ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.313.333

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

Георгий Дмитриевич Смирнов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, e-mail: gerg_smir_1988@mail.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

Диагностирование обмоток роторов асинхронных двигателей в режиме выбега по внешнему магнитному полю

Авторское резюме

Состояние вопроса. Обрывы стержней обмоток роторов двигателей системы собственных нужд являются распространенной причиной отказов, которые приводят к значительному экономическому ущербу на электростанциях. Одним из наиболее перспективных методов их своевременного обнаружения является спектральный анализ внешнего магнитного поля. Однако не уделяется необходимого внимания использованию данного метода в режиме выбега, который имеет ряд неоспоримых преимуществ. В связи с этим целью настоящего исследования является обнаружение характерных признаков наличия обрывов стержней обмотки ротора асинхронных двигателей в спектрах сигналов внешнего магнитного поля в режиме выбега с учетом остаточной намагниченности.

© Захаров М.А., Страхов А.С., Новоселов Е.М., Полкошников Д.А., Смирнов Г.Д., Скоробогатов А.А., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 53–61.

Материалы и методы. Исследования проведены на имитационных моделях двух асинхронных двигателей, разработанных в программном комплексе Ansys. Для проведения контроля использован метод спектрального анализа индукции внешнего магнитного поля на основе определения амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора. Для обработки результатов применен метод оконного преобразования Фурье с использованием оконной функции Флэттоп для более точного определения амплитуд гармоник.
Результаты. Произведен анализ частотно-временных спектров на моделях двух асинхронных двигателей при различной нагрузке. Показано, что как при наличии токов в обмотке ротора, так и после их затухания вследствие явления остаточной намагниченности в спектрах асинхронных двигателей при наличии обрывов стержней обмотки ротора значительно возрастают амплитуды гармоник от фиктивной обмотки ротора. При этом установлено, что чем выше будет нагрузка двигателя в режиме, предшествующем выбегу, тем больше будут амплитуды гармоник от фиктивной обмотки ротора.
Выводы. Исследования подтвердили возможность обнаружения повреждений обмоток роторов на основе роста амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора, существующих во внешнем магнитном поле как высоковольтных, так и низковольтных двигателей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, спектральный анализ, режим выбега, оконное преобразование Фурье, внешнее магнитное поле, обрыв стержней обмотки ротора, остаточная намагниченность

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

Georgy Dmitrievich Smirnov
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, e-mail: gerg_smir_1988@mail.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

Diagnostic of rotor windings of induction motors in rundown mode using an external magnetic field

Abstract

Background: Broken rotor bars in auxiliary motor rotors are a common cause of failures, leading to significant economic losses at power plants. One of the most promising methods for their timely detection is spectral analysis of the external magnetic field. However, the use of this method in rundown mode, which has several undeniable advantages, has received little attention. Thus, the purpose of this study is to detect special signs of broken rotor bars in the external magnetic field signal spectra of asynchronous motors in rundown mode, taking into account residual magnetization.
Materials and methods. The study has been conducted using simulation models of two induction motors developed in the Ansys software package. Spectral analysis of the external magnetic field induction has been used for monitoring, based on determining the harmonic amplitudes of a fictitious rotor winding. For processing, a short-time Fourier transform method is used applying the Flattop window function for more accurate determination of harmonic amplitudes.
Results. Frequency-time spectra have been analyzed for both motor models under varying loads. It has been shown that both in the presence of rotor winding currents and after their attenuation due to residual magnetization, the amplitudes of harmonics associated with the fictitious rotor winding significantly increase in the spectra of induction motors with broken rotor bars. Moreover, the higher the motor load in the pre-rundown mode, the greater the amplitudes of harmonics associated with the fictitious rotor winding.
Conclusions. The results of the research have confirmed the feasibility to detect rotor winding damage based on the increase in harmonic amplitudes associated with the fictitious rotor winding, existing in the external magnetic field of both high-voltage and low-voltage motors.

Key words: induction motor, spectral analysis, rundown mode, short-time Fourier transform, external magnetic field, broken rotor bars, residual magnetization

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.053-061

Состояние вопроса. Одним из актуальных вопросов современной электроэнергетики является повышение надежности функционирования асинхронных двигателей (АД), являющихся приводами большинства механизмов системы собственных нужд электрических станций. Необходимость проработки данного вопроса обусловлена тем, что их отказы могут привести не только к необходимости дорогого ремонта, сопоставимого со стоимостью двигателя, но и к полному или частичному нарушению процесса выработки электрической энергии и мощности блоком электрической станции. В связи с этим как в отечественной, так и в зарубежной литературе уделяется значительное внимание вопросам разработки методов диагностирования состояния АД в процессе эксплуатации как инструмента для повышения надежности функционирования системы собственных нужд.

Одной из частых причин отказов АД являются повреждения короткозамкнутых обмоток роторов. Хорошо известно, что доля подобных отказов в среднем составляет около 5–10 % от общего числа отказов АД [1]. Однако в ряде работ показано, что доля отказов высоковольтных АД, являющихся приводами ответственных механизмов собственных нужд с тяжелыми условиями пуска, значительно выше и составляет до 30 % от общего числа отказов [2, 3]. По этой причине разработка эффективных методов обнаружения обрывов стержней в перспективе приведет к значительному снижению годового ущерба электрических станций из-за внеплановых отказов АД.

Одним из наиболее перспективных методов обнаружения обрывов стержней в настоящее время является спектральный анализ внешнего магнитного поля (ВМП). При наличии повреждения обмотки ротора из-за возникающей несимметрии в спектре магнитного поля проявляются характерные гармонические составляющие, которые обычно называют гармониками от фиктивной обмотки ротора (далее – гармоники ФОР) [4]. По этой причине рост амплитуд этих гармоник является диагностическим признаком наличия повреждения. Существует ряд отечественных и зарубежных публикаций, посвященных диагностированию обмоток роторов АД по ВМП в установившихся режимах работы [5–9] и при пуске АД [10]. Однако в существующих работах практически не уделяется внимания такому направлению, как обнаружение обрывов стержней АД в режиме выбега, что обусловлено сложностью регистрации и обработки сигнала. Однако при этом данный режим обладает неоспоримым преимуществом – АД отключен от сети, поэтому изменение параметров питающей сети не может оказать никакого влияния на результаты диагностирования.

Авторы существующих на данный момент исследований, посвященных диагностированию АД в режиме выбега, рассматривают преимущественно обнаружение не повреждений обмотки ротора, а иных дефектов, таких как межвитковые замыкания [11, 12] и повреждения подшипников [12, 13]. В этих работах предлагается выявлять дефекты как на основе изменения времени выбега, так и с помощью методов спектрального анализа сигналов вибрации и напряжения. Что касается повреждений обмотки ротора, можно выделить следующие подходы. В [14, 15] предлагается определять наличие обрывов стержней на основе спектрального анализа напряжения на обмотке статора в режиме выбега. В качестве характерной гармоники выбрана гармоническая составляющая, частота которой может быть определена по выражению

$$f_{p-1} = f_c\,(1-s)\left(1-\frac{1}{p}\right), \qquad (1)$$

где f_c – частота сети, Гц; p – число пар полюсов; s – скольжение ротора.

Хотя и не совсем корректно говорить о частоте сети и скольжении в режиме выбега, но очевидно, что в [14, 15] рассматривалась разница между синхронной частотой вращения двигателя и фактической скоростью вращения ротора в любой момент времени в процессе выбега.

В [16] предлагается оценивать наличие обрывов стержней короткозамкнутой обмотки ротора в режиме выбега в области гармоник более высоких порядков (в диапазоне от 5 до 37 гармонических составляющих сигнала). Для более надежного выявления повреждения в качестве метода обработки сигнала предлагается вейвлет-преобразование, а в качестве регистрируемого сигнала – напряжение обмотки статора.

Следует отметить, что никто из авторов не рассматривает в качестве диагностического сигнал в режиме выбега ВМП, которое достаточно удобно для регистрации и позволяет успешно оценивать техническое состояние обмоток роторов электродвигателей. В предшествующей работе нами были проведены исследования на математических моделях высоковольтных АД, где было показано, что при наличии обрыва даже одного стержня в сигнале ВМП отчетливо проявляются характерные гармонические составляющие [17]. Однако в предыдущих исследованиях при моделировании не было учтено явление остаточной намагниченности стали статора и ротора. В [18] на примере определения повышенного эксцентриситета ротора показано, что вследствие остаточной намагниченности даже после затухания токов в роторе магнитное поле все еще суще-

ствует, поэтому без его учета невозможно получить корректные результаты.

Исходя из вышесказанного, целью настоящего исследования является обнаружение характерных признаков наличия обрывов стержней короткозамкнутой обмотки ротора АД в спектрах сигналов ВМП в режиме выбега с учетом остаточной намагниченности.

В ходе исследования были поставлены следующие задачи:

1) проанализировать спектры сигналов ВМП в режиме выбега на имитационных моделях низковольтных и высоковольтных АД с учетом остаточной намагниченности;

2) оценить влияние нагрузки АД в режиме, предшествующем режиму выбега, на результаты диагностирования.

Материалы и методы. Рассмотрим, как изменяются частоты характерных гармоник в режиме выбега, опишем имитационные модели, используемые для проведения контроля, и метод обработки получаемых сигналов.

Как было отмечено выше, характерной особенностью спектров сигналов ВМП является появление гармоник ФОР, частоты которых в установившемся и пусковом режимах могут быть определены по выражению [10]

$$f_{\text{ФОР}}^{\nu\pm}(t)=\left|f_c\left(\frac{1-s(t)}{p}\cdot\nu\pm s(t)\right)\right|, \qquad (2)$$

где $f_{\text{ФОР}}^{\nu\pm}(t)$ – верхняя и нижняя боковая частота гармоники ФОР ν-го порядка в момент времени t, Гц.

Поскольку в режиме выбега двигатель отключен от сети, применение формулы (2) невозможно. В данном режиме частота основной гармоники сигнала, а также частоты характерных гармоник ФОР будут определяться фактической скоростью вращения двигателя, а вместо двух частот каждого порядка останется только одна гармоническая составляющая. Исходя из (2) можно оценить значения частот гармоник ФОР в режиме выбега по выражению

$$f_{\Phi OP}^{\nu}(t)=\frac{n(t)}{60}\,\frac{\nu}{p}, \qquad (3)$$

где $f_{\text{ФОР}}^{\nu}(t)$ – частота гармоники ФОР ν-го порядка в момент времени t, Гц; $n(t)$ – скорость вращения АД в момент времени t, об/мин.

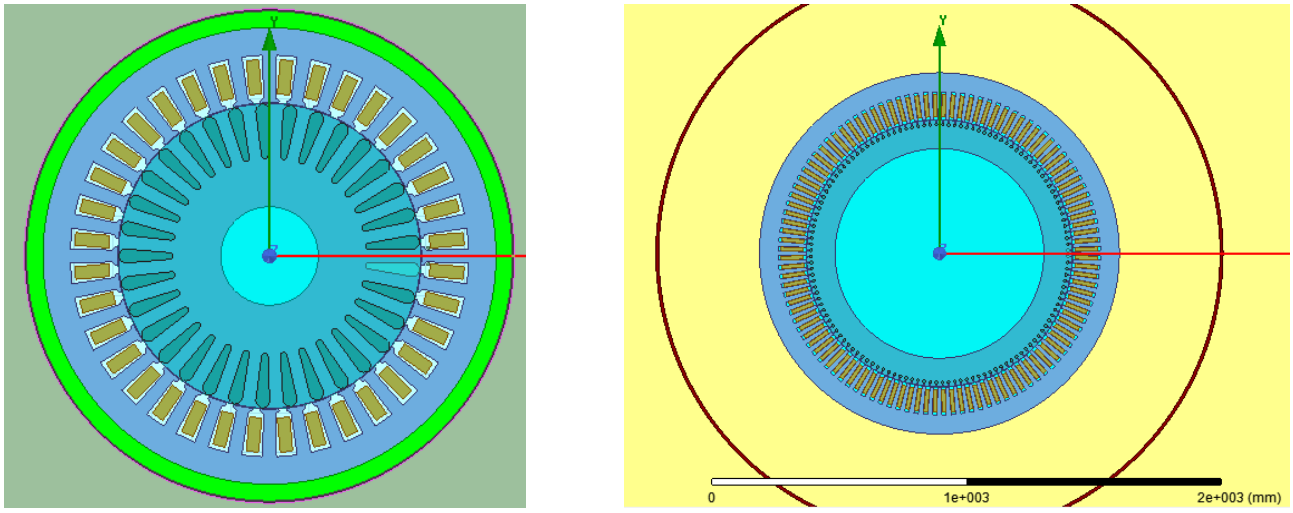
При этом хорошо известно, что в сигнале ВМП в спектрах отчетливо проявляются гармоники ФОР более низких порядков. Также из выражения (3) очевидно, что значение частоты гармоники порядка, совпадающего с числом пар полюсов, соответствует основной гармонике сигнала, по этой причине использование ее амплитуды непригодно для проведения контроля. Таким образом, необходимо сделать акцент на оценку амплитуд гармоник ФОР первых порядков за исключением гармоники порядка $\nu = p$.

Для проведения исследования использовались имитационные модели АД, разработанные в программном комплексе Ansys. Смоделированы два двигателя с подключенными к ним механизмами: низковольтный АД типа АИР 71А6 мощностью 370 Вт с 3 парами полюсов, обмотка ротора которого имеет 33 стержня (рис. 1,а), и высоковольтный двухскоростной АД типа ДАЗО2-17-44-8/10 (выбег осуществлялся на первой скорости, число пар полюсов 5, мощность 320 кВт, число стержней в обмотке ротора 132) (рис. 1,б). Расчет ВМП производился на основе метода конечных элементов в одной точке на корпусе АД при различной нагрузке. Каждая из моделей рассчитана для двух состояний обмотки ротора – исправного и неисправного, в котором обмотка имеет оборванные стержни.

Моделирование остаточной намагниченности осуществлялось путем задания петли гистерезиса для электротехнической стали. Для ее создания были использованы основная кривая намагничивания B(H) электротехнической стали в соответствии с [19] и коэрцитивная сила, которая для электротехнической стали составляет от 12 до 80 А/м [20]. В рамках проводимых исследований ее величина была принята равной 50 А/м.

В качестве инструмента для обработки сигналов выбрано оконное преобразование Фурье, которое является достаточно простым и эффективным инструментом для анализа сигналов, амплитуды и частоты гармоник в которых изменяются с течением времени (что характерно для режима выбега). Для снижения влияния эффекта растекания спектра, который может привести к существенному искажению амплитуд гармонических составляющих, использовано окно Флэттоп. Требования к продолжительности интервалов, на которые должен быть разбит сигнал, и к необходимой продолжительности выбега агрегата, приведены в [18]. Проведенный анализ показал, что длительность выбега обоих агрегатов является достаточной для проведения успешной обработки сигнала.

Результаты. Первоначально для обнаружения признаков наличия повреждения обмотки ротора АД в режиме выбега были проанализированы спектры сигналов ВМП низковольтного двигателя типа АИР 71А6 при его номинальной нагрузке, ток в обмотке ротора которого затухает очень быстро. На рис. 2 представлено изменение тока I в обмотке ротора (в стержне) в процессе выбега, где отключение двигателя от сети происходит в момент времени, равный 5 с. Видно, что спустя всего лишь 0,3 с значение тока в обмотке ротора снижается почти до 0.



а) б)

Рис. 1. Имитационные модели АД: а – АИР 71А6; б – ДАЗО2-17-44-8/10

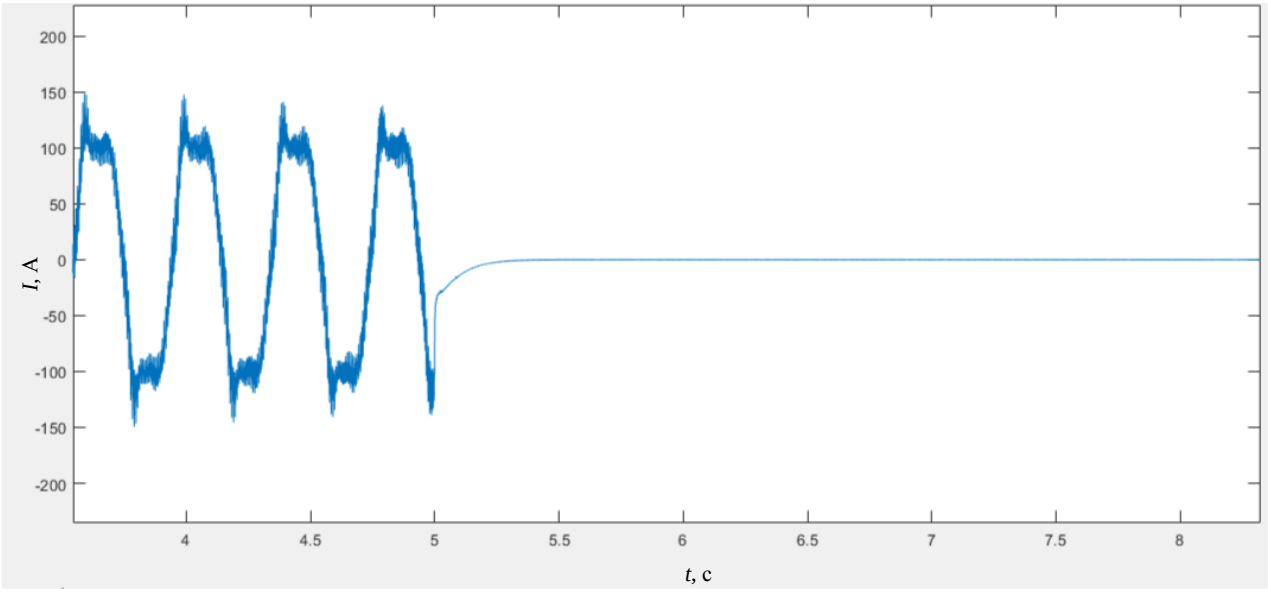


Рис. 2. Изменение тока в обмотке ротора (в стержнях) в режиме с номинальной нагрузкой АД типа АИР 71А6

Полученный частотно-временной спектр (ЧВС) сигнала индукции ВМП при номинальной нагрузке исправного двигателя представлен на рис. 3, а при наличии одного оборванного стержня – на рис. 4. Для большей наглядности значения амплитуд гармоник ФОР в моменты времени 1 и 9 с от начала процесса выбега (указанные моменты времени отмечены на рисунках пунктиром) сведены в табл. 1 (прочерком обозначены ячейки, где амплитуда гармоники составляет менее 10^{-5} мкТл).

Анализ полученных результатов показал, что при наличии обрыва стержня амплитуды гармоник ФОР (рис. 4) значительно возрастают по сравнению с исправным двигателем (рис. 3), поэтому их рост может выступать диагностическим признаком повреждения обмоток роторов АД. Также очевидно, что в данном случае появление этих гармоник обусловлено исключительно явлением остаточной намагниченности сердечника ротора, поскольку ток в обмотке ротора уже спустя 0,3 с снижается практически до 0. По этой причине амплитуды гармоник с течением времени практически не отличаются (небольшой рост амплитуд гармоник ФОР с течением времени обусловлен снижением их частоты) (табл. 1).

Аналогичные опыты были проведены на математических моделях высоковольтного АД типа ДАЗО2-17-44-8/10. Полученные ЧВС представлены на рис. 5 и 6, а значения амплитуд гармоник ФОР – в табл. 1.

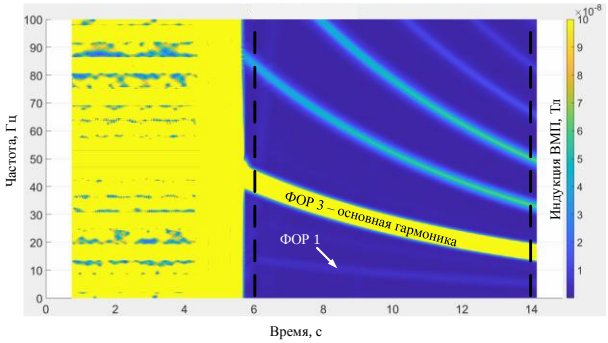


Рис. 3. ЧВС АД типа АИР 71А6 с исправной обмоткой ротора в режиме с номинальной нагрузкой

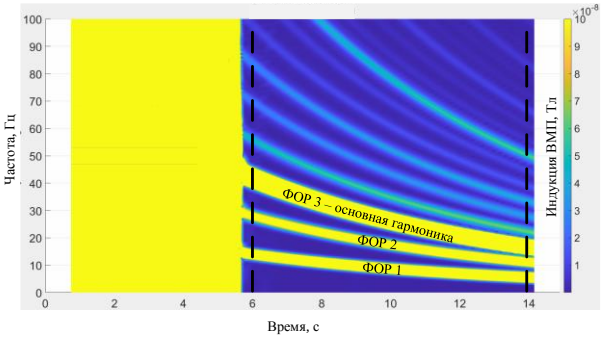


Рис. 4. ЧВС АД типа АИР 71А6 с одним оборванным стержнем обмотки ротора в режиме с номинальной нагрузкой

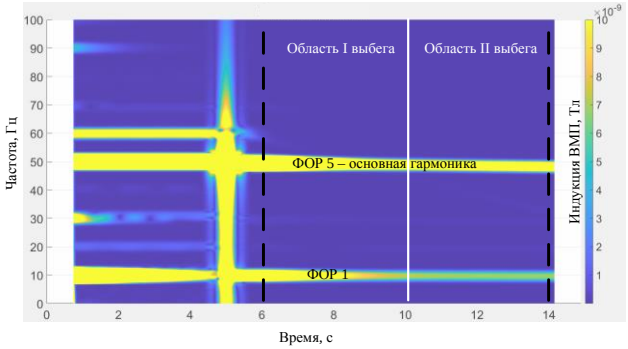


Рис. 5. ЧВС АД типа ДАЗО2-17-44-8/10 с исправной обмоткой ротора в режиме с номинальной нагрузкой

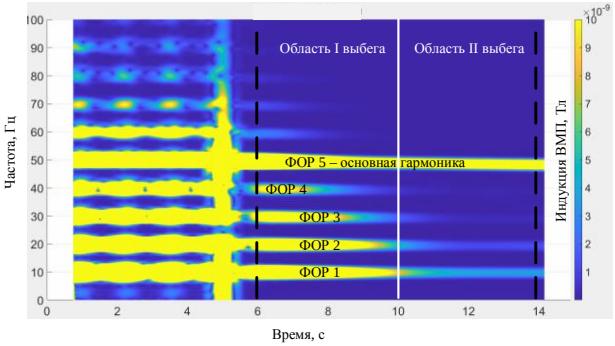


Рис. 6. ЧВС АД типа ДАЗО2-17-44-8/10 с одним оборванным стержнем обмотки ротора в режиме с номинальной нагрузкой

Таблица 1. **Значения амплитуд гармоник ФОР в сигнале индукции ВМП при номинальной нагрузке при наличии и отсутствии повреждения обмотки ротора**

Момент времени, с	Тип двигателя	Состояние обмотки ротора АД	Амплитуда гармоники ФОР, мкТл			
			1-го порядка	2-го порядка	3-го порядка	4-го порядка
t = 6 с (1 с от начала выбега)	АИР 71А6	Исправная	0,0027	0,001		
		С одним оборванным стержнем	0,263	0,166		
	ДАЗО2-17-44-8/10	Исправная	0,042	0,00014	0,00025	0,00002
		С одним оборванным стержнем	0,107	0,028	0,016	0,009
t = 14 с (9 с от начала выбега)	АИР 71А6	Исправная	0,0042	0,0012		
		С одним оборванным стержнем	0,29	0,188		
	ДАЗО2-17-44-8/10	Исправная	0,0069	0,00013	0,00009	–
		С одним оборванным стержнем	0,0037	0,0012	0,00029	0,00012

Анализ полученных результатов показал, что значения амплитуд гармоник ФОР, как и для низковольтного АД, значительно возрастают даже при наличии только одного оборванного стержня из 132. Однако для ДАЗО2-17-44-8/10 время затухания тока в обмотке ротора уже значительно выше и составляет около 5 секунд [18]. По этой причине в спектрах можно выделить две области – I и II, которые на рис. 5, 6 разделены белой линией. В области I рост амплитуд гармоник ФОР обусловлен не только явлением остаточной намагниченности, но и протеканием токов в обмотке ротора. Следовательно, в этой области амплитуды гармоник ФОР постепенно снижаются из-за уменьшения тока ротора. В области II ток в обмотке ротора уже практически равен нулю, поэтому амплитуды гармоник ФОР практически не изменяются и обусловлены только явлением остаточной намагниченности.

Далее был произведен анализ влияния нагрузки в режиме, предшествующем выбегу, на амплитуды гармоник ФОР. Особенно актуально проведение данного опыта в связи с доказательством влияния явления остаточной намагниченности, так как хорошо известно, что при более высокой нагрузке амплитуды гармоник ФОР в установившемся режиме работы значительно выше. По этой причине были проанализированы спектры сигналов ВМП при различной нагрузке. Расчеты произведены при наличии одного оборванного стержня для АД типа АИР 71А6 при трех различных нагрузках в установившемся режиме, предшествующем выбегу: при номиналь-

ной нагрузке, при нагрузке, составляющей 50 % от номинальной и в режиме холостого хода. Для АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 произведены расчеты при нагрузках, составляющих 25, 50, 75 и 100 % от номинальной нагрузки, при наличии 6 оборванных стержней обмотки ротора (что составляет 5 % от общего количества стержней обмотки ротора).

Полученные ЧВС АД типа АИР 71А6 при указанных нагрузках приведены на рис. 3, 4, 7, 8, а спектры АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 – на рис. 9–12. Результаты сопоставления амплитуд гармоник сведены в табл. 2.

Сравнивая результаты при различной нагрузке (в том числе, и с номинальной нагрузкой), можно сделать вывод о том, что как для низковольтных, так и для высоковольтных АД увеличение нагрузки приводит к существенному увеличению амплитуд гармонических составляющих ФОР при наличии повреждения обмотки ротора, поэтому при более высокой нагрузке двигателя выявлять повреждение обмотки ротора значительно проще. При этом данная закономерность характерна как для области I (спустя 1 с от начала выбега), так и для области II (спустя 9 с от начала выбега).

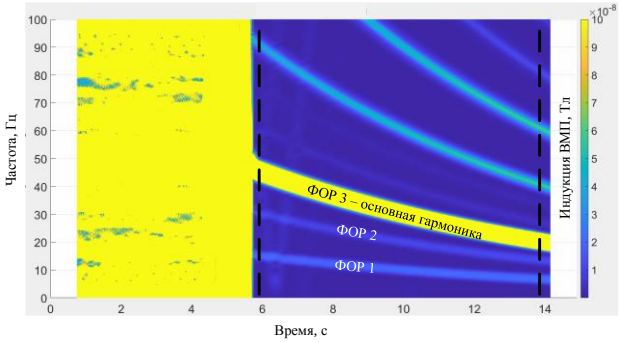


Рис. 7. ЧВС АД типа АИР 71А6 с одним оборванным стержнем обмотки ротора в режиме холостого хода

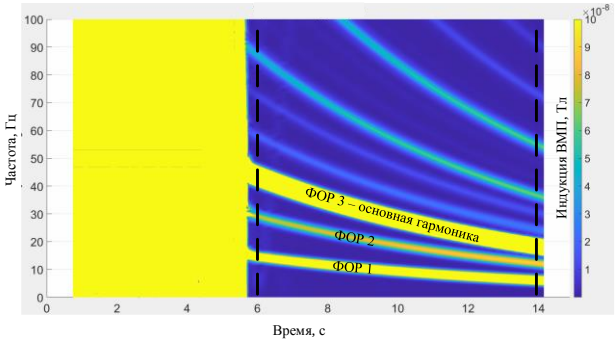


Рис. 8. ЧВС АД типа АИР 71А6 с одним оборванным стержнем обмотки ротора в режиме с нагрузкой, составляющей 50 % от номинальной

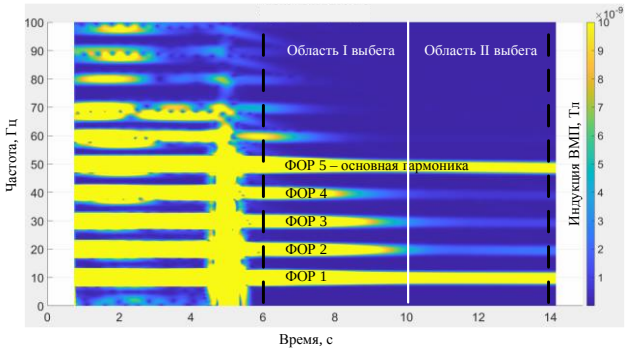


Рис. 9. ЧВС АД типа ДАЗО2-17-44-8/10 с шестью оборванными стержнями обмотки ротора в режиме с нагрузкой, составляющей 25 % от номинальной

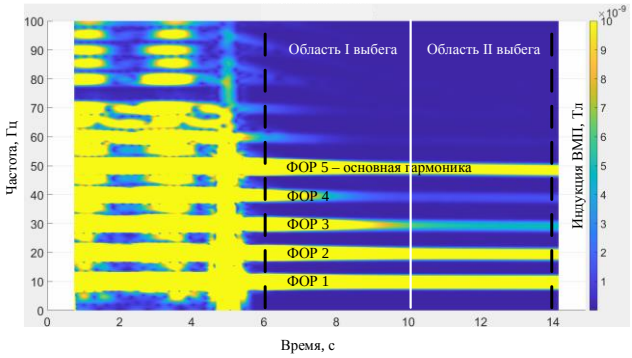


Рис. 10. ЧВС АД типа ДАЗО2-17-44-8/10 с одним оборванным стержнем обмотки ротора в режиме с нагрузкой, составляющей 50 % от номинальной

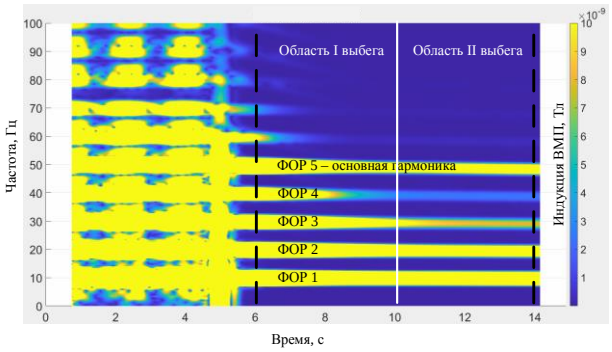


Рис. 11. ЧВС АД типа ДАЗО2-17-44-8/10 с шестью оборванными стержнями обмотки ротора в режиме с нагрузкой, составляющей 75 % от номинальной

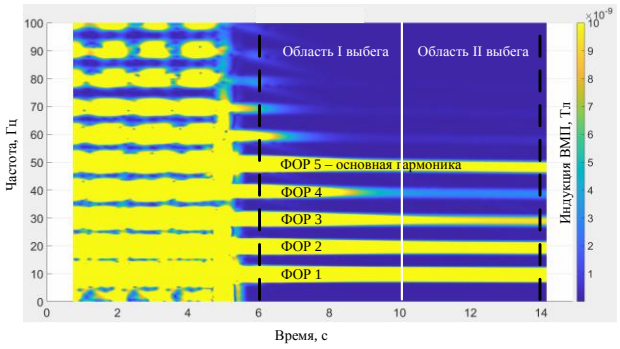


Рис. 12. ЧВС АД типа ДАЗО2-17-44-8/10 с одним оборванным стержнем обмотки ротора в режиме с номинальной нагрузкой

Таблица 2. **Значения амплитуд гармоник ФОР в сигнале индукции ВМП в различных режимах работы при наличии оборванных стержней обмотки ротора**

Момент времени, с	Тип двигателя	Число оборванных стержней	Нагрузка АД в % от номинальной	Амплитуда гармоники ФОР, мкТл			
				1-го порядка	2-го порядка	3-го порядка	4-го порядка
t = 6 с (1 с после начала выбега)	АИР 71А6	1	0	0,0203	0,0112		
			50	0,154	0,0802		
			100	0,263	0,166		
	ДАЗО2-17-44-8/10	6	25	0,31	0,029	0,043	0,036
			50	0,45	0,29	0,12	0,038
			75	0,77	0,42	0,18	0,076
			100	0,99	0,46	0,21	0,092
t = 14 с (9 с от начала выбега)	АИР 71А6	1	0	0,0219	0,0119		
			50	0,171	0,0906		
			100	0,29	0,188		
	ДАЗО2-17-44-8/10	6	25	0,027	0,002	0,0011	0,0006
			50	0,073	0,021	0,0049	0,0013
			75	0,12	0,03	0,0079	0,0025
			100	0,16	0,035	0,0094	0,0029

Следует отметить, что при отсутствии обрывов стержней разница амплитуд гармоник ФОР в режиме выбега незначительна

Выводы. В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) при наличии обрыва даже одного стержня короткозамкнутой обмотки ротора АД в спектре сигнала ВМП значительно возрастают амплитуды гармоник ФОР первых порядков, что может служить диагностическим признаком дефекта;

2) указанные гармоники существуют не только при протекании в обмотке ротора токов, но и после их затухания в процессе выбега, что обусловлено явлением остаточной намагниченности сердечника ротора;

3) загрузка двигателя в режиме, предшествующем выбегу, оказывает значительное влияние на амплитуды гармоник ФОР и, следовательно, на результаты диагностирования.

Таким образом, важнейшим результатом настоящего исследования является доказанная возможность обнаружения в спектрах ВМП характерных признаков наличия обрывов стержней не только при наличии протекающих токов в обмотке ротора, но и после их затухания вследствие явления остаточной намагниченности сердечника ротора.

Полученные результаты позволяют оценивать наличие обрывов стержней обмотки ротора не только для мощных высоковольтных двигателей, токи в обмотках ротора которых затухают в течение нескольких секунд, но и для маломощных низковольтных АД, если продолжительность их выбега достаточна для проведения обработки сигналов.

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. **Stefani A., Bellini A., Filippetti F.** Diagnosis of Induction Machines Rotor Faults in Time-Varying Conditions // IEEE Transaction on Industrial Electronics. – 2009. – Vol. 56, No. 11. – P. 4548–4556.

3. **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. – Vol. 6, No. 1. – P. 15–21.

4. **Скоробогатов А.А.** Анализ спектра магнитного поля в зазоре асинхронного двигателя при повреждении обмотки ротора // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 2. – С. 75–78.

5. **Jarzyna W.** Diagnostic Characteretics of Axial Flux in an Induction Machine // Electrical Machines and Drives, Conference Publication. – 1995. – No. 4. – P. 141–146.

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

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

8. **Бельский И.О., Куприянов И.С, Лукьянов А.В.** Исследование угловой скорости и магнитного поля при дефектах асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 4. – С. 62–69.

9. **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. – 2011. – P. 192–198.

10. **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.

11. **Сафиуллин Р.А., Янгиров И.Ф.** Исследование вибрации асинхронного электродвигателя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 62–70.

12. **Соколова О.В., Соколов И.С.** Устройство для диагностики межвитковых замыканий и дефектов

подшипников асинхронных электродвигателей // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2019. – Т. 11, № 3. – С. 592–599.

13. **Диагностика** состояния подшипников асинхронного двигателя 0,38 кВ на основе спектрального состава напряжения выбега / А.А. Корф, И.Ф. Суворов, А.С. Дедов и др. // Наука и образование: актуальные исследования и разработки: сб. ст. III Всерос. науч.-практ. конф. – Чита, 2020. – С. 124–130.

14. **Потапенко А.О., Юсупова А.О., Латыпов С.И.** Способ диагностики повреждения короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя в режиме выбега // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 62–70.

15. **Novozhilov A., Potapenko A., Novozhilov T.** Process simulation in induction motor where short-circuit rotor bar is failed during run-down regime // Przegląd elektrotechniczny. – 2018. – Vol. 94, No. 6. – P. 33–37.

16. **Detection** of Broken Rotor Bar Faults and Effects of Loading in Induction Motors during Rundown / R. Supangat, J. Grieger, N. Ertugrul, et al. // IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya, Turkey. – 2007. – Vol. 1. – P. 196–201.

17. **Исследование** влияния нагрузки и несимметрии питающего напряжения на внешнее магнитное поле в режиме выбега электродвигателя при повреждении обмотки ротора / Д.А. Полкошников, А.С. Страхов, Д.А. Гаврилов и др. // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (XXII Бенардосовские чтения). Т. 1. – Иваново, 2023. – С. 103–105.

18. **Метод** определения динамического эксцентриситета асинхронных электродвигателей электростанций в режиме выбега / А.Н. Назарычев, Д.А. Полкошников, А.С. Страхов и др. // Электрические станции. – 2025. – № 3(1124). – С. 29–38.

19. **Проектирование** электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев: учебник для вузов. – 4 изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2011. – 767 с.

20. **Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М.** Электротехнические материалы: учебник для вузов. – 7 изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 304 с.

References

1. 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.

2. Stefani, A., Bellini, A., Filippetti, F. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no. 11, pp. 4548–4556.

3. Jahić, A., Hederić, Z., Atić, M. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 15–21.

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

5. Jarzyna, W. Diagnostic Characteretics of Axial Flux in an Induction Machine. *Conference Publication "Electrical Machines and Drives",* 1995, no. 4, pp. 141–146.

6. Ceban, A., Pusca, R., Romary, R. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, May 2012, vol. 59, no. 5, pp. 2082–2093.

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

8. Bel'skiy, I.O., Kupriyanov, I.S, Luk'yanov, A.V. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2018, no. 4, pp. 62–69.

9. 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.

10. 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.

11. Safiullin, R.A., Yangirov, I.F. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy*, 2021, vol. 17, no. 2, pp. 62–70.

12. Sokolova, O.V., Sokolov, I.S. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 592–599.

13. Korf, A.A., Suvorov, I.F., Dedov, A.S., Ivanov, A.A., Shoyvanov, Yu.R. Diagnostika sostoyaniya podshipnikov asinkhronnogo dvigatelya 0,38 kV na osnove spektral'nogo sostava napryazheniya vybega [Diagnostic of condition of 0,38 kV induction motor bearings based on the spectral composition of the coast-down voltage]. *Sbornik statey III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauka i obrazovanie: aktual'nye issledovaniya i razrabotki"* [Proceedings of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference "Science and Education: Current Research and Developments"]. Chita, 2020, pp. 124–130.

14. Potapenko, A.O., Yusupova, A.O., Latypov, S.I. *Vestnik YuUrGU. Seriya Energetika*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 62–70.

15. Novozhilov, A., Potapenko, A., Novozhilov, T. *Przegląd elektrotechniczny*, 2018, vol. 94, no. 6, pp. 33–37.

16. Supangat, R., Grieger, J., Ertugrul, N., Soong, W.L., Gray, D.A., Hansen, C.H. Detection of Broken Rotor Bar Faults and Effects of Loading in Induction Motors during Rundown. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference.* Antalya, Turkey, 2007, vol. 1, pp. 196–201.

17. Polkoshnikov, D.A., Strakhov, A.S., Gavrilov, D.A., Novoselov, E.M., Skorobogatov, A.A. Issledovanie vliyaniya nagruzki i nesimmetrii pitayushchego napryazheniya na vneshnee magnitnoe pole v rezhime vybega elektrodvigatelya pri povrezhdenii obmotki rotora [Study of the effect of load and supply voltage asymmetry on the external magnetic field during electric motor coast-down under rotor winding fault conditions]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii". T. 1 (XXII Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of international scientific and technical conference "Current state and trends of the development of electrical and thermal technologies" (XXII Benardos Readings)]. Ivanovo, 2023, pp. 103–105.

18. Nazarychev, A.N., Polkoshnikov, D.A., Strakhov, A.S., Novoselov, E.M., Zakharov, M.A., Skorobogatov, A.A. *Elektricheskie stantsii*, 2025, no. 3(1124), pp. 29–38.

19. Kopylov, I.P., Klokov, B.K., Morozkin, V.P., Tokarev, B.F. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of Electrical Machines]. Moscow: Izdatel'stvo Yurayt, 2011. 767 p.

20. Bogoroditskiy, N.P., Pasynkov, V.V., Tareev, B.M. *Elektrotekhnicheskie materialy* [Electrical engineering materials]. Leningrad: Energoatomizdat, Leningradskoe otdelenie, 1985. 304 p.