

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.333, 621.314.26

Александр Николаевич Назарычев

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: nazarychev@mail.ru

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

О возможности проведения контроля состояния асинхронных электродвигателей с частотно-регулируемым приводом методом спектрального анализа

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одной из важных задач современной энергетики является повышение надежности функционирования асинхронных электродвигателей. Перспективным направлением контроля их технического состояния являются методы спектрального анализа сигналов. Однако очень мало внимания уделяется диагностике асинхронных двигателей в составе частотно-регулируемого электропривода, а также использованию преобразователей частоты в целях диагностики. В связи с этим вопросы, связанные с контролем состояния асинхронных электродвигателей с частотно-регулируемым приводом, являются актуальными и требуют проведения научных исследований. Целью исследования является экспериментальная оценка возможности применения метода спектрального анализа для оценки технического состояния асинхронных двигателей, в качестве приводов которых используются преобразователи частоты.

Материалы и методы. Исследования проведены на асинхронном двигателе типа АИР71А6 при исправной обмотке ротора и наличии одного оборванного стержня. В качестве диагностического сигнала рассмотрено внутреннее магнитное поле в установившемся режиме работы и при пуске двигателя. Оценка состояния осуществлена на основе определения в спектре амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора. Для обработки сигнала использовано оконное преобразование Фурье.

Результаты. Получены спектры внутреннего магнитного поля при пуске и в установившемся режиме при питании двигателя от автотрансформатора и при использовании преобразователя частоты. Установлено, что диагностический признак наличия оборванных стержней, заключающийся в увеличении амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора, проявляется при питании электродвигателя не только от автотрансформатора, но и от преобразователя частоты. Сопоставление амплитуд гармоник при наличии и отсутствии преобразователя частоты позволяет сделать заключение о том, что возникающие от преобразователя помехи незначительно влияют на амплитуды характерных гармоник.

Выводы. На примере сигнала внутреннего магнитного поля показано, что методы спектрального анализа могут быть использованы для диагностирования состояния асинхронных двигателей в составе частотно-регулируемого электропривода.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, преобразователь частоты, спектральный анализ, внутреннее магнитное поле, обрыв стержня ротора

Alexander Nikolaevich Nazarychev

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Electric Power Engineering and Electromechanics Department, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: nazarychev@mail.ru

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 Electric Power Plants, 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 Electric Power Plants, 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 Aleksandrovich 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

On the possibility of monitoring the condition of induction motors with a variable speed drive by spectral analysis method

Abstract

Background. One of the important tasks of current energy power industry is to increase the reliability of induction motors operation. A promising direction for monitoring their technical condition is application of methods of spectral analysis of signals. However, very little attention is paid to the diagnostic assessment of induction motors as a part of a variable frequency drive, as well as the use of frequency converters for diagnostic purposes. Therefore, the issues related to monitoring the condition of induction motors with variable frequency drives are relevant and require scientific research. The purpose of the study is experimental evaluation of the possibility to use the spectral analysis method to assess the technical condition of induction motors driven by frequency converters.

Materials and methods. The research has been carried out on AIR71A6 induction motor with a serviceable rotor winding and one broken rotor bar rotor winding. The internal magnetic field is considered as a diagnos-

tic signal in steady-state and start-up mode. The condition has been evaluated based on the determination of harmonics in the amplitude spectrum from the dummy rotor winding. A Short Time Fourier Transform is used for signal processing.

Results. The spectra of the internal magnetic field have been obtained at start-up and in steady-state mode when the engine is fed by an autotransformer and frequency converter. A diagnostic sign of the presence of broken bars, that is an increase of harmonic amplitudes from the dummy rotor winding, manifested itself not only when the electric motor is fed by an autotransformer, but also frequency driven. Comparing the amplitudes of harmonics in the presence and absence of a frequency converter allows us to conclude that interference of the converter slightly affect the amplitudes of specific harmonics.

Conclusions. Using the example of an internal magnetic field signal, it is shown that spectral analysis methods can be used to diagnose the induction motors condition with a variable speed drive.

Key words: induction motor, variable speed drive, spectral analysis, internal magnetic field, broken rotor bar

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.5.066-074

Состояние вопроса. Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутой обмоткой ротора составляют около 90 % всех потребителей электрической энергии и характеризуются простотой конструкции, надежностью и устойчивостью работы. Тем не менее АД может выйти из строя, что приведет к останову и нарушению функционирования его приводного механизма. Известно, что причинами отказов являются повреждения подшипников (около 40 % от общего числа отказов АД), статора (около 30 %), ротора (около 10 %) и другие виды повреждений (до 20 %) [1, 2]. Для нормального функционирования как самого двигателя, так и технологического процесса важной задачей является как можно более раннее выявление нарушений работы АД.

Одним из наиболее перспективных методов выявления неисправностей АД в процессе эксплуатации является спектральный анализ сигналов, в качестве которых можно использовать внутреннее магнитное поле [3], ток статора [4–7], внешнее магнитное поле [8–13], вибрационные сигналы [13–15]. Применение данного метода описано в двух межгосударственных стандартах¹. Установлено, что различные повреждения можно обнаружить из-за появления в спектрах сигналов соответствующих им частот.

¹ ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.; ГОСТ IEC/TS 60034-24-2015. Машины электрические вращающиеся. Ч. 24. Онлайнное обнаружение и диагностика потенциальных отказов активных деталей вращающихся электромашин и деталей с подшипниковым током. Руководство по применению. – М.: Стандартинформ, 2017. – 16 с.

Однако в настоящее время задача диагностики решается отдельно от задачи регулирования частоты вращения асинхронного двигателя. Такое регулирование осуществляется различными электрическими и механическими способами. С развитием полупроводниковой промышленности все большее распространение в качестве привода АД получают преобразователи частоты (ПЧ) с двойным преобразованием энергии, построенные на базе транзисторов и тиристорных ключей при широтно-импульсной модуляции является источником помех, которые проявляются в спектре магнитного поля и тока статора, что может исказить спектр анализируемого сигнала [16] и тем самым усложнить процесс выявления повреждений.

Следует отметить, что необходимо проанализировать не только влияние ПЧ на возможность определения повреждения АД, но и возможность использования ПЧ как инструмента для проведения диагностики АД. Например, ПЧ может использоваться для увеличения продолжительности пуска АД, так как низкая продолжительность пуска часто затрудняет процесс диагностики, или для изменения частоты основной гармоники сигнала, а следовательно, и характерных гармоник в установившемся режиме работы.

Целью настоящего исследования является экспериментальная оценка возможности применения метода спектрального анализа для оценки технического состояния АД в составе частотно-регулируемого электропривода. Для этого необходимо доказать, что диагностические признаки, характерные для АД, работающих без ПЧ, будут проявляться и существенно не искажаться

для АД в составе частотно-регулируемого электропривода. При этом нужно отметить, что данная задача должна решаться отдельно для каждого вида неисправности и каждого диагностического сигнала.

В качестве примера неисправности был взят обрыв стержней короткозамкнутой обмотки ротора, на которые приходится около 5–10 % от общего количества отказов АД [1–2], а в качестве метода диагностики – спектральный анализ сигнала ЭДС, снятого с индукционного датчика, расположенного на зубце обмотки статора. Этот сигнал отражает изменение индукции магнитного поля в данной области пространства. Для удобства далее будем называть этот сигнал внутренним магнитным полем. Выбор в качестве сигнала внутреннего магнитного поля обусловлен тем, что в нем наиболее ярко проявляются диагностические признаки повреждений электромагнитного характера.

Материалы и методы. Суть метода спектрального анализа заключается в обнаружении в спектре диагностического сигнала характерных гармонических составляющих и в оценке их амплитуд. Для внутреннего магнитного поля при пуске в случае наличия оборванных стержней обмотки ротора значительно возрастают амплитуды гармоник от фиктивной обмотки ротора [3] (далее будем называть их гармониками ФОР). Частоты гармоник ФОР могут быть определены по выражению

$$f_{\text{ФОР}}^{(v\pm)}(t) = f_c \left(\frac{1-s(t)}{p} v \pm s(t) \right), \quad (1)$$

где $f_{\text{ФОР}}^{(v-)}$ – нижняя боковая частота гармоники ФОР v -го порядка в момент времени t , Гц; $f_{\text{ФОР}}^{(v+)}$ – верхняя боковая частота гармоники ФОР v -го порядка в момент времени t , Гц; f_c – частота сети, Гц; $v = 1, 2, 3, \dots$ – порядок гармоники; $s(t)$ – скольжение двигателя в момент времени t .

Регистрация сигналов осуществляется в установившемся и пусковом режимах работы. Выбор установившегося режима обусловлен тем, что произвести обработку сигнала при неизменной нагрузке наиболее просто. Выбор пускового режима обусловлен тем, что гармоники ФОР наиболее отчетливо проявляются в спектре именно при пуске АД.

Для обработки сигналов использовано оконное преобразование Фурье, позволяю-

щее получить частотно-временные спектры зарегистрированного сигнала. Под частотно-временным спектром понимаются трехмерные спектры, которые отражают зависимость изменения амплитуд гармонических составляющих при изменении частоты и времени. Выбор обусловлен тем, что в процессе пуска скольжение АД изменяется, поэтому изменяются и частоты гармоник, определяемые по выражению (1). Для точного определения амплитуд гармоник ФОР сигнала внутреннего магнитного поля и снижения эффекта растекания спектра применялась оконная функция Флэттоп.

Исследования производились на экспериментальном стенде (рис. 1). В качестве исследуемого АД использован АИР71А6 с 3 парами полюсов номинальным напряжением 380 В, мощностью 370 Вт. При этом использовались два ротора: один – с исправной обмоткой, второй – с одним оборванным стержнем обмотки ротора. Регистрация внутреннего магнитного поля осуществлялась с помощью внутреннего индуктивного датчика, который представляет собой виток провода, намотанного на зубец АД. В качестве АЦП использована полупрофессиональная звуковая карта Focusrite Scarlett 2i2, запись сигнала осуществлялась на ноутбук, обработка производилась на ноутбуке в программе, разработанной в комплексе Matlab.

Следует отметить, что применение оконного преобразования Фурье не позволяет получить достоверные результаты при диагностике двигателей при пуске продолжительностью менее 3 секунд, поскольку в этом случае выявить в частотно-временном спектре характерные гармоники практически невозможно [8].

Переходный процесс пуска АД с короткозамкнутой обмоткой ротора описывается уравнением движения:

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

где $M_{\text{дв}}(t)$ – электромагнитный момент, развиваемый двигателем, в момент времени t , Н·м; $M_c(t)$ – суммарный нагрузочный момент, приложенный к валу двигателя, в момент времени t , Н·м; J – суммарный момент инерции вала двигателя и соединенного с ним механизма, приведенный к валу двигателя, кг·м²; ω – угловая частота вращения вала двигателя, рад/с.



Рис. 1. Лабораторный стенд: 1 – АД типа АИР71А6; 2 – АЦП (Focusrite Scarlett 2i2); 3 – ноутбук; 4 – регулировочный автотрансформатор; 5 – преобразователь частоты

Согласно (2), одним из способов увеличения времени пуска является уменьшение электромагнитного момента АД путем снижения действующего значения питающего напряжения. На практике для увеличения времени пуска возможно применение либо автотрансформатора, либо преобразователя частоты. При этом преобразователь предпочтителен для систем с частотным приводом. В экспериментальной установке для увеличения времени пуска использованы трехфазный регулировочный автотрансформатор и ПЧ типа Веспер Т4-8400-010Н.

Нужно отметить, что возможность обнаружения повреждения обмотки ротора двигателя в режиме пуска при подаче пониженного напряжения с помощью автотрансформатора уже доказана (например, в [8]). В связи с этим задача настоящего исследования состоит в сравнении результатов, получаемых при питании АД от автотрансформатора и при использовании ПЧ.

В ходе экспериментов произведено сравнение сигналов внутреннего магнитного поля для исправного и поврежденного

двигателей при подаче на двигатель пониженного напряжения, составляющего 40 В, в пусковом и установившемся режимах. Выбор был обусловлен тем, что при данном значении напряжения время пуска превышает 3 секунды, что позволяет провести обработку пускового сигнала на основе оконного преобразования Фурье. Кроме того, при таком напряжении скольжение в установившемся режиме даже на холостом ходу составляет примерно 0,1, что позволяет разделить в спектре гармоники на верхних и нижних боковых частотах, в отличие от работы при напряжении 380 В, где скольжение практически равно 0.

Результаты. На рис. 2 и 3 приведены частотно-временные спектры внутреннего магнитного поля, полученные на АД при их пуске на пониженном напряжении с помощью регулировочного автотрансформатора (рис. 2) и частотного преобразователя (рис. 3) при отсутствии повреждения обмотки ротора, а на рис. 4 и 5 – частотно-временные спектры АД с одним оборванным стержнем обмотки ротора.

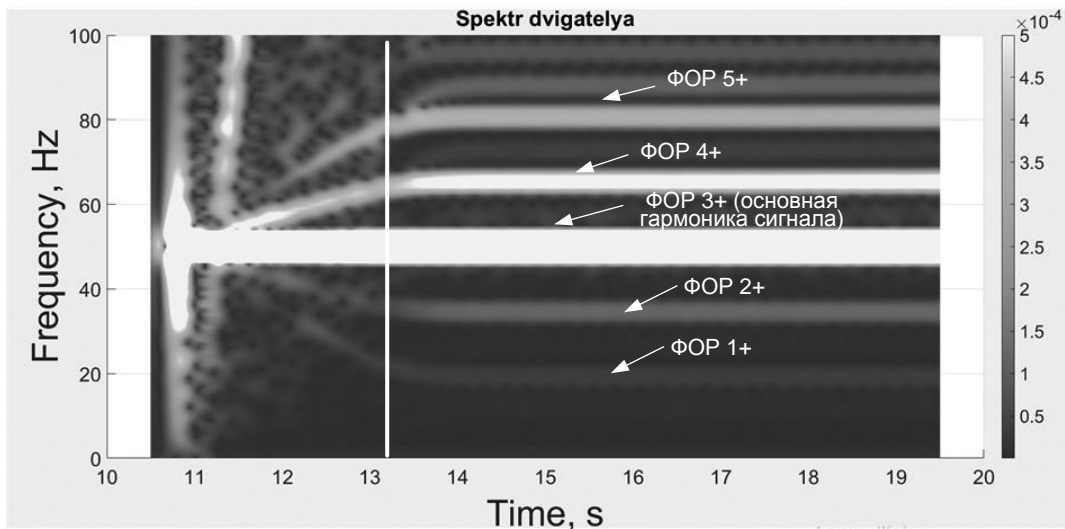


Рис. 2. Частотно-временной спектр АД с исправной обмоткой ротора при пуске от автотрансформатора (напряжение 40 В)

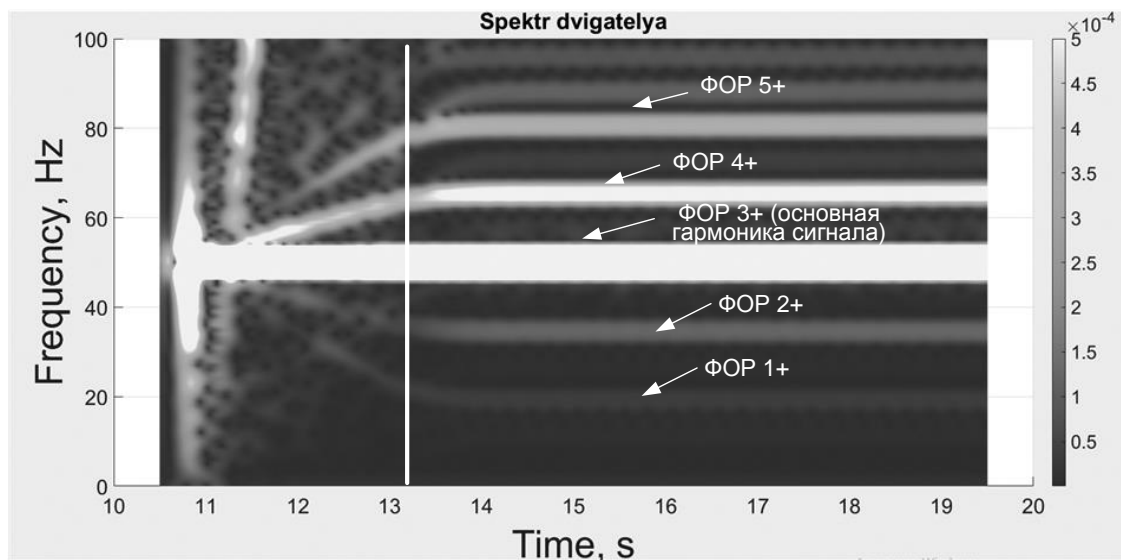


Рис. 3. Частотно-временной спектр АД с исправной обмоткой ротора при пуске от ПЧ (напряжение 40 В)

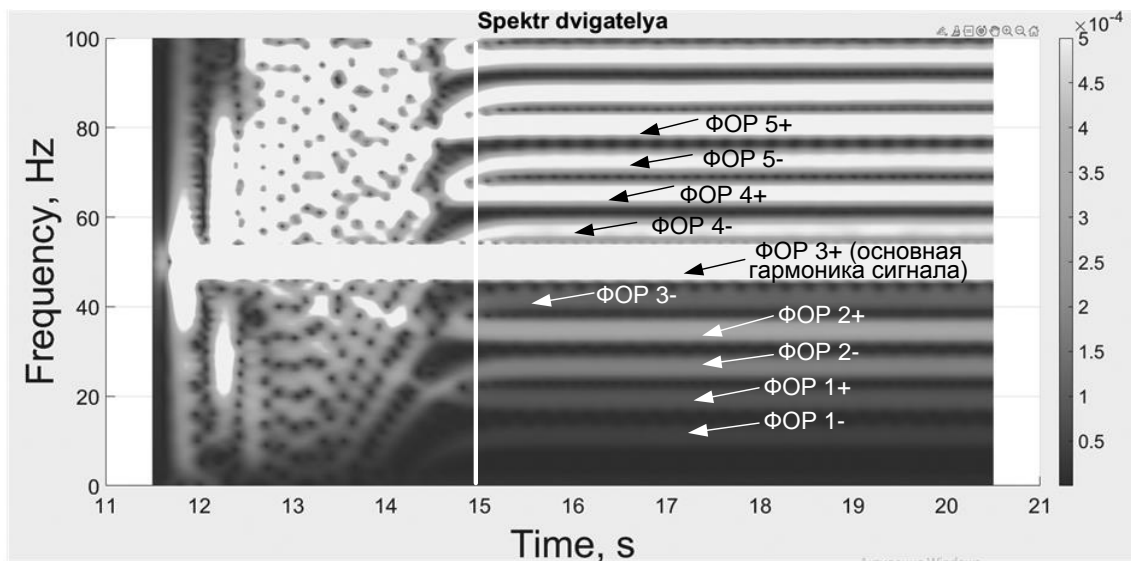


Рис. 4. Частотно-временной спектр АД с одним оборванным стержнем при пуске от автотрансформатора (напряжение 40 В)

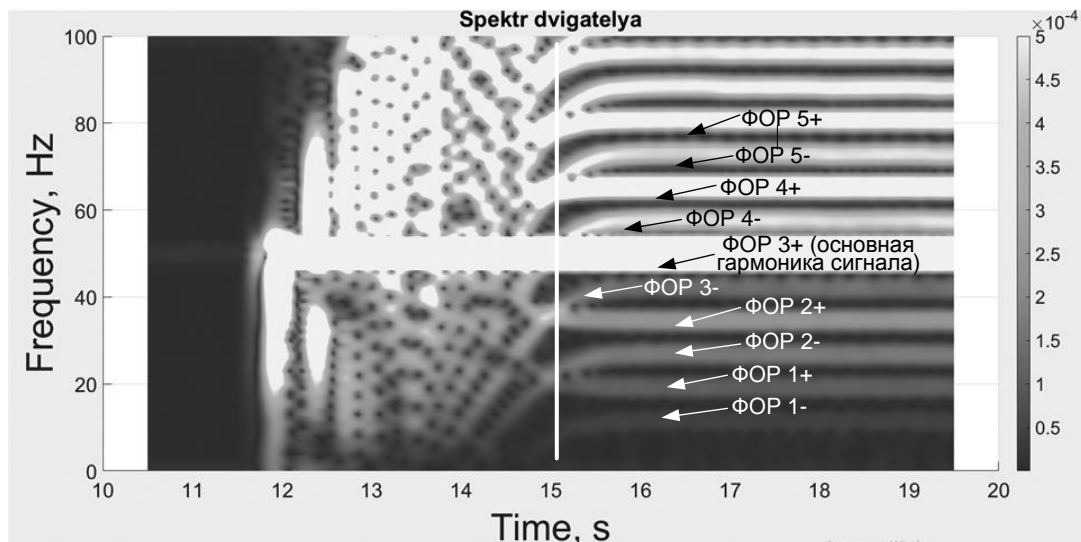


Рис. 5. Частотно-временной спектр АД с одним оборванным стержнем при пуске от ПЧ(напряжение 40 В)

В данных спектрах по оси ординат определяется значение частоты, по оси абсцисс – момент времени t . По цветовой шкале справа оценивается значение амплитуд гармонических составляющих. В полученных спектрах стрелками указаны гармоники ФОР, характерные при наличии оборванных стержней (цифра в обозначении гармоники указывает на порядок гармоники, а знак (+ или –) – на знак перед скользящим в выражении (1)).

В полученных спектрах оценивались значения амплитуд гармоник ФОР первых четырех порядков. Для удобства значения амплитуд указанных гармоник при наличии повреждения сведены в табл. 1 и 2, где приведены амплитуды в установившемся режиме работы на напряжении 40 В (табл. 1) и при пуске АД спустя приблизительно 3 секунды от начала пуска (табл. 2). Момент времени, при котором определялись амплитуды, указан в спектрах на рис. 4 и 5 белой вертикальной линией.

Сравнительный анализ спектров сигналов показывает, что как при работе от сети через регулировочный автотрансформатор, так и при использовании ПЧ при наличии повреждений в спектрах резко возрастают амплитуды гармоник ФОР, что подтверждает наличие оборванного стержня. Присутствие в спектрах исправного двигателя выраженных гармоник, частоты которых совпадают с ФОР (1+, 2+, 4+, 5+), обусловлено явлением динамического эксцентриситета [9]. При этом анализ представленных спектров и результатов сопоставления амплитуд гармоник (табл. 1 и 2) показывает, что амплитуды гармоник ФОР при наличии повреждения при использовании ПЧ мало отличаются от значений при питании двигателя от автотрансформатора. Таким образом, использование ПЧ не приводит к существенному искажению значения амплитуд гармоник ФОР и поэтому не препятствует проведению контроля АД методом спектрального анализа по внутреннему магнитному полю.

Таблица 1. Амплитуды гармоник ФОР в установившемся режиме работы для АД с повреждением обмотки ротора на напряжении 40 В

Наименование гармоники	Амплитуда гармоники при подключении АД к сети с помощью регулировочного автотрансформатора	Амплитуда гармоники при использовании ПЧ
ФОР 1-	0,000041249	0,000044024
ФОР 2-	0,000183	0,000162
ФОР 3-	0,000119	0,000137
ФОР 4-	0,000506	0,000482
ФОР 1+	0,000084237	0,00010366
ФОР 2+	0,000311989	0,000246307
ФОР 3+ (основная гармоника сигнала)	0,019237	0,02
ФОР 4+	0,00059	0,000856

Таблица 2. Амплитуды гармоник ФОР при пуске АД с повреждением обмотки ротора на напряжении 40 В

Наименование гармоники	Амплитуда гармоники при подключении АД к сети с помощью регулировочного автотрансформатора	Амплитуда гармоники при использовании ПЧ
ФОР 1-	0,00003833	0,00004137
ФОР 2-	0,000179	0,000177
ФОР 3-	0,000142	0,000167
ФОР 4-	0,000541	0,000501
ФОР 1+	0,00008417	0,0001083
ФОР 2+	0,0003061	0,0002345
ФОР 3+ (основная гармоника сигнала)	0,01881	0,01974
ФОР 4+	0,000583	0,000848

Выводы. На примере анализа внутреннего магнитного поля асинхронного двигателя показано, что использование ПЧ для питания АД не препятствует возможности проведения диагностики его обмотки ротора методом спектрального анализа. Кроме того, применение ПЧ позволяет значительно расширить область применения методов спектрального анализа, например, путем увеличения продолжительности пуска АД. При этом искажения характерных для повреждения гармонических составляющих не происходит как в установившемся режиме, так и при пуске АД.

Каждый диагностический сигнал при использовании в качестве привода ПЧ нужно рассматривать отдельно, поэтому для заключения о возможности диагностирования АД методом спектрального анализа тока статора, внешнего магнитного поля или вибрационных сигналов требуется проведение отдельного исследования.

Список литературы

1. Седуни 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.
2. 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.
3. Скоробогатов А.А. Анализ спектра магнитного поля в зазоре асинхронного двигателя при повреждении обмотки ротора // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 2. – С. 75–78.
4. Вейнреб К. Диагностика ротора асинхронного двигателя методом спектрального

анализа токов статора // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2013. – № 4. – С. 133–154.

5. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский и др. // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2014. – № 3. – С. 34–39.

6. Mehala N. Current Signature Analysis for Condition Monitoring of Motors // International Journal of Electronics and Computer Science Engineering. – 2012. – Vol. 1, No. 3. – P. 1629–1633.

7. Turk N. Fault Diagnosis of Induction Motor using MCSA // International Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2016. – Vol. 8. – P. 13–18.

8. Экспериментальное определение диагностических признаков повреждения обмоток роторов высоковольтных двигателей электростанций в режиме пуска / А.Н. Назарычев, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников и др. // Дефектоскопия. – 2020. – № 5. – С. 3–11.

9. Экспериментально-аналитическое определение диагностического признака дефектов обмотки ротора асинхронного электродвигателя / Е.М. Новоселов, В.А. Савельев, А.С. Страхов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 4. – С. 44–53.

10. Диагностика и прогнозирование состояния асинхронных двигателей на основе использования параметров их внешнего электромагнитного поля / А.Ю. Алексеенко, О.В. Бродский, В.Н. Веденев и др. // Вестник АлтГТУ. – 2006. – № 2. – С. 9–13.

11. Finite Element Diagnosis of Rotor Faults in Induction Motors Based on Low Frequency Harmonics of the Near-Magnetic Field / A. Ceban, V. Fireteanu, R. Romary, et al. // IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives, Fault Modeling in Electrical Machines, Power Electronics and Drives. – Bologna, Italy, 2011. – P. 192–198.

12. Ceban A., Pusca R., Romary R. Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis // IEEE Transactions on

Industrial Electronics. – May, 2012. – Vol. 59, No. 5. – P. 2082–2093.

13. Лукьянов А.В., Мухачев Ю.С., Бельский И.О. Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2(22). – С. 61–69.

14. Русов В.А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. – Пермь, 2012. – 252 с.

15. Gritli Y., Di Tommaso A.O., Miceli R., Filippetti F., Rossi C. Vibration Signature Analysis for Rotor Broken Bar Diagnosis in Double Cage Induction Motor Drives // 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul, Turkey, 13–17 May, 2013. – Istanbul, Turkey, 2013. – P. 1814–1820.

16. Курнышев Б.С., Фомин П.А. Электромагнитная совместимость регулируемых асинхронных электроприводов / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2005. – 100 с.

References

1. Sedunin, A.M., Afanas'ev, D.O., Sidel'nikov, L.G. *Vestnik Permskogo Natsional'nogo Issledovatel'skogo Politekhnicheskogo Universiteta*, 2013, issue 12, pp. 15–18.

2. Siddiqui, K.M., Sahay, K., Giri, V.K. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2014, vol. 3, issue 1, pp. 6549–6565.

3. Skorobogatov, A.A. *Vestnik IGEU*, 2006, issue 2, pp. 75–78.

4. Veynreb, K. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*, 2013, no. 4, pp. 133–154.

5. Safin, N.R., Prakht, V.A., Dmitrievskiy, V.A., Dmitrievskiy, A.A., Kazakbaev, V.M. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*, 2014, no. 3, pp. 34–39.

6. Mehala, N. *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering*, 2012, vol. 1, no. 3, pp. 1629–1633.

7. Turk, N. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2016, vol. 8, pp. 13–18.

8. Nazarychev, A.N., Novoselov, E.M., Polkoshnikov, D.A., Strakhov, A.S., Skorobogatov, A.A., Pugachev, A.A. *Defektoskopiya*, 2020, no. 5, pp. 3–11.

9. Novoselov, E.M., Savel'ev, V.A., Strakhov, A.S., Skorobogatov, A.A., Sulynenkov, I.N. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 4, pp. 44–53.

10. Alekseenko, A.Yu., Brodskiy, O.V., Vedenev, V.N., Tonkikh, V.G., Khomutov, S.O. *Vestnik AltGTU*, 2006, no. 2, pp. 9–13.

11. Ceban, A., Fireteanu, V., Romary, R., Pusca, R., Taras, P. Finite Element Diagnosis of Rotor Faults in Induction Motors Based on Low Frequency Harmonics of the Near-Magnetic Field. *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives, Fault Modeling in Electrical Machines, Power Electronics and Drives*. Bologna, Italy, 2011, pp. 192–198.

12. Ceban, A., Pusca, R., Romary, R. Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, May 2012, vol. 59, № 5, pp. 2082–2093.

13. Luk'yanov, A.V., Mukhachev, Yu.S., Bel'skiy, I.O. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2014, no. 2(22), pp. 61–69.

14. Rusov, V.A. *Diagnostika defektov vrashchayushchegosya oborudovaniya po vibratsionnym signalam* [Diagnosis of defects in rotating equipment using vibration signals]. Perm', 2012. 252 p.

15. Gritli, Y., Di Tommaso, A.O., Miceli, R., Filippetti, F., Rossi, C. Vibration Signature Analysis for Rotor Broken Bar Diagnosis in Double Cage Induction Motor Drives. *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul, Turkey, 13–17 May 2013*. Istanbul, Turkey, 2013, pp. 1814–1820.

16. Kurnyshev, B.S., Fomin, P.A. *Elektromagnitnaya sovmestimost' reguliruemyykh asinkhronnykh elektroprivodov* [Electromagnetic compatibility of adjustable induction electric drives]. Ivanovo, 2005. 100 p.