

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.333, 621.314.26

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

Илья Николаевич Сулыненков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: sulynenkov.in@ispu.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

Применение преобразователя частоты для диагностики асинхронных двигателей методом спектрального анализа тока статора

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время одним из наиболее перспективных методов контроля повреждений обмоток роторов асинхронных двигателей является метод спектрального анализа тока статора в установившемся и пусковом режимах работы. Однако практически все подобные исследования проведены без учета преобразователей частоты, которые часто используются в составе приводов. Преобразователи частоты могут использоваться для увеличения продолжительности пуска асинхронного двигателя и изменения величины напряжения и частоты, что позволяет добиться более достоверных результатов диагностики. В связи с этим актуальным

является исследование возможностей применения преобразователя частоты для контроля состояния обмоток ротора двигателей по току статора.

Материалы и методы. Для проведения исследований разработан экспериментальный стенд. Исследования проведены на асинхронном двигателе типа АИР71А6 при исправной обмотке ротора и наличии одного оборванного стержня, в качестве силового преобразователя использован преобразователь частоты Веспер Е4-8400-010Н. Для регистрации тока статора с трансформаторов тока использовано устройство ENMU. Обработка сигналов тока статора осуществлена с помощью оконного преобразования Фурье с использованием оконной функции Флэттоп.

Результаты. Получены и проанализированы частотно-временные спектры сигналов тока статора при наличии и отсутствии обрыва стержня обмотки ротора асинхронного двигателя. Преобразователь частоты использован для увеличения продолжительности пуска и изменения режимных параметров в процессе работы двигателя. Обнаружена характерная для повреждения гармоническая составляющая при наличии обрыва, что подтверждает возможность применения преобразователя для диагностики двигателей.

Выводы. Показано, что преобразователям частоты в процессе диагностики нужно уделять внимание не только как возможному источнику помех и искажения диагностической информации, но и как инструменту для получения более достоверных результатов о состоянии обмоток роторов асинхронных двигателей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, преобразователь частоты, спектральный анализ, оконное преобразование Фурье, ток статора, обрыв стержней ротора

Mikhail Alekseevich Zakharov

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Electric Drive 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

Evgeniy 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

Ilya Nikolaevich Sulynenkov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Electrical Stations, Substations and Diagnostics of Electrical Equipment Department, Russia, Ivanovo, e-mail: sulynenkov.in@ispu.ru

Andrey Aleksandrovich Skorobogatov

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

Application of frequency converter to examine induction motors using spectral analysis method of stator current

Abstract

Background. Currently, one of the most promising methods to monitor damage of the rotor windings of induction motors is the method of spectral analysis of the stator current in steady-state and starting modes of operation. However, almost all such studies have been conducted without considering frequency converters, which are commonly used in drive systems. Frequency converters can be used to increase the starting time of an induction motor and change the voltage and frequency values, which will allow achieving more reliable diagnostic results. Therefore, it is relevant to study the possibilities to use a frequency converter to monitor the condition of the rotor windings of motors based on the stator current.

Materials and methods. A test bench has been developed for the research. The study has been conducted based on an induction motor of the AIR71A6 type with a fault-free rotor winding and one broken rod. A Vesper E4-8400-010H frequency converter has been used as a power converter. The ENMU device has been used to record the stator current from the current transformers. The stator current signals have been processed using the short-time Fourier transform with the Flat-top window function.

Results. The frequency-time spectra of the stator current signals have been obtained and analyzed with and without a breakage in the rotor winding rod of the induction motor. The frequency converter has been used to increase the start-up duration and change the operating parameters during the motor operation. A harmonic component characteristic of damage has been detected in case of a break, which confirms the possibility to use the converter for motor diagnostics.

Conclusions. The results of the research have shown that in diagnostic process frequency converters are not only a possible source of interference and distortion of diagnostic information, but also a tool to obtain more reliable results on the condition of the rotor windings of induction motors.

Key words: induction motor, frequency converter, spectral analysis, short-time Fourier transform, stator current, rotor bar breakage

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.046-060

Состояние вопроса. Хорошо известно, что в настоящее время асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутыми обмотками роторов активно применяются в различных областях промышленности в качестве приводов механизмов. В случае отказа АД может потребоваться его дорогостоящий ремонт. Также отказы ответственных двигателей могут привести и к нарушению технологического процесса на предприятии. По этой причине одной из задач современной электроэнергетики является разработка новых и совершенствование существующих методов диагностирования АД для своевременного обнаружения неисправностей.

Одной из распространенных причин отказов АД является обрыв стержней короткозамкнутых обмоток роторов. В соответствии с [1, 2], доля отказов, связанных с повреждениями обмоток роторов, составляет около 10 % от общего числа отказов. Одним из наиболее перспективных методов для выявления обрывов стержней обмотки ротора АД является спектральный анализ сигналов. При этом наиболее часто в работах предлагается использовать сигнал тока статора, так как в настоящее время он является одним из наиболее удобных и доступных для регистрации в процессе эксплуатации, а также несет в себе большое количество диагностической информации о состоянии двигателя. Идея метода заключается в том, что при возникновении повреждения обмотки ротора в спектрах диагностических сигналов проявляется ряд гармонических составляющих, которые практически не видны при отсутствии повреждений. Данные гармоники принято называть гармониками от фиктивной обмотки ротора. Однако в сигнале тока статора из этих гармоник в спектрах отчетливо проявляется только гармоника от фиктивной обмотки ротора порядка, совпадающего с числом пар полюсов p , на нижней боковой частоте [3] (далее для краткости будем называть ее гармоникой ФОР). Значение частоты гармоники ФОР в сигнале тока статора в любой момент времени t может быть определено по выражению

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

где f_c – частота сети, Гц; $s(t)$ – скольжение двигателя в момент времени t .

На данный момент эти методы достаточно хорошо изучены, имеется большое количество публикаций по обнаружению обрывов стержней АД как в пусковом (например, в [3, 4]), так и в

установившемся режимах работы (например, в [5–7]) на основе спектрального анализа тока статора. Однако обычно в работах не учитывается тот факт, что в настоящее время все чаще в составе приводов применяются преобразователи частоты (ПЧ) с двойным преобразованием энергии, построенные на базе транзисторов и тиристорных, служащих для регулирования частоты вращения двигателей и создания условий для плавного пуска.

На сегодняшний день существует небольшое количество публикаций, посвященных вопросам влияния ПЧ на результаты диагностики АД. Можно выделить работы [8–11], где описываются особенности проведения контроля АД с ПЧ на основе метода спектрального анализа тока статора при плавном нарастании частоты, [12], где авторами предлагается производить анализ огибающей сигнала тока статора в целях диагностики АД с ПЧ, а также [13] доказано отсутствие существенного влияния ПЧ на результаты диагностики по внутреннему магнитному полю.

Однако при этом не уделяется внимания вопросам непосредственного применения самого ПЧ в качестве инструмента для обеспечения возможности проведения контроля на основе анализа спектра тока статора и увеличения достоверности получаемых результатов. В [14] предлагается подобная идея, но подходящая лишь для АД мощностью до 30 кВт и при иных видах повреждений. При этом именно в целях анализа спектра применение ПЧ имеет несколько неоспоримых преимуществ:

1) возможность изменения частоты и действующего значения питающего напряжения при пуске и функционировании АД;

2) возможность обеспечения плавного пуска АД в течение продолжительного времени.

Таким образом, целью настоящего исследования является описание возможностей применения ПЧ для обнаружения повреждений обмоток роторов АД на основе метода спектрального анализа тока статора и экспериментальное их подтверждение.

Материалы и методы. При проведении контроля методом спектрального анализа тока статора возникают следующие основные проблемы:

1) в установившемся режиме работы разница частот между основной гармоникой сигнала (f_c в выражении (1)) и значением частоты гармоники ФОР ($f_{\text{ФОР}}^p$), составляет $2 \cdot s \cdot f_c$. Хорошо известно, что при номинальном напряжении

величина скольжения будет близка к 0, поэтому две указанные гармоники будут располагаться в спектре очень близко друг к другу (будут иметь очень близкие частоты), что значительно усложняет процесс контроля. При этом чем ниже нагрузка двигателя, тем меньше будет значение скольжения и амплитуды гармоники ФОР, поэтому необходимо достаточно большое время регистрации сигнала, чтобы можно было выявить в спектре данную гармонику, и принятие мер для снижения последствий эффекта растекания спектра [15];

2) в пусковом режиме скольжение изменяется от 1 до 0, поэтому искомую гармонику обнаружить значительно проще, однако для АД малой мощности время пуска очень мало. В [3] показано, что для возможности проведения контроля в режиме пуска его длительность должна составлять не менее 0,8 с, что часто не выполняется.

Исходя из сказанного выше, рассмотрим три способа применения преобразователя частоты:

– во-первых, изменение значения частоты и питающего напряжения в процессе эксплуатации. Идея заключается в том, что при снижении питающего напряжения будет снижаться также и вращающий момент АД, поэтому и значение скольжения будет возрастать, вследствие чего увеличится разница частот между основной гармоникой сигнала и гармоникой ФОР, что позволит легко обнаружить гармонику ФОР в спектре и более точно определить ее амплитуду;

– во-вторых, осуществление пуска на пониженном напряжении. Как уже было сказано, снижение напряжения приведет к снижению вращающего момента АД, вследствие чего можно значительно увеличить продолжительность пуска, при этом частота в течение пуска изменяться не будет;

– в-третьих, имеется возможность обеспечения плавного пуска, когда в процессе пуска будет изменяться не только действующее значение питающего напряжения, но и значение частоты от 0 до 50 Гц, при этом время подъема частоты также можно регулировать.

Для доказательства возможности применения ПЧ указанным образом были проведены исследования на экспериментальном стенде, фотографии и более детальное описание которого приведены в [13]. Эксперименты проводились на низковольтном АД типа АИР 71А6 (1) мощностью 370 Вт с 3 парами полюсов при использовании двух различных роторов – один с исправной обмоткой, второй с одним оборванным (высверленным) стержнем. В качестве преобразователя частоты был использован Веспер Е4-8400-010Н. Регистрация сигнала тока статора осуществлялась с помощью устройства сопряжения с шиной процесса ENMU, которое подключалось к измерительным цепям трансформаторов тока типа ЕКФ ТТЕ-А-10/5. Для преобразования среды

распространения сигнала был использован медиаконвертер. Запись производилась на ноутбук с дальнейшей обработкой сигналов в программном комплексе Matlab на основе оконного преобразования Фурье. Для более достоверного определения амплитуд и снижения эффекта растекания спектра в качестве оконной функции использовано окно Флэттоп.

Было запланировано два опыта, для которых характеристика $U(f)$, настроенная в преобразователе частоты, представлена на рис. 1. Анализ этой характеристики показывает, что при установке значения частоты 49 Гц напряжение, подаваемое на АД, будет равно 33 В, а увеличение частоты до 50 Гц приведет к возрастанию напряжения до номинальной величины 380 В. Это сделано для возможности регулирования величины напряжения практически без изменения частоты.

В ходе первого опыта изменение частоты в переходных режимах производилось практически мгновенно.

Порядок проведения опыта №1:

- 1) пуск АД на пониженном напряжении (частота 49 Гц, напряжение 33 В);
- 2) работа АД в установившемся режиме с частотой 49 Гц и напряжением 33 В около 10 с;
- 3) подъем частоты до 50 Гц и напряжения до 380 В;
- 4) работа АД в установившемся режиме с частотой 50 Гц и напряжением 380 В в течение 10 с;
- 5) снижение частоты до 49 Гц и напряжения до 33 В;
- 6) работа АД в установившемся режиме с частотой 49 Гц и напряжением 33 В в течение 10 с;
- 7) подъем частоты до 50 Гц и напряжения до 380 В;
- 8) работа АД в установившемся режиме с частотой 50 Гц и напряжением 380 В в течение 10 с;
- 9) отключение преобразователя (снижение частоты и напряжения до 0).

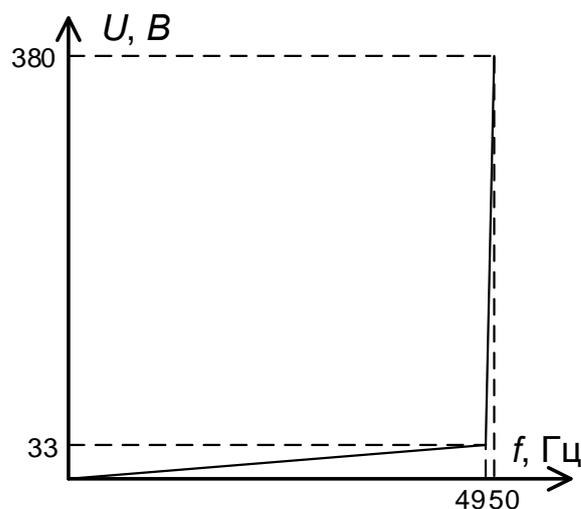


Рис. 1. Зависимость $U(f)$, выставленная в преобразователе частоты

В ходе второго опыта осуществлялось плавное изменение частоты (изменение частоты от 0 до 50 Гц в течение 10 с). При этом частота изменялась плавно не только при пуске АД, но и при изменении режима работы. Идея опыта заключалась в изучении возможности применения для диагностики пуска АД от ПЧ с плавным нарастанием частоты.

Порядок проведения опыта №2:

- 1) пуск с плавным увеличением частоты от 0 до 50 Гц в течение 30 с (напряжение изменялось в соответствии с приведенной на рис. 1 характеристикой);
- 2) работа АД в установившемся режиме с частотой 50 Гц и напряжением 380 В в течение 10 с;
- 3) плавное снижение частоты с 50 до 30 Гц;
- 4) работа АД в установившемся режиме с частотой 30 Гц и напряжением 20 В в течение 10 с;

- 5) плавное увеличение частоты с 30 до 50 Гц;
- 6) работа АД в установившемся режиме с частотой 50 Гц и напряжением 380 В в течение около 10 с;
- 7) плавное снижение частоты преобразователем от 50 до 0 Гц.

Оба эксперимента выполнены для ненагруженного АД.

Результаты. Рассмотрим результаты проведенных экспериментов. Полные частотно-временные спектры (ЧВС) зарегистрированных сигналов с исправного АД и АД с одним оборванным стержнем обмотки ротора в ходе опыта №1 приведены на рис. 2, а более детальное представление ЧВС в различных режимах – на рис. 3–5. Графики изменения тока статора от времени в ходе эксперимента приведены на рис. 6.

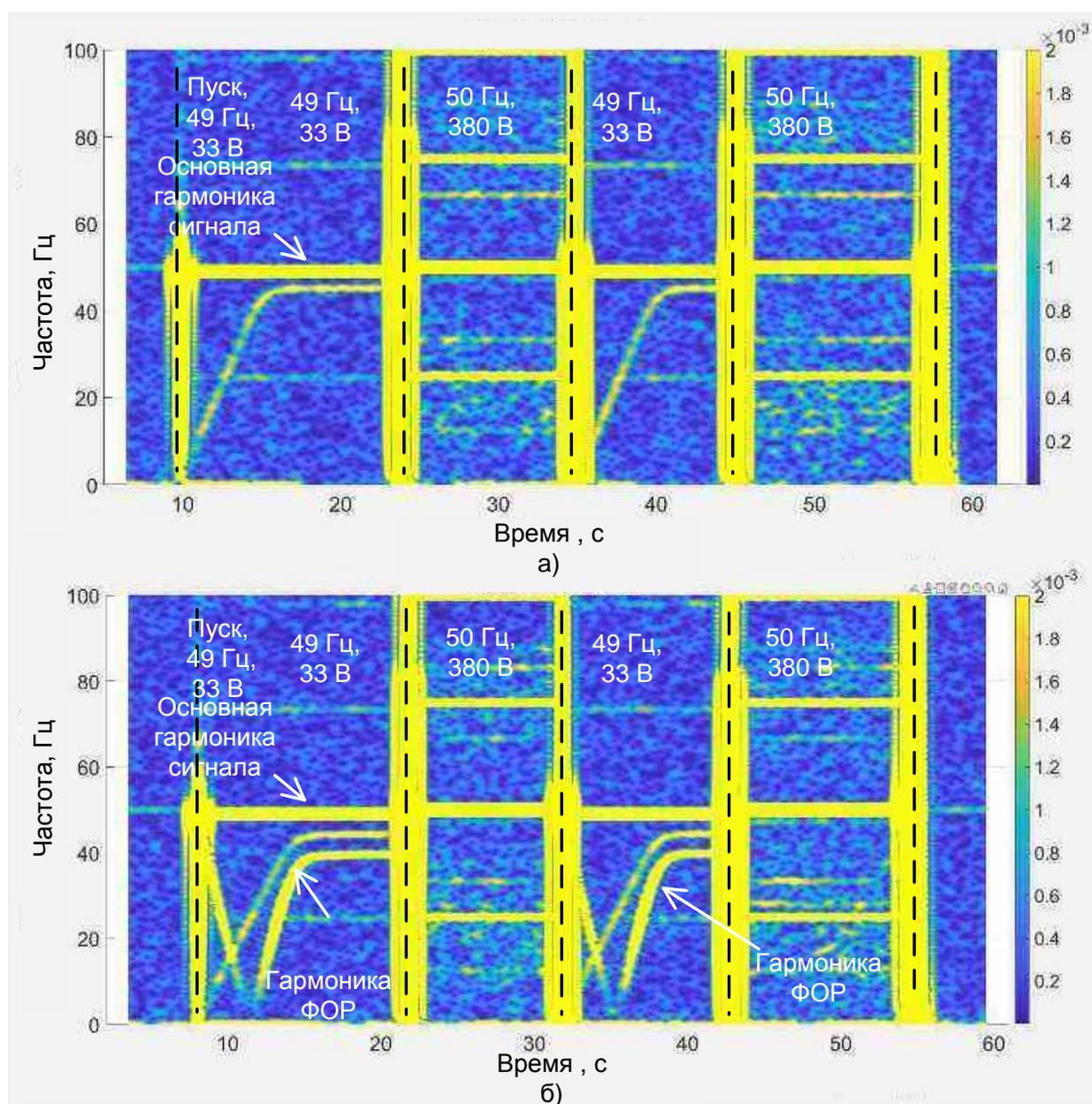


Рис. 2. ЧВС АД с ПЧ в ходе опыта №1: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

Анализ ЧВС сигналов в режиме пуска (рис. 3) показывает, что при подаче напряжения 33 В время пуска АД увеличивается приблизительно до 5 с, что позволяет произвести обработку пускового тока статора с помощью оконного преобразования Фурье. Также очевидно, что при наличии повреждения обмотки ротора (рис. 3,б) в спектре отчетливо проявляется

гармоника ФОР, особенностью которой является отражение от оси времени в процессе пуска, в то время как для исправного АД (рис. 3,а) эта гармоника отсутствует. Данный факт подтверждает возможность обнаружения обрыва в пусковом режиме даже при пониженном напряжении с помощью ПЧ.

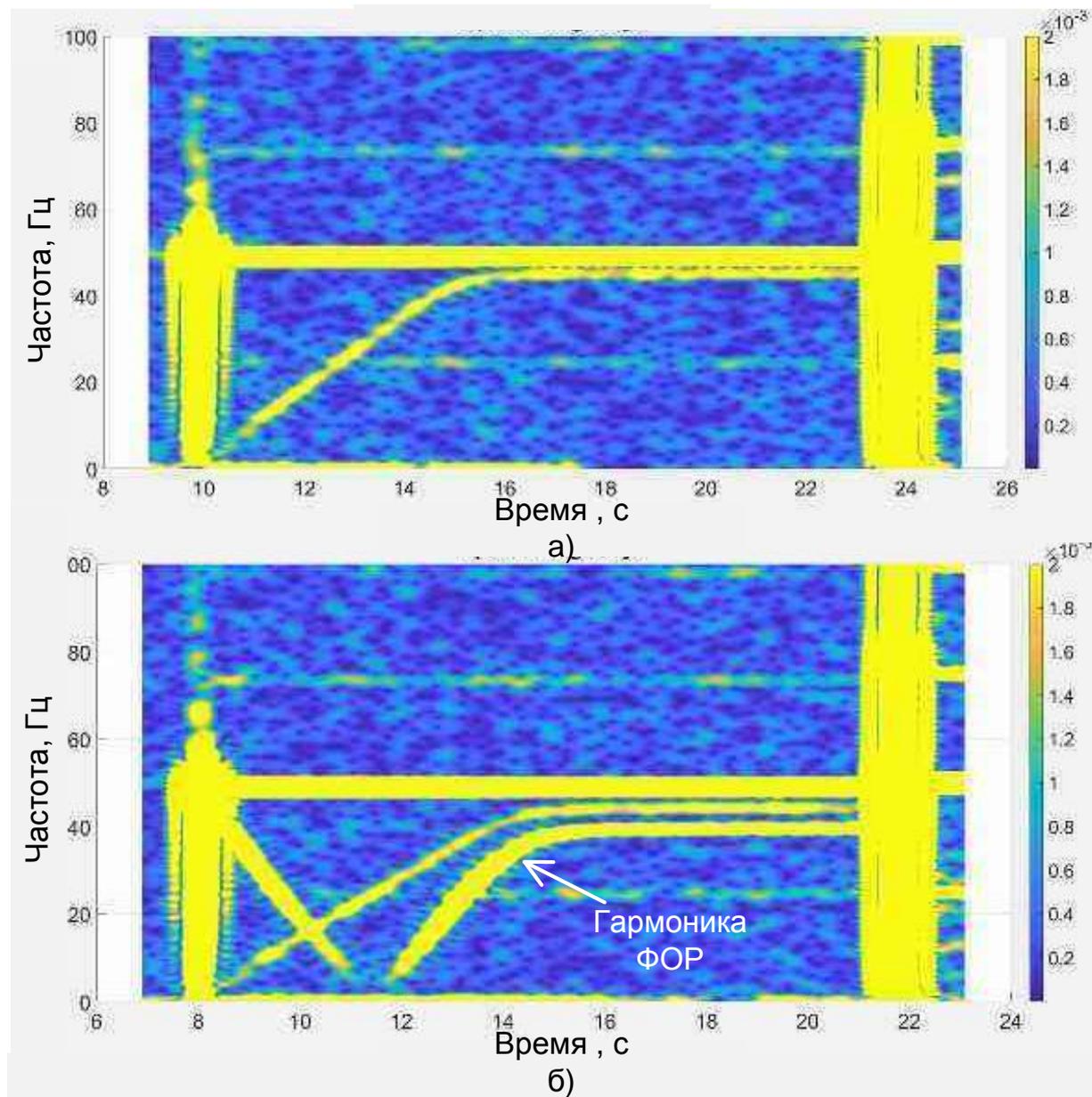


Рис. 3. ЧВС АД с ПЧ в ходе опыта №1 – участок пуска АД на пониженном напряжении: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

На рис. 4 приведены ЧВС для установившегося режима с частотой 50 Гц и напряжением 380 В. Их анализ показывает, что получаемые спектры практически идентичны друг другу и не позволяют выявить повреждение обмотки ротора, поскольку скольжение АД в этом режиме составляет 0,001, поэтому гармоника ФОР перекрывается в спектре основной гармоникой сигнала.

На рис. 5 приведены ЧВС для переходного режима при снижении частоты с 50 до 49 Гц, а также для установившегося режима работы с частотой 49 Гц и напряжением 33 В. На этих спектрах можно отчетливо увидеть появление гармоники ФОР как в процессе изменения частоты, так и в установившемся режиме работы при наличии повреждения обмотки ротора. В

первом случае данное явление обусловлено резким изменением скорости вращения АД, а также значения питающего напряжения при изменении частоты. По этой причине частота гармоники ФОР, появляющейся в спектре, изменяется практически так же, как и при пуске АД. Во втором случае возможность обнаружения

гармоники ФОР обусловлена значительным увеличением скольжения до 0,13, поэтому значение частоты гармоники ФОР заметно отличается от 49 Гц основной гармоники сигнала. При этом ее амплитуда достаточна для обнаружения в ЧВС тока статора АД даже при напряжении 33 В и в режиме холостого хода АД.

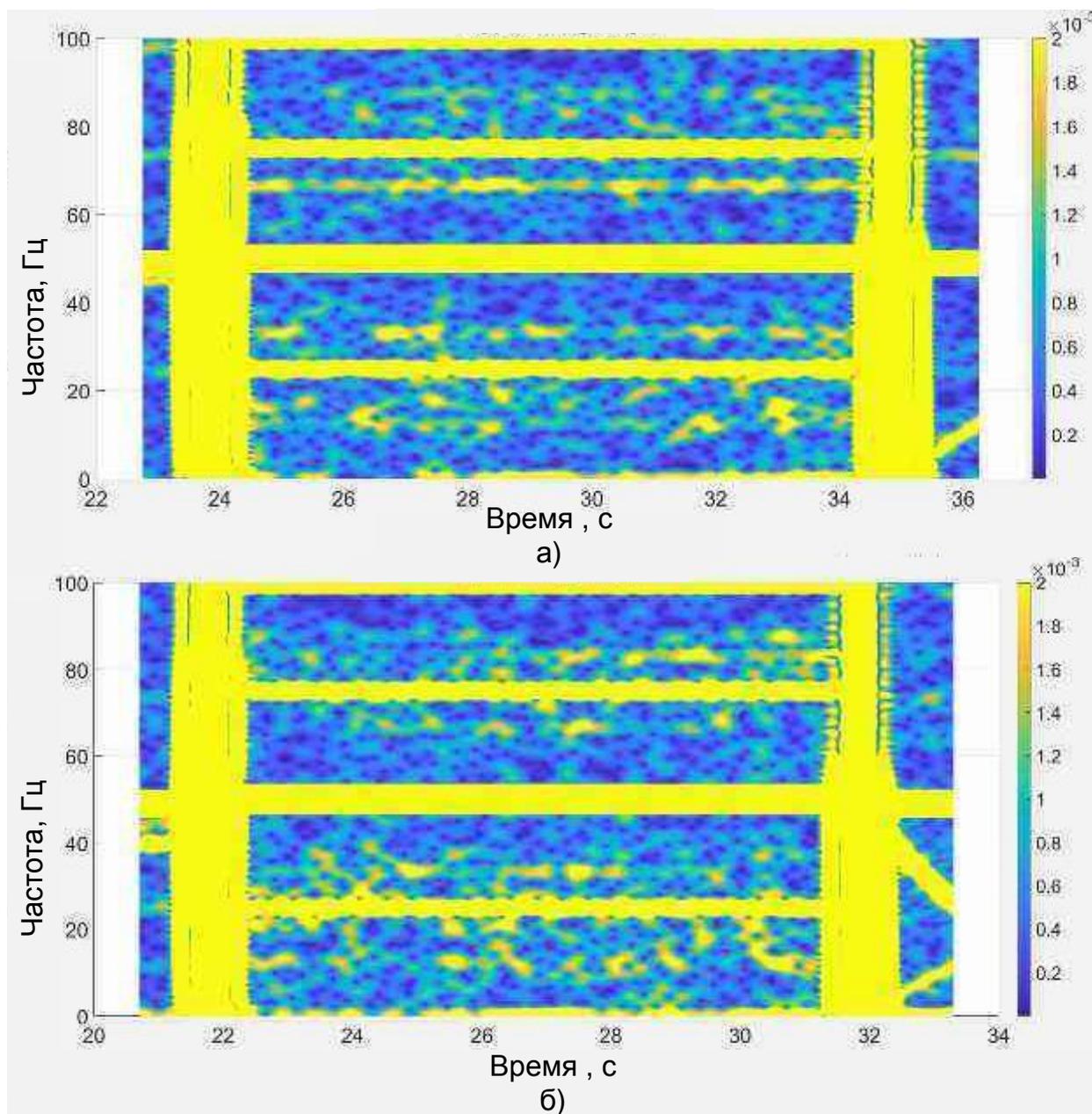


Рис. 4. ЧВС АД с ПЧ в ходе опыта №1 – установившийся режим с частотой 50 Гц и напряжением 380 В: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

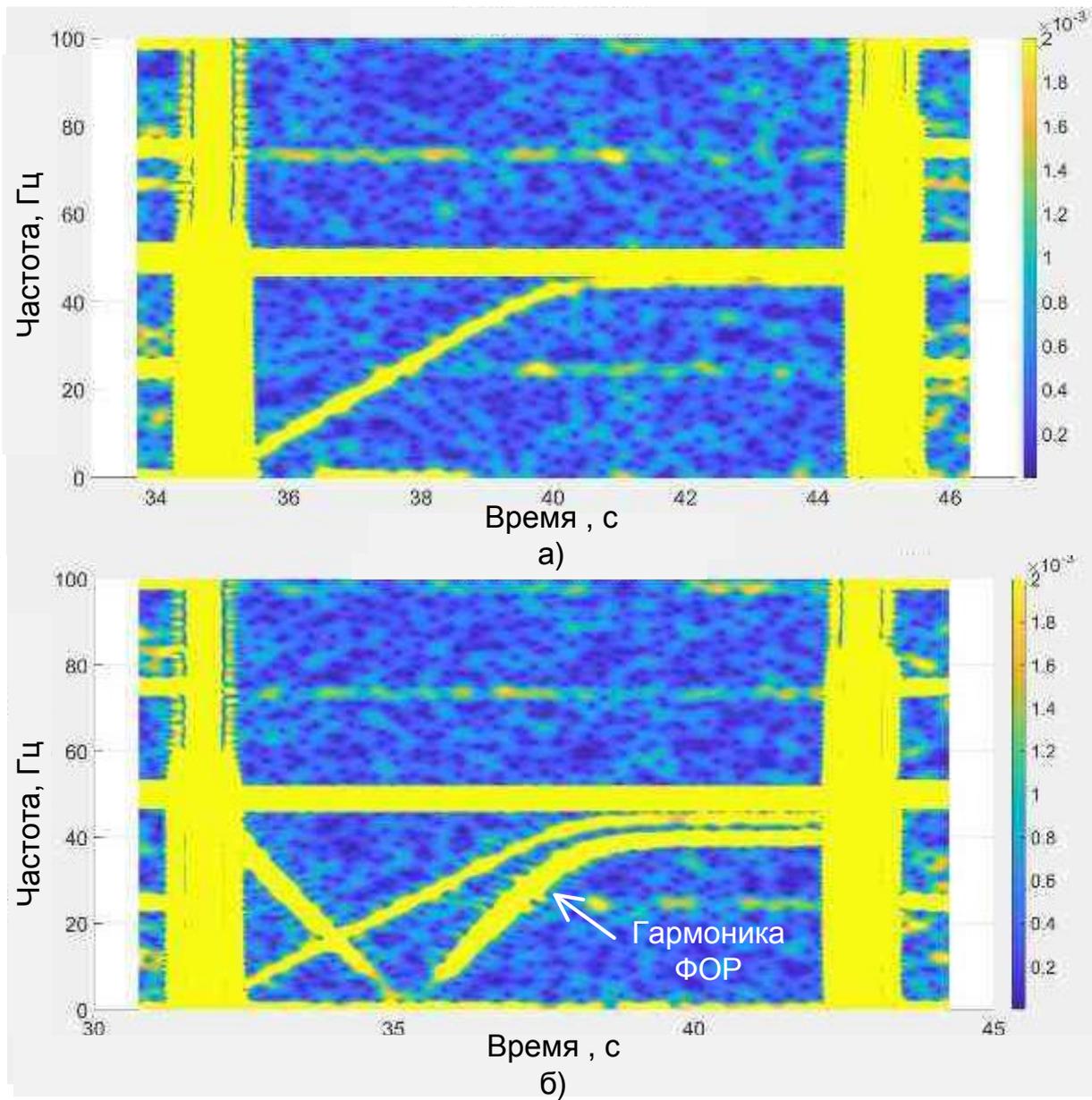


Рис. 5. ЧВС АД с ПЧ в ходе опыта №1 – участок с изменением частоты с 50 до 49 Гц и напряжения с 380 до 33 В и в установившемся режиме с частотой 49 Гц и напряжением 33 В: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

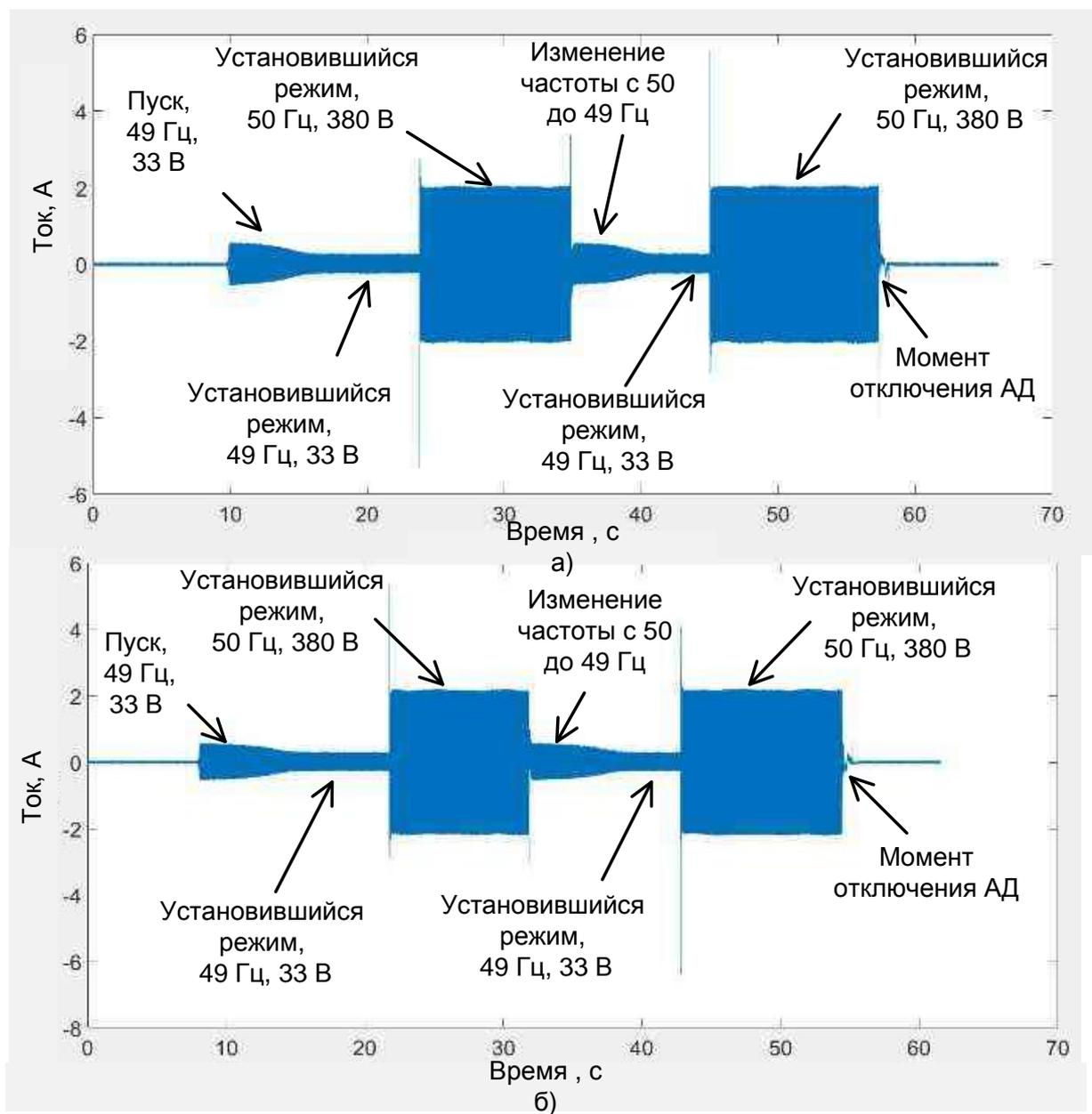


Рис. 6. Форма зарегистрированного сигнала тока статора в процессе опыта №1: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

ЧВС, полученные в ходе опыта №2, приведены на рис. 7, а более детальный их вид в режимах пуска и изменения частоты представлен на рис. 8 и 9 соответственно. Графики тока статора от времени представлены на рис. 10.

Анализ спектров, представленных на рис. 8, показал, что при повреждении обмотки ротора в спектре пускового сигнала отчетливо проявляется гармоника ФОР. В данном режиме значение частоты плавно увеличивается от 0 до установившегося значения, что согласуется с результатами,

полученными другими авторами [8, 10]. Анализ ЧВС на рис. 9 показывает, что при плавном изменении частоты гармонику ФОР можно увидеть не только при пуске, но и при снижении частоты, при этом в процессе снижения частоты гармоника ФОР отражается от оси, как и в случае резкого изменения напряжения и частоты. Кроме того, как и в предыдущем эксперименте, искомая гармоника может быть легко определена и в установившемся режиме работы.

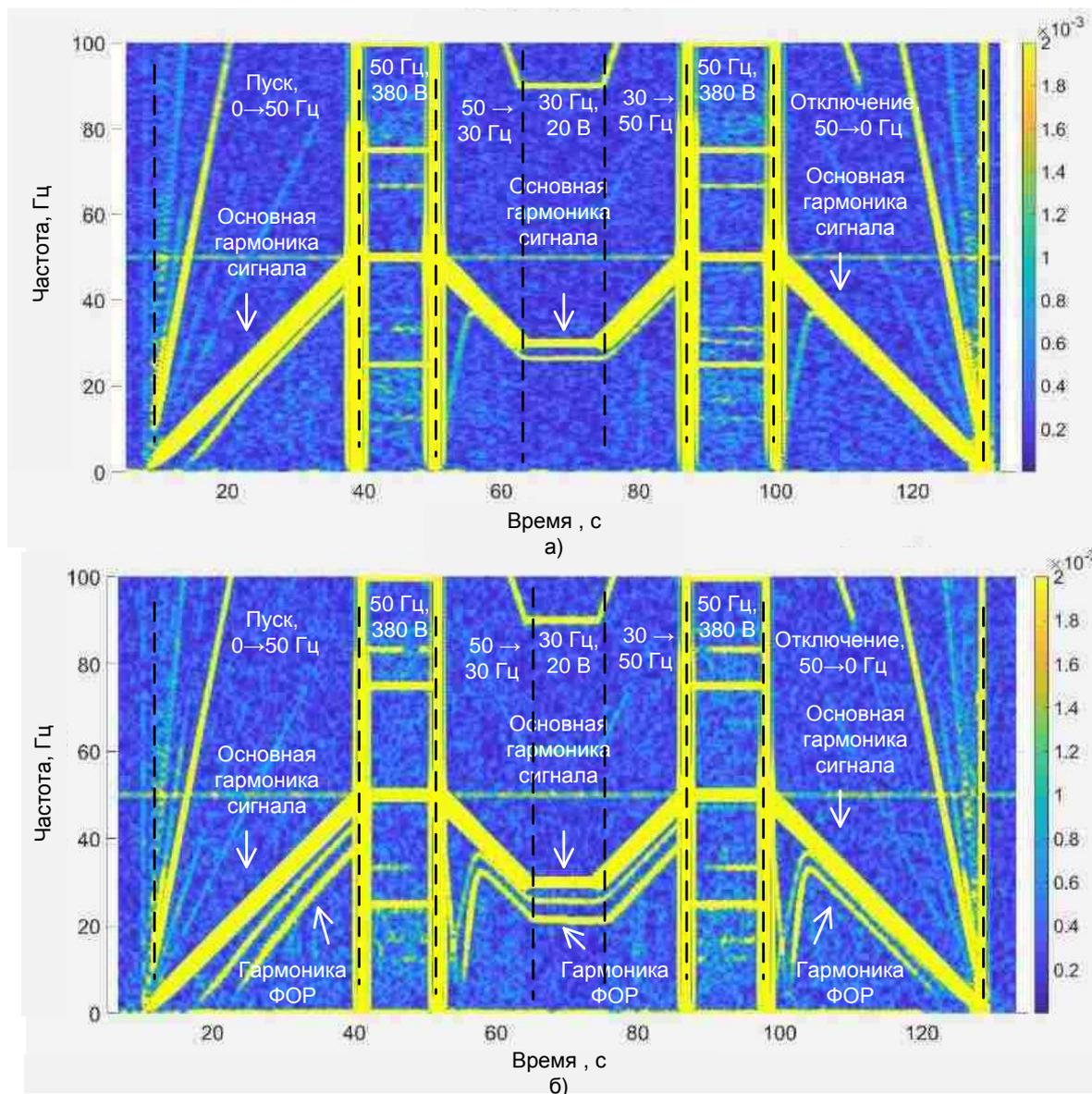


Рис. 7. ЧВС АД с ПЧ в ходе опыта №2: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

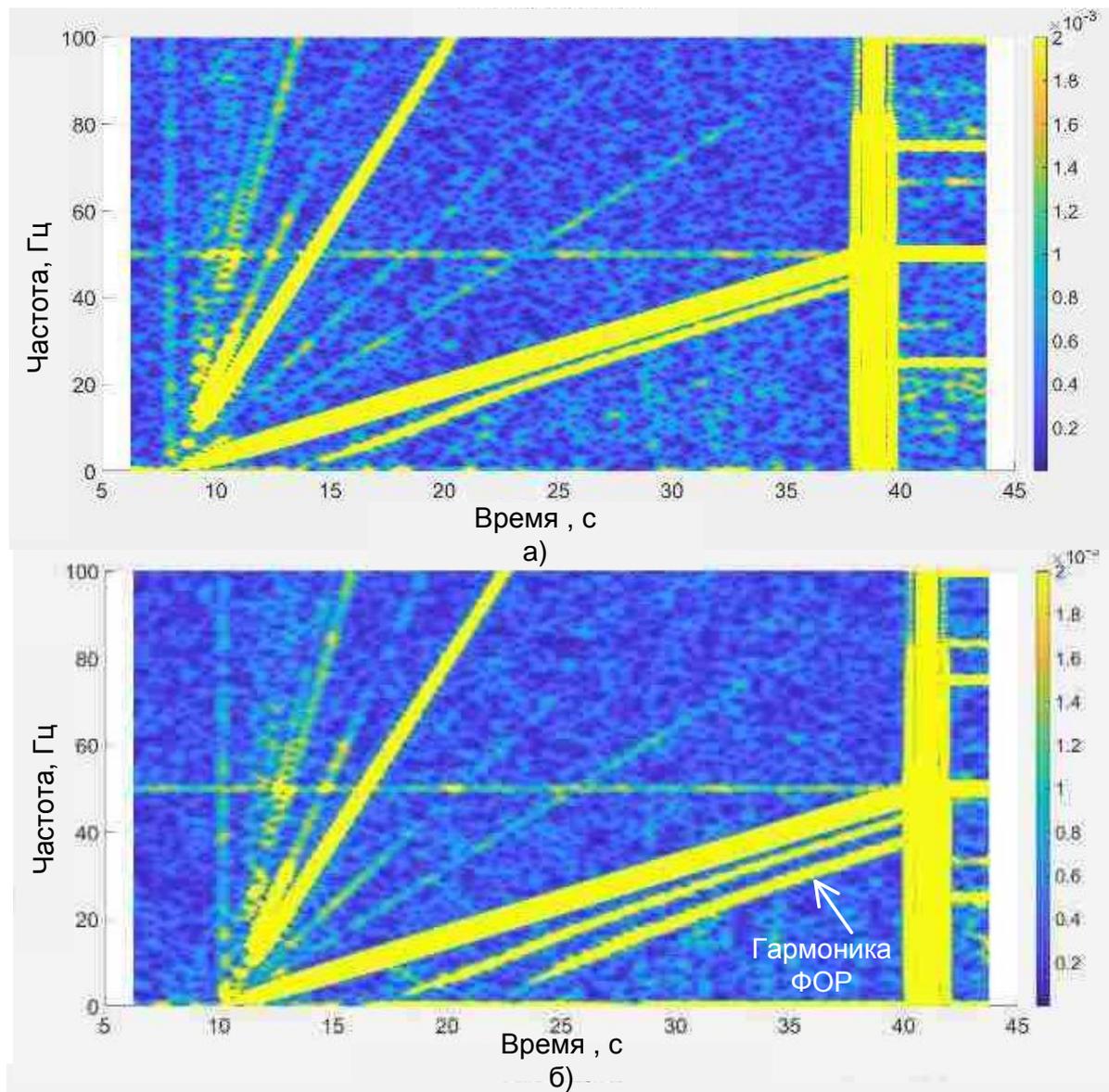


Рис. 8. ЧВС АД с ПЧ в ходе опыта №2 – участок пуска АД при плавном увеличении частоты: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

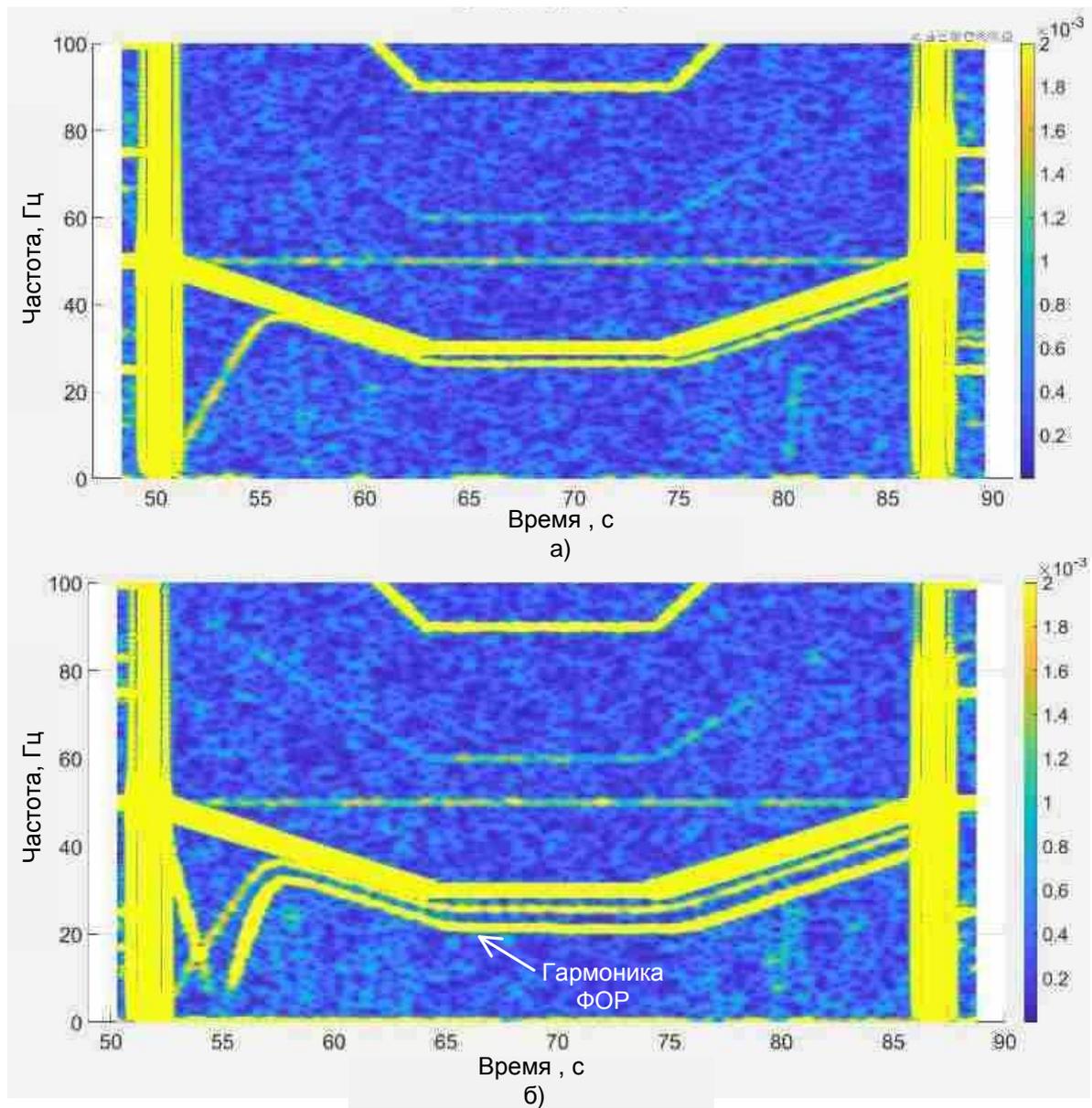


Рис. 9. ЧВС АД с ПЧ в ходе опыта №2 – участок изменения частоты с 50 до 30 Гц и наоборот: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

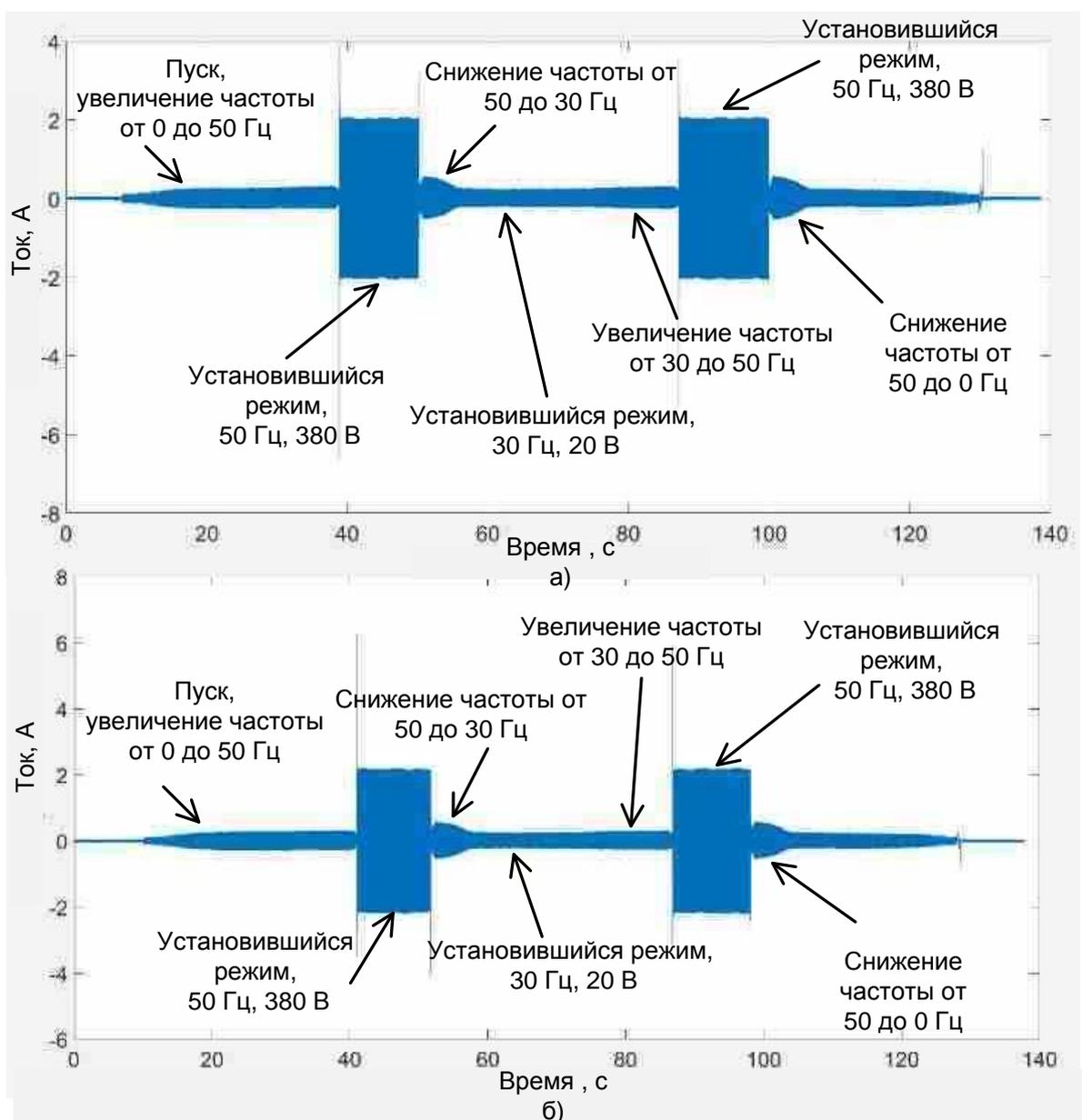


Рис. 10. Форма зарегистрированного сигнала тока статора в процессе опыта №2: а – для исправного АД; б – с одним оборванным стержнем

Выводы. В ходе проведенных исследований экспериментально доказана возможность применения ПЧ в целях диагностики АД следующими способами:

1) путем пуска АД на пониженном напряжении с последующим его увеличением до номинального значения, что позволяет заметно увеличить время пуска и тем самым обеспечить возможность обработки пускового сигнала тока статора;

2) путем регулирования значения питающего напряжения в процессе эксплуатации АД, что позволяет значительно увеличить скольжение АД и тем самым облегчить обнаружение характерной при наличии обрывов стержней обмотки ротора гармоники (ФОР);

3) путем плавного изменения частоты в переходных режимах для увеличения их продолжительности.

Несмотря на ухудшение режимных параметров (снижение значений напряжения, тока статора и частоты), в ходе проведенных экспериментов в спектре сигналов тока статора удалось обнаружить гармонику ФОР, что подтверждает возможность проведения контроля подобными способами.

Таким образом, в ходе исследований показано, что в процессе диагностики нужно уделять внимание ПЧ не только как возможному источнику помех и искажения диагностической информации, но и как полезному инструменту для получения более достоверных сведений о состоянии АД.

Список литературы

1. **Babu W.R., Ravichandran C.S., Matheswaran V.** Performance Analysis of Medium Voltage Induction Motor Using Stator Current Profile // *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. – 2015. – Vol. 4, Issue 4. – P. 2129–2136.

2. **Андреева О.А.** Разработка методов диагностики двигателей собственных нужд электрических станций. – Павлодар: Кереку, 2015. – 142 с.

3. **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.

4. **Instantaneous** Frequency of the Left Sideband Harmonic During the Start-Up Transient: A New Method for Diagnosis of Broken Bars / M. Pineda-Sánchez, M. Riera-Guasp, J. Antonino-Daviu, et al. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2009. – Vol. 56, No. 11. – P. 4557–4570.

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

6. **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*. – Texas, 2003 September. – P. 145–156.

7. **Jokic S., Ilic S.** Condition assessment of the induction motor based on vibration and current signature analyses // *International Electrical Testing Association Journal NETAworld*. – 2018. – P. 66–70.

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. García-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. Morinigo-Sotelo, et al. // *Electric Power Systems Research*. – 2016. – Vol. 133. – P. 142–148.

10. **Practical** Aspects of Broken Rotor Bars Detection in PWM Voltage-Source-Inverter-Fed Squirrel-Cage Induction Motors / Zhu Hong-yu, Hu Jing-tao, G. Lei, H. Hao // *Journal of Applied Mathematics*. – 2013. – P. 1–11. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/128368> (Accessed 24 February 2025).

11. **Zaman Sh.Md.K., Liang X., Li W.** Fault Diagnosis for Variable Frequency Drive-Fed Induction Motors Using Wavelet Packet Decomposition and Greedy-Gradient Max-Cut Learning. *IEEE Access*. – 2021. – P. 1–13. URL: https://www.researchgate.net/publication/351184541_Fault_Diagnosis_for_Variable_Frequency_Drive-Fed_Induction_Motors_Using_Wavelet_Packet_Decomposition_and_Greedy-Gradient_Max-Cut_Learning (Accessed 24 February 2025).

12. **Broken** Rotor Bar Fault Diagnostic for DTC Fed Induction Motor Using Stator Instantaneous Complex Apparent Power Envelope Signature Analysis /

S. Lachtar, G. Adel, K. Koussa, et al. // *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*. – Sep. 2019. – Vol. 10, No. 3. – P. 1187–1196.

13. **О возможности** проведения контроля состояния асинхронных электродвигателей с частотно-регулируемым приводом методом спектрального анализа / А.Н. Назарычев, М.А. Захаров, А.С. Страхов и др. // *Вестник ИГЭУ*. – 2024. – Вып. 5. – С. 66–74.

14. **Новаков А.В., Гладков В.В.** Преобразователь частоты для диагностики асинхронных двигателей // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2022. – Вып. 3. – С. 153–158.

15. **Анализатор** спектра на основе алгоритма автокоррекции времени записи сигнала / А.Н. Назарычев, Е.М. Новоселов, А.С. Страхов и др. // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 98–109.

References

1. Babu, W.R., Ravichandran, C.S., Matheswaran, V. Performance Analysis of Medium Voltage Induction Motor Using Stator Current Profile. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2015, vol. 4, issue 4, pp. 2129–2136.

2. Andreeva, O.A. *Razrabotka metodov diagnostiki dvigateley sobstvennykh nuzhd elektricheskikh stantsiy* [Development of diagnostic methods for auxiliary motors of power plants: monograph]. Pavlodar: Kereku, 2015. 142 p.

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

4. Pineda-Sánchez, M., Riera-Guasp, M., Antonino-Daviu, J., Roger-Folch, J., Pérez-Cruz, J., Puche-Panadero, R. Instantaneous Frequency of the Left Sideband Harmonic During the Start-Up Transient: A New Method for Diagnosis of Broken Bars. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no. 11, pp. 4557–4570.

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

6. 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*. Texas, USA, September, 2003, pp. 145–156.

7. Jokic, S., Ilic, S. Condition assessment of the induction motor based on vibration and current signature analyses. *International Electrical Testing Association Journal NETAworld*, 2018, pp. 66–70.

8. Fernandez-Cavero, V., García-Escudero, L.A., Pons-Llinares, J., Fernández, M.A., Duque-Perez, O., Morinigo-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. <https://doi.org/10.3390/app11093769> (Accessed 24 February 2025).

9. Romero-Troncoso, R.J., Garcia-Perez, A., Morinigo-Sotelo, D., Duque-Perez, O., Osornio-Rios, R.A., 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. Hong-yu, Zhu, Jing-tao, Hu, Lei, G., Hao, H. Practical Aspects of Broken Rotor Bars Detection in PWM Voltage-Source-Inverter-Fed Squirrel-Cage Induction Motors. *Journal of Applied Mathematics*, 2013, pp. 1–11. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/128368> (Accessed 24 February 2025).

11. Zaman, Sh.Md.K., Liang, X., Li, W. Fault Diagnosis for Variable Frequency Drive-Fed Induction Motors Using Wavelet Packet Decomposition and Greedy-Gradient Max-Cut Learning. *IEEE Access*, 2021, pp. 1–13. Available at: https://www.researchgate.net/publication/351184541_Fault_Diagnosis_for_Variable_Frequency_Drive-Fed_Induction_Motors_Using_Wavelet_Packet_Decomposition_and_Greedy-Gradient_Max-Cut_Learning (Accessed 24 February 2025).

12. Lachtar, S., Adel, G., Koussa, K., Bouraiou, A., Attoui, I. Broken Rotor Bar Fault Diagnostic for DTC Fed

Induction Motor Using Stator Instantaneous Complex Apparent Power Envelope Signature Analysis. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, Sep. 2019, vol. 10, no. 3, pp. 1187–1196.

13. Nazarychev, A.N., Zakharov, M.A., Strakhov, A.S., Novoselov, E.M., Polkoshnikov, D.A., Skorobogatov, A.A. O vozmozhnosti provedeniya kontrolya sostoyaniya asinkhronnykh elektrodvigatelyey s chastotno-reguliruemym privodom metodom spektral'nogo analiza [On the possibility of monitoring the condition of asynchronous electric motors with variable-frequency drives using the spectral analysis method]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 5, pp. 66–74.

14. Novakov, A.V., Gladkov, V.V. Preobrazovatel' chastoty dlya diagnostiki asinkhronnykh dvigateley [Frequency converter for diagnostics of asynchronous motors]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2022, issue 3, pp. 153–158.

15. Nazarychev, A.N., Novoselov, E.M., Strakhov, A.S., Skorobogatov, A.A., Korovkin, N.V. Analizator spektra na osnove algoritma avtokorrektsii vremeni zapisi signala [Spectrum analyzer based on the algorithm for automatic correction of the signal recording time]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 98–109.