

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ОБМОТОК РОТОРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В РЕЖИМЕ ПУСКА

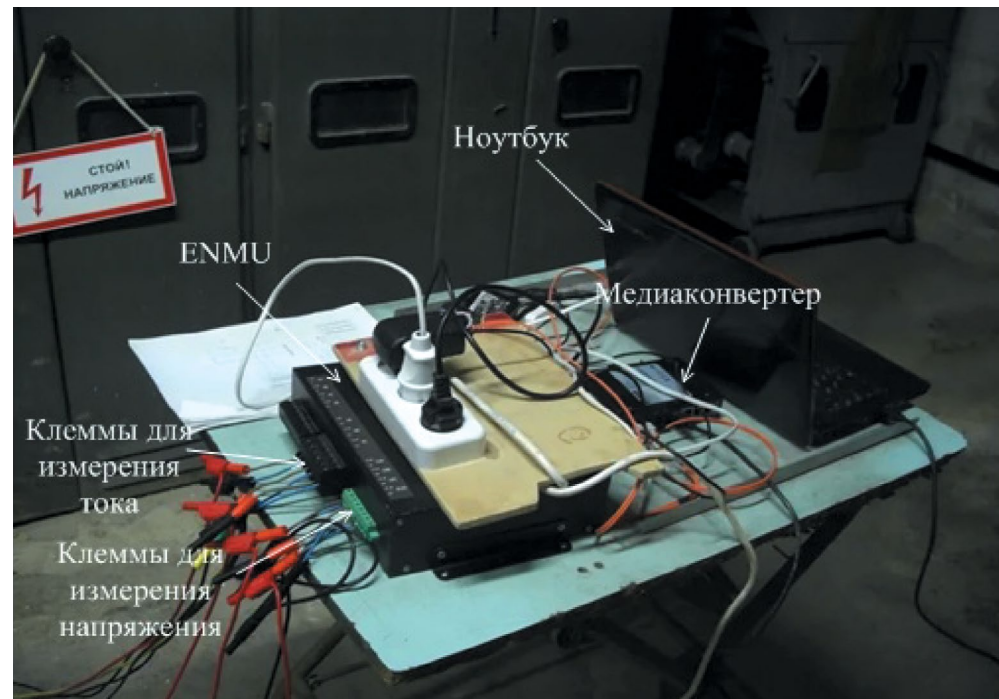
АВТОРЫ:

А.Н. Назарычев,
Санкт-Петербургский
горный
университет

А.С. Страхов,
А.А. Скоробогатов,
Ивановский
государственный
энергетический
университет им.
В.И. Ленина

Приведено описание методики контроля состояния обмотки ротора высоковольтных асинхронных электродвигателей, являющихся приводами механизмов собственных нужд электрических станций, на основе метода спектрального анализа сигналов тока статора и внешнего магнитного поля в режиме пуска. Рассмотрены вопросы регистрации и обработки сигналов. Предложен метод определения пороговых значений амплитуд гармоник, характерных для повреждения обмотки ротора. Проанализированы результаты контроля состояния электродвигателей в реальных условиях электрических станций.

Ключевые слова: высоковольтные асинхронные двигатели; электрические станции; система электроснабжения собственных нужд; обрывы стержней обмотки ротора; ток статора; внешнее магнитное поле; спектральный анализ; оконное преобразование Фурье; компьютерная модель.



Комплекс устройств для регистрации и обработки сигналов тока статора АД
Рис. 1

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве приводов ответственных механизмов в системе электроснабжения собственных нужд электрических станций применяют мощные высоковольтные асинхронные двигатели (АД). Отказ АД может привести не только к необходимости внепланового дорогостоящего ремонта, но и к снижению вырабатываемой мощности блоком электрической станции или даже к полному его отключению.

Одним из видов повреждений АД, которые могут привести к их отказу в процессе эксплуатации, является обрыв стержней короткозамкнутой обмотки ротора. Наиболее часто подобные повреждения возникают у высоковольтных АД с тяжелыми условиями пуска, к которым можно отнести двигатели механизмов тягодутьевого тракта — дымососы, дутьевые вентиляторы, а также двигатели системы топливо-приготовления пылеугольных электрических станций — мельницы и дробилки. Пуск таких двигателей осуществляется непосредственно от сети и длится не менее 5 с.

В ряде исследований показано, что доля отказов АД системы электроснабжения собственных нужд по причине повреждения обмоток роторов может составлять до 20–30% от общего числа отказов [1, 2]. Это подтверждает значимость своевременного обнаружения обрывов стержней до возникновения отказа АД.

Для раннего обнаружения оборванных стержней обмотки ротора наиболее перспективны методы контроля на основе спектрального анализа, который также часто называют сигнатурным, сигналов тока статора и внешнего магнитного поля (ВМП). Однако большинство подобных исследований выполнено для установившегося режима работы АД. Так, например, в [3–5] рассмотрены методы контроля

на основе спектрального анализа сигнала тока статора, а в [1, 6, 7] — контроля параметров ВМП в установившемся режиме работы АД. Эти методы также подробно описаны в двух межгосударственных стандартах, посвященных диагностике вращающихся электрических машин [12, 13]. Однако для высоковольтных АД системы электроснабжения собственных нужд электростанций предпочтительнее производить контроль обмотки ротора в пусковом, а не в установившемся режиме, что связано с особенностями их функционирования. В настоящее время для выявления оборванных стержней в пусковом режиме наиболее известен способ, прописанный в [14], однако он не обладает достаточной чувствительностью для выявления повреждений короткозамкнутых обмоток роторов АД с большим количеством стержней. Поэтому разработка новых методов контроля технического состояния обмоток роторов в пусковом режиме является актуальной задачей.

В ранее опубликованных работах авторов на математических моделях АД и на экспериментальном стенде была доказана возможность выявления оборванных стержней обмоток роторов АД с длительным пуском на основе спектрального анализа сигналов ВМП [8, 9] и тока статора [10] в пусковом режиме работы при использовании для обработки сигналов оконного преобразования Фурье.

Целью данной статьи является описание предлагаемой методики для проведения контроля технического состояния обмоток роторов высоковольтных АД механизмов приготовления топлива и тягодутьевого тракта на электрических станциях на основе указанных ранее методов, описание ее практической реализации, а также результатов, полученных на действующих электрических станциях.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ КОНТРОЛЯ ОБМОТОК РОТОРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Методика контроля обмоток роторов высоковольтных АД системы электроснабжения собственных нужд электростанций в режиме пуска осуществляется в несколько этапов. На рис. 2 представлена блок-схема контроля обмотки ротора высоковольтного АД.

В соответствии с блок-схемой первоначально осуществляется регистрация диагностического сигнала от АД (блок № 1 на рис. 2), в качестве которого используются либо ток статора, либо индукция радиальной или аксиальной составляющих ВМП, и его преобразование в цифровой сигнал с помощью аналого-цифрового преобразователя.

Далее производится обработка цифрового сигнала. Как было показано в работах [8, 10], для получения качественных частотно-временных спектров сигналов АД при пуске на основе ОПФ необходима продолжительность пуска от 3 до 5 с для сигналов ВМП и не менее 0,9 с для тока статора. Более точно минимальная продолжительность пуска $T_{п,мин}$, при которой можно осуществлять обработку сигнала, оценивается по выражению (1) для ВМП и по выражению (2) для тока статора.

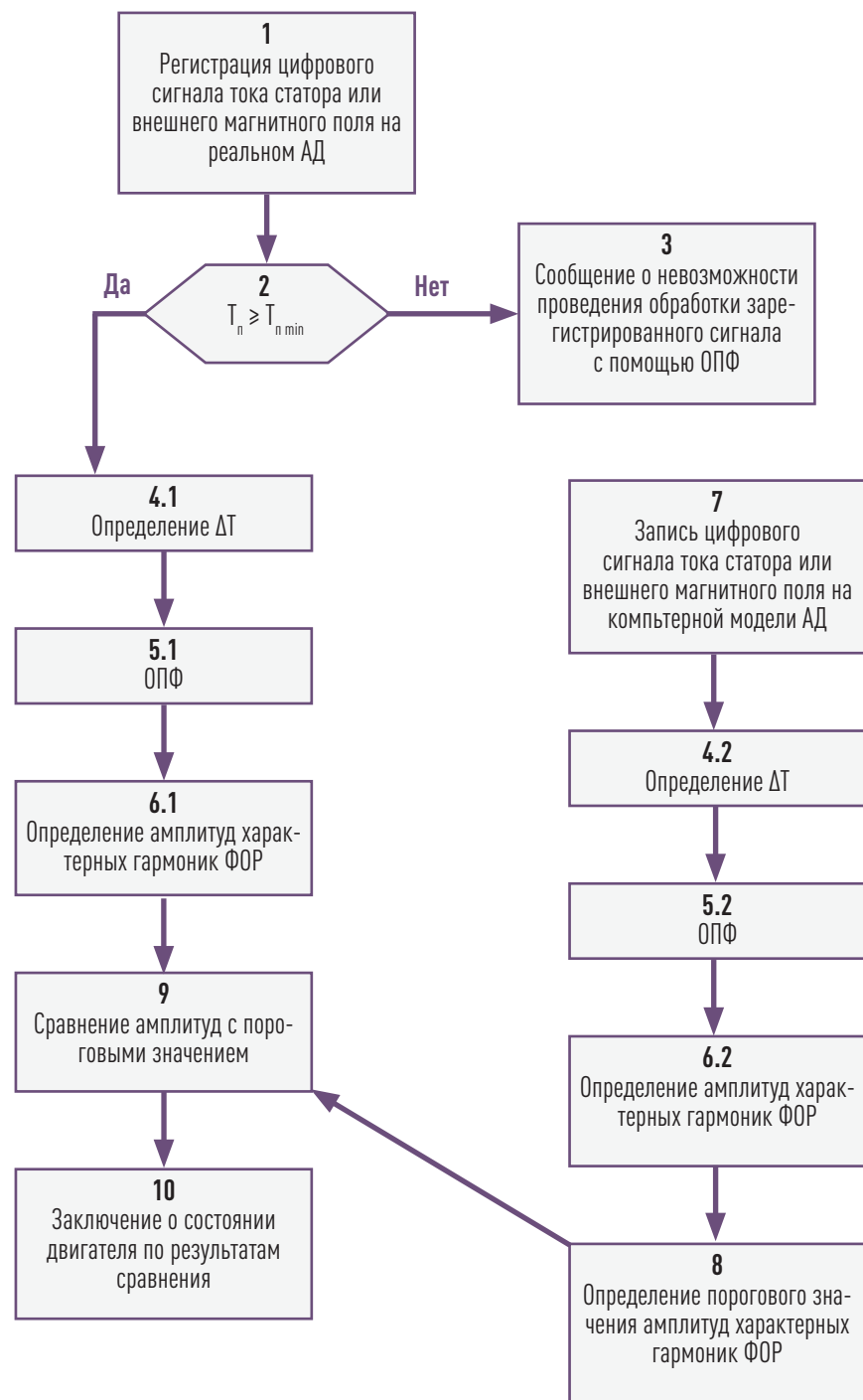
$$T_{п,мин} = \frac{2 \cdot \Delta F \cdot (p + v_{макс})^2 \cdot (p + v_{макс} + 1)}{5 \cdot f_c \cdot p}; \quad (1)$$

$$T_{п,мин} = \frac{9 \cdot \Delta F}{f_c}; \quad (2)$$

где f_c — частота сети;
 p — число пар полюсов;
 $v_{макс}$ — порядок предельно учитываемой гармоники (принимается равным 3);
 ΔF — относительная ширина главного лепестка применяемой оконной функции по сравнению с шириной главного лепестка прямоугольного окна.

БЛОК-СХЕМА КОНТРОЛЯ ОБМОТКИ РОТОРА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО АД В РЕЖИМЕ ПУСКА

Рис. 2



Обозначения: ОПФ — оконное преобразование Фурье; ФОР — фиктивная обмотка ротора; T_n — время пуска АД; $T_{n\min}$ — минимальная продолжительность пуска АД, при которой возможна корректная обработка сигнала с помощью ОПФ; ΔT — продолжительность интервалов времени, на которые разбивается сигнал для его обработки с помощью ОПФ.

Таким образом, первоначально осуществляется проверка достаточности длительности пуска для проведения контроля (блок № 2 на рис. 2). Если условие не выполняется, то поступает сообщение о невозможности проведения обработки данного сигнала на основе ОПФ (блок № 3 на рис. 2). При выполнении условия оценивается необходимая продолжительность интервалов ΔT , на которые в дальнейшем разбивается сигнал (блок № 4.1 на рис. 2), по выражениям (3) и (4) для сигналов ВМП и тока статора соответственно.

$$\frac{2 \cdot \Delta F \cdot (p + v_{\max})}{2.25 \cdot f_c} < \Delta T < \frac{2.25 \cdot p}{(p + v_{\max}) \cdot (p + v_{\max} + 1)} \cdot T_n; \quad (3)$$

$$\frac{3 \cdot \Delta F}{f_c} < \Delta T < \frac{T_n}{3}. \quad (4)$$

На следующем этапе осуществляется обработка сигнала на основе ОПФ (блок № 5.1 на рис. 2). Предпочтительно использовать оконные функции с низким разрешением по частоте, например окно Флэттоп. Продолжительность интервалов, на которые разбивается сигнал, должна удовлетворять условиям (3) или (4). После этого из полученных спектров определяются амплитуды гармонических составляющих, характеризующих наличие повреждения обмотки ротора, которые принято называть гармониками от ФОР (блок № 6.1 на рис. 2). Частоты этих гармоник в процессе пуска АД можно оценить по выражению (5) [8].

$$f_{\text{ФОР}}^{(v\pm)}(t) = \left| f_c \cdot \left(\frac{1-s(t)}{p} \cdot v \pm s(t) \right) \right|, \quad (5)$$

где v — порядок гармоники; s — скольжение; t — момент времени в процессе пуска АД.

Отметим, что обычно в спектрах сигналов ВМП наиболее отчетливо проявляются гармоники ФОР первых трех порядков. В спектре тока статора будет проявляться лишь одна характерная гармоника ФОР, частота которой определяется в соответствии с выражением (6) [10].

$$f_{\text{ФОР}}^{(p-)}(t) = \left| f_c \cdot (1 - 2 \cdot s(t)) \right|. \quad (6)$$

Далее оцениваются пороговые значения амплитуд гармоник ФОР первых порядков в сигнале ВМП или гармоники ФОР на нижней боковой частоте порядка, совпадающего с числом пар полюсов АД [10], в сигнале тока статора (блоки № 7, 8 и 4.2–6.2 на рис. 2). В отсутствие большого количества экспериментальных данных с АД конкретного типа наиболее удобным способом определения пороговых значений является применение метода модельного анализа.

В ходе выполнения исследований разработана компьютерная модель АД в специализированном программном комплексе Ansys, в которой для оценки состояния обмотки ротора АД заложено повреждение с одним оборванным стержнем. В модели записываются цифровые сигналы ВМП или тока статора (блок № 7 на рис. 2).

На следующем этапе полученный сигнал обрабатывается с помощью представленного ранее алгоритма (блоки № 4.2–6.2 на рис. 2). Пороговые значения амплитуд характерных гармонических составляющих могут быть определены с коэффициентом запаса (блок № 8 на рис. 2) как половина от амплитуд, полученных на компьютерной модели при условии корректности последней, по выражению (7):

$$A_{\text{пор}} = 0,5 \cdot A_{\text{ФОРмм}}. \quad (7)$$

где $A_{\text{пор}}$ — пороговое значение искомой амплитуды гармоники ФОР; 0,5 — принятый коэффициент запаса; $A_{\text{ФОРмм}}$ — значение гармоники ФОР в спектре ВМП или тока статора,

полученное с помощью компьютерной модели АД с одним оборванным стержнем обмотки ротора.

Затем сравниваются амплитуды характерных гармоник ФОР с их пороговыми значениями (блок № 9 на рис. 2). Для тока статора заключение о наличии оборванных стержней обмотки ротора делается при превышении амплитуды гармоники ФОР на нижней боковой частоте порядка, совпадающего с числом пар полюсов, ее порогового значения. Для сигналов ВМП заключение о наличии повреждения делается при превышении амплитуды любой из гармоник первых трех или более порядков порогового зна-

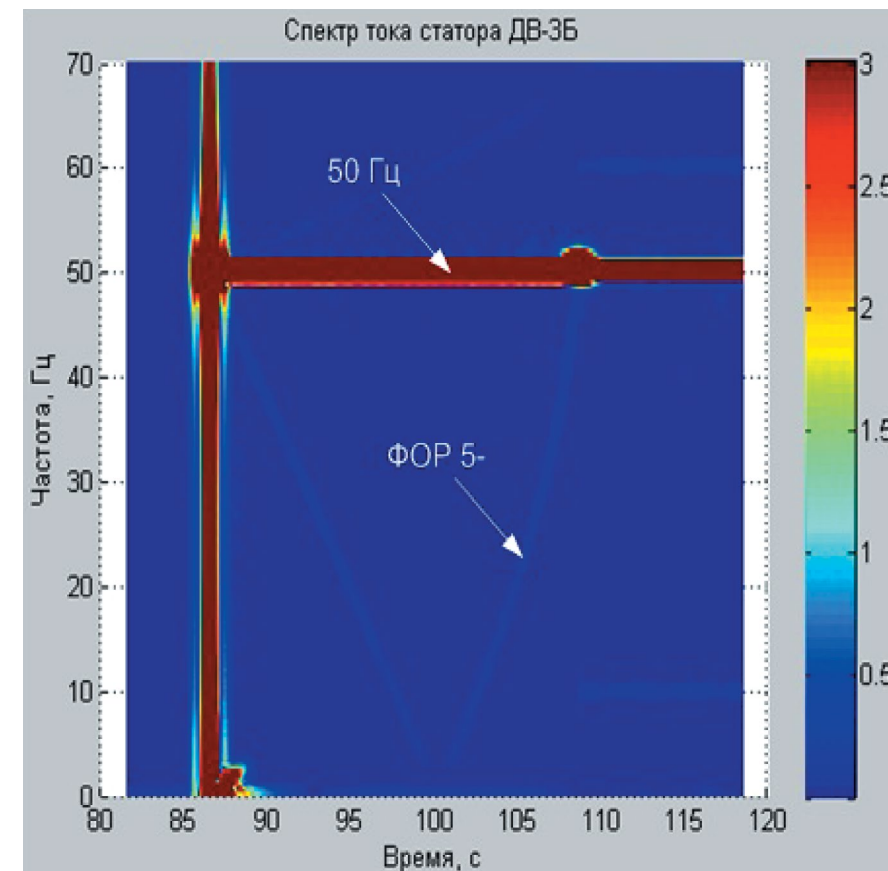
чения. В дальнейшем эти пороговые значения могут уточняться в ходе эксплуатации АД при увеличении количества опытных данных, а также по тенденциям изменения амплитуд гармоник ФОР. Если при проведении контроля было показано наличие оборванных стержней обмотки ротора, то необходимо при последующем останове АД вывести его в ремонт для устранения повреждения.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБМОТКИ РОТОРА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Для проверки работоспособности предлагаемой методики на практике были проведены исследования

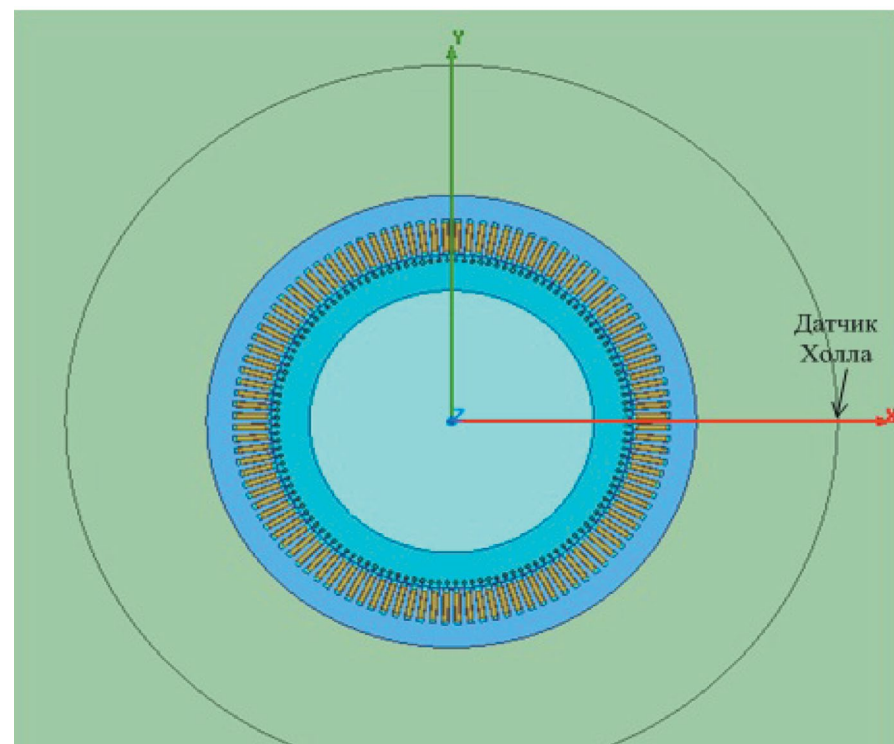
ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ СПЕКТР ТОКА СТАТОРА ПРИ ПУСКЕ ИССЛЕДУЕМОГО АД ТИПА ДАЗ02-17-44-8/10У1 ДУТЬЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

Рис. 3



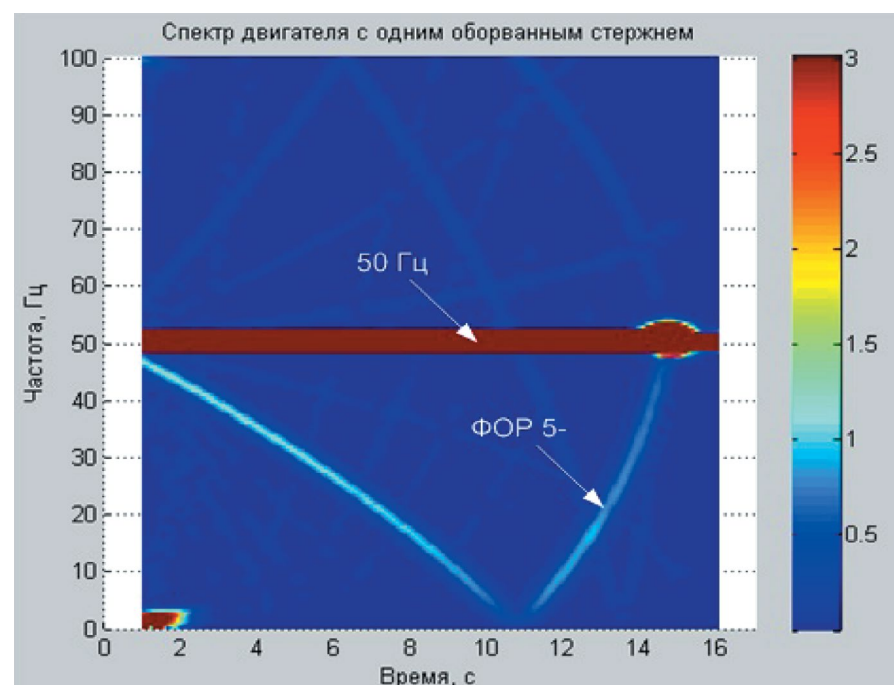
КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ АД ТИПА ДАЗ02-17-44-8/10У1

Рис. 4



ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ СПЕКТР ТОКА СТАТОРА НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ АД ТИПА ДАЗ02-17-44-8/10У1 С ОДНИМ ОБОРВАННЫМ СТЕРЖНЕМ ОБМОТКИ РОТОРА

Рис. 5



на нескольких высоковольтных АД, являющихся приводами дымососов и дутьевых вентиляторов в системе электроснабжения собственных нужд тепловых электрических станций. Целью экспериментальных исследований является доказательство наличия в частотно-временных спектрах сигналов индукции радиальной составляющей ВМП или тока статора гармоник ФОР, амплитуды которых являются диагностическими параметрами наличия повреждения. Для формирования заключения о техническом состоянии обмотки ротора АД необходимо сравнить значение амплитуд гармоник ФОР с пороговыми значениями, полученными на компьютерных моделях.

Рассмотрим предлагаемую методику на примере АД типа ДАЗ02-17-44-8/10У1, являющегося приводом дутьевых вентиляторов одной из действующих электростанций. Параметры исследуемого АД: 5 пар полюсов, мощность 320 кВт (пуск осуществлялся на более низкой скорости), напряжение 6 кВ.

ПРОВЕДЕНИЕ КОНТРОЛЯ ПО ТОКУ СТАТОРА

В соответствии с разработанной методикой произведена регистрация диагностического сигнала и выполнено его преобразование в цифровую форму. Для этих целей использовали комплекс ENMU [11], который подключался к вторичным измерительным цепям трансформатора тока на электрической станции. Комплекс устройств для регистрации и обработки сигнала тока статора показан на рис. 1.

Если в качестве ОПФ использовали окна Флэттоп при оценке необходимой продолжительности пуска, значение ΔF принималось равным 5. Подставив необходимые данные в выражение (2), получили, что длительность пуска должна составлять не менее 0,9 с, в то время

как длительность пуска агрегата собственных нужд составляла около 20 с, что подтверждает возможность корректной обработки диагностического сигнала.

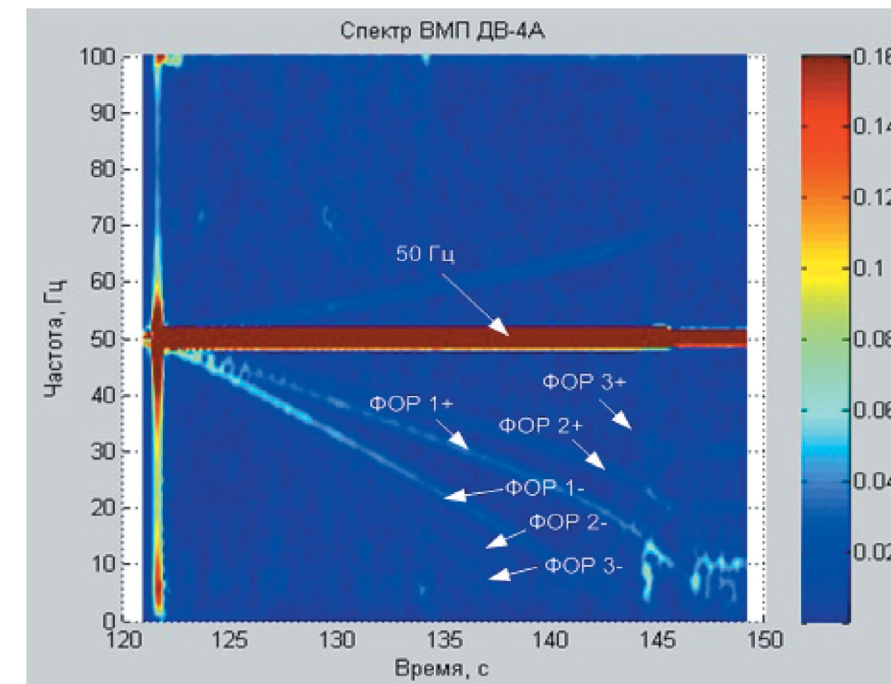
При проведении оценки необходимой продолжительности интервалов ΔT , на которые разбивается диагностический сигнал, по выражению (4) было установлено, что значение этой величины должно находиться в интервале от 0,3 до 6,7 с. Поэтому для экспериментальных исследований была выбрана продолжительность интервала времени, на котором проводится ОПФ, со значением ΔT равным 2 с.

В программном комплексе Matlab с помощью ОПФ был построен частотно-временной спектр сигнала тока статора, который приведен на рис. 3, и определена амплитуда характерной гармоники ФОР — «р —», где р — порядок гармоники, совпадающей с числом пар полюсов АД, равным 5, «—» — знак перед скольжением в выражении (5), которое составило 0,067 А. Амплитуды гармоник на представленных частотно-временных спектрах можно оценить по цветовой шкале, находящейся на рисунках справа.

Для определения порогового значения этой гармоники использовали компьютерную модель АД типа ДАЗ02-17-44-8/10У1 с одним оборванным стержнем обмотки ротора, выполненную в программном комплексе Ansys (более подробно результаты исследования сигналов тока статора и ВМП при наличии обрыва стержня и при исправной обмотке ротора представлены в [8–10]). Данная модель приведена на рис. 4. Полученный на компьютерной модели АД с одним оборванным стержнем частотно-временной спектр сигнала тока статора изображен на рис. 5. Амплитуда характерной гармоники составила 1,1 А, следовательно, пороговое значение по вы-

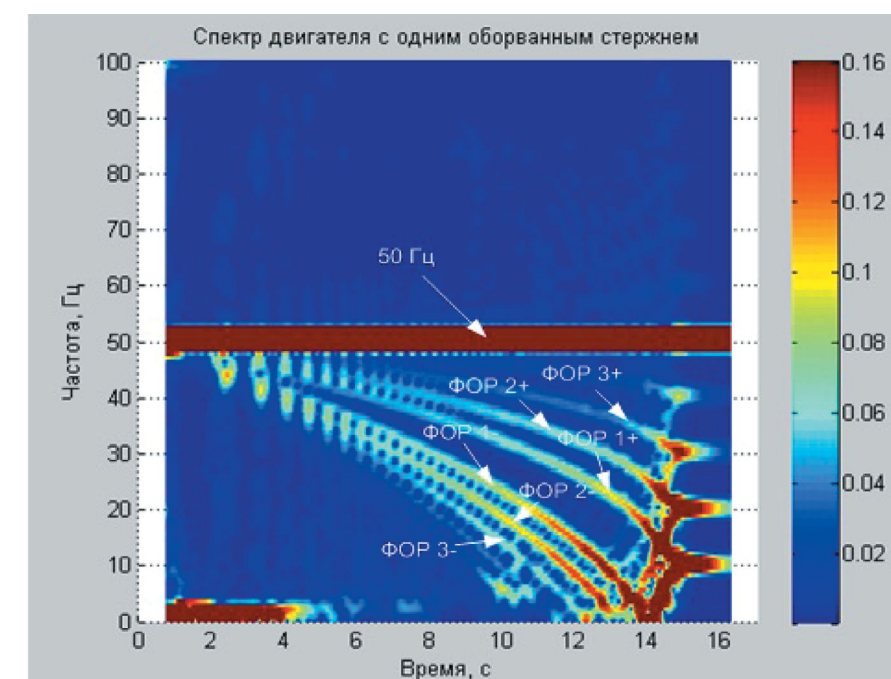
ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ СПЕКТР ИНДУКЦИИ РАДИАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВМП ПРИ ПУСКЕ ИССЛЕДУЕМОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО АД ТИПА ДАЗ02-17-44-8/10У1 ДУТЬЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

Рис. 6



ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ СПЕКТР ТОКА СТАТОРА НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО АД ТИПА ДАЗ02-17-44-8/10У1 С ОДНИМ ОБОРВАННЫМ СТЕРЖНЕМ ОБМОТКИ РОТОРА

Рис. 7



ражению (7) будет равно 0,55 А. Так как значение амплитуды гармоники получилось меньше порогового ($0,067 < 0,55$), можно сделать заключение об исправном состоянии обмотки ротора исследуемого АД.

ПРОВЕДЕНИЕ КОНТРОЛЯ ПО ВНЕШНЕМУ МАГНИТНОМУ ПОЛЮ

В ходе экспериментальных исследований проведены регистрация и анализ сигнала индукции радиальной составляющей ВМП при пуске АД. Для регистрации этого сигнала использовали как датчик Холла, так и наружный индуктивный датчик (НИД), который представляет собой П-образный магнитопровод с обмоткой. Оба датчика устанавливали на корпус электродвигателя в зоне середины длины сердечника статора. В качестве аналого-цифрового преобразователя применяли звуковую карту типа Focusrite Scarlett 2i2.

Минимальное время пуска, достаточное для выявления в спектре гармоник ФОР первых трех порядков, определено по выражению (1) и составило 4,61 с, что меньше фактического времени пуска исследуемого агрегата собственных нужд. Необходимая продолжительность интервалов, на которые разбивается сигнал, составила $0,7 < \Delta T < 3,1$ с. Значение ΔT приняли равным 2 с.

В результате получен частотно-временной спектр сигнала индукции радиальной составляющей ВМП при пуске АД, приведенный на рис. 5. Регистрация выполнена с помощью НИД, поскольку используемый датчик Холла для данного АД со стальным корпусом не имеет достаточной чувствительности для выявления в спектре ВМП гармоник ФОР. Из рис. 6 видно, что в спектре, как и для сигнала тока статора, проявляются характерные гармоники ФОР, что позволяет оценить техническое состояние обмотки ротора по их амплитудам.

На рис. 7 приведен частотно-временной спектр сигнала индукции радиальной составляющей ВМП, полученный на компьютерной модели исследуемого АД с одним оборванным стержнем. Результаты сравнения амплитуд с пороговыми значениями представлены в таблице.

На основании сравнительного анализа данных таблицы можно отметить, что амплитуды всех характерных гармоник ФОР на исследуемом АД меньше пороговых значений, что подтверждает отсутствие оборванных стержней в обмотке ротора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные и компьютерные исследования по-

зволяют утверждать, что разработанная методика дает возможность ее применения для оценки технического состояния обмотки ротора высоковольтных АД.

Разработана блок-схема алгоритма контроля обмотки ротора высоковольтного АД в режиме пуска.

Исследования, выполненные на АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 одной из действующих тепловых электростанций, подтверждают, что предложенные в методике диагностические признаки, заключающиеся в резком возрастании амплитуд характерных гармоник ФОР в сигналах ВМП и тока статора, могут быть использованы в целях диагностики повреждений обмотки ротора АД.

Аналогичные экспериментальные исследования были проведены в режиме пуска на трех АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1, четырех АД типа ДАМСО-15-12-8 и одном АД типа ДАМСО-14-10-10, которые являются приводами механизмов тягодутьевого тракта электрических станций. Во всех спектрах сигналов обнаружены характерные гармоники ФОР. В результате сравнения амплитуд характерных гармоник ФОР с пороговыми значениями, определенными на компьютерной модели, сделано заключение об исправном состоянии обмоток роторов этих АД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева О.А. Разработка методов диагностики двигателей собственных нужд электрических станций: монография. Павлодар: Кереку, 2015.
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. Vol. 6. № 1. P. 15–21.
3. Вейнреб К. Диагностика неисправностей ротора асинхронного двигателя методом спектрального анализа токов статора // Электричество. 2012. № 7. С. 51–57.
4. Turk N. Fault Diagnosis of Induction Motor using MCSA // International Journal of

ЗНАЧЕНИЯ АМПЛИТУД ГАРМОНИК ФОР В СИГНАЛЕ ВМП НА ИССЛЕДУЕМОМ АД ТИПА ДАЗО2-17-44-8/10У1 И ЕГО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ОДНИМ ОБОРВАННЫМ СТЕРЖНЕМ, МКТЛ

Гармоника	Реальный АД дутьевого вентилятора	Математическая модель с одним оборванным стержнем	Пороговое значение
ФОР 1-	0,022	0,065	0,033
ФОР 2-	0,01	0,123	0,062
ФОР 3-	0,013	0,129	0,064
ФОР 1+	0,03	0,081	0,041
ФОР 2+	0,018	0,061	0,031
ФОР 3+	0,007	0,036	0,018

- Electrical and Computer Engineering. 2016. Vol. 8. P. 13–18.
5. Chen Z., Pu Shi, Vagapov Y. Wavelet Transform based Broken Rotor-bar Fault detection and Diagnosis Performance Evaluations // International Journal of Computer Applications. 2013. Vol. 69. № 14. P. 36–43.
6. Jarzyna W. Diagnostic Characteristics of Axial Flux in an Induction Machine // Electrical Machines and Drives, Conference Publication. 1995. № 4. P. 141–146.
7. Romary R., Corton R., Thailly D., Brudny J. F. Induction Machine Fault Diagnosis Using an External Radial Flux Sensor // EPJ. Appl. Phys. 2005. Vol. 32. № 2. P. 125–132.
8. Савельев В.А., Страхов А.С., Новоселов Е.М., Полкошников Д.А., Скоробогатов А.А. Метод контроля состояния обмоток роторов высоковольтных электродвигателей собственных нужд электростанций при пуске // Вестник ИГЭУ. Иваново, 2019. Вып. 4. С. 31–44.

9. Назарычев А.Н., Новоселов Е.М., Полкошников 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.
10. Назарычев А.Н., Новоселов Е.М., Полкошников Д.А., Страхов А.С., Скоробогатов А.А. Метод контроля состояния обмоток роторов асинхронных электродвигателей при пуске по току статора // Дефектоскопия. 2020. № 8. С. 49–55.
11. Каталог продукции инженерного центра Энергосервис: устройство сопряжения с шиной процесса ENMU. URL: <https://enip2.ru/>

- production/metering/enmu/ (дата обращения: 29.01.2023).
12. ГОСТ ISO 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. — М.: Стандартинформ, 2016.
13. ГОСТ IEC/TS 60034-24-2015. Машины электрические вращающиеся. Часть 24. Онлайнное обнаружение и диагностика потенциальных отказов активных деталей вращающихся электромашин и деталей с подшипниковым током. Руководство по применению. — М.: Стандартинформ, 2017.
14. АС. 800906 (СССР). Способ определения повреждения стержней беличьей клетки роторов асинхронных электродвигателей / Брюханов Г.А., Князев С.А. — Опул. в Б. И., 1981. № 4.



РОСКОНГРЕСС
Пространство доверия

11–13 октября
Москва,
ЦВЗ «Манеж»

rusenergyweek.com



ПРАВИТЕЛЬСТВО МОСКВЫ

Реклама 6+