

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы Instrument engineering, metrology and information and measuring devices and systems

Научная статья
УДК 621.313
DOI: 10.14529/ctcr250205

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ВЫСШИМ ГАРМОНИКАМ ТОКА МЕТОДОМ МАТРИЧНЫХ ПУЧКОВ

А.Л. Шестаков, a.l.shestakov@susu.ru

С.Г. Некрасов, nekrasovsg@susu.ru

В.А. Еремеева, eremeevava@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8284-1887>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Обрывы в короткозамкнутой обмотке ротора асинхронного электродвигателя являются одной из причин преждевременного выхода из строя промышленного оборудования. Обрыв стержня ротора приводит к перегреву электродвигателя, повышению его вибрации и снижению эффективности работы. Классические методы диагностики дефектов ротора, основанные на обнаружении частотных составляющих около гармоники питания двигателя в спектрах тока, часто оказываются недостаточно точными из-за влияния различных маскирующих факторов, таких как присутствие шумов в сигналах тока, особенности конструкции ротора и изменение рабочих условий. **Цель исследования:** применить метод матричных пучков к сигналам тока электродвигателя для получения значений амплитуд и частот высших гармоник дефекта ротора в районе 5-й и 7-й гармоник питания. Высшие гармоники дефекта ротора менее подвержены влиянию маскирующих эффектов и являются более надёжными индикаторами неисправности ротора по сравнению с составляющими в районе основной гармоники питания. **Материалы и методы.** Метод матричных пучков имеет высокое спектральное разрешение и вычислительную эффективность по сравнению с методами спектрального анализа на основе преобразования Фурье. Дополнительная обработка сигналов тока, включающая их фильтрацию и демодуляцию на основе суммирования квадратов токов, позволяет повысить точность и надёжность обнаружения высших гармоник дефекта ротора. **Результаты.** Обработка реальных сигналов электропривода с дефектами ротора показала, что при увеличении нагрузки двигателя и прогрессировании дефекта амплитуды гармоник дефекта ротора также увеличиваются. Таким образом, данные параметры могут служить диагностическими признаками неисправности. Метод матричных пучков позволяет с достаточной точностью определить значения частот и амплитуд гармоник дефекта ротора при малой частоте дискретизации 100 Гц при длине сигнала 200 отсчетов. **Заключение.** Метод матричных пучков является эффективным инструментом для мониторинга состояния асинхронных электродвигателей, так как позволяет отслеживать как изменение частот дефектных гармоник, так и рост их амплитуд при развитии повреждения. Таким образом, метод матричных пучков может быть применен на практике для раннего обнаружения неисправностей асинхронного двигателя и предотвращения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, токовый сигнал, дефект стержня ротора, гармонический анализ, метод матричных пучков

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 25-29-00633, <https://rscf.ru/ru/project/25-29-00633/>.

Для цитирования: Шестаков А.Л., Некрасов С.Г., Еремеева В.А. Обнаружение дефектов ротора асинхронного двигателя по высшим гармоникам тока методом матричных пучков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 2. С. 55–64. DOI: 10.14529/ctcr250205

DETECTION OF ROTOR FAULTS IN INDUCTION MOTOR BY HIGHER CURRENT HARMONICS USING THE MATRIX PENCIL METHOD

A.L. Shestakov, a.l.shestakov@susu.ru

S.G. Nekrasov, nekrasovsg@susu.ru

V.A. Ereemeeva, eremeevava@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8284-1887>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Broken rotor bars in the squirrel-cage winding of an induction motor are one of the causes of premature failure in industrial equipment. A broken rotor bar leads to motor overheating, increased vibration, and reduced operational efficiency. Conventional rotor fault diagnostic methods, based on detecting fault-related frequency components near the supply harmonic in current spectra, often prove insufficiently accurate due to various masking effects, such as current signal noise, rotor design peculiarities, and changing operating conditions. **The aim of the study:** to apply the Matrix Pencil Method (MPM) to motor current signals to extract the amplitudes and frequencies of higher-order rotor fault harmonics near the 5th and 7th supply harmonics. These higher-order rotor fault harmonics are less susceptible to masking effects and provide more reliable indicators of rotor faults compared to components near the fundamental supply frequency. **Materials and methods.** The Matrix Pencil Method offers superior spectral resolution and computational efficiency compared to Fourier transform-based spectral analysis techniques. Additional signal processing, including filtering and demodulation based on squared current summation, enhances the accuracy and reliability of detecting higher-order rotor fault harmonics. **Results.** The analysis of real motor current signals with rotor faults demonstrated that as motor load increases and the fault progresses, the amplitudes of rotor fault harmonics also rise. Thus, these parameters can serve as effective diagnostic indicators. The Matrix Pencil Method accurately determines the frequencies and amplitudes of rotor fault harmonics even at a low sampling rate of 100 Hz and a signal length of 200 samples. **Conclusion.** The Matrix Pencil Method is an effective tool for monitoring the condition of induction motors, as it tracks both the frequency shifts and amplitude growth of fault-related harmonics as the defect develops. Therefore, this method can be practically applied for early fault detection in induction motors, helping to prevent critical failures and unplanned downtime.

Keywords: squirrel cage induction motor, current signal, rotor bar defect, harmonic analysis, Matrix Pencil method

Acknowledgments. The research was funded by the Russian Science Foundation No. 25-29-00633, <https://rscf.ru/en/project/25-29-00633/>.

For citation: Shestakov A.L., Nekrasov S.G., Ereemeeva V.A. Detection of rotor faults in induction motor by higher current harmonics using the matrix pencil method. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(2):55–64. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250205

Введение

Работа металлургического оборудования обеспечивается десятками тысяч электродвигателей [1]. Как правило, большую часть электродвигателей составляют машины переменного тока, в частности асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. В металлургическом производстве электродвигатели работают в крайне тяжелых условиях эксплуатации: под воздействием высоких вибраций, с загрязнениями парами кислоты, окалиной, СОЖ. Данные факторы резко сокращают срок эксплуатации двигателя и повышают риск внезапного отказа. Поэтому важно контролировать фактическое состояние электродвигателей для предотвращения финансовых потерь из-за ремонтных простоев, а также для обеспечения безопасности производства.

Асинхронный двигатель состоит из статора, ротора и корпуса. Двигатели средней и большой мощности имеют сборную конструкцию ротора [2]. Обмотка сборного ротора представляет собой медные стержни, которые вставляются в пазы сердечника и припаиваются на каждом конце к замыкающему кольцу. Место пайки является слабым местом обмотки. Перегрев ротора из-за

пусковых токов, повышенная вибрация, перегруз двигателя могут привести к повреждению места пайки [3]. Обрыв одного стержня ротора почти не оказывает влияния на работу двигателя. Однако ток поврежденного стержня перераспределяется на соседние стержни, в результате чего происходит их локальный перегрев и последующее отгорание [4]. В результате двигатель не развивает требуемую скорость и момент, а его КПД падает на 13–20 % [4]. При обширном повреждении ротора двигатель выходит из строя. В некоторых случаях выступающий фрагмент отгоревшего стержня может повредить изоляцию обмотки статора, что приведет к аварийному отключению двигателя [5].

Принцип работы асинхронного двигателя основан на вращающемся магнитном поле, вызванном переменными токами в обмотках статора. Обрыв стержня ротора вызывает появление магнитного поля, вращающегося в обратном направлении относительно общего поля машины [6]. Магнитное поле, вызванное дефектом, модулирует токи статора двигателя низкочастотной составляющей, равной

$$f_{BB} = 2sf_{\text{пит}} / p,$$

где f_{BB} – частота дефекта; s – скольжение двигателя; $f_{\text{пит}}$ – частота питания двигателя; p – число пар полюсов двигателя.

В связи с этим традиционный способ обнаружения сломанных стержней ротора основан на частотном анализе токов двигателя и поиске гармоник дефекта ротора вокруг основной гармоники питания. Примерами подобных методов являются метод сигнатурного анализа тока двигателя (MCSA) [7] и векторный метод Парка [8]. Однако существуют эффекты, которые затрудняют обнаружение низкочастотной составляющей дефекта около основной гармоники питания. Данные эффекты включают наличие осевых воздухопроводов в роторе, низкочастотные колебания нагрузки, магнитную анизотропию материалов сердечника [9–11]. Эти эффекты генерируют гармоники в сигналах тока в том же частотном диапазоне, что и сломанный стержень ротора. Поэтому использование классических методов частотного анализа на основе преобразования Фурье может привести к неверной оценке технического состояния двигателя. Кроме того, методы на основе Фурье работают только со стационарными сигналами. Нестационарные режимы работы двигателя, такие как работа с переменной частотой вращения или работа под векторным управлением, приводят к размытию частотного спектра и невозможности обнаружения гармоник дефекта [9].

Для решения проблемы анализа нестационарных сигналов разработан ряд частотных методов высокого разрешения, например, алгоритм классификации множественных сигналов MUSIC [12], алгоритм инвариантного вращения подпространства ESPRIT [13], метод Прони [14] и другие. Так, метод Прони позволяет получить информацию о гармоническом составе сигналов очень малой длительности, что позволяет реализовать анализ нестационарных сигналов. В литературе известны работы по применению метода Прони в задачах контроля состояния энергетических систем. Однако точность извлеченных параметров методом Прони резко уменьшается с увеличением шума в сигналах [14]. Поэтому исследовательский интерес представляет метод, который является развитием метода Прони, – метод матричных пучков [15, 16]. Метод матричных пучков позволяет получить оценки параметров гармоник в зашумленных сигналах с достаточной для задач диагностики точностью [14]. При этом вычислительная эффективность алгоритма матричных пучков в 5,7 раза выше, чем у алгоритмов MUSIC и ESPRIT [17].

В данной статье предлагается диагностика состояния ротора по параметрам высших гармоник дефекта в токе двигателя. Для извлечения частоты и амплитуды гармоник дефекта к сигналам тока применяется метод матричных пучков. Сигналы тока двигателя дополнительно подвергаются фильтрации и демодуляции для улучшения информативности и повышения вероятности обнаружения гармоник дефекта ротора. Предлагаемый метод тестируется на сигналах реального электропривода, работающего при разных уровнях нагрузки.

1. Методы и материалы

1.1. Высшие гармоники дефекта ротора

Обрыв стержня ротора вызывает появление двух боковых гармоник, расположенных симметрично около частоты питания двигателя (рис. 1а).

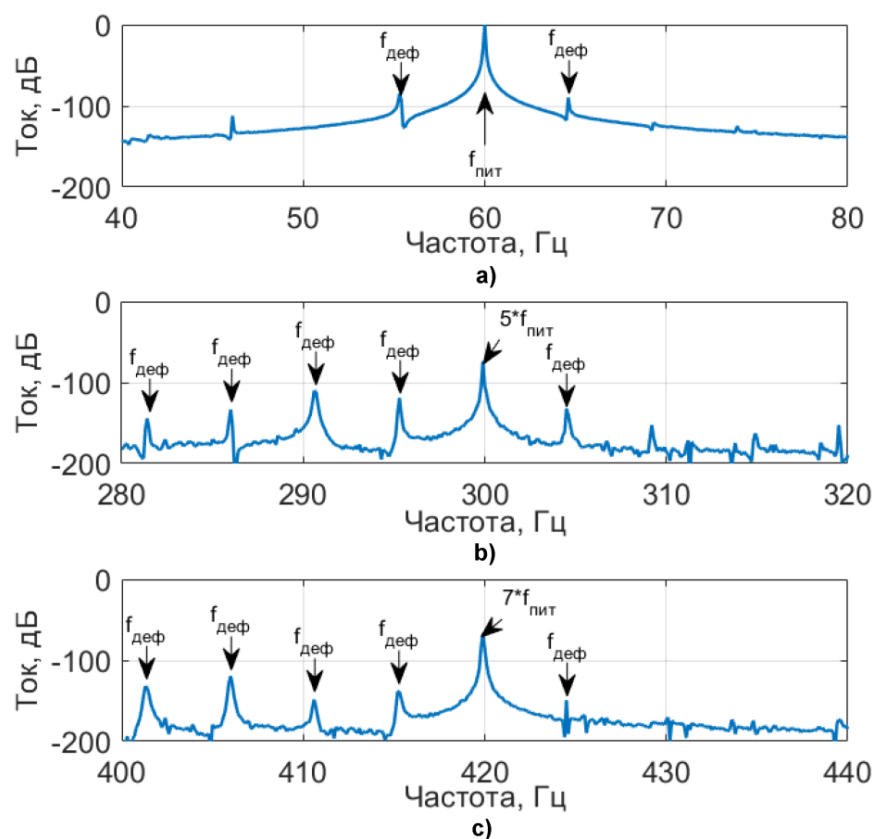


Рис. 1. Спектр тока с 1 сломанным стержнем при частоте питания 60 Гц:
а – в районе основной гармоники питания; б – в районе 5-й гармоники
питания; с – в районе 7-й гармоники питания

Fig. 1. Current spectrum with 1 broken bar at a power supply frequency of 60 Hz:
a – in the region of the fundamental power supply harmonic; b – in the region
of the 5th power supply harmonic; c – in the region of the 7th power supply
harmonic

Амплитуды гармоник зависят от степени тяжести дефекта, поэтому, контролируя их величины, можно оценивать состояния ротора. В случае исправного двигателя также возможно присутствие данных гармоник с небольшой амплитудой. Их наличие объясняется внутренними конструктивными несимметриями, вызванными при изготовлении и сборке двигателя.

Дефект ротора также вызывает модуляцию других гармоник тока двигателя: пространственных гармоник магнитодвижущей силы порядка $\mu = 6i \pm 1$ ($i = 1, 2, \dots$) и временных ШИМ-гармоник в случае питания двигателя от частотного преобразователя [18]. Новые гармоники дефекта определяются по формулам:

$$f_{\mu} = (\mu(1-s) \pm s)f_{\text{пит}}/p, \quad (\mu = 5, 7);$$

$$f_u = (u \pm 2ks)f_{\text{пит}}/p, \quad (u = 5, 7; k = 1, 2, \dots),$$

где f_{μ} – составляющие дефекта, модулирующие гармоники магнитодвижущей силы; f_u – составляющие дефекта, модулирующие временные ШИМ-гармоники.

Совокупность f_{μ} и f_u образует «гребенку» из гармоник в спектре тока в районе 5-й и 7-й частоты питания (рис. 1б, с). Далее в тексте данные гармоники упоминаются как «высшие гармоники дефекта». Отношение амплитуд высших гармоник дефектов к амплитуде гармонике питания выше, чем в диапазоне основной частоты питания. Также в исследованиях [19, 20] отмечено, что низкочастотные колебания нагрузки и магнитная анизотропия ротора гораздо слабее влияют на состав тока в районе высших гармоник по сравнению с диапазоном основной частоты питания. Следовательно, обнаружение высших гармоник дефекта ротора в спектре тока является более надежным методом диагностики состояния двигателя.

1.2. Фильтрация и демодуляция сигналов тока двигателя

Гармоники дефекта f_{BB} , f_u и f_v зависят от скольжения, а значит, и от нагрузки двигателя. При малой нагрузке гармоники дефекта могут слиться с гармоникой питания, в результате чего их будет сложно обнаружить. Для улучшения обнаружения гармоник дефекта в некоторых методах предлагается удалять гармонику питания из сигналов тока. Примерами подобных методов являются амплитудная демодуляция сигнала преобразованием Гильберта [21] и преобразование Парка – Кларка [22]. В работе [23] показано, что сигналы тока, полученные с применением данных методов, являются более информативными с точки зрения обнаружения дефекта ротора. Однако авторы работы [23] показали, что суммирование квадратов трех сигналов тока позволяет получить демодулированный сигнал с меньшим уровнем шума по сравнению с преобразованием Гильберта. Кроме того, такой подход является более быстрым в вычислении, чем преобразование Парка – Кларка.

В данной статье метод демодуляции применяется к сигналам тока, отфильтрованным в районе 5-й и 7-й гармоник питания, для получения сигналов $i_{\text{демо}1}(t)$ и $i_{\text{демо}2}(t)$ по формулам:

$$i_{\text{демо}1}(t) = \frac{i_{A\_фил5}^2(t) + i_{B\_фил5}^2(t) + i_{C\_фил5}^2(t)}{3}; \quad i_{\text{демо}2}(t) = \frac{i_{A\_фил7}^2(t) + i_{B\_фил7}^2(t) + i_{C\_фил7}^2(t)}{3},$$

где $i_{A\_фил5}(t)$, $i_{B\_фил5}(t)$, $i_{C\_фил5}(t)$, $i_{A\_фил7}(t)$, $i_{B\_фил7}(t)$, $i_{C\_фил7}(t)$ – отфильтрованные сигналы тока с помощью полосовых фильтров с частотами пропускания не менее $[5f_{\text{пит}} - k \cdot f_{BB1}; 5f_{\text{пит}} + k \cdot f_{BB1}]$ и $[7f_{\text{пит}} - k \cdot f_{BB1}; 7f_{\text{пит}} + k \cdot f_{BB1}]$ соответственно, где k – число анализируемых гармоник дефекта.

После фильтрации и демодуляции сигналы $i_{\text{демо}1}(t)$ и $i_{\text{демо}2}(t)$ в основном будут содержать низкочастотные гармоники дефекта ротора (рис. 2). Преимущество данного подхода заключается в учете особенностей всех трех токов двигателя, а также в снижении уровня случайного шума за счет фильтрации и усреднения сигналов.

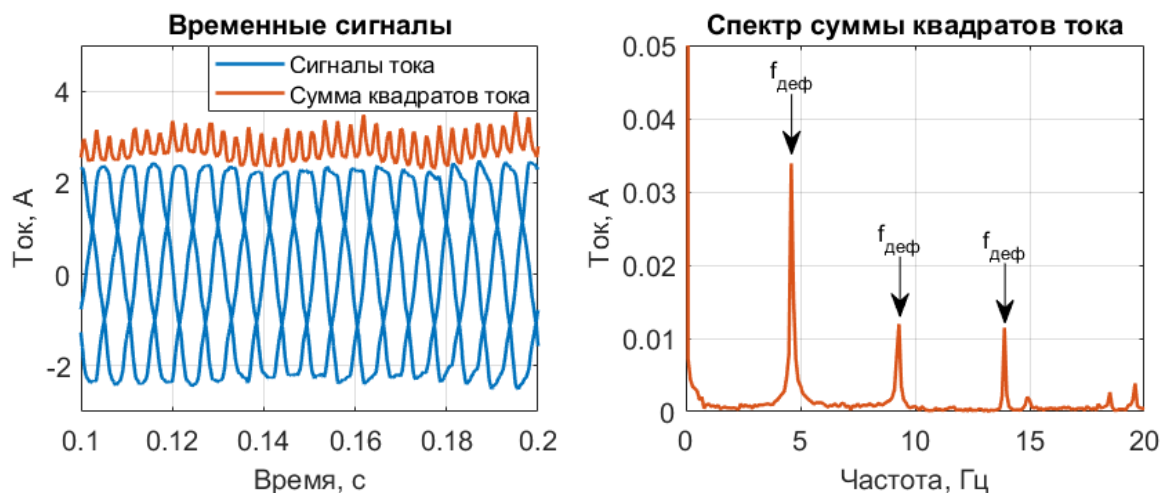


Рис. 2. Демодулированный сигнал тока со сломанным стержнем
Fig. 2. Demodulated current signal with broken rotor bar

1.3. Метод матричных пучков

Метод матричных пучков является параметрическим методом спектрального анализа, который позволяет анализировать гармонический состав дискретного сигнала $y(n)$ на основе его аппроксимирующей модели $\hat{y}(n)$, состоящей из суммы комплексных экспонент [16]:

$$\hat{y}(n) = \sum_{k=1}^M A_k e^{j2\pi f_k n T + j\phi_k} = \sum_{k=1}^M R_k z_k^n,$$

где M – число экспонент аппроксимирующей модели; $0 \leq n \leq N-1$ – номер отсчета; T – период дискретизации сигнала; A_k , f_k и θ_k – амплитуда, частота и начальная фаза k -й комплексной экспо-

ненты; $R_k = A_k e^{j\varphi_k}$ – комплексная амплитуда k -й экспоненты; $z_k = e^{j2\pi f_k nT}$ – комплексная экспонента (комплексный полюс).

Метод матричных пучков позволяет найти амплитуду, частоту и фазу интересующих гармоник сигнала по оценкам его комплексных полюсов z_k и комплексных амплитуд R_k . Более подробно алгоритм описан в [16]. В данной статье метод матричных пучков используется для нахождения частот и амплитуд гармоник дефекта ротора из демодулированных сигналов тока $i_{\text{демо}1}(t)$ и $i_{\text{демо}2}(t)$. Для реальных данных количество гармоник дефекта k может варьироваться от 2 до 5 в зависимости от типоразмера двигателя. В данной статье анализируются параметры первых трех гармоник дефекта: $f_{BB1} = 2s \cdot f_{\text{пит}}$, $f_{BB2} = 4s \cdot f_{\text{пит}}$ и $f_{BB3} = 6s \cdot f_{\text{пит}}$.

2. Эксперимент

Для тестирования предложенного метода взяты данные университета Сан-Паулу (Бразилия), полученные на экспериментальном стенде в лаборатории интеллектуальной автоматизации процессов и систем [24]. Экспериментальный стенд состоит из четырехполюсного асинхронного двигателя, датчика момента, двигателя постоянного тока для создания момента нагрузки (рис. 3). Параметры трехфазного асинхронного двигателя W22 WEG приведены в таблице.



Рис. 3. Экспериментальный стенд лаборатории Сан-Паулу [24]
Fig. 3. Experimental rig of the Sao Paulo laboratory [24]

Параметры двигателя W22 WEG
W22 WEG motor parameters

Мощность P , кВт	0,74
Напряжение питания U , В	220/380
Частота поля n_1 , об/мин	1800
Частота вращения ротора n_2 , об/мин	1715
Номинальный момент, Н·м	4,1
Количество стержней ротора, шт.	34

Данные получены для исправного двигателя, двигателя с 1, 2, 3 и 4 стержнями, сломанными рядом друг с другом. Для имитации сломанных стержней в роторе просверлены отверстия с помощью дрели, оснащенной сверлом диаметром 6 мм. Эксперимент проведен при частоте питания 60 Гц и при разных уровнях нагрузки: 1,0; 2,0; 3,0 и 4,0 Н·м, что соответственно составляет 5; 50; 75 и 100 % нагрузки от номинальной. В данной статье использованы три сигнала фазных токов, а также сигнал виброускорения с акселерометра, установленного на корпусе двигателя, для получения информации о частоте вращения электропривода. Для измерения сигналов тока использованы токовые клещи Yokogawa 96033, для измерения вибрации использован акселерометр Vibrocontrol PU 2001. Частота дискретизации сигналов тока равна 50 кГц, частота дискретизации сигнала вибрации равна 7,6 кГц. Длительность сигналов составляет около 18 с.

3. Результаты

По сигналам вибрации получены значения частоты вращения двигателя и расчетные значения гармоник дефектов ротора. Самое большое значение частоты гармоники дефекта составило 4,88 Гц. В связи с этим полосы пропускания фильтров для получения отфильтрованных сигналов в районе 5-й и 7-й частоты питания выбраны равными [285; 315] и [405; 435] Гц соответственно. В качестве фильтров выбраны эллиптические БИХ-фильтры 10-го порядка. Отфильтрованные сигналы тока возведены в квадрат и суммированы для получения демодулированных сигналов $i_{\text{демо1}}(t)$ и $i_{\text{демо2}}(t)$. Поскольку демодулированные сигналы содержат только низкочастотные гармоники дефекта ротора, частота дискретизации сигналов может быть понижена с 50 кГц до 100 Гц. Пример демодулированных сигналов для двигателя с 4 сломанными стержнями и 100%-ной нагрузкой приведен на рис. 4.

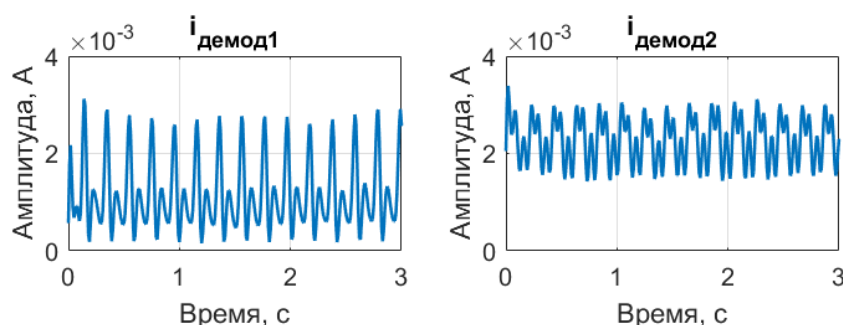


Рис. 4. Демодулированные сигналы тока
Fig. 4. Demodulated current signals

Полученные демодулированные сигналы обработаны методом матричных пучков в режиме скользящего окна, т. е. берется некоторое количество отсчетов сигнала, на их основе находятся параметры интересующих гармоник, затем «окно обработки» сдвигается на 1 отсчет и процедура повторяется. Длина окна выбрана равной 200 отсчетам, что соответствует 2 с сигнала. Число комплексных экспонент M для аппроксимирующей модели метода матричных пучков выбрано равным 6, так как необходимо найти параметры первых трех гармоник дефекта. Пример полученных параметров гармоники дефекта для исправного двигателя и двигателя с четырьмя сломанными стержнями с нагрузкой 100 % приведен на рис. 5.

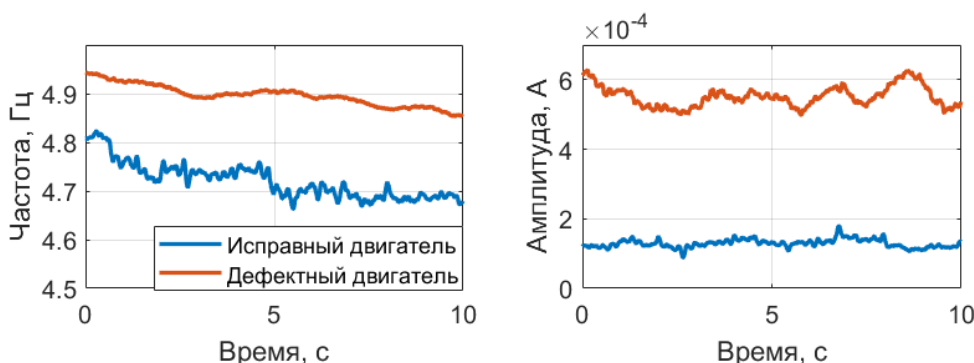


Рис. 5. Параметры гармоники дефекта f_{BB1} для демодулированного сигнала $i_{\text{демо1}}(t)$
Fig. 5. Parameters of the defect harmonic f_{BB1} for the demodulated signal $i_{\text{демо1}}(t)$

Видно, что частота гармоники дефекта незначительно увеличивается при наличии дефекта ротора. Однако ее амплитуда вырастает более чем в 4 раза по сравнению с исправным двигателем. Анализ полученных параметров гармоник дефектов для всех режимов работы двигателя показал, что вторая гармоника дефекта $f_{BB2} = 4s \cdot f_{\text{пит}}$ для сигнала $i_{\text{демо1}}(t)$ и третья гармоника дефекта $f_{BB3} = 6s \cdot f_{\text{пит}}$ для сигнала $i_{\text{демо2}}(t)$ позволяют наиболее достоверно определить состояние двигателя. Средние значения амплитуд данных гармоник для всех режимов работы двигателя приведены на рис. 6.

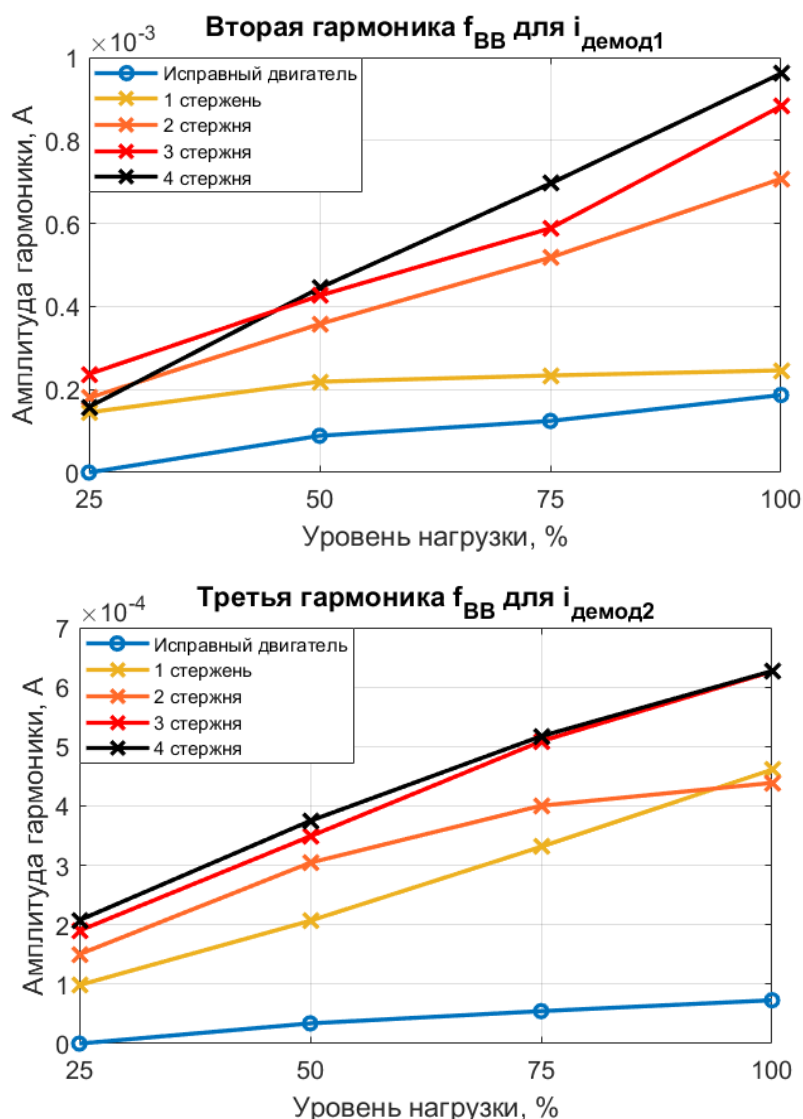


Рис. 6. Изменение амплитуд гармоник дефекта ротора при смене режима работы двигателя
Fig. 6. Change in the amplitudes of rotor defect harmonics when changing the motor operating mode

Из рис. 6 видно, что средние значения амплитуд гармоник дефекта растут с увеличением степени повреждения ротора. Также амплитуда гармоник дефекта зависит от уровня нагрузки двигателя. Наибольшая разница между значением амплитуды при исправном состоянии двигателя и дефектном достигается на нагрузке 100 %. Поэтому надежней всего диагностировать состояние двигателя, когда он полностью нагружен. Тем не менее параметры гармоник дефекта, извлеченные предложенным методом, позволяют однозначно отличить исправное состояние двигателя от состояния двигателя с поврежденным ротором.

Заклучение

Использование амплитуд высших гармоник дефекта ротора, извлеченных из демодулированных сигналов тока, позволяет определить наличие сломанных стержней в роторе асинхронного двигателя. Анализ тока статора в районе 5-й и 7-й гармоник тока обеспечивает более надежное извлечение признаков дефекта из сигналов по сравнению с классическим подходом, так как в этих частотных диапазонах многие маскирующие эффекты оказывают меньшее влияние. Демодуляция с помощью суммирования квадратов фазных токов также позволяет повысить информативность сигналов для обнаружения гармоник дефекта ротора, а также учесть особенности всех трех токов двигателя. Обработка полученных демодулированных сигналов тока методом матричных пучков позволяет получить параметры гармоник дефектов ротора даже при изменении нагрузки двигателя.

Список литературы/References

1. Петушков М.Ю., Сарваров А.С., Федоров О.В. Пути решения проблем в области нерегулируемого асинхронного электропривода в металлургической промышленности // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 3. С. 60–74. [Petushkov M.Y., Sarvarov A.S., Fedorov O.V. Ways to solve problems in field of unregulated asynchronous electric drive in metallurgical industry. *Smart Electrical Engineering*. 2019;3:60–74. (In Russ.)]. DOI: 10.46960/2658-6754_2019_3_60
2. Bonnett A.H., Albers T. Squirrel cage rotor options for AC induction motors. In: *Conference Record of 2000 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference (Cat. No.00CH37111)*/ Atlanta, GA, USA; 2000. P. 54–67. DOI: 10.1109/PAPCON.2000.854190
3. Zhang P., Du Y., Habetler T.G., Lu B. A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2011;47(1):34–46. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316083
4. Garcia M., Panagiotou P.A., Antonino-Daviu J.A., Gyftakis K.N. Efficiency Assessment of Induction Motors Operating Under Different Faulty Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019;66(10):8072–8081. DOI: 10.1109/TIE.2018.2885719
5. Yang C., Lee S.B., Jang G., Kim S., Jung G., Lee J., Shim S., Lim Y.K., Kim J., Park S. Starting current analysis in medium voltage induction motors: detecting rotor faults and reactor starting defects. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2019;25(6):69–79. DOI: 10.1109/MIAS.2019.2923105
6. Вольдек, А.И. Электрические машины: учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. Л.: Энергия, 1978. 832 с. [Voldek, A.I. *Elektricheskie mashiny: ucheb. dlya studentov vyssh. tekhn. ucheb. zavedeniy* [Electric machine. Textbook for students of higher technical educational institutions]. Leningrad: Energiya; 1978. 832 p. (In Russ.)].
7. Kliman G.B., Stein J. Methods of motor current signature analysis. *Electric Machines and Power Systems*. 1992;20(5):463–474. DOI: 10.1080/07313569208909609
8. Marques Cardoso A.J., Cruz S.M.A., Fonseca D.S.B. Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1999;14(3):595–598. DOI: 10.1109/60.790920
9. Lee S.B., Hyun D., Kang T., Yang C., Shin S., Kim H., Park S., Kong T., Kim H. Identification of false rotor fault indications produced by online MCSA for medium-voltage induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016;52(1):729–739. DOI: 10.1109/TIA.2015.2464301
10. Benbouzid M.E.H., Kliman G.B. What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis? *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2003;18(2):238–244. DOI: 10.1109/TEC.2003.811741
11. Kim J., Shin S., Lee S.B., Gyftakis K.N., Drif M., Cardoso A.J.M. Power spectrum-based detection of induction motor rotor faults for immunity to false alarms. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2015;30(3):1123–1132. DOI: 10.1109/TEC.2015.2423315
12. Morinigo-Sotelo D., Romero-Troncoso R.J., Antonino-Daviu J.A., Gyftakis K.N. Reliable detection of broken rotor bars in induction motors via MUSIC and ZSC methods. In: *Proceedings of the 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Lausanne, Switzerland; 2016. P. 2881–2886. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732932
13. Xu B., Sun L., Xu L., Xu G. Improvement of the Hilbert method via esprit for detecting rotor fault in induction motors at low slip. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2013;28(1):225–233. DOI: 10.1109/TEC.2012.2236557
14. Grant L.L., Crow M.L. Comparison of Matrix Pencil and Prony methods for power system modal analysis of noisy signals. In: *Proceedings of 2011 North American Power Symposium*. Boston, USA. 2011. P. 1–7. DOI: 10.1109/NAPS.2011.6024892
15. Ибряева О.Л., Салов Д.Д. Модификация метода матричных пучков, использующая совместное оценивание полюсов сигнала и обратных к ним // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». 2017. Т. 6, № 1. С. 26–37. [Ibryaeva O.L., Salov D.D. Modification of the Matrix Pencil Method using a combined evaluation of signal poles and their inverses. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computational Mathematics and Software Engineering*. 2017;6(1):26–37. (In Russ.)]. DOI: 10.14529/cmse170102
16. Генри М.П., Ибряева О.Л., Салов Д.Д., Семенов А.С. Метод матричных пучков для оценки параметров векторных процессов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование

и программирование». 2017. Т. 10, № 4. P. 92–104. [Henry M.P., Ibryaeva O.L., Salov D.D., Semenov A.S. Matrix pencil method for estimation of parameters of vector processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*. 2017;10(4):92–104. (In Russ.)]. DOI: 10.14529/mmp170409

17. Chahine K. Rotor fault diagnosis in induction motors by the matrix pencil method and support vector machine. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2017;28(10):1–13. DOI: 10.1002/etep.2612

18. Tang J., Yang Y., Chen J., Qiu R., Liu Z. Characteristics analysis and measurement of inverter-fed induction motors for stator and rotor fault detection. *Energies*. 2019;13(1):101. DOI: 10.3390/en13010101

19. Kim H., Lee S.B., Park S., Kia S.H., Capolino G.-A. Reliable detection of rotor faults under the influence of low-frequency load torque oscillations for applications with speed reduction couplings. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2016;52(2):1460–1468. DOI: 10.1109/TIA.2015.2508423

20. Shin S., Kim J., Lee S.B., Lim C., Wiedenbrug E.J. Evaluation of the influence of rotor magnetic anisotropy on condition monitoring of 2 pole induction motors. In: *Proceedings of 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Pittsburgh, USA. 2014. P. 638–645. DOI: 10.1109/ECCE.2014.6953455

21. Abd-el-Malek M.B., Abdelsalam A.K., Hassan O.E. Novel approach using Hilbert Transform for multiple broken rotor bars fault location detection for three phase induction motor. *ISA Transactions*. 2018;80:439–457. DOI: 10.1016/j.isatra.2018.07.020

22. Gyftakis K.N., Marques Cardoso A.J., Antonino-Daviu J.A. Introducing the Filtered Park's and Filtered Extended Park's Vector Approach to detect broken rotor bars in induction motors independently from the rotor slots number. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017;93:30–50. DOI: 10.1016/j.ymssp.2017.01.046

23. Chen J., Hu N., Zhang L., Chen L., Wang B., Zhou Y. A method for broken rotor bars diagnosis based on sum-of-squares of current signals. *Applied Sciences*. 2020;10(17):5980. DOI: 10.3390/app10175980

24. Treml A.E., Flautzino R.A., Suetake M., Maciejewski N.A.R. Experimental database for detecting and diagnosing rotor broken bar in a three-phase induction motor. *IEEE Dataport*. 2020. DOI: 10.21227/fmm-bn95

Информация об авторах

Шестаков Александр Леонидович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; a.l.shestakov@susu.ru.

Некрасов Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф. кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; nekrasovsg@susu.ru.

Еремеева Виктория Александровна, аспирант кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; eremeevava@susu.ru.

Information about the authors

Alexander L. Shestakov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Information and Measurement Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; a.l.shestakov@susu.ru.

Sergey G. Nekrasov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Information and Measurement Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; nekrasovsg@susu.ru.

Victoria A. Ereemeeva, Postgraduate student of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; eremeevava@susu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.11.2024

The article was submitted 13.11.2024