С. 80-87.

References (transliterated)

1. Uhan Zh. I., Kalinov A. P. Klyasifikatsiya metodiv diahnostryky poshkodzhen' obmotok rotora asynkhronnykh dyvuhuniv [Classification of damages rotor bars diagnostics methods of engine motors]. *Visnik KDU*, 2010, vol. 3(62), pp. 138-144.
2. Drobnic K., Nemes M., Fiser R., Ambrozic V. Simple detection of broken rotor bars using field-oriented control. [Power Electronics and Motion Control Conference \(EPE/PEMC\), 2012 15th International](#), 4-6 Sept. 2012.
3. Milykh V. I., Sidorenko E. A., Shilkova L. V. Analiz magnitnogo polya asinhronnogo dvigatelya v razlichnykh rezhimakh raboty s ispolzovaniem metoda konechnykh elementov [Analysis of magnetic field of the induction motor in different operating modes using the finite element method]. *Visnik NTU «HPI»*. Harkiv: NTU «HPI» [Bulletin of NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI"]. 2007, no. 24, pp. 54-61.
4. Faiz J. Ebrahimi B. M. A New Pattern for Detecting Broken Rotor Bars in Induction Motors During Start-Up. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, vol. 44, no. 12, pp. 4673-4683.
5. Vaimann T. Kallaste A. Detection of Broken Rotor Bars in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor Using Fast Fourier Transform. *10th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering»*, Pärnu, Estonia, 2011, pp. 52-56.
6. Akuner C., Temiz I. Symmetrically broken rotor bars effect on the stator current of squirrel-cage induction motor *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2011, no. 3, pp. 313-314.
7. Zagirnyak M. V., Romashykhina Zh. I., Kalinov A. P. Diagnostika povrezhdeniy sterzhney rotora v asinhronnom dvigatele na osnovanii analiza ego magnitnogo polya [Diagnostic of broken rotor bars in induction motor on the basis of its magnetic field analysis]. *Visnik NTU «HPI»*. Harkiv: NTU «HPI» [Bulletin of NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI"]. 2012, no. 49(955), pp. 38-48.
8. Romashykhina Zh. I., Kalinov A. P., Lucenko I. A. Dekompozitsiya syhnalu elektrorushynoyi sily obmotok statora dlya diahnostryky poshkodzhen' stryzhniv rotora asynkhronnoho dyvuhuna [A decoupling of electromotive force signal of stator bars for rotor bars damages diagnostics of engine motors]. *Elektromehanichni i energosberegauchi systemu, Kremenchuk*, 2013, vol. 4(22), pp. 27-36.
9. Milykh V. I., Shilkova L. V. Chislno-polevoy analiz magnitnogo polya trehfaznogo asinhronnogo dvigatelya v statike i dinamike [Numerical-field analysis of the magnetic field of a three-phase induction motor in statics and dynamics]. *Visnik NTU «HPI»*. Harkiv: NTU «HPI» [Bulletin of NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI"]. 2016, no. 11(1183), pp. 80-87.

Поступила (received) 22.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аналіз коефіцієнтів вейвлет-спектрів діагностичних сигналів при пошкодженні ротора асинхронного двигуна / М. В. Загірняк, Ж. І. Ромашихіна, А. П. Калінов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 64–69. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

Анализ коэффициентов вейвлет-спектров диагностических сигналов при повреждении ротора асинхронного двигателя / М. В. Загирняк, Ж. И. Ромашихина, А. П. Калинов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 64–69. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

Analysis of coefficients of wavelet spectra of diagnostic signals in the case of rotor damage of induction motor / M. V. Zagirnyak, Zh. I. Romashykhina, A. P. Kalinov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 1 (1223). – P. 64–69. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Загірняк Михайло Васильович, доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, ректор КрНУ, тел. (05366) 3-62-19; e-mail: mzagirn@gmail.com

Загирняк Михаил Васильевич, доктор технических наук, профессор, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, ректор КрНУ, тел. (05366) 3-62-19; e-mail: mzagirn@gmail.com

Zagirnyak Mykhaylo Vasylyovych, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyi National University, rector, tel. +38 (05366) 3-62-19; e-mail: mzagirn@gmail.com

Ромашихіна Жанна Іванівна, кандидат технічних наук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, старший викладач кафедри електричних машин та апаратів, тел. (05366) 74-32-45; e-mail: romashykhina.zhanna@gmail.com

Ромашихина Жанна Ивановна, кандидат технических наук, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, старший преподаватель кафедры электрических машин и аппаратов, тел. (05366) 74-32-45; e-mail: romashykhina.zhanna@gmail.com

Romashykhina Zhanna Ivanivna, Candidate of Technical Sciences, Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyi National University, Senior Lecturer of the Department of Electric machines and apparatus, tel. +38 (05366) 74-32-45; e-mail: romashykhina.zhanna@gmail.com

Калінов Андрій Петрович, кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри систем автоматичного управління та електроприводу, тел. (05366) 3-11-47; e-mail: andrii.kalinov@gmail.com

Калинов Андрей Петрович, кандидат технических наук, доцент, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, доцент кафедры систем автоматического управления и электропривода, тел. (05366) 3-11-47; e-mail: andrii.kalinov@gmail.com

Kalinov Andrii Petrovych, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyi National University, Associate Professor at the Department of Systems of Automatic Control and Electric Drive, tel. +38 (05366) 3-11-47; e-mail: andrii.kalinov@gmail.com