

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

---

---

УДК 621.313.333, 621.314.261

**Михаил Алексеевич Захаров**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Россия, Иваново, e-mail: mazoid@gmail.com

**Александр Станиславович Страхов**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: astrakhov90@yandex.ru

**Евгений Михайлович Новоселов**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: captain.udgin@gmail.com

**Денис Андреевич Полкошников**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: pda37@yandex.ru

**Андрей Александрович Скоробогатов**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: aaskor.andrey@yandex.ru

### **Влияние настройки преобразователя частоты на спектр тока статора асинхронного двигателя с повреждением обмотки ротора**

#### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** В настоящее время все чаще асинхронные электродвигатели работают в составе частотно-регулируемого привода. Одним из распространенных видов их дефектов, приводящих к отказам, являются повреждения обмоток роторов. Перспективным методом для их обнаружения выступает спектральный анализ тока статора. Однако в существующих работах не уделяется должного внимания преобразователям частоты, хотя при различной настройке преобразователей можно получить совершенно различные спектры при наличии повреждения обмоток роторов. В связи с этим в рамках проводимых исследований изучаются вопросы влияния преобразователя частоты на спектры тока статора асинхронных электродвигателей при их пуске.

**Материалы и методы.** Исследование работы асинхронного двигателя типа АИР71А6 в составе частотно-регулируемого привода проведено на экспериментальном стенде. В качестве преобразователя частоты использован Веспер Е4-8400-010Н. Для регистрации сигнала тока статора использовано устройство ENMU, сигналы с которого

через медиаконвертер передавались на ноутбук, а для подтверждения результатов регистрировалась также скорость вращения двигателя с помощью энкодера.

**Результаты.** Получены частотно-временные спектры сигналов тока статора при различной настройке преобразователя частоты. Установлено, что чем выше напряжение, тем ближе частота гармоники от фиктивной обмотки ротора к основной гармонике сигнала в течение пуска, а также, что скорость нарастания частоты на выходе преобразователя в зависимости от настройки кривой  $U(f)$  может оказать существенное влияние на внешний вид спектра асинхронного электродвигателя. Гармоники от фиктивной обмотки ротора проявляются только при наличии повреждения обмотки ротора при любой настройке преобразователя.

**Выводы.** Полученные результаты необходимо учитывать и при проведении, и в рамках разработки новых методов диагностирования состояния обмотки ротора асинхронного двигателя.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, преобразователь частоты, спектральный анализ, ток статора, частотно-регулируемый пуск, оконное преобразование Фурье

#### **Mikhail Alekseevich Zakharov**

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Electric Drives and Automation of Industrial Installations Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mazoid@gmail.com

#### **Alexander Stanislavovich Strakhov**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electrical Stations, Substations and Diagnostics of Electrical Equipment Department, Russia, Ivanovo, e-mail: astrakhov90@yandex.ru

#### **Evgeny Mikhailovich Novoselov**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electrical Stations, Substations and Diagnostics of Electrical Equipment Department, Russia, Ivanovo, e-mail: captain.udgin@gmail.com

#### **Denis Andreevich Polkoshnikov**

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Electrical Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: pda37@yandex.ru

#### **Andrey Alexandrovich Skorobogatov**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electrical Stations, Substations and Diagnostics of Electrical Equipment Department, Russia, Ivanovo, e-mail: aaskor.andrey@yandex.ru

## **The influence of frequency converter settings on the stator current spectrum of an asynchronous motor with rotor winding fault**

### **Abstract**

**Background.** At present, induction motors are increasingly being operated as part of variable-frequency drives. One of the common types of faults leading to failures is damage of rotor windings. Spectral analysis of the stator current appears to be a promising method for detecting such faults. However, available studies do not pay sufficient attention to frequency converters, although different settings of these converters can yield significantly different spectra in the presence of rotor winding damage. Thus, the ongoing research investigates the influence of the frequency converter on the stator current spectra of induction motors during their startup.

**Materials and methods.** The study of the operation of AIR71A6 type induction motor integrated into a frequency-controlled drive has been carried out on an experimental stand. A Vesper E4-8400-010H frequency converter has been employed as the frequency control unit. To capture the stator current signal, an ENMU device has been utilized. The acquired signals have been transmitted to a laptop via a media converter. To validate the results, the motor's rotational speed has been simultaneously recorded using an encoder.

**Results.** Time-frequency spectra of stator current signals have been obtained for various frequency converter settings. It has been found that the higher the voltage, the closer the harmonic frequency from the fictitious rotor winding is to the fundamental harmonic of the signal during startup. Also, it has been established that the rate of frequency increase at the converter output, depending on the  $U(f)$  curve setting, can significantly affect the physical configuration of the spectrum of the induction motor. Harmonics from the fictitious rotor winding appear only in the presence of rotor winding damage, regardless of the frequency converter setting.

**Conclusions.** The obtained results must be taken into account both during implementation and development of new methods to diagnose the condition of the induction motor rotor winding.

**Key words:** induction motor, frequency converter, spectral analysis, stator current, frequency-controlled startup, short-time Fourier transform

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2026.2.063-074

**Состояние вопроса.** Хорошо известно, что в настоящее время одним из современных направлений развития электротехнической отрасли является разработка новых и совершенствование существующих методов технической диагностики асинхронных электродвигателей (АЭД). Применение эффективных методов своевременного обнаружения дефектов позволит значительно сократить количество их внезапных отказов и тем самым снизить экономические затраты. Одной из достаточно распространенных причин отказов являются повреждения обмотки ротора, на которые приходится в среднем около 5–10 % от общего числа отказов [1].

Одним из методов функционального контроля, используемых для обнаружения оборванных стержней короткозамкнутых обмоток роторов АЭД, является метод спектрального анализа тока статора. Использование тока статора при проведении контроля обусловлено рядом факторов, среди которых можно выделить несложную обработку диагностического сигнала вследствие малого количества гармонических составляющих, а также доступность сигнала, так как на многих предприятиях в настоящее время имеется возможность его регистрации даже штатными средствами без использования дополнительных датчиков и устройств. Существует большое количество отечественных и зарубежных публикаций, посвященных применению метода спектрального анализа тока статора для обнаружения повреждений в установившемся [2–4] и пусковом [5–7] режимах работы АЭД. Большинство авторов, занимающихся исследованиями в указанной области, для обнаружения дефектов обмотки ротора предлагается использовать возрастание амплитуды гармоники от фиктивной обмотки ротора (ФОР) порядка, совпадающего с числом пар полюсов электродвигателя, на нижней боковой частоте. Значение частоты данной гармоники в любой момент времени можно определить по выражению [5]

$$f_{\text{ФОР}}^p(t) = |f_c(t) (1 - 2s(t))|, \quad (1)$$

где  $f_{\text{ФОР}}^p(t)$  – нижняя боковая частота гармоники ФОР порядка, совпадающего с числом пар полюсов;  $f_c(t)$  – частота сети в момент времени  $t$ , Гц;  $s(t)$  – скольжение двигателя в момент времени  $t$ .

Вопросы обнаружения характерной гармоники в спектрах тока статора в пусковом и установившемся режимах АЭД достаточно подробно рассмотрены в имеющихся на данный момент публикациях. Однако при этом в существующих исследованиях очень мало внимания уделяется вопросам влияния преобразователя частоты (ПЧ) на результаты диагностирования. При этом использование АЭД в составе частотно-регулируемого привода находит все

большее распространение в различных отраслях промышленности, особенно на низковольтных АЭД. Очевидно, что применение ПЧ значительно изменяет поведение характерной гармоники, определяемой по (1), в спектре пускового сигнала. По этой причине требуется более детальная проработка вопросов обнаружения диагностических признаков повреждения обмоток роторов для АЭД, работающих в составе частотно-регулируемого привода.

В настоящее время имеется ряд зарубежных исследований, в которых описываются спектры сигналов тока статора АЭД, работающего с ПЧ [8, 9]. В [10] рассмотрены вопросы применения ПЧ в качестве элемента системы диагностирования АЭД. Однако следует отметить, что в условиях эксплуатации важным вопросом, требующим внимания исследователей, является настройка ПЧ при осуществлении плавного пуска.

Под настройкой преобразователя частоты понимается задание соотношения напряжения на выходе ПЧ  $U$  к частоте на выходе ПЧ  $f$ , т. е. зависимости  $U(f)$ . Если механическая характеристика нагрузки  $M(\omega)$  ( $M$  – момент на валу АЭД, Н·м,  $\omega$  – угловая частота вращения ротора, рад/с) известна, то расчет зависимости  $U(f)$  может быть выполнен на основе статической модели АЭД с учетом выбранного закона частотного управления. Пока закон частотного управления не задан, задача расчета  $U(f)$  по  $M(\omega)$  решается неоднозначно. Поэтому в практических условиях реализация того или иного закона в ПЧ заключается в выборе предустановленной настройки или задании зависимости  $U(f)$  многоточечным способом. Количество точек зависит от возможностей конкретного ПЧ.

Другим важным вопросом, требующим проработки, является исследование влияния динамической составляющей момента нагрузки, так как для ее снижения на практике используется ограничение скорости нарастания частоты напряжения на выходе ПЧ.

Исходя из вышесказанного, необходимо проанализировать влияние настроек ПЧ на спектры тока статора АЭД при наличии повреждения обмотки ротора. Полученные результаты могут быть полезны как при непосредственном проведении контроля на АЭД, работающих от ПЧ, так и в рамках рассмотрения вопросов о создании более удобных режимов для проведения контроля состояния обмоток роторов АЭД в рамках приемо-сдаточных испытаний.

**Материалы и методы.** Как уже было отмечено выше, идея применения метода спектрального анализа заключается в том, что в спектрах тока статора осуществляется поиск гармонической составляющей, частота которой в процессе пуска может быть определена по (1). Влияние частотного преобразователя заключается в том, что при увеличении частоты от 0 до 50 Гц также плавно увеличивается и величина

напряжения на выходе преобразователя. При этом хорошо известно, что изменение скорости вращения АЭД в процессе пуска определяется величиной динамического (избыточного) момента, который представляет собой разницу между вращающим моментом АЭД и моментом сопротивления агрегата. Данная зависимость описывается выражением

$$M_{\text{изб}}(t) = M_{\text{дв}}(t) - M_{\text{с}}(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad (2)$$

где  $M_{\text{изб}}(t)$  – избыточный момент агрегата в момент времени  $t$ , Н·м;  $M_{\text{дв}}(t)$  – вращающий момент АЭД в момент времени  $t$ , Н·м;  $M_{\text{с}}(t)$  – момент сопротивления агрегата в момент времени  $t$ , Н·м;  $J$  – суммарный момент инерции вала двигателя и соединенного с ним механизма, приведенный к валу двигателя, кг·м<sup>2</sup>;  $\omega$  – угловая частота вращения вала двигателя, рад/с.

При этом величина вращающего момента АЭД прямо пропорциональна квадрату приложенного напряжения в момент времени  $t$  и обратно пропорциональна угловой скорости вращения. По этой причине изменение частоты основной гармоники от фиктивной обмотки ротора на нижней боковой частоте порядка, совпадающего с числом пар полюсов (далее – гармоника ФОР), будет зависеть от тех параметров, на которые настроен ПЧ.

Для более детального исследования влияния настройки преобразователя частоты на положение в спектре гармоники ФОР были

произведены исследования на экспериментальном стенде (рис. 1).

В качестве исследуемого двигателя использован низковольтный АЭД типа АИР 71А6 1 с 3 парами полюсов мощностью 370 Вт. Предусмотрена установка двух роторов – одного исправного и одного с одним оборванным (высверленным) стержнем обмотки ротора. Пуск АЭД производился от ПЧ типа Веспер Е4-8400-010Н 2. Регистрация сигнала тока статора осуществлялась с помощью устройства сопряжения с шиной процесса ENMU 3, которое подключалось к измерительным цепям трансформаторов тока типа ЕКФ ТТЕ-А-10/5. Для преобразования среды распространения сигнала был использован медиаконвертер 4. Запись производилась на ноутбук 5.

Обработка регистрируемых сигналов на ноутбуке осуществлялась с помощью программы, разработанной в программном комплексе Matlab. В качестве инструмента для построения частотно-временных спектров (ЧВС) было использовано оконное преобразование Фурье (ОПФ), а в качестве применяемой оконной функции – окно Флэттоп, так как ее применение обеспечивает наиболее точное определение амплитуды гармоники ФОР за счет снижения влияния эффекта растекания спектра. Ширина интервалов, на которые разделяется сигнал, определяется по выражению, приведенному в [5], для получения более наглядной и плавной картинки выполняется наложение интервалов.



Рис. 1. Внешний вид экспериментального стенда: 1 – АЭД типа АИР71А6; 2 – ПЧ типа Веспер Е4-8400-010Н; 3 – ENMU; 4 – медиаконвертер; 5 – ноутбук; 6 – инкрементальный энкодер типа ЛИР158Б

В ходе проведения исследования настройка ПЧ выполнялась по 3 точкам. Зависимость  $U(f)$ , заданная в ПЧ, представлена на рис. 2.

Анализ полученных данных (рис. 2) показал, что имеется три линейных участка установленной зависимости  $U(f)$ . На участке I при увеличении частоты от 0 до 25 Гц величина питающего напряжения не изменяется и составляет  $U_1$ . На участке II при увеличении частоты от 25 до 49 Гц напряжение линейно возрастает от  $U_1$  до  $U_2$ , на участке III осуществляется подъем напряжения с  $U_2$  до 380 В при изменении частоты от 49 до 50 Гц.

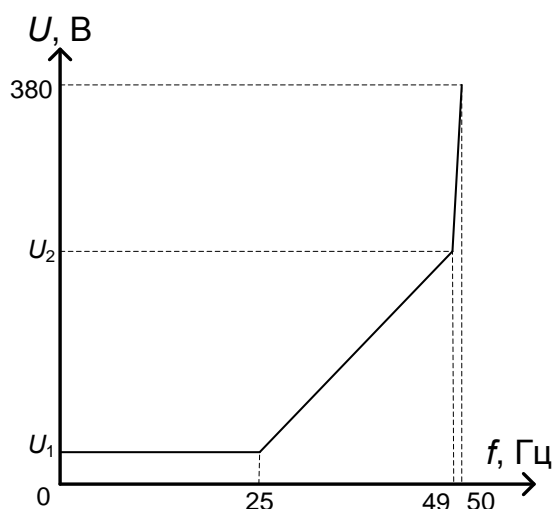


Рис. 2. Заданная настройка многоточечной зависимости  $U(f)$  ПЧ

В ходе исследования было проанализировано влияние на изменение частоты гармоники ФОР трех параметров:

- 1) значения напряжения  $U_1$  (были заданы три различных значения – 20, 25 и 30 В);
- 2) значения напряжения  $U_2$  (были заданы два различных значения – 45 и 85 В);
- 3) значения времени нарастания частоты от 0 до 70 Гц (были заданы три различных значения – 10, 30 и 60 с для оценки влияния динамической составляющей момента двигателя).

Также для подтверждения результатов, а именно для доказательства того, что искомые гармоники в спектрах действительно являются гармониками ФОР, производилось измерение скорости вращения с помощью инкрементального энкодера 6 типа ЛИР-158Б для дальнейшего определения скольжения и расчета частот по (1).

**Результаты.** Первоначально были проанализированы ЧВС сигналов тока статора при изменении напряжений  $U_1$  и  $U_2$ . Время нарастания частоты задавалось неизменным и равным 30 с. Полученные частотно-временные спектры представлены на рис. 3–8 при наличии обрыва стержня обмотки ротора АЭД, а на рис. 9 и 10 приведены примеры спектров исправного АЭД при различной настройке ПЧ. ЧВС представляют собой трехмерные спектры, на которых по горизонтальной оси отмечено время от начала регистрации сигнала, по вертикальной оси – частоты гармоник, по цветовой шкале справа – амплитуды гармоник. В случае, если амплитуда гармоники превышает предельное значение на шкале, она будет отображаться светлым тоном.

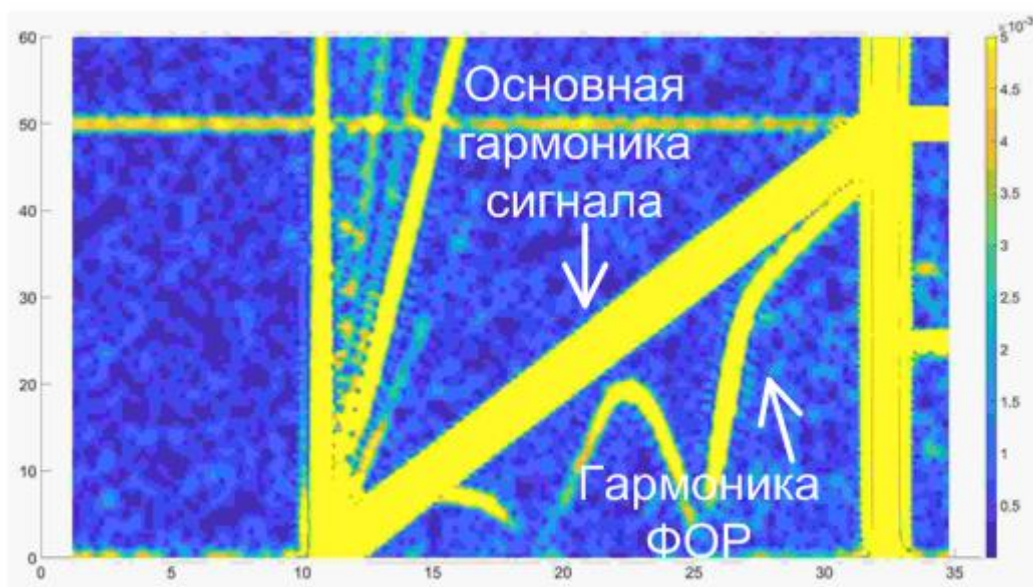


Рис. 3. ЧВС АЭД с одним оборванным стержнем обмотки ротора с ПЧ при  $U_1 = 20$  В,  $U_2 = 85$  В, скорости нарастания частоты 30 с

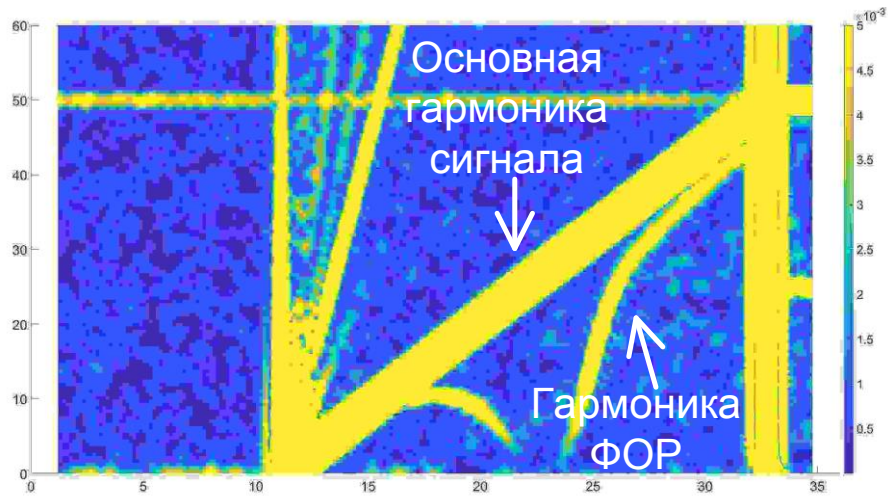


Рис. 4. ЧВС АД с одним оборванным стержнем обмотки ротора с ПЧ при  $U_1 = 25$  В,  $U_2 = 85$  В, скорости нарастания частоты 30 с

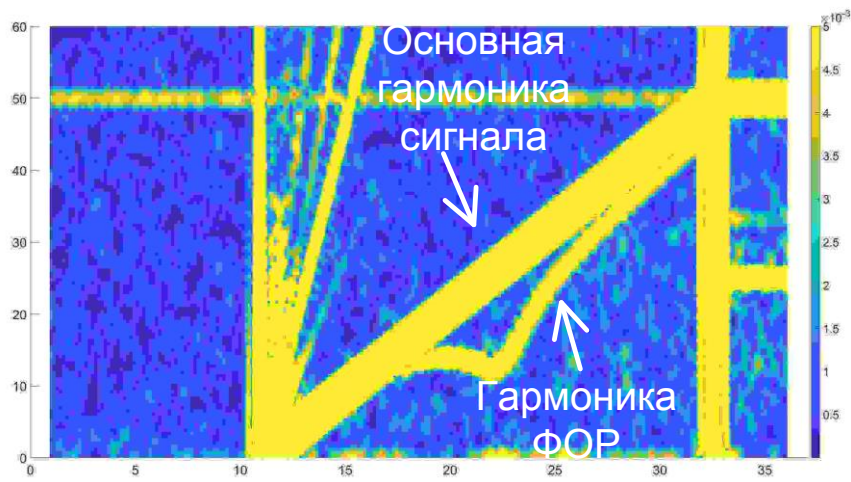


Рис. 5. ЧВС АД с одним оборванным стержнем обмотки ротора с ПЧ при  $U_1 = 30$  В,  $U_2 = 85$  В, скорости нарастания частоты 30 с

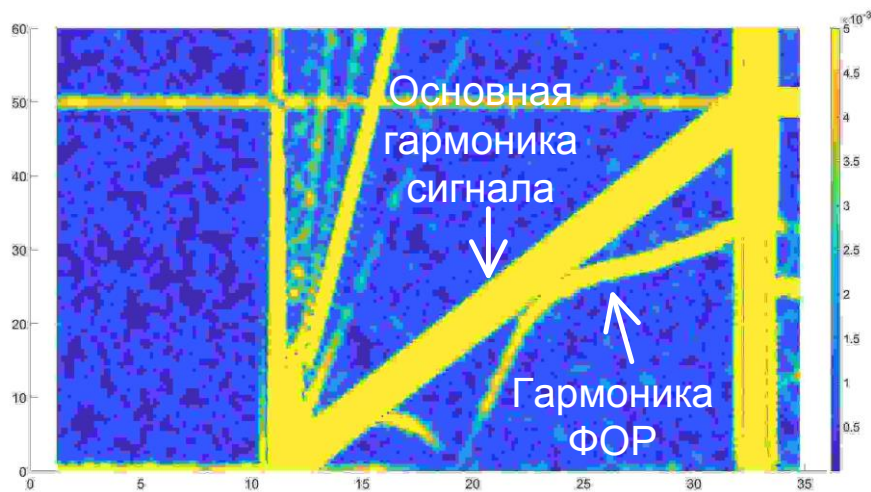


Рис. 6. ЧВС АД с одним оборванным стержнем обмотки ротора с ПЧ при  $U_1 = 20$  В,  $U_2 = 45$  В, скорости нарастания частоты 30 с

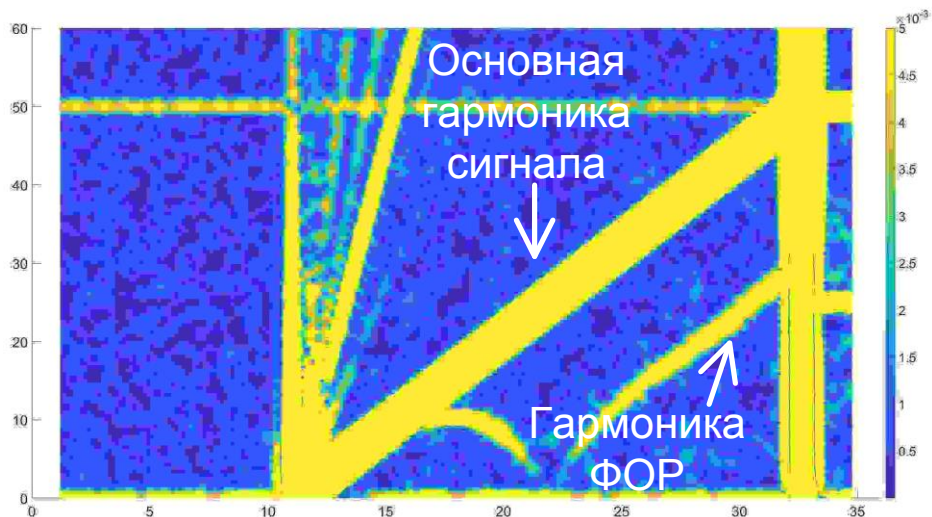


Рис. 7. ЧВС АЭД с одним оборванным стержнем обмотки ротора с ПЧ при  $U_1 = 25$  В,  $U_2 = 45$  В, скорости нарастания частоты 30 с

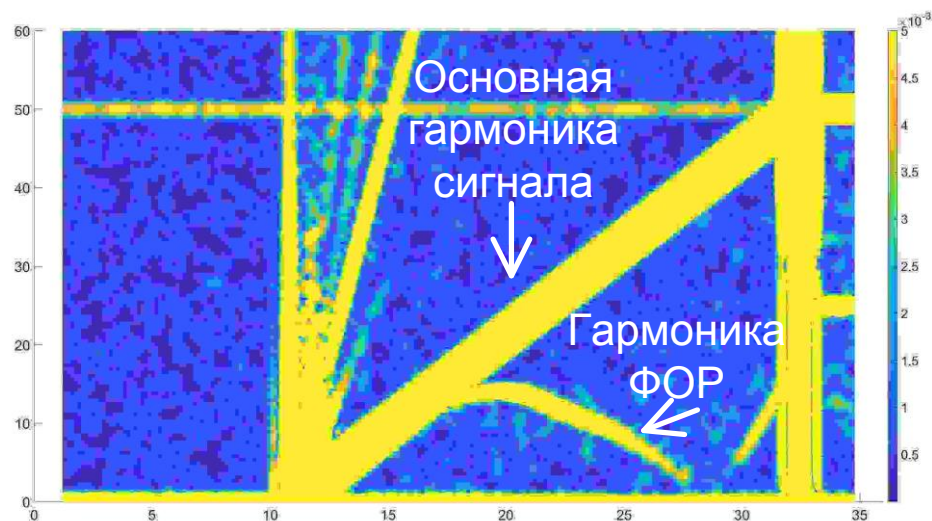


Рис. 8. ЧВС АЭД с одним оборванным стержнем обмотки ротора с ПЧ при  $U_1 = 30$  В,  $U_2 = 45$  В, скорости нарастания частоты 30 с

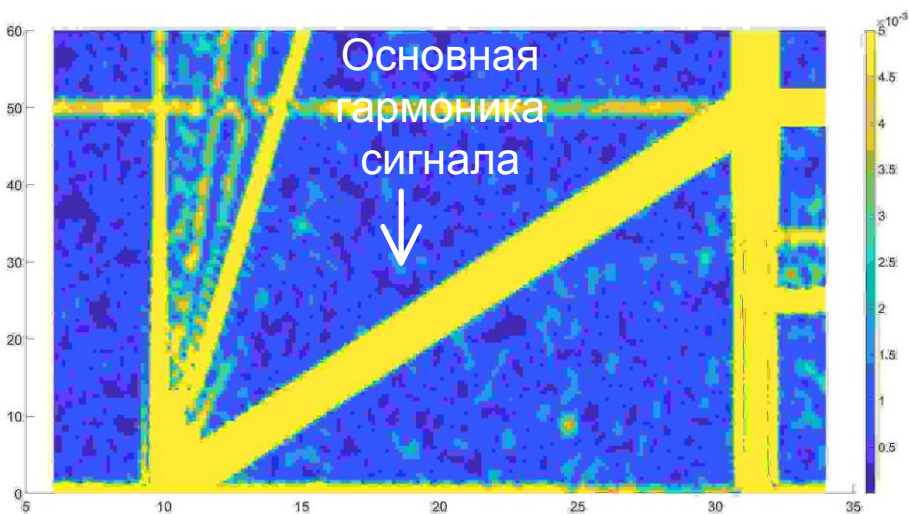


Рис. 9. ЧВС АЭД с исправной обмоткой ротора с ПЧ при  $U_1 = 20$  В,  $U_2 = 45$  В, скорости нарастания частоты 30 с

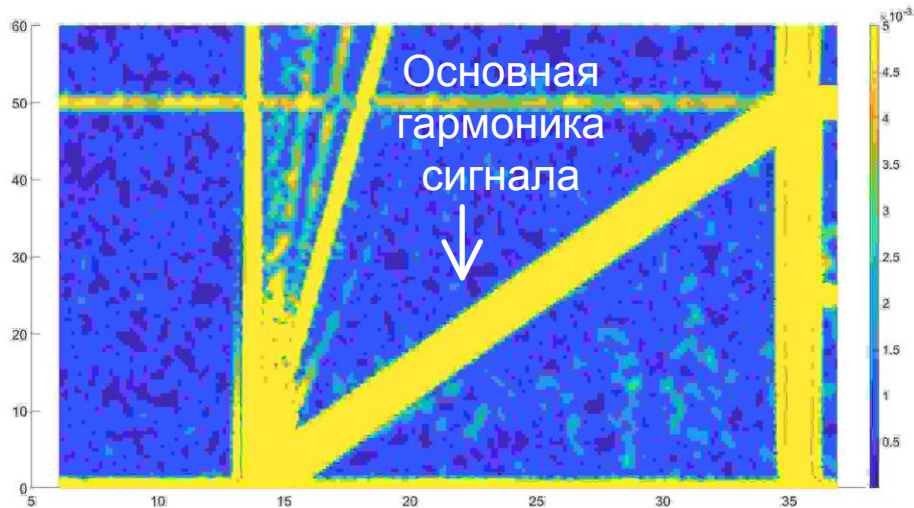


Рис. 10. ЧВС АЭД с исправной обмоткой ротора с ПЧ при  $U_1 = 30$  В,  $U_2 = 85$  В, скорости нарастания частоты 30 с

Проанализируем влияние напряжения  $U_1$  на поведение гармоники ФОР в спектре сигнала. Анализ полученных спектров (рис. 3–5) показывает, что частота данной гармоники с течением времени изменяется совершенно по-разному. При значении напряжения  $U_1 = 20$  В частота гармоники дважды снижается до 0 Гц и возвращается к основной гармонике сигнала, при напряжении  $U_1 = 25$  В снижение частоты практически до 0 происходит один раз, а при напряжении  $U_1 = 30$  В частота снижается незначительно и за весь процесс пуска не опускается ниже 10 Гц.

Объясняется данная зависимость изменением вращающего момента АЭД. В начале пуска АЭД имеет высокий вращающий момент из-за низкой частоты на выходе ПЧ (скольжение будет иметь значение, близкое к 0).

В дальнейшем частота на выходе ПЧ, а также синхронная частота вращения АЭД возрастают, а напряжение не меняется до частоты 25 Гц. Это приводит к снижению вращающего момента, при этом в первом случае ( $U_1 = 20$  В) скорость вращения снижается почти до 0, т. е. скольжение увеличивается от 0 практически до 1, вследствие чего частота гармоники ФОР сначала уменьшается (становится равной 0 при  $s = 0,5$ ), а потом возрастает. Во втором случае ( $U_1 = 25$  В) из-за повышения напряжения скольжение возрастает уже не до 1, а до 0,5, вследствие чего частота гармоники ФОР падает до 0 приблизительно в момент достижения частоты 25 Гц на выходе преобразователя. Наконец, в третьем случае ( $U_1 = 30$  В) скольжение увеличивается незначительно, поэтому и частота гармоники ФОР снижается незначительно относительно основной гармоники сигнала.

После увеличения частоты на выходе преобразователя до значений выше 25 Гц происходит линейный подъем напряжения, вследствие чего вращающий момент снова начинает увели-

чиваться и двигатель вновь разгоняется до скорости, близкой к синхронной, а скольжение уменьшается почти до 0.

Таким образом, очевидно, что чем выше напряжение на низких частотах ПЧ, тем более близко гармоника ФОР будет находиться к основной гармонике сигнала и тем сложнее будет ее обнаружить в спектре. И, наоборот, при низких напряжениях в начале пуска частота гармоники ФОР будет падать практически до 0 и ее будет легко обнаружить в ЧВС.

Проанализируем влияние напряжения  $U_2$  на форму полученной кривой изменения частоты гармоники ФОР с течением времени. Сравнивая пары рис. 3 и 6, 4 и 7, 5 и 8, можно отчетливо видеть, что на первом участке при изменении частоты на выходе преобразователя от 0 до 25 Гц изменения ЧВС не будет. При этом во второй половине ЧВС возникают существенные изменения, потому что повышение напряжения до 45 В не обеспечивает достаточный вращающий момент для увеличения скорости вращения двигателя до значений, близких к синхронной. По этой причине частота гармоники ФОР приближается к частоте основной гармоники сигнала только по достижении частоты 49 Гц на выходе преобразователя, где напряжение начинает увеличиваться до 380 В.

Сравнивая спектры АЭД при наличии и отсутствии оборванных стержней обмотки ротора, можно сделать однозначный вывод, что отмеченная гармоника действительно является гармоникой ФОР, поскольку она возникает только при наличии обрыва. При этом ЧВС тока статора во всех рассмотренных случаях при исправной обмотке ротора АЭД практически идентичны друг другу (рис. 9 и 10).

Также для доказательства представленной выше теории, объясняющей изменение частоты гармоники ФОР с течением времени, было

произведено сопоставление частот в полученных ЧВС АЭД с оборванным стержнем при различной настройке ПЧ с расчетными значениями, определяемыми по (1). Значение частоты на выходе преобразователя легко оценивается в любой момент времени, а значение скольжения определяется по скорости вращения, кото-

рая регистрировалась с помощью энкодера. Результаты сравнения сведены в таблицу, их анализ показывает, что расчетные и экспериментальные значения частоты гармоники ФОР в спектрах совпадают с достаточно высокой точностью, что подтверждает сделанные ранее выводы.

#### Значения частот гармоники ФОР в спектре АЭД с одним оборванным стержнем и расчетные значения в различные моменты времени

Параметры ПЧ	Расчетная частота гармоники ФОР в момент времени				Фактическая частота гармоники ФОР в ЧВС в момент времени			
	18 с	21 с	24 с	27 с	18 с	21 с	24 с	27 с
$U_1 = 20 \text{ В}$ , $U_2 = 85 \text{ В}$	4,218	13,124	12,656	27,656	1,6462	-12,9374	-13,0497	29,04288
$U_1 = 25 \text{ В}$ , $U_2 = 85 \text{ В}$	10,781	5,625	5,156	29,531	10,36328	3,581	5,30004	30,08804
$U_1 = 30 \text{ В}$ , $U_2 = 85 \text{ В}$	12,973	13,5135	20,5405	31,3514	12,84324	13,47032	21,10266	31,58918
$U_1 = 20 \text{ В}$ , $U_2 = 45 \text{ В}$	4,583	11,667	24,009	27,917	4,46704	-11,867	-24,583	-27,667
$U_1 = 25 \text{ В}$ , $U_2 = 45 \text{ В}$	10	4,583	9,583	17,083	10,24996	4,683	-9,35004	-17,083
$U_1 = 30 \text{ В}$ , $U_2 = 45 \text{ В}$	13,333	13,333	9,583	4,167	12,78304	13,24996	9,783	4,2

На рис. 11–14 представлены ЧВС АЭД с одним оборванным стержнем обмотки ротора при изменении времени нарастания частоты, а именно при снижении его до 10 с и при увеличении до 60 с. В качестве примера приведены ЧВС для двух случаев настройки параметров ПЧ: 1) при значениях напряжения  $U_1 = 30 \text{ В}$ ,  $U_2 = 85 \text{ В}$ , поскольку в этом случае скорость вращения АЭД в процессе пуска наиболее велика; 2) при  $U_1 = 20 \text{ В}$ ,  $U_2 = 45 \text{ В}$ , когда скорость АЭД наименьшая и падает практически до 0.

Проанализируем полученные ЧВС. Сравнивая форму кривой изменения частоты ФОР с течением времени в процессе частотно-регулируемого пуска при  $U_1 = 30 \text{ В}$ ,  $U_2 = 85 \text{ В}$  (рис. 5, 11, 12),

можно сделать вывод о том, что при достаточно высоких значениях напряжения, а следовательно, вращающего момента АЭД, форма кривой практически не изменяется (за исключением длительности). В то же время при низком напряжении (рис. 6, 13, 14) форма кривой изменяется значительно, поскольку двигатель не успевает разогнаться при малом времени подъема напряжения. По этой причине можно сделать однозначный вывод, что на начальных этапах пуска при малом напряжении на выходе преобразователя время нарастания частоты также может являться значимым фактором, определяющим изменение частоты гармоники ФОР в ЧВС тока статора.

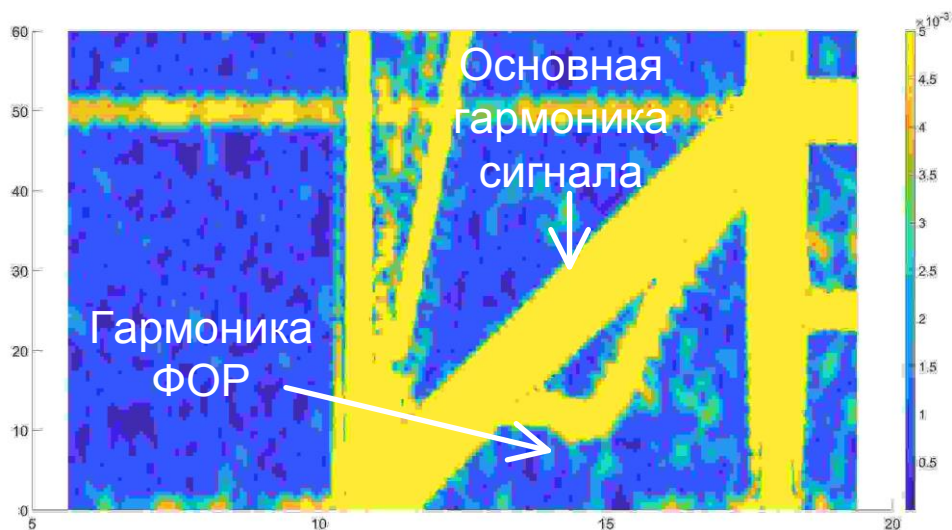


Рис. 11. ЧВС АЭД с одним оборванным стержнем обмотки ротора с ПЧ при  $U_1 = 30 \text{ В}$ ,  $U_2 = 85 \text{ В}$ , скорости нарастания частоты 10 с

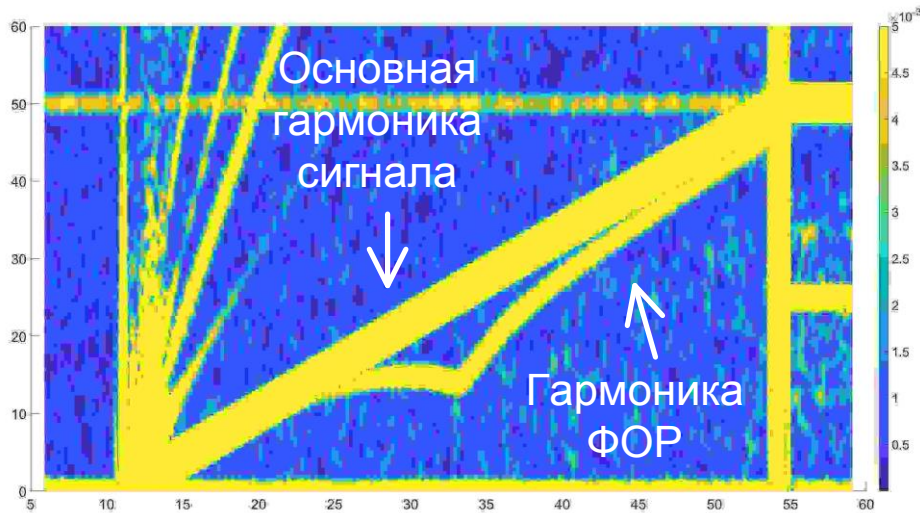


Рис. 12. ЧВС АЭД с одним оборванным стержнем обмотки ротора с ПЧ при  $U_1 = 30$  В,  $U_2 = 85$  В, скорости нарастания частоты 60 с

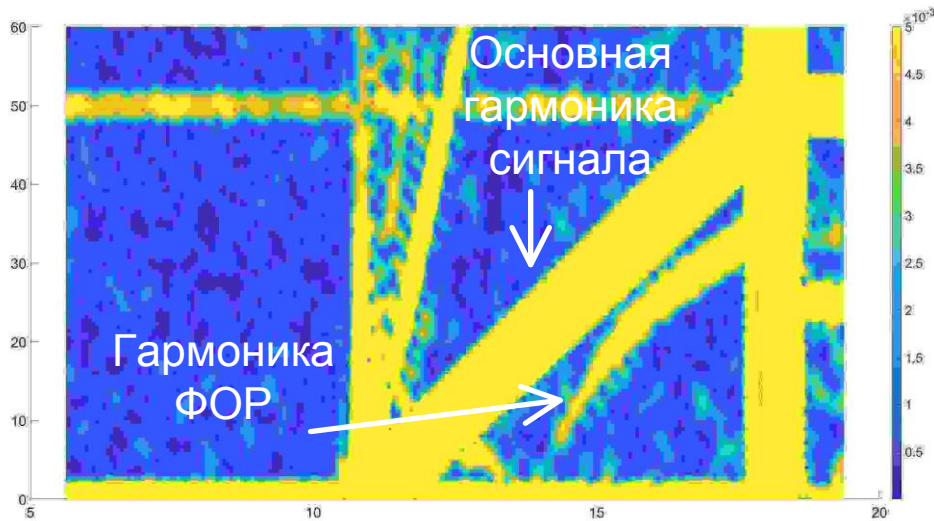


Рис. 13. ЧВС АЭД с одним оборванным стержнем обмотки ротора с ПЧ при  $U_1 = 20$  В,  $U_2 = 45$  В, скорости нарастания частоты 10 с

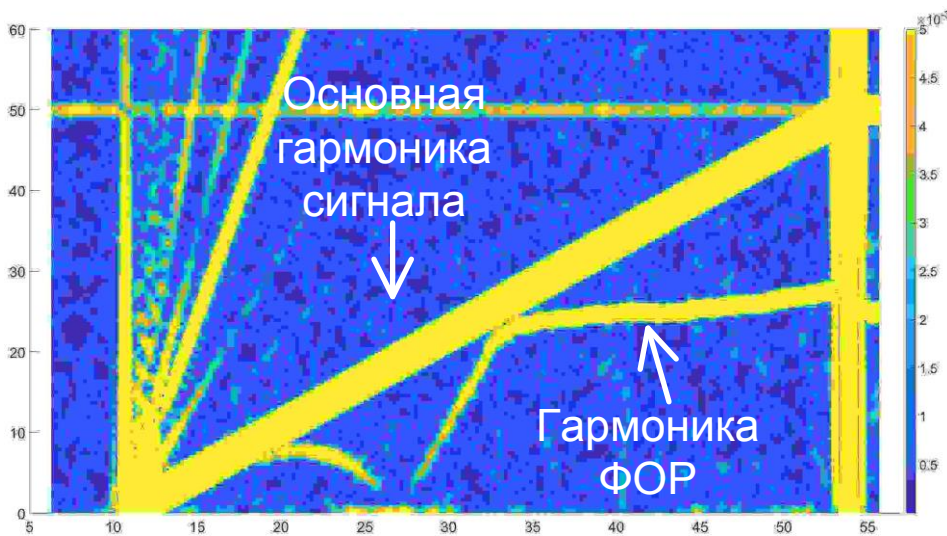


Рис. 14. ЧВС АЭД с одним оборванным стержнем обмотки ротора с ПЧ при  $U_1 = 20$  В,  $U_2 = 45$  В, скорости нарастания частоты 60 с

Проведенные исследования на АЭД с исправной обмоткой ротора также подтвердили отсутствие гармоники ФОР в спектре и при другом времени нарастания частоты в ПЧ.

**Выводы.** Главный вывод, который можно сделать по результатам проведенных исследований, заключается в том, что при различной настройке ПЧ поведение гармоники ФОР в ЧВС тока статора в процессе частотно-регулируемого пуска может значительно отличаться от того, которое прописано в существующих публикациях ([5–6, 8–10]).

Нужно отметить, что полученные результаты с точки зрения проведения диагностирования АЭД можно рассматривать с разных сторон. С одной стороны, в процессе эксплуатации АЭД, работающих в составе частотно-регулируемого привода, применение методов диагностирования состояния их обмоток роторов усложняется, поскольку при проведении контроля необходимо знать настройку преобразователя частоты и изменение скорости вращения АЭД с течением времени, в противном случае можно не обнаружить гармонику ФОР в спектре или ошибочно принять за нее другую гармонику.

С другой стороны, полученные результаты могут быть использованы в рамках проведения контроля технического состояния обмоток роторов в процессе приемо-сдаточных испытаний. Это обусловлено тем, что, снижая величины напряжения до подходящих значений, можно получить кривую изменения гармоники ФОР, которая располагалась бы «далеко» от основной гармоники сигнала и которую было бы легко обнаружить в ЧВС тока статора. Это значительно упростило бы процесс обнаружения повреждения на низковольтных АЭД с непродолжительными пусками. В связи с этим вопросы настройки ПЧ для проведения испытаний АЭД в рамках приемо-сдаточных испытаний планируется рассмотреть в рамках дальнейших исследований, в том числе и на математических моделях АЭД.

#### Список литературы

1. **Siddiqui K.M., Sahay K., Giri V.K.** Health Monitoring and Fault Diagnosis in Induction Motor – A Review // *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. – 2014. – Vol. 3, Issue 1. – P. 6549–6565.
2. **Thomson W.T., Gilmore R.J.** Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives – Fundamentals, Data Interpretation and Industrial Case Histories // *Proceedings of 32nd Turbomachinery Symposium*, Texas, A&M University. – USA, September, 2003. – P. 145–156.
3. **Седунин А.М., Афанасьев Д.О., Сидельников Л.Г.** Контроль технического состояния асинхронных двигателей на основе спектрального анализа потребляемого тока // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета*. – 2013. – Вып. 12. – С. 15–18.

4. **Thakur A., Wadhvani S., Wadhvani A.K.** Motor Current Signature Analysis as a Tool for Induction Machine Fault Diagnosis // *International Journal of Computer Science and Information Technology Research*. – 2015. – Vol. 3, Issue 3. – P. 309–313.

5. **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.

6. **Instantaneous** Frequency of the Left Sideband Harmonic During the Start-Up Transient: A New Method for Diagnosis of Broken Bars / M. Pineda-Sanchez, M. Riera-Guasp, J.A. Antonino-Daviu, et al. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2009. – Vol. 56, Issue 11. – P. 4557–4570.

7. **Сарваров А.С., Купцов В.В.** Диагностика асинхронных двигателей в нестационарных режимах // *Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр.* – Магнитогорск: МГТУ, 2009. – Вып. 16. – С. 144–152.

8. **Diagnosis** of Broken Rotor Bars during the Startup of Inverter-Fed Induction Motors Using the Dragon Transform and Functional ANOVA / V. Fernandez-Cavero, L.A. Garcia-Escudero, J. Pons-Llinares, et al. // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, Issue 9. – P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/app11093769> (Accessed 24 February 2025).

9. **Rotor** Unbalance and Broken Rotor Bar Detection in Inverter-Fed Induction Motors at Start-up and Steady-State Regimes by High-Resolution Spectral Analysis / R.J. Romero-Troncoso, A. Garcia-Perez, D. Morfífigo-Sotelo, et al. // *Electric Power Systems Research*. – 2016. – Vol. 133. – P. 142–148.

10. **Применение** преобразователя частоты для диагностики асинхронных двигателей методом спектрального анализа тока статора / М.А. Захаров, А.С. Страхов, Е.М. Новоселов и др. // *Вестник ИГЭУ*. – 2025. – Вып. 3. – С. 46–60.

#### References

1. Siddiqui, K.M., Sahay, K., Giri, V.K. Health monitoring and fault diagnosis in induction motor – A review. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2014, vol. 3, issue 1, pp. 6549–6565.
2. Thomson, W.T., Gilmore, R.J. Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives – Fundamentals, data interpretation and industrial case histories. *Proceedings of the 32nd Turbomachinery Symposium*. Texas, USA: A&M University, 2003, pp. 145–156.
3. Sedunin, A.M., Afanas'ev, D.O., Sidel'nikov, L.G. Kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnykh dvigateley na osnove spektral'nogo analiza potrebyaemogo toka [Technical condition monitoring of induction motors based on spectral analysis of supply current]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*, 2013, issue 12, pp. 15–18.
4. Thakur, A., Wadhvani, S., Wadhvani, A.K. Motor current signature analysis as a tool for induction machine fault diagnosis. *International Journal of Computer Science and Information Technology Research*, 2015, vol. 3, issue 3, pp. 309–313.
5. 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 [A method for monitoring the condition of rotor windings in induction motors during startup using stator current]. *Defektoskopiya*, 2020, no. 8, pp. 49–55.

6. Pineda-Sanchez, M., Riera-Guasp, M., Antonino-Daviu, J.A., Roger-Folch, J., Perez Cruz, I., Puche-Panadero, R. Instantaneous frequency of the left side-band harmonic during the start-up transient: A new method for diagnosis of broken bars. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, issue 11, pp. 4557–4570.

7. Sarvarov, A.S., Kuptsov, V.V. Diagnostika asinkhronnykh dvigateley v nestatsionarnykh rezhimakh [Diagnosis of induction motors in non-stationary regimes]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы»* [Interuniversity collection of scientific papers “Electrical Systems and Complexes”]. Magnitogorsk: MSTU, 2009, issue 16, pp. 144–152.

8. Fernandez-Cavero, V., Garcia-Escudero, L.A., Pons-Llinares, J., Fernández, M.A., Duque, O., Moríñigo-Sotelo, D. Diagnosis of broken rotor bars during the startup of inverter-fed induction motors using the Dragon transform and functional ANOVA. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, issue 9, pp. 1–12. (Accessed: February 24, 2025).

9. Romero-Troncoso, R.J., Garcia-Perez, A., Moríñigo-Sotelo, D., Duque, O., Osornio-Rios, R. Ibarra-Manzano, M.A. Rotor unbalance and broken rotor bar detection in inverter-fed induction motors at start-up and steady-state regimes by high-resolution spectral analysis. *Electric Power Systems Research*, 2016, vol. 133, pp. 142–148.

10. Zakharov, M.A., Strakhov, A.S., Novoselov, E.M., Polkoshnikov, D.A., Sulynenkov, I.N., Skorobogatov, A.A. Primenenie preobrazovatelya chastoty dlya diagnostiki asinkhronnykh dvigateley metodom spektral'nogo analiza toka statora [Application of frequency converters for diagnosis of induction motors using stator current spectral analysis]. *Vestnik IGEU*, 2025, issue 3, pp. 46–60.