

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ПОВРЕЖДЕНИЯ ОБМОТОК РОТОРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В РЕЖИМЕ ПУСКА

© 2020 г. А.Н. Назарычев^{1,*}, Е.М. Новоселов^{2,**}, Д.А. Полкошников^{2,***}, А.С. Страхов^{2,****},
А.А. Скоробогатов^{2,*****}, А.А. Пугачев^{1,*****}

¹Петербургский энергетический институт повышения квалификации, Россия 196135

Санкт-Петербург, ул. Авиационная, 23

²ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», Россия
153003 Иваново, ул. Рабфаковская, 34

E-mail: *nazarythev@mail.ru; **captain.udgin@gmail.com; ***pda37@yandex.ru;

****astrakhov90@yandex.ru; *****aaskor.andrey@yandex.ru; *****aap@energan.ru

Поступила в редакцию 10.02.2020; после доработки 13.03.2020

Принята к публикации 23.03.2020

Асинхронные электродвигатели широко используются в качестве приводов различных механизмов в энергетике и промышленности. Их отказ может привести к дорогостоящему ремонту, к снижению мощности или, например, полному останову блока электростанции. Одной из причин отказов высоковольтных асинхронных двигателей, работающих с тяжелыми условиями пуска, являются повреждения короткозамкнутой обмотки ротора. Существующие в настоящее время методы контроля обрывов стержней таких электродвигателей малоэффективны из-за особенностей режимов их работы. Поэтому контроль состояния стержней высоковольтных двигателей при пуске и поиск диагностических признаков является актуальной задачей. Первоначально исследования проводились на модели высоковольтного асинхронного двигателя, разработанной в программном комплексе ANSYS. Для подтверждения полученных результатов на реальном двигателе проведены исследования и на разработанном экспериментальном стенде. Обработка зарегистрированных сигналов осуществлена на основе метода оконного преобразования Фурье в программном комплексе MatLab. В ходе проведенного исследования показано, что при наличии обрывов стержней в спектре асинхронного двигателя резко возрастают амплитуды гармонических составляющих фиктивной обмотки ротора на нижних боковых частотах первых порядков, что подтверждает возможность использования сигнала внешнего магнитного поля при пуске для выявления наличия обрывов стержней короткозамкнутой обмотки ротора высоковольтных асинхронных двигателей с тяжелыми длительными пусками.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, обрыв стержней обмотки ротора, тяжелые условия пуска, внешнее магнитное поле, оконное преобразование Фурье.

DOI: 10.31857/S0130308220050012

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая станция является сложным технологическим объектом, надежность работы которого зависит от множества факторов. Одним из таких факторов является безотказность вспомогательного оборудования. Отказы высоковольтных асинхронных двигателей (АД) собственных нужд (СН) являются частой причиной нарушений в технологическом цикле выработки тепловой и электрической энергии и могут даже привести к останову блока.

Нужно отметить, что в настоящий момент оборудование на электрических станциях имеет высокий уровень износа, что способствует росту числа внезапных отказов. Поэтому одним из способов увеличения безотказной работы является использование нового оборудования, которое будет более надежным. Однако для этого требуются значительные финансовые затраты. Более дешевым вариантом является внедрение систем диагностирования, которые позволяли бы выявлять неисправности на раннем этапе их развития, так как основная опасность заключается именно во внезапном отказе электрооборудования.

Одной из причин отказов высоковольтных АД СН электростанций, работающих с тяжелыми условиями пуска, являются повреждения короткозамкнутой обмотки ротора (ОР). Отказы ОР от 13 до 30 % от общего количества отказов узлов высоковольтных АД [1, 2].

Наибольшая повреждаемость роторов наблюдается на высоковольтных АД, особенно на электродвигателях механизмов топливоподачи и топливоприготовления (дробилки и мельницы) и механизмов тягодутьевого тракта пылеугольных электростанций. Такая повреждаемость обусловлена особенностями их пусков, а именно:

1. Прямой пуск двигателей.

2. Тяжелые условия пуска. Наиболее характерны для дробилок, мельниц, дутьевых вентиляторов и дымососов.

3. Частые пуски. Например, дробилки и мельницы могут пускаться более 600 раз в год.

4. Высокий уровень износа оборудования, а также низкое качество обслуживания и ремонта.

Наиболее тяжелые последствия обрыва стержней ОР наблюдаются на мощных высоковольтных АД с составной обмоткой. При пуске стержень может отогнуться и повредить лобовую часть обмотки статора, что приведет к катастрофическим для двигателя последствиям. В случае своевременного выявления неисправности можно было бы ограничиться лишь небольшим ремонтом силами самого предприятия.

Таким образом, для высоковольтных АД СН электростанций актуальной задачей является своевременное выявление обрывов стержней обмотки ротора, что может быть осуществлено с помощью методов функционального диагностирования, которые позволяют выявлять неисправности на работающем оборудовании.

Традиционно подобные методы диагностики АД основаны, как правило, на спектральном анализе сигналов (тока статора [3, 4], вибрации [5, 6], внешнего и внутреннего магнитного поля [7—10] и т.д.) с помощью быстрого преобразования Фурье. Однако необходимо отметить, что двигатели ряда механизмов, на которых наиболее часто происходят повреждения обмотки ротора (дробилки и мельницы), работают с колебаниями частоты вращения, что делает невозможным применение традиционных методов спектрального анализа, которым необходим стационарный сигнал.

Также следует отметить, что многие высоковольтные АД с тяжелыми условиями пуска, вращающие механизмы СН электростанций, выполняются с двойной беличьей клеткой. Диагностировать состояние ОР подобных АД в установившемся режиме работы затруднительно, так как при этом большая часть тока протекает по внутренней (рабочей) обмотке. Обрыв стержней ОР происходит чаще всего в ходе пуска электродвигателя, когда амплитуды протекающих токов максимальны, поэтому чаще всего повреждается наружная (пусковая) обмотка.

Многие АД на электрических станциях работают с нагрузкой, составляющей 0,53—0,8 от номинальной [11]. Это усложняет процесс контроля, так как амплитуды протекающих токов ротора в этом случае значительно ниже, чем при номинальной нагрузке. Поэтому требуется разработка новых более чувствительных методов диагностики таких двигателей.

Развитие компьютерных технологий и позволяет проводить контроль методом спектрального анализа не только в установившихся, но и в пусковых режимах. Контроль при пуске позволяет избежать тех сложностей, которые характерны для установившихся режимов. Известны разработки методов контроля наличия оборванных стержней при пуске АД по току статора [12—14]. Однако данные методы еще мало проработаны и требуют дальнейшего исследования. Кроме того, в представленных работах не уделяется внимание проведению исследований на высоковольтных двигателях.

Отметим, что в настоящее время одним из наиболее перспективных и неизученных методов, используемых для контроля состояния обмотки ротора АД, является спектральный анализ внешнего магнитного поля (ВМП) АД. При этом никто из авторов не исследовал сигнал ВМП в пусковом режиме. Поэтому целью работы является исследование сигналов ВМП при пуске высоковольтных АД СН с тяжелыми условиями пуска и доказательство возможности его применения в целях определения состояния ОР двигателей.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования сигналов ВМП при пуске разработана модель высоковольтного двухскоростного АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1, который применяется в качестве привода механизмов

Таблица 1

Параметры моделируемого АД

Тип двигателя	Напряжение, кВ	Число пар полюсов	Номинальная частота вращения, об/мин	Номинальная мощность, кВт
ДАЗО-17-44-8/10У1	6	4	741	630
		5	594	320

тягодутьевого тракта в системе СН электростанций. Модель разработана в программном комплексе ANSYS Maxwell [15]. Расчет ВМП осуществляется на основе метода конечных элементов. Параметры исследуемого двухскоростного двигателя приведены в табл. 1, а его модель — на рис. 1. У двигателя регистрируется значение индукции радиальной составляющей ВМП

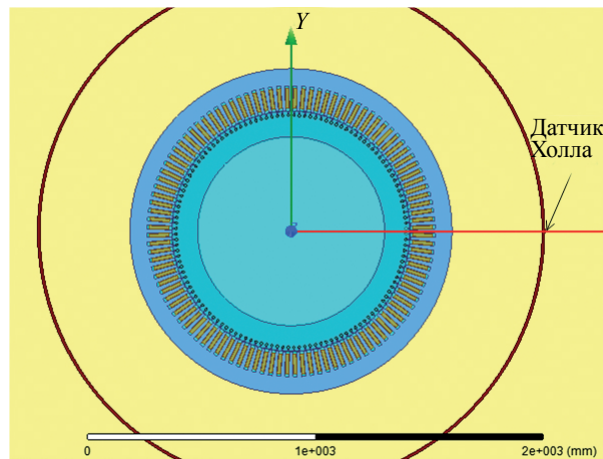


Рис. 1. Модель двигателя ДАЗО-17-44-8/10У1.

в точке на корпусе двигателя, указанной на рис. 1. При этом смоделированы как исправный АД, так и АД при таких повреждениях, как обрыв стержня обмотки ротора и динамический эксцентриситет (равный 20 % от величины воздушного зазора). Основные теоретические результаты, полученные в процессе исследований на математической модели, представлены в работе [17].

В качестве метода исследования был выбран метод спектрального анализа, суть которого заключается в том, что при наличии оборванных стержней обмотки ротора в спектре ВМП АД возникают гармонические составляющие, называемые гармониками фиктивной обмотки ротора (ФОР).

Согласно [17], при пуске АД частоты этих гармонических составляющих могут быть определены по выражению:

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

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

Поскольку сигнал при пуске АД не является стационарным, то применение метода контроля на основе быстрого преобразования Фурье невозможно. Для построения спектров подобных сигналов необходимо применение более сложных методов, одним из которых является оконное преобразование Фурье (ОПФ). В работе применялись оконные функции Блэкмана-Наталла и Флэттоп. Эти функции относятся к окнам низкого разрешения и обладают свойством снижения эффекта растекания спектра, что позволяет более точно определять амплитуды гармонических составляющих спектра сигнала.

Продолжительность интервалов, на которые разделялся сигнал, определялась так, чтобы гармонические составляющие первых порядков не сливались в спектре. Разные оконные функции имеют различную ширину основного лепестка, поэтому для разных двигателей в зависимости от времени пуска могут применяться разные оконные функции.

Как показано в [17], применение ОПФ накладывает ограничения на минимальную продолжительность интервала разбиения времени пуска, что определяется разрешением сигнала по частоте, и на максимальную продолжительность, которая определяется разрешением по времени. С учетом взаимного расположения гармонических составляющих в процессе пуска (показано на рис. 3б), было определено соотношение, по которому можно оценить необходимую продолжительность интервалов:

$$\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (p + v_{\text{макс}})}{f_c} < \Delta T < \frac{\Delta F \cdot p}{(p + v_{\text{макс}}) \cdot (p + v_{\text{макс}} + 1)} \cdot T_n, \quad (2)$$

где ΔF — относительная ширина главного лепестка используемого окна по сравнению с шириной главного лепестка прямоугольного окна ($\Delta F = 5$ для окна Флэттоп, $\Delta F = 4$ для окна Блэкмана-Наталла и т.д.); $v_{\text{макс}}$ — порядок предельно учитываемой гармоники; ΔT — продолжительности интервалов, на которые разбивается пусковой сигнал, с; T_n — время пуска АД, с.

По выражению (2) можно также оценить и минимально допустимое время пуска АД, при котором проводится оценка состояния обмотки ротора:

$$T_{\text{п min}} > \frac{2 \cdot (p + v_{\text{макс}})^2 \cdot (p + v_{\text{макс}} + 1)}{f_c \cdot p}. \quad (3)$$

Если в выражение (3) подставить все необходимые параметры, то получится, что для корректного отображения спектра потребуется время пуска в несколько секунд. Это осложняет процесс выявления неисправностей АД. Поэтому при малом и близком к граничному времени пуска требуется учитывать меньшее количество гармонических составляющих. Для получения корректных результатов анализа спектра достаточно проявления в спектре первых 3 гармонических составляющих с самыми большими амплитудами. Длительность пуска электродвигателей механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта, как правило, значительно превышает указанные минимальные значения, что позволяет успешно выявлять неисправности обмотки ротора.

Кроме расчетов на математической модели проводились исследования ВМП на экспериментальном стенде с двигателем малой мощности АИР 71А6. Фотография стенда приведена на рис. 2. Параметры исследуемого двигателя (1): напряжение — 0,4 кВ, мощность — 380 Вт, 3 пары полюсов. Для регистрации сигналов ВМП использовался наружный индуктивный датчик. Для определения режимных параметров двигателя использован многофункциональный измерительный прибор ЩМ-120 (2). Сигнал ВМП регистрировался в 3 режимах — без механизма, с установленным шкивом (3) и с подключенным с помощью ремня генератором переменного тока (4).



Рис. 2. Внешний вид разработанного экспериментального стенда.

Для обработки сигнала с помощью ОПФ его длительность должна составлять несколько секунд. Поскольку время пуска рассматриваемого АД не превышает 0,2 с даже с подключенной нагрузкой, то регистрация ВМП осуществлялась при подаче на двигатель пониженного напряжения с помощью регулировочного трехфазного автотрансформатора (5) для приближения продолжительности времени пуска данного двигателя к реальным высоковольтным двигателям на электростанции. Обработка зарегистрированного сигнала осуществлялась на персональном компьютере в программном комплексе Matlab.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В реальных условиях работы на АД воздействует ряд эксплуатационных факторов, которые могут искажать результаты диагностирования. В [16] показано, что одним из таких факторов является динамический эксцентриситет (ДЭ). ДЭ ротора приводит к появлению гармонических составляющих с частотами, которые в пусковом режиме можно определить по выражению (4) [7]:

$$f_{\text{ДЭ}}^{(v\pm)}(t) = \left| f_c \cdot \left(1 \pm \frac{1-s(t)}{p} \cdot v \right) \right|, \quad (4)$$

где $f_{\text{ДЭ}}^{(v\pm)}(t)$ — верхняя ($v+$) и нижняя ($v-$) боковые частоты гармоник ДЭ v -го порядка в момент времени t , Гц.

В [9] показано, что в спектре сигнала ВМП АД отчетливо проявляются лишь гармоники ДЭ первых порядков (не более 2), а в [15] — что в сигнале ВМП отчетливо проявляются гармоники ФОР первых 5 порядков на верхних и нижних боковых частотах, остальные гармоники проявляются в спектре слабее. Поэтому для оценки возможности корректного определения амплитуд гармоник ФОР первых 5 порядков произведено сравнение их частот в спектре радиальной составляющей ВМП со значениями частот гармоник ДЭ первых 2 порядков (для двигателя с 5 парами полюсов). Изменение частот указанных гармоник в процессе пуска показано на рис. 3.

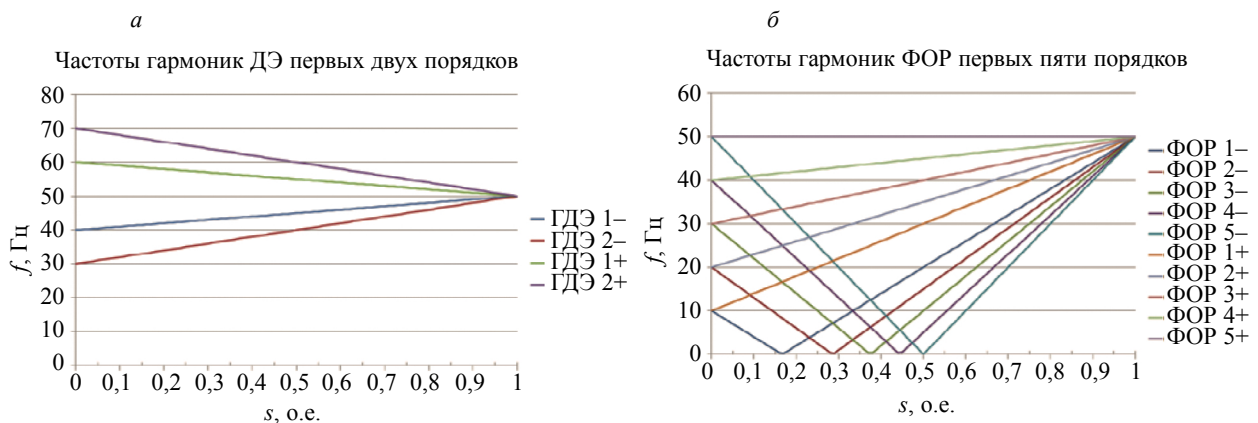


Рис. 3. Зависимости частот гармоник ДЭ (а) и ФОР (б) от скольжения для двигателя с 5 парами полюсов.

Из рис. 3 видно, что значения нескольких верхних боковых частот гармоник ФОР совпадают с частотами гармоник ДЭ первых порядков с высокими амплитудами и с основной гармоникой сигнала (50 Гц). Гармонические составляющие ФОР на нижних боковых частотах появляются в спектре при обрывах стержней ротора и не проявляются в спектре при наличии ДЭ. Особенность этих гармонических составляющих в спектре состоит в том, что при развороте двигателя их частоты сначала уменьшаются до нуля, а потом возрастают, то есть в спектрах они «отражаются» от оси скольжения, скорости вращения или времени. Это видно на рис. 3б (в дальнейшем будем эти гармоники называть отраженными). Также необходимо отметить, что полученный диагностический признак обрыва стержней обмотки ротора не зависит от влияния такого эксплуатационного фактора, как эксцентриситет ротора, что позволяет повысить достоверность результатов диагностирования.

Для проверки данного вывода на математической модели высоковольтного АД с 5 парами полюсов типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 были построены частотно-временные спектры в 3 случаях: для исправного АД, для АД с одним оборванным стержнем без других повреждений и для АД с динамическим эксцентриситетом ротора. Время пуска данного двигателя составляло 15 с.

Полученные спектры ВМП представлены на рис. 4—6. Оценить значения амплитуд гармонических составляющих можно по цветовой шкале, приведенной справа на указанных рисунках. Из приведенных спектров можно сделать следующие выводы. В спектре исправного АД (рис. 4) при пуске практически не проявляются гармонические составляющие за исключением гармоники с частотой 50 Гц. При возникновении ДЭ (рис. 5) в спектре проявляются гармонические составляющие ДЭ первого порядка, причем их амплитуды при пуске значительно ниже, чем в установившемся режиме. При обрыве стержней обмотки ротора АД (рис. 6) в спектре отчетливо проявляется большинство гармоник ФОР, часть из которых относится к отраженным гармоникам.

Сравнение полученных спектров при наличии оборванного стержня (см. рис. 6) с графиками зависимости частот гармоник ФОР от времени (рис. 7), рассчитанными по выражению (1), подтвердили корректность полученных результатов.

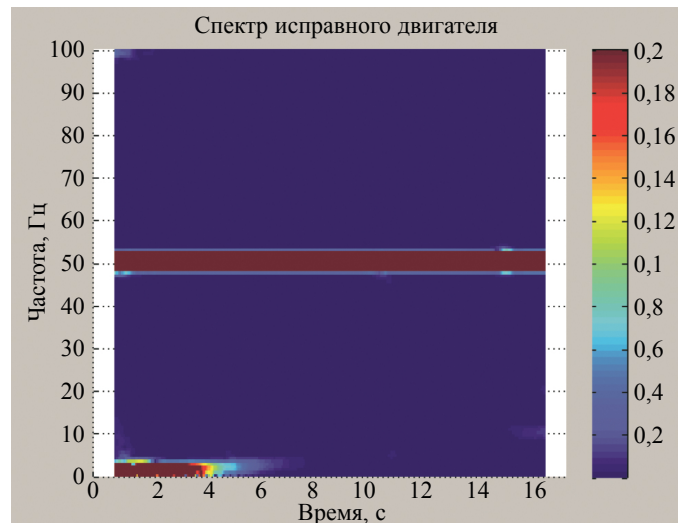


Рис. 4. Частотно-временной спектр ВМП АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 с исправной обмоткой ротора и без эксцентриситета, полученный на математической модели.

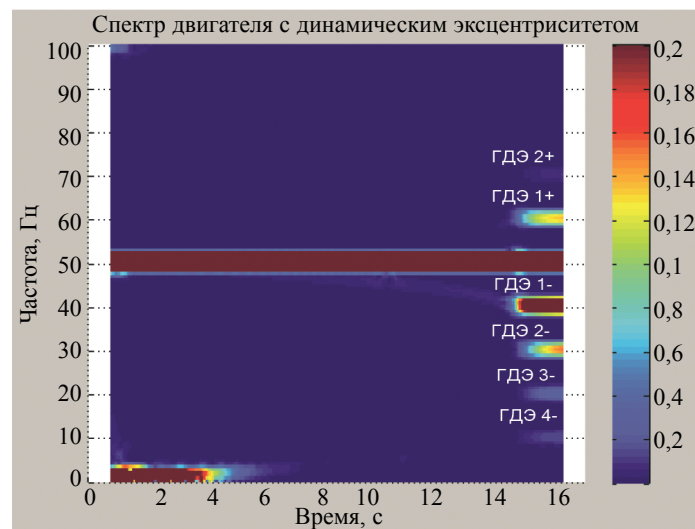


Рис. 5. Частотно-временной спектр ВМП АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 с исправной обмоткой ротора и 20 % динамическим эксцентриситетом, полученный на математической модели.

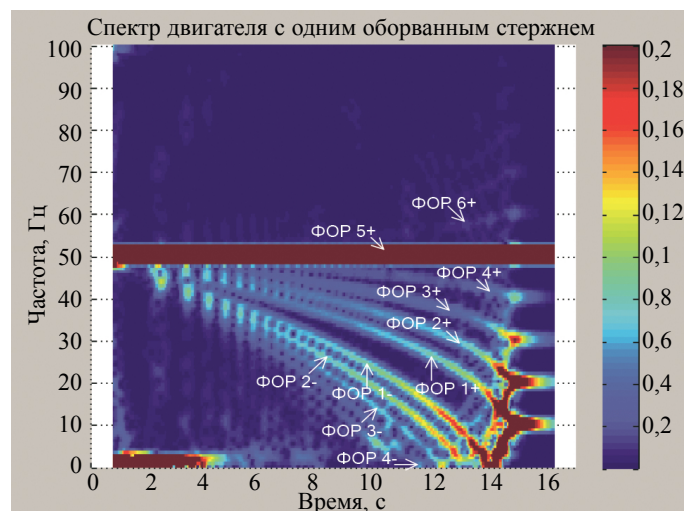


Рис. 6. Частотно-временной спектр ВМП АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 с одним оборванным стержнем короткозамкнутой обмотки ротора, полученный на математической модели.

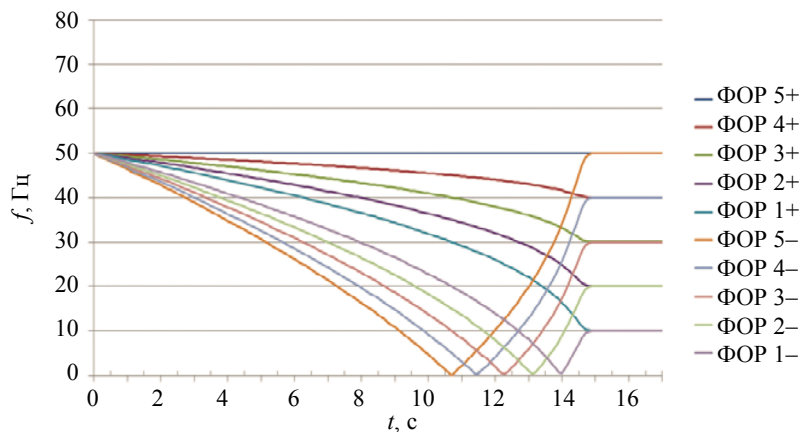


Рис. 7. Зависимости частот гармоник ФОР от времени.

Были проведены испытания двигателя на экспериментальном стенде при установке в АД различных роторов. У одного из роторов был поврежден один стержень, второй являлся исправным. Первоначально исследовалось влияние величины питающего напряжения на время пуска АД в каждом из указанных выше режимах пуска: АД без механизма, АД с установленным на вал шкивом и АД с подключенным с помощью ремня генератором переменного тока. Во всех рассмотренных случаях время пуска превышало 10 с. Это позволило построить частотно-временные спектры сигнала ВМП. При установке на валу шкива без подключения генератора переменного тока пуск двигателя составил примерно минуту при подаче напряжения порядка 30 В. Поэтому в дальнейшем построение спектров производилось в этом режиме.

Полученные спектры при установке различных роторов приведены на рис. 8 и 9. На них отчетливо видно, что большое количество гармоник ФОР на верхней боковой частоте четко проявляется как при наличии обрыва стержня (рис. 8), так и при его отсутствии (рис. 9). Это объясняется влиянием ДЭ и вибрацией АД. С другой стороны, на рис. 8 отчетливо видны несколько отраженных гармонических составляющих, которые отсутствуют при исправном роторе (отражение гармоник ФОР первых составляющих на нижних боковых частотах указано на рис. 8 стрелками). Поэтому даже при подаче такого низкого напряжения при протекании малого тока по стержням в пусковом режиме возможно выявление обрывов стержней обмотки ротора АД по ВМП.

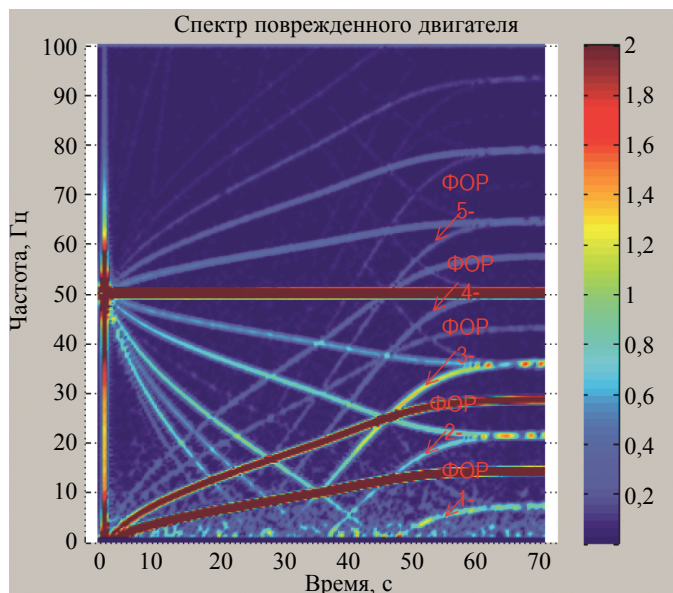


Рис. 8. Частотно-временной спектр ВМП АД типа АИР71А6 с ротором № 1 (с одним оборванным стержнем), полученный на экспериментальном стенде.

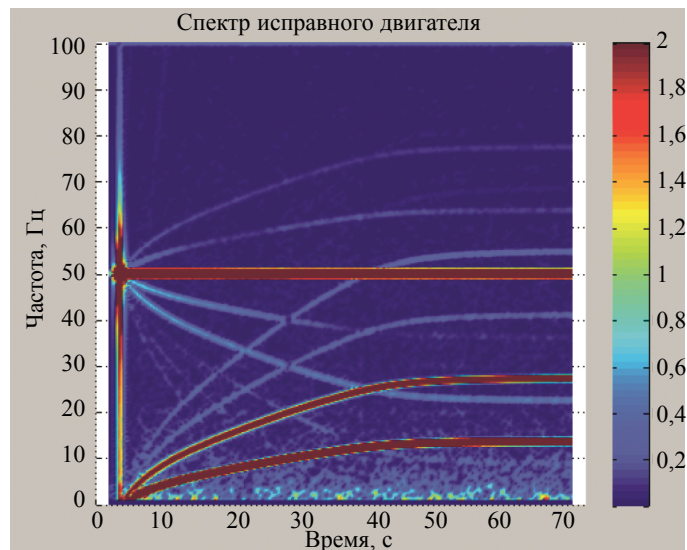


Рис. 9. Частотно-временной спектр ВМП АД типа АИР71А6 с ротором № 2 (исправный ротор), полученный на экспериментальном стенде.

ВЫВОД

Сигналы ВМП, а именно индукция радиальной составляющей ВМП, в пусковом режиме для высоковольтных АД СН электростанций с длительным пуском обладает диагностической информацией, которая может быть использована для оценки технического состояния обмоток их роторов в реальном времени. В качестве диагностического признака выявления дефекта обрывов стержней можно использовать появление в частотно-временном спектре радиальной составляющей ВМП явно выраженных отраженных гармонических составляющих ФОР. Основным преимуществом представленного подхода является его устойчивость к отрицательному влиянию таких существенных эксплуатационных факторов как эксцентриситет ротора и нагрузка на валу ротора, что позволит повысить достоверность диагностирования обмотки ротора АД высоковольтных АД СН электростанций.

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. V. 4. No 4. P. 2129—2136.
2. 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. No 1. P. 15—21.
3. Вейнреб К. Диагностика ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2013. № 4. С. 133—154.
4. Thomson W. T., Gilmore R. J. Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives — Fundamentals, Data Interpretation and Industrial Case Histories / Proceedings of 32nd Turbomachinery Symposium, Texas, A&M University, USA, September 2003. P. 145—156.
5. Рысов В.А. Спектральная вибродиагностика. Пермь: Вибро-Центр, 1996. 176 с.
6. 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. P. 1814—1820.
7. Новоселов Е.М., Савельев В.А., Скоробогатов А.А., Страхов А.С., Сулыненко И.Н. Оценка возможности использования радиальной составляющей внешнего магнитного поля в целях диагностики асинхронных электродвигателей // Вестник ИГЭУ. 2018. № 3. С. 38—46.
8. 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. No. 2. 12 p.
9. Kliman G.B., Koegl R.A., Stein J., Endicott R.D., Madden M.W. Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1988. V. 3. No. 4. P. 873—879.

10. Fireteanu V., Romary R., Pusca R., Ceban A. Finite element analysis and experimental study of the nearmagnetic field for detection of rotor faults in induction motors // Progress in Electromagnetics Research. 2013. V. 50. P. 37—59.

11. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / Под ред. Л.Г. Микоянца. 4-е изд., переработ. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.

12. Сивокобыленко В. Ф., Кузьменко Д. И., Яременко С. П. Диагностика стержней двухклеточных и глубокопазных короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей // Наукові праці Донецького національного технічного університету. 2011. № 10 (180). С. 148—152.

13. Pu Shi, Chen Z., Vagapov Y. Wavelet Transform based Broken Rotor-bar Fault detection and Diagnosis Performance Evaluations // International Journal of Computer Applications (0975—8887). 2013. V. 69. No.14. P. 36—43.

14. 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.

15. 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. 2018. № 4. С. 44—53.

16. Новоселов Е.М., Полкошников Д.А., Скоробогатов А.А. Исследование влияния эксплуатационных факторов на внешнее магнитное поле асинхронного электродвигателя / Материалы тринадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2018». Т. 3. Иваново, 2018. С. 134—135.

17. Новоселов Е.М., Полкошников Д.А., Савельев В.А., Страхов А.С., Скоробогатов А.А., Сулыненков И.Н. Метод контроля состояния обмоток роторов высоковольтных электродвигателей собственных нужд электростанций при пуске // Вестник ИГЭУ. 2019. № 4. С. 31—44.