

## МЕТОД КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПУСКЕ ПО ТОКУ СТАТОРА

© 2020 г. А.Н. Назарычев<sup>1,\*</sup>, Е.М. Новоселов<sup>2,\*\*</sup>, Д.А. Полкошников<sup>2,\*\*\*</sup>,  
А.С. Страхов<sup>2,\*\*\*\*</sup>, А.А. Скоробогатов<sup>2,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Петербургский энергетический институт повышения квалификации,  
Россия 196135 Санкт-Петербурга, ул. Авиационная, 23

<sup>2</sup>Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,  
Россия 153003 Иваново, ул. Рабфаковская, 34

E-mail: \*nazaraychev@mail.ru; \*\*captain.udgin@gmail.com; \*\*\*pda37@yandex.ru;  
\*\*\*\*astrakhov90@yandex.ru; \*\*\*\*\*aaskor.andrey@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.06.2020; после доработки 29.06.2020

Принята к публикации 03.07.2020

В настоящее время одним из наиболее эффективных методов выявления оборванных стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронных электродвигателей с тяжелыми условиями пуска являются спектральный анализ тока статора в установившемся режиме работы. Существующие методы контроля в пусковых режимах обладают недостаточной чувствительностью либо незавершенностью проведенных исследований, хотя именно такие методы позволяют проводить диагностику машин, контроль которых невозможно выполнять в установившемся режиме работы. Целью данной статьи является разработка метода контроля состояния обмоток ротора асинхронных двигателей с тяжелыми условиями пуска по току статора в пусковом режиме, что является актуальной задачей.

Исследования проведены как на цифровых моделях асинхронного двигателя, разработанных в программном комплексе Ansys, так и на экспериментальном стенде при подаче на низковольтный двигатель пониженного напряжения для увеличения длительности его пуска. Обработка сигналов производится в программном комплексе Matlab с помощью оконного преобразования Фурье.

Показано, что лишь при наличии обрыва стержня резко возрастает амплитуда гармонической составляющей порядка, совпадающего с числом пар полюсов двигателя, на нижней боковой частоте, что служит признаком наличия повреждения. Показано, что разработанный метод контроля состояния обмоток роторов асинхронных двигателей с тяжелыми условиями пуска является более чувствительным к обрывам стержней, чем существующие методы, что позволяет одновременно выявлять повреждения обмотки ротора и предотвращать внезапные отказы асинхронных электродвигателей.

*Ключевые слова:* асинхронный двигатель, обрыв стержней обмотки ротора, тяжелые условия пуска, ток статора, оконное преобразование Фурье.

DOI: 10.31857/S0130308220080059

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время высоковольтные и низковольтные асинхронные двигатели используются во многих областях промышленности в качестве приводов различных механизмов. Хорошо известно, что отказ электродвигателя может привести как к частичному, так и полному останову технологического процесса производства. Поэтому многие исследователи уделяют большое внимание вопросам их диагностики.

Одним из повреждений асинхронных электродвигателей, которые могут привести к их отказам, является обрыв стержней короткозамкнутой обмотки ротора. Известно, что для разных машин процент отказов, связанных с оборванными стержнями, составляет от 8 до 30 % от общего числа отказов [1—3]. При этом наибольшая доля отказов приходится на асинхронные двигатели с тяжелыми условиями пуска (например, двигателей тягодутьевых механизмов, двигателей дробилок и мельниц и т.п.). Особенно опасны обрывы стержней для двигателей с составной обмоткой ротора, поскольку в процессе работы оборванные стержни могут отогнуться и нанести тяжелый ущерб статору двигателя и вынужденному его останову.

В настоящее время многими авторами проведены работы по разработке методов контроля наличия обрывов стержней в установившемся режиме работы. Наиболее эффективными методами контроля можно считать спектральный анализ сигналов тока статора [3—5, 13] или внешнего магнитного поля [6, 7]. Однако они не могут быть использованы для ряда машин с тяжелыми условиями пуска. К ним можно отнести: двигатели, работающие с переменной нагрузкой, двигатели с двойной беличьей клеткой и двигатели ряда механизмов, загрузка которых в процессе эксплуатации мала.

Контроль подобных механизмов может быть осуществлен лишь в пусковом режиме работы. Существует ряд методов, которые могут быть использованы для оценки состояния двигателей

в процессе пуска по току статора [8—10]. Однако эти методы либо обладают недостаточной чувствительностью для своевременного обнаружения оборванных стержней, либо являются незавершенными. Существует также описанный авторами метод на основе спектрального анализа сигнала внешнего магнитного поля при пуске [14]. Но метод малоэффективен для асинхронных двигателей с корпусами из магнитных материалов, поскольку амплитуды гармоник внешнего магнитного поля для таких двигателей очень малы и их тяжело использовать в качестве диагностических параметров. Поэтому цель данного исследования — разработка метода контроля состояния короткозамкнутой обмотки ротора двигателя в пусковом режиме по току статора является актуальной задачей.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поскольку проведение экспериментальных исследований на реальных высоковольтных двигателях с тяжелыми условиями пуска затруднительно и требует больших материальных затрат, исследования сигнала тока статора при пуске проведены на разработанных моделях асинхронных двигателей и на экспериментальном стенде на маломощном низковольтном двигателе.

Математические модели исправного асинхронного двигателя и двигателя с одним оборванным стержнем разработаны в программном комплексе Ansys. В качестве исследуемой машины выступает двигатель типа ДАЗО2-17-44-8/10У1, который применяется в качестве привода дутьевых вентиляторов на одной из ТЭЦ города Иваново и работает с тяжелыми условиями пуска.

Данный двигатель является двухскоростным с номинальным напряжением 6 кВ. Первая номинальная скорость двигателя составляет 594 об/мин (5 пар полюсов), номинальная мощность — 320 кВт, вторая номинальная скорость равна 741 об/мин (4 пары полюсов), номинальная мощность — 630 кВт. Пуск двигателя осуществляется на первой скорости.

Методика построения моделей прописана в [6]. Проверка достоверности полученной модели проверялась путем сравнения полученных на модели результатов с данными, представленными в технической документации, предоставленной на ТЭЦ города Иваново. Результаты сравнения показали, что полученные параметры с достаточной точностью совпадают с данными, полученными на электрической станции, что говорит о корректности разработанной модели.

В качестве метода исследования выбран метод спектрального анализа сигнала тока статора. Хорошо известно, что характерным признаком наличия обрывов стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронных электродвигателей является обнаружение в спектре анализируемых сигналов гармоник, именуемых гармониками фиктивной обмотки ротора (ФОР). Частоты этих гармоник могут быть определены по выражению [11]:

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

где  $f_{\text{ФОР}}^{(v\pm)}$  — верхняя ( $v+$ ) и нижняя ( $v-$ ) боковые частоты гармоник ФОР  $v$ -го порядка, Гц;  $f_c$  — частота сети, Гц;  $s$  — скольжение двигателя;  $p$  — число пар полюсов.

С другой стороны, известно, что обмотка статора является фильтром для большинства гармоник ФОР. Это приводит к тому, что в спектре тока статора проявляется значительно меньше гармонических составляющих, чем в сигналах внешнего или внутреннего магнитного поля, а именно, лишь гармоники, порядок которых удовлетворяет следующему выражению [12]:

$$v = (6c \pm 1) \cdot p, \quad (2)$$

где  $c = 0, 1, 2, \dots$ .

При этом наиболее отчетливо проявляются гармоники наименьшего порядка. Из выражения (2) очевидно, что порядок таких гармоник в спектре любого асинхронного двигателя будет совпадать с числом пар полюсов (при подстановке в выражение (2)  $c = 0$ ). Гармоника на верхней боковой частоте  $f_{\text{ФОР}}^{(p+)}$  не может служить диагностическим признаком наличия обрыва, поскольку ее частота совпадает с основной гармоникой сигнала (50 Гц). Поэтому в качестве диагностического параметра удобно использовать амплитуду гармоники с частотой  $f_{\text{ФОР}}^{(p-)}$ . Ее частота в процессе пуска может быть описана как

$$f_{\text{ФОР}}^{(p-)}(t) = |f_c \cdot (1 - 2s(t))|. \quad (3)$$

Поскольку гармонический состав тока статора в процессе пуска изменяется, необходим инструмент для обработки нестационарных сигналов, в качестве которых обычно используются оконное преобразование Фурье (ОПФ) или вейвлет-преобразование. Для проведения исследований выбрано ОПФ, поскольку оно является более простым и требующим меньшего времени для проведения расчетов при сохранении достаточной эффективности обработки. В качестве оконной функции выбрано окно с плоской вершиной (окно Флэттоп), поскольку в этом случае амплитуду искомой гармоники можно определить наиболее точно, а эффект растекания спектра незначителен.

Для корректного построения спектра тока статора необходимо определить подходящую продолжительность интервалов, на которые разбивается диагностический сигнал, чтобы можно было отчетливо выявить характерную гармонику. Для сигнала тока статора она вычисляется, исходя из времени пуска асинхронного двигателя. В ходе работы определено соотношение (4), по которому можно определить необходимую продолжительность интервалов разбиения сигнала для двигателей с любым числом пар полюсов:

$$\frac{2 \cdot \Delta F}{f_c} < \Delta T < \frac{T_n}{4}, \quad (4)$$

где  $\Delta T$  — продолжительности интервалов, на которые разбивается пусковой сигнал, с;  $\Delta F$  — относительная ширина главного лепестка используемого окна по сравнению с шириной главного лепестка прямоугольного окна ( $\Delta F = 5$  для окна Флэттоп);  $T_n$  — время пуска электродвигателя, с.

Из выражения (4) можно оценить и минимальную продолжительность пуска, при которой производится обработка сигнала тока статора:

$$T_{n \min} > \frac{8 \cdot \Delta F}{f_c}. \quad (5)$$

Из выражения (5) при подстановке необходимых параметров видно, что корректная обработка сигналов тока статора с помощью ОПФ возможна только для асинхронных электродвигателей, длительность пуска которых составляет не менее 0,8 с. Электродвигатели с тяжелыми условиями пуска обладают достаточной продолжительностью сигналов, что позволяет производить их обработку и оценивать техническое состояние обмотки ротора при пуске по току статора.

Экспериментальный стенд, на котором проведено исследование сигнала тока статора реальных асинхронных двигателей, представлен на рис. 1. Исследования проводились на низковольтном двигателе типа АИР 71А6 (1) мощностью 370 Вт с 3 парами полюсов. Поскольку время пуска данного двигателя очень мало и составляет менее 0,2 с, то проводить на нем исследования



Рис. 1. Внешний вид экспериментального стенда для исследования сигнала тока статора асинхронных двигателей при пуске.

описанным методом не представляется возможным. Для увеличения времени пуска и приближения длительности пуска к двигателям с тяжелыми условиями пуска принято решение подавать пониженное напряжение с помощью трехфазного регулировочного трансформатора (2). В ходе работы показано, что максимальное время пуска исследуемого двигателя составило около 1 мин при подаче напряжения 30—35 В. Этот режим и рассматривался в качестве расчетного. Сигнал тока статора регистрировался с помощью датчика тока (3). Для обработки сигналов использована звуковая карта (4), обработка сигналов осуществлялась на персональном компьютере в программном комплексе Matlab на основе ОПФ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В первую очередь, для оценки корректности полученных на модели и экспериментальном стенде результатов были рассчитаны значения нижней боковой частоты гармоники ФОР порядка, совпадающего с числом пар полюсов асинхронного двигателя, при изменении скольжения от 1 (момент начала пуска) до 0. Полученный график изменения частоты этой гармоники представлен на рис. 2. Из рис. 2 видно, что при скольжениях, равных 1 и 0, частота гармоники совпадает с частотой 50 Гц, при отличных значениях частота искомой гармоники будет меньше. Минимальное значение частоты (равное 0) достигается при скольжении, равном 0,5 о.е.

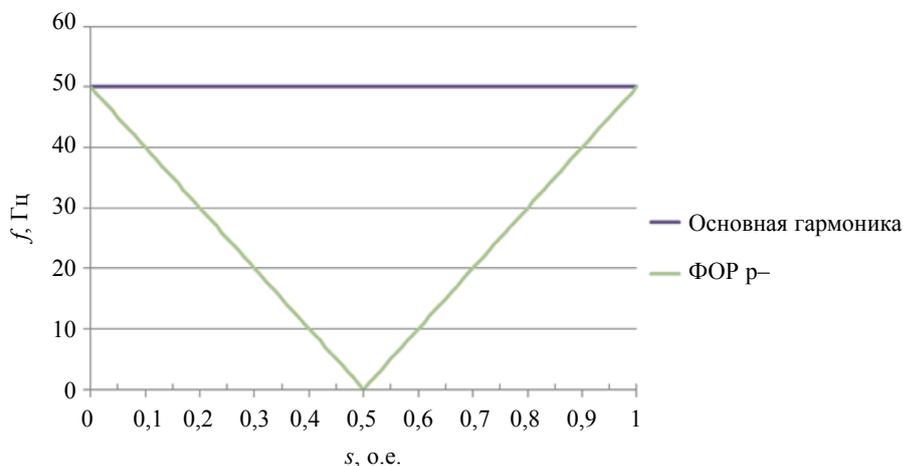


Рис. 2. Изменение частот гармоник ФОР в спектре тока статора при пуске.

Далее были проанализированы спектры сигналов тока статора при пуске при наличии и отсутствии повреждения обмотки ротора на цифровых моделях. Полученные частотно-временные спектры представлены на рис. 3 и 4 для моделей двигателя с 1 оборванным стержнем и без наличия обрывов соответственно. Также для проверки полученных результатов на рис. 5 приведена расчетная зависимость изменения нижней боковой частоты искомой гармоники при пуске.

Из представленных спектров видно, что только при наличии оборванных стержней в спектре отчетливо проявляется гармоника ФОР на нижней боковой частоте, что подтверждает предположение о том, что резкий рост амплитуды этой гармоники может служить диагностическим признаком наличия оборванного стержня. Сравнение рис. 3 и рис. 5 показывает, что частота гармоники ФОР порядка  $p$ – в спектре близка к ее расчетному значению.

Для оценки эффективности разработанного метода произведено сравнение его чувствительности с двумя наиболее эффективными из уже существующих методов контроля по току статора. В первом методе диагностическим признаком обрыва стержня является увеличение разницы амплитуд соседних пиков пускового тока статора. На основании этого метода разработано устройство ВОРС [10]. Диагностическим признаком во втором методе, который в зарубежной литературе имеет аббревиатуру MCSA, является увеличение амплитуды гармоники ФОР  $p$ – в установленном режиме работы [3, 5]. Результаты сравнения представлены в виде таблицы.

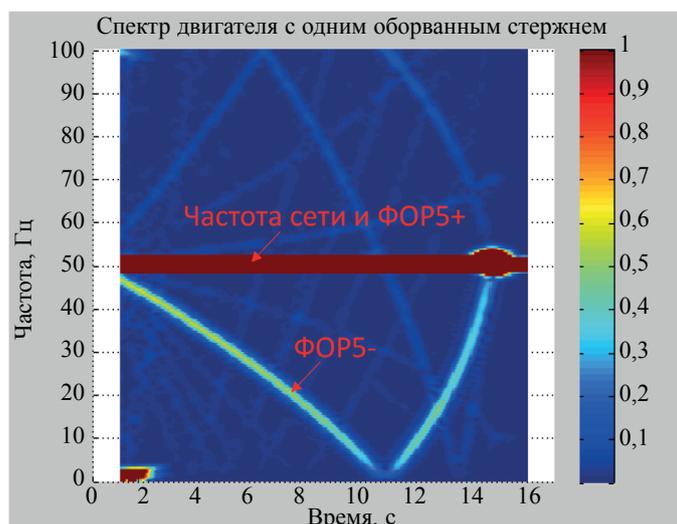


Рис. 3. Частотно-временной спектр тока статора на математической модели двигателя с одним оборванным стержнем.

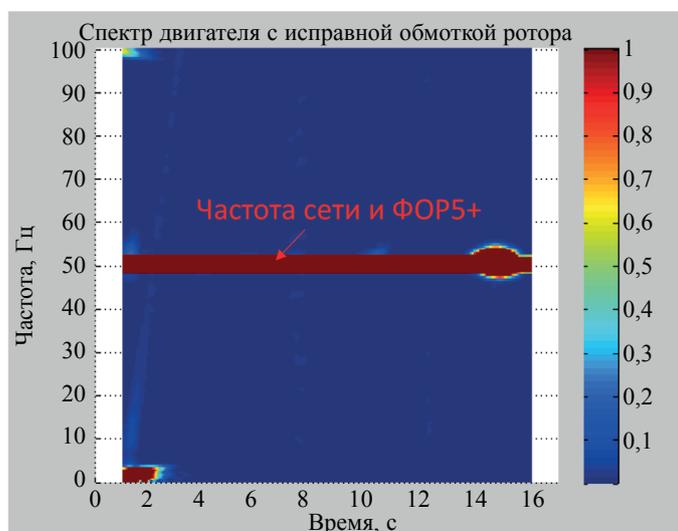


Рис. 4. Частотно-временной спектр тока статора на математической модели исправного двигателя.

Таблица 1

Сравнение методов контроля состояния обрывов стержней по току статора

Наименование метода	Значение диагностического параметра для исправного двигателя	Значение диагностического параметра для двигателя с одним оборванным стержнем	Соотношение значений диагностических параметров при наличии и отсутствии обрыва
ВОРС (Брюханов Г.А., Князев С.А. — по разнице амплитуд тока статора в процессе пуска)	0,58	2,416	4,17
MSCA (по амплитуде гармоники ФОР р- в установившемся режиме работы)	0,008765	0,1751	19,98
Разработанный метод (по амплитуде гармоники ФОР р- в процессе пуска)	0,008146	1,108	136,02

Из табл. 1 видно, что разработанный метод является более чувствительным, что подтверждает его эффективность при проведении контроля двигателей с малым количеством оборванных стержней.

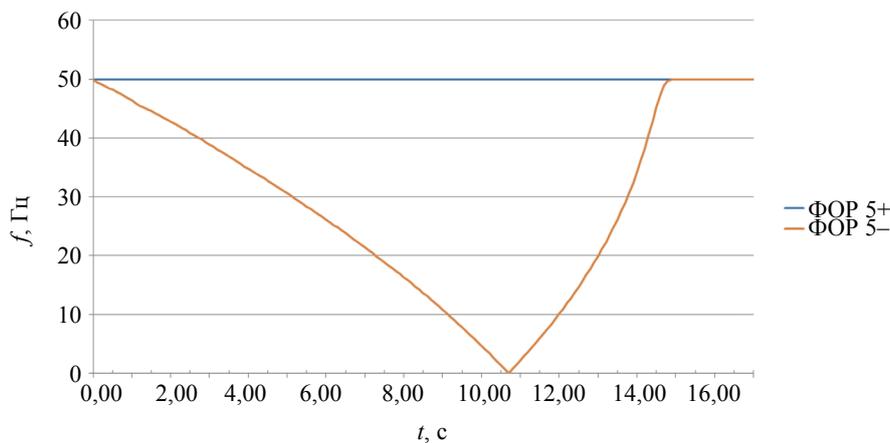


Рис. 5. Расчетные значения частот гармоник ФОР, совпадающих с числом пар полюсов, на математической модели асинхронного двигателя ДАЗО-17-44-8/10У1.

Для оценки возможности проведения контроля на реальных асинхронных двигателях проведены аналогичные исследования на экспериментальном стенде при установке на рассматриваемом двигателе двух роторов: первый был в исправном состоянии, второй — с одним оборванным стержнем обмотки ротора. Полученные спектры представлены на рис. 6 и 7 соответственно при отсутствии и наличии обрыва. Из них видно, что при наличии оборванного стержня в спектре амплитуда гармоники ФОР значительно выше, чем при отсутствии обрыва, что подтверждает сделанные ранее выводы. Значительное отличие частоты гармоники в установившемся режиме работы от 50 Гц на рис. 7 можно объяснить тем, что скорость вращения двигателя при подаче пониженного напряжения существенно отличается от синхронной, поэтому скольжение заметно отличается от 0.

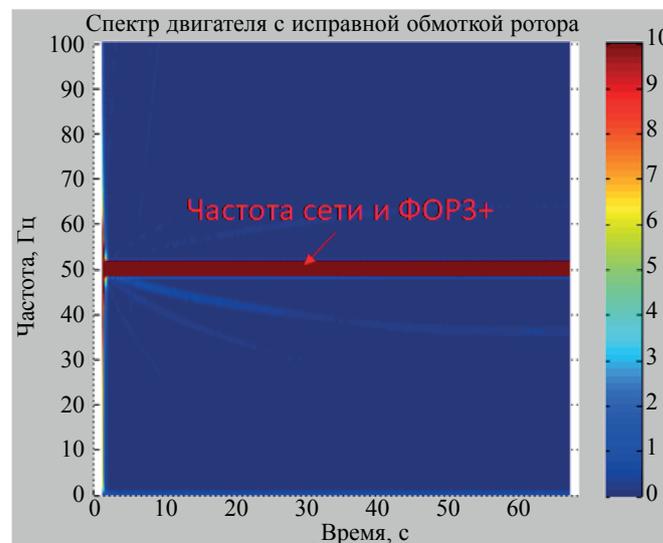


Рис. 6. Частотно-временной спектр тока статора на экспериментальном стенде для исправного двигателя.

## ВЫВОДЫ

В ходе исследования показано, что резкое возрастание амплитуды гармонической составляющей ФОР на нижней боковой частоте, порядок которой совпадает с числом пар полюсов асинхронного двигателя, в сигнале тока статора при пуске может служить диагностическим признаком наличия повреждения его короткозамкнутой обмотки ротора и использоваться для контроля ее состояния. Разработанный метод контроля состояния обмоток роторов асинхронных двигателей с тяжелыми условиями пуска является более чувствительным к обрывам стержней, чем существую-

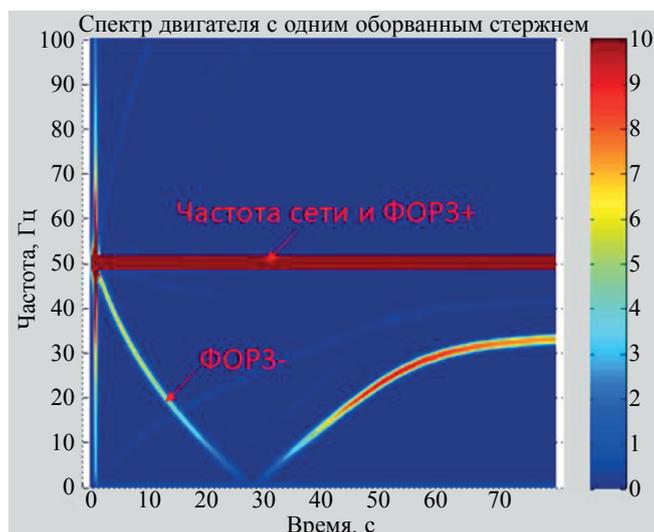


Рис. 7. Частотно-временной спектр тока статора на экспериментальном стенде для двигателя с одним оборванным стержнем.

шие методы, что позволяет своевременно выявлять повреждения обмотки ротора и предотвращать внезапные отказы асинхронных электродвигателей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jahić A., Hederić Z., Atić M.* Detection of Failures on the High-Voltage Cage Induction Motor Rotor // *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*. 2015. V. 6. № 1. P. 15—21.
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. V. 3. Iss. 1. P. 6549—6565.
3. *Sonje D. M., Munje R. K.* Rotor Cage Fault Detection in Induction Motors by Motor Current Signature Analysis // *IJCA Proceedings on International Conference in Computational Intelligence (ICCIA)*. 2012. V. 2. P. 22—26.
4. *Вейнреб К.* Диагностика ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора // *Известия академии наук*. 2013. № 4. С. 133—154.
5. *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. V. 3. Iss. 3. P. 309—313.
6. *Савельев В.А., Страхов А.С., Новоселов Е.М., Скоробогатов А.А., Сулыненков И.Н.* Экспериментально-аналитическое определение диагностического признака дефектов обмотки ротора асинхронного электродвигателя // *Вестник ИГЭУ*. Иваново, 2018. № 4. С. 44—53.
7. *Devillers E., Le Besnerais J., Lubin T., Hecquet M., Lecoq J.* An improved 2D subdomain model of squirrel cage induction machine including winding and slotting harmonics at steady state // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2018. V. 54. Iss. 2. 12 p.
8. *Pu Shi, Chen Z., Vagapov Y.* Wavelet Transform based Broken Rotor-bar Fault detection and Diagnosis Performance Evaluations // *International Journal of Computer Applications*. 2013. V. 69. No.14. P. 36—43.
9. *Pineda-Sanchez M. et al.* 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. V. 56. No. 11. P. 4557—4570.
10. *Брюханов Г.А., Князев С.А.* Метод и устройство диагностики состояния роторных обмоток асинхронных электродвигателей // *Электрические станции*. 1986. № 2. С. 44—45.
11. *Скоробогатов А.А.* Анализ спектра магнитного поля в зазоре асинхронного двигателя при повреждении обмотки ротора // *Вестник ИГЭУ*. Иваново: ИГЭУ, 2006. № 2. С. 75—78.
12. *Геллер Б., Гамата В.* Высшие гармоники в асинхронных машинах. М.: Энергия, 1981. 352 с.
13. *Назарычев А.Н., Скоробогатов А.А., Новоселов Е.М.* Диагностика обрывов стержней обмотки ротора электродвигателя на основе анализа тока статора // *Дефектоскопия*. 2011. № 3. С. 74—82.
14. *Назарычев А.Н., Новоселов Е.М., Полкошиников Д.А., Страхов А.С., Скоробогатов А.А., Пугачев А.А.* Экспериментальное определение диагностических признаков повреждения обмоток роторов высоковольтных двигателей электростанций в режиме пуска // *Дефектоскопия*. 2020. № 5. С. 3—11.