

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.3; 621.317

Оценка возможности использования радиальной составляющей внешнего магнитного поля в целях диагностики асинхронных электродвигателей

Е.М. Новоселов, В.А. Савельев, А.А. Скоробогатов, А.С. Страхов, И.Н. Сулыненков
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: sstrakhov57@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время все большее внимание уделяется разработке методов контроля технического состояния узлов асинхронных электродвигателей на основе анализа их внешнего магнитного поля. Наибольшее развитие получили способы, связанные с регистрацией аксиального магнитного потока. Изучению радиальной составляющей индукции внешнего магнитного поля не уделяется должного внимания, несмотря на то что данный параметр является более доступным для регистрации. При этом исследования, как правило, проводятся в идеальных лабораторных условиях. Вопросы регистрации внешнего магнитного поля в условиях реальной эксплуатации мало изучены. Таким образом, оценка возможности использования радиальной составляющей внешнего магнитного поля асинхронных электродвигателей является актуальной задачей, решение которой может дать толчок к появлению новых методов технического диагностирования.

Материалы и методы: Для проведения исследования сигналов радиальной составляющей внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя разработан экспериментальный стенд. Для регистрации радиальной составляющей внешнего магнитного поля использован цифровой контрольно-измерительный комплекс, состоящий из датчика Холла, двухканального АЦП и персонального компьютера. Исследования проведены в лабораторных условиях и в условиях реальной эксплуатации на двигателях 0,4 и 6 кВт. Обработка зарегистрированных сигналов произведена с помощью спектрального анализа.

Результаты: Экспериментально доказано, что в радиальной составляющей внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя присутствуют информативные гармоники (гармоники динамического эксцентриситета), характеризующие техническое состояние ротора машины. Взаимное влияние магнитных полей асинхронных двигателей крайне незначительно и им можно пренебречь.

Выводы: Техническая диагностика узлов асинхронных электродвигателей по гармоникам радиальной составляющей внешнего магнитного поля является перспективным направлением, так как, в отличие от существующих методов, не требует установки датчика внутри машины, доступа к токовым цепям и может производиться на асинхронных электродвигателях различных типов, размеров и классов напряжений.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, радиальная составляющая индукции внешнего магнитного поля, спектральный анализ, гармоники эксцентриситета ротора.

Evaluation of the possibility of using the radial component of external magnetic field for induction motor diagnostics

E.M. Novoselov, V.A. Savelyev, A.A. Skorobogatov, A.S. Strakhov, I.N. Sulynenkov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: sstrakhov57@mail.ru

Abstract

Background: Currently, more and more attention is being paid to the development of methods for monitoring the condition of components of induction motors by the signal of their external magnetic field. The most developed methods are associated with axial flux registration. The study of the radial component of external magnetic field induction is not given due attention, despite the fact that this parameter is more accessible for registration. Studies are usually conducted in ideal laboratory conditions, and the problems of recording external magnetic field under conditions of actual operation have not been studied well yet. Thus, the evaluation of the possibility of using the external magnetic field radial component of induction motors is an urgent problem, which, when solved, can stimulate the emergence of new methods of technical diagnostics.

Materials and methods: An experimental stand has been developed for studying the signals of induction motor external magnetic field. To record the radial component of external magnetic field, a digital control complex has been used. The complex consists of a Hall sensor, a two-channel ADC and a personal computer. The investigations have been carried out both in laboratory conditions on the experimental stand, and in real operation conditions on 0,4 and 6 kV motors. The recorded signals were processed by means of spectral analysis.

Results: It has been experimentally confirmed that the radial component of induction motor external magnetic field contains informative harmonics (harmonics of dynamic eccentricity) characterizing the technical state of the machine rotor. The mutual influence of magnetic fields of induction motors is so small that it can be neglected.

Conclusions: Technical diagnostics of induction motor units by harmonics of the external magnetic field radial component is a promising direction as, unlike the existing methods, it does not require the installation of a sensor inside the machine or the access to the current circuits and can be performed on induction motors of various types, sizes and voltage classes.

Key words: induction motor, radial component of external magnetic field induction, spectral analysis, rotor eccentricity harmonics.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.3.038-046

Введение. Асинхронные двигатели (АД) получили широкое применение в промышленности, энергетике и в других отраслях народного хозяйства. Неисправности и дефекты в электродвигателях могут привести к их отказу и нарушению технологического процесса из-за отключения приводимого этим электродвигателем механизма. Поэтому в настоящее время все большее внимание уделяется разработке методов контроля по сигналу магнитного поля за пределами корпуса АД, которое принято называть внешним магнитным полем (ВМП). Первые публикации, связанные с такими методами, появились за рубежом в конце 80-х гг. XX века [1, 2], а в нашей стране – в конце 90-х гг. XX века [3, 4].

Наибольшее развитие получили способы, связанные с регистрацией аксиальной составляющей потока ВМП, наводимого токами лобовых частей обмоток статора и ротора. Регистрация сигнала осуществляется с помощью индуктивных датчиков, которые располагаются на торцевом щите соосно с валом ротора [2, 5–8]. При этом исследователи отдают предпочтение индуктивным датчикам из-за их низкой стоимости и неплохой чувствительности [9]. С другой стороны, в силу хорошей доступности измерений, более привлекательно использование для контроля локальных параметров ВМП, и в первую очередь индукции радиальной составляющей, которой в настоящее время не уделяется должного внимания.

Опубликованные исследования в этом направлении, как правило, проводились в лабораторных, т. е. в идеальных, условиях и на низковольтных машинах. В связи с этим представляет интерес изучение внешнего магнитного поля в условиях реальной эксплуатации и определение влияния на результаты измерений (регистрации) магнитных полей соседних электроустановок и соседних электродвигателей (далее в тексте под термином ВМП подразумевается радиальная составляющая индукции ВМП).

Исходя из вышесказанного актуальным является:

1) исследование возможности регистрации ВМП низковольтных и высоковольтных АД;

2) исследование ВМП на содержание информативных гармонических составляющих, характеризующих техническое состояние узлов АД. В качестве информативных гармонических составляющих были выбраны гармоники эксцентриситета ротора первого порядка [10];

3) исследование взаимного влияния магнитных полей соседних электродвигателей.

Материалы и методы. Для решения поставленных задач разработан экспериментальный стенд (рис. 1).

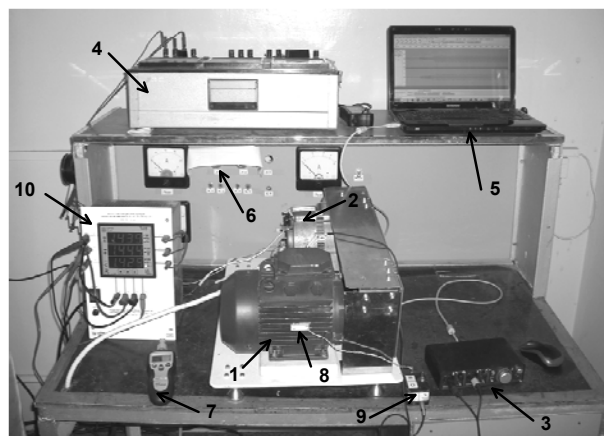


Рис. 1. Внешний вид экспериментального стенда

На стенде исследован трехфазный асинхронный электродвигатель АИР 71А6УЗ 1, нагрузка на валу которого создавалась с помощью генератора переменного тока 2. К генератору подключены лампы накаливания 6. Для контроля электрических параметров (тока, напряжения и мощности) использован измерительный комплект К-505 4, а также многофункциональный измерительный прибор ЩМ120 10.

Для измерения частоты вращения ротора АД применяется цифровой оптический тахометр СЕМ АТ-8 7. Для регистрации ВМП используется датчик Холла (ДХ) 8 типа SS496А производства компании Honeywell, который запитан от блока питания 9.

В качестве АЦП применяется внешняя звуковая карта Focusrite Scarlett 2i2 3. Запись оцифрованного сигнала осуществляется на персональный компьютер 5, где производится его окончательная обработка и анализ с помощью программного комплекса Matlab.

Помимо экспериментов, проведенных в лабораторных условиях, также были выполнены измерения в условиях реальной эксплуатации на АД 0,4 кВ и 6 кВт, параметры которых приведены в табл. 1. На рис. 2 показан процесс записи сигнала ВМП на корпусе двигателя 5А160S6У3 дымососа котельной.

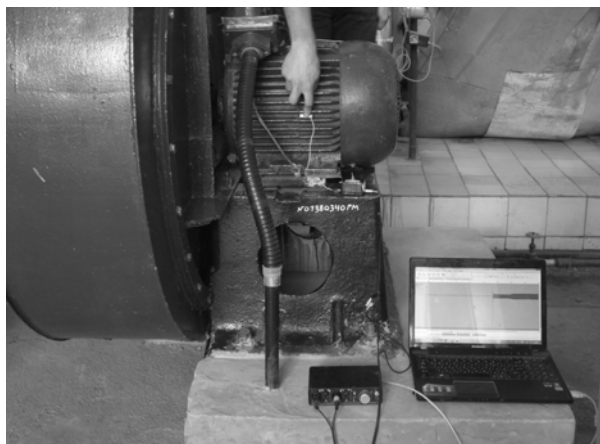


Рис. 2. Регистрация ВМП на корпусе двигателя 5А160S6У3 дымососа №1

Таблица 1. Параметры исследуемых АД

№	Тип механизма	Тип двигателя	Число пар полюсов	Номинальная частота вращения, об/мин	Номинальная мощность, кВт	Напряжение, кВ
1	Стенд	АИР 71А6У3	3	945	0,37	0,4
2	Дымосос №1	5А160S6У3	3	970	11	0,4
3	Дымосос №3	5АИ160S6У3	3	970	11	0,4
4	Дутьевой вентилятор №1	АИР160S6У3	3	970	11	0,4
5	Сетевой насос № 4	АИР160М2У3	1	2900	18,5	0,4
6	Сетевой насос № 6	АИР160М2У3	1	2900	18,5	0,4
7	Дымосос 3А	ДАМСО-15-12-8	4	740	570	6

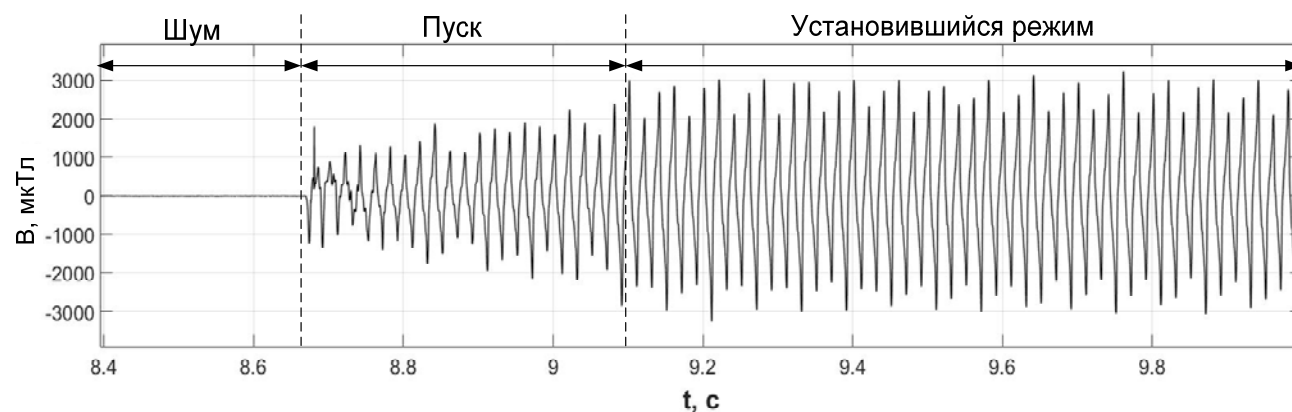


Рис. 3. Форма сигнала с ДХ при пуске двигателя АИР 71А6У3 экспериментального стенда

Результаты. Для оценки проявления ВМП на фоне электромагнитных помех была произведена регистрация сигналов при пуске АД (под электромагнитными помехами в данном случае понимается сигнал, обусловленный магнитными полями от внешних источников, а также собственными помехами измерительной системы). При этом определялись амплитуды сигналов до запуска двигателя, в пусковом режиме и после окончания переходного процесса (в установившемся режиме). На рис. 3 показана форма сигнала с ДХ, полученная при пуске АД экспериментального стенда, а на рис. 4 – при пуске электродвигателя дымососа 3А.

Результаты анализа полученных сигналов показывают, что при пуске АД ВМП отчетливо проявляется на фоне помех. Уровень сигнала, зафиксированный с момента пуска АД, многократно превышает величину сигнала при отключенном двигателе. На экспериментальном стенде (рис. 3, 4) величина индукции ВМП в установившемся режиме составляет приблизительно 3000 мкТл, а при отключенном АД она не превышает 10 мкТл, для двигателя дымососа 3А это соотношение составляет 50 и 5 мкТл соответственно.

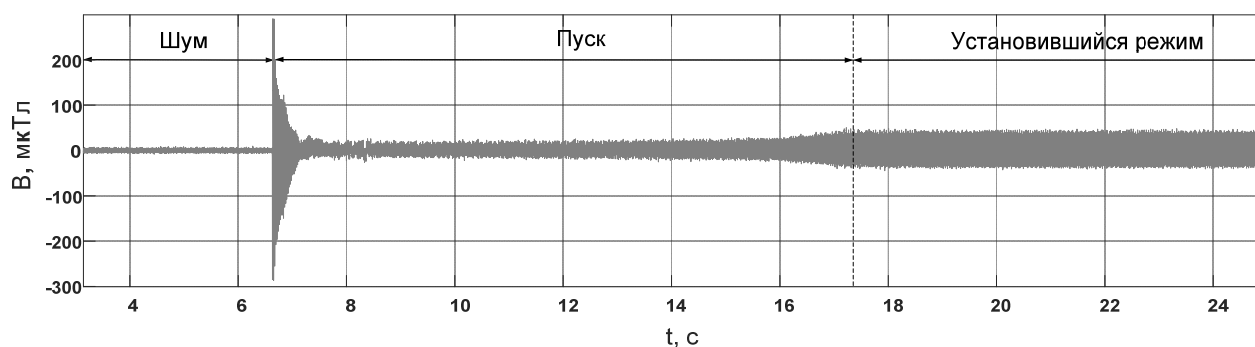


Рис. 4. Форма сигнала с ДХ при пуске двигателя ДАМСО-15-12-8 дымососа 3А

Таким образом, измерения, проведенные как в лабораторных условиях, так и в условиях реальной эксплуатации, показали, что радиальная составляющая ВМП может быть успешно зарегистрирована с помощью доступной измерительной системы на основе ДХ.

Далее было проведено исследование ВМП на содержание информативных гармонических составляющих, в качестве которых были приняты гармоники динамического эксцентриситета ротора первого порядка, которые далее называются гармониками эксцентриситета ротора (ГЭР). Выбор этих гармонических составляющих обусловлен следующими причинами:

1. Так как ГЭР всегда присутствуют в спектре магнитного поля воздушного зазора, то, вероятно, они будут присутствовать и в ВМП.

2. Гармоники ГЭР содержат высокую информативную ценность. Эти гармоники могут использоваться для определения скользяния АД и контроля технического состояния ротора и подшипниковых узлов.

Частоты ГЭР первого порядка могут быть определены по выражению [10]

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

где $f_{ГЭР}^{(1\pm)}$ – нижняя и верхняя боковые частоты ГЭР первого порядка соответственно; s – скользяние двигателя; p – число пар полюсов; f_c – частота сети.

Порядок испытаний был следующим. На АД, работающих в установившемся режиме, была проведена регистрация ВМП. Исследование зарегистрированных сигналов осуществлялось с помощью анализатора спектра на основе быстрого преобразования Фурье и алгоритма автокоррекции времени записи сигнала. Описание анализатора приведено в [11, 12].

На рис. 5–11 показаны амплитудные спектры ВМП АД, параметры которых указаны в табл. 1. Так же с помощью анализатора спектра были определены амплитуды гармоник на частоте сети и частотах, соответствующих ГЭР первого порядка (табл. 2). Для проверки того, действительно ли обнаруженные гармоники являются ГЭР первого порядка, значения по-

лученных с помощью анализатора спектра частот сравнивались с расчетными значениями этих частот (1) для двигателя на экспериментальном стенде. Необходимая для расчета скорость вращения двигателя была определена с помощью оптического тахометра. Результаты расчета приведены в табл. 3. Сравнительный анализ полученных значений показывает, что рассматриваемые гармоники действительно являются ГЭР первого порядка.

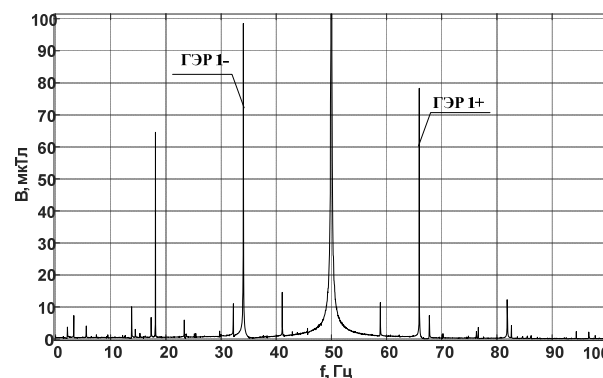


Рис. 5. Амплитудный спектр сигнала с ДХ на корпусе АД экспериментального стенда

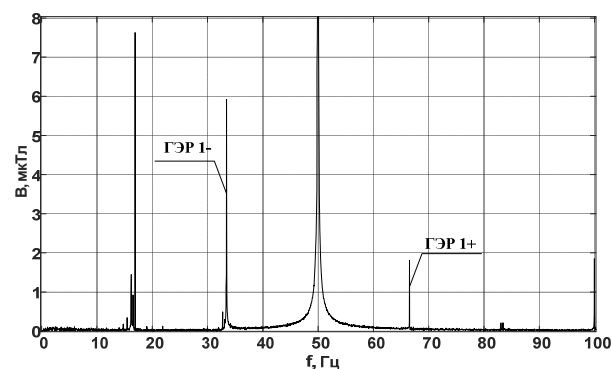


Рис. 6. Амплитудный спектр сигнала с ДХ на корпусе АД дымососа № 1

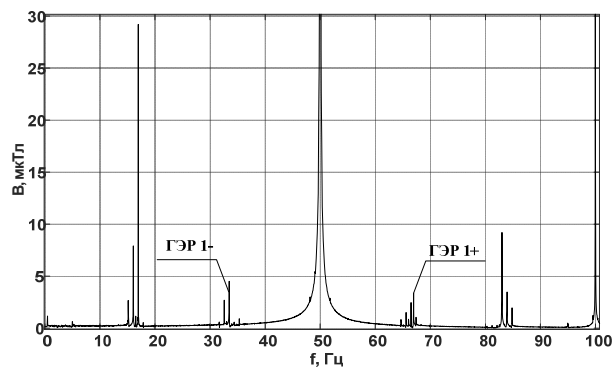


Рис. 7. Амплитудный спектр сигнала с ДХ на корпусе АД дымососа № 3

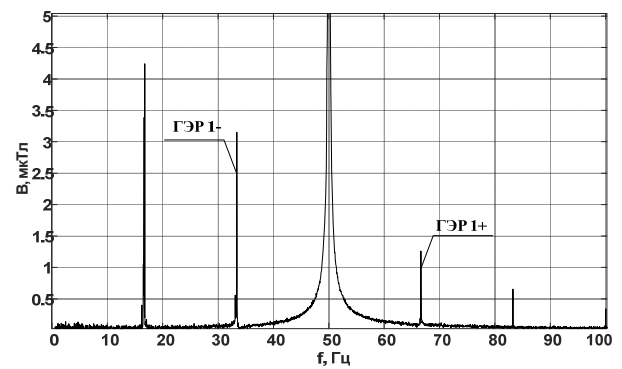


Рис. 8. Амплитудный спектр сигнала с ДХ на корпусе АД дутьевого вентилятора № 1

Таблица 2. Соотношение амплитуд гармонических составляющих сигнала ВМП

№	Наименование механизма	Тип двигателя	Амплитуда гармоники частоты сети, мкТл	Амплитуда ГЭР первого порядка на нижней боковой частоте, мкТл	Амплитуда ГЭР первого порядка на верхней боковой частоте, мкТл
1	Стенд	АИР 71А6У3	1207	100	79
2	Дымосос №1	5А160S6У3	86	7	1,9
3	Дымосос №3	5АИ160S6У3	504	5	2,6
4	Дутьевой вентилятор №1	АИР160S6У3	124	3,1	1,5
5	Сетевой насос № 4	АИР160М2У3	95,4	—	1,45
6	Сетевой насос № 6	АИР160М2У3	122	—	0,33
7	Дымосос ДС-3А	ДАМСО-15-12-8	52	7,7	2,1

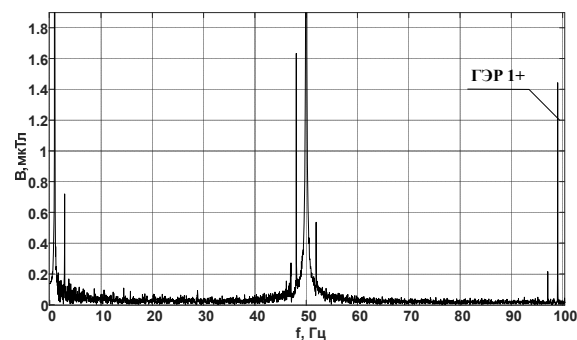


Рис. 9. Амплитудный спектр сигнала с ДХ на корпусе АД сетевого насоса № 4

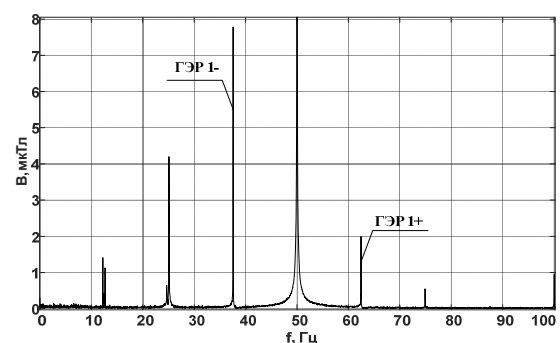


Рис. 11. Амплитудный спектр сигнала с ДХ на корпусе АД дымососа 3А (6 кВ)

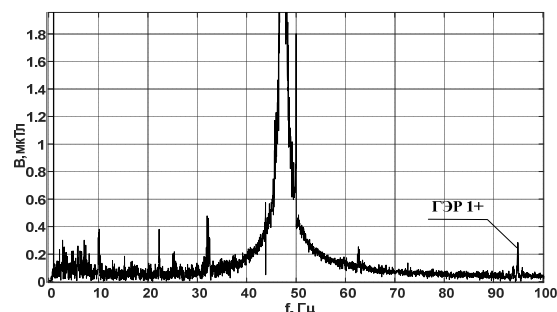


Рис. 10. Амплитудный спектр сигнала с ДХ на корпусе АД сетевого насоса № 6

Анализ результатов (рис. 5–11, табл. 2) показывает, что ГЭР первого порядка действительно присутствуют в ВМП АД. Данные гармонические составляющие отчетливо выделяются на фоне других гармонических составляющих сигнала. Представленные спектры показывают низкую зашумленность полученных сигналов. Исключением является сигнал, полученный с АД сетевого насоса № 6 (рис. 10). Зашумленность и некоторая «размытость» спектра данного сигнала объясняется тем, что АД сетевого насоса № 6 управляется с помощью преобразователя частоты.

Таблица 3. Сравнение расчетных значений частот ГЭР первого порядка

Тип двигателя	АИР 71А6УЗ
Измеренная скорость вращения, об/мин	959,3
Скольжение двигателя, о.е.	0,0407
Расчетное значение нижней боковой частоты ГЭР первого порядка	34,01
Расчетное значение верхней боковой частоты ГЭР первого порядка	65,99
Полученное анализатором значение нижней боковой частоты ГЭР первого порядка	34,1
Полученное анализатором значение верхней боковой частоты ГЭР первого порядка	65,9

Полученные спектры ВМП демонстрируют богатый спектральный состав, поэтому актуальной задачей для дальнейших исследований является исследование ВМП в качестве диагностического сигнала для определения технического состояния АД и его узлов.

Важной характеристикой диагностического сигнала является его помехозащищенность. Наиболее вероятным источником электромагнитных помех, которые могут воздействовать на ВМП, являются другие АД. Для изучения влияния магнитных полей АД друг на друга был произведен ряд экспериментов.

Было произведено исследование изменения ВМП при его удалении от корпуса АД АИР 71А6УЗ экспериментального стенда. Для этого производилась непрерывная регистрация сигнала с ДХ, который с интервалом 4–6 с последовательно удалялся от корпуса АД на 1 см. Форма полученного сигнала показана на

рис. 12. Также в каждой точке определялись амплитуды гармоники частоты сети и ГЭР первого порядка. Результаты измерений представлены в табл. 4.

Полученные результаты показывают, что при удалении датчика на 1 см от корпуса АД амплитуда основной гармоники уменьшилась почти в 2 раза, а при его удалении на 35 см амплитуда основной гармоники становится неразличимой на фоне помех. В свою очередь, ГЭР первого порядка становятся неразличимыми в спектре уже на расстоянии более 10 см. В связи с быстрым затуханием ВМП при его удалении от корпуса АД можно сделать вывод, что даже в случае близкого расположения АД взаимное влияние их ВМП друг на друга будет крайне незначительным, так как амплитуды информативных гармоник слишком малы.

Для практического подтверждения данного вывода проведено исследование взаимного влияния ВМП соседних АД друг на друга, находящихся в эксплуатации.

Измерения проводились на двигателях сетевых насосов №4–6, при этом сетевые насосы №4 и №6 находились в работе, а сетевой насос №5 был отключен. Данные двигатели были выбраны неслучайно, так как расстояние в свету между машинами составляет всего около 5 см (рис. 13), что увеличивает вероятность обнаружения гармоник ВМП от соседних двигателей. При этом, как было отмечено выше, двигатель сетевого насоса №6 управляется с помощью преобразователя частоты, поэтому частота основной гармоники сети для данного агрегата составляет примерно 46,8–47,2 Гц.

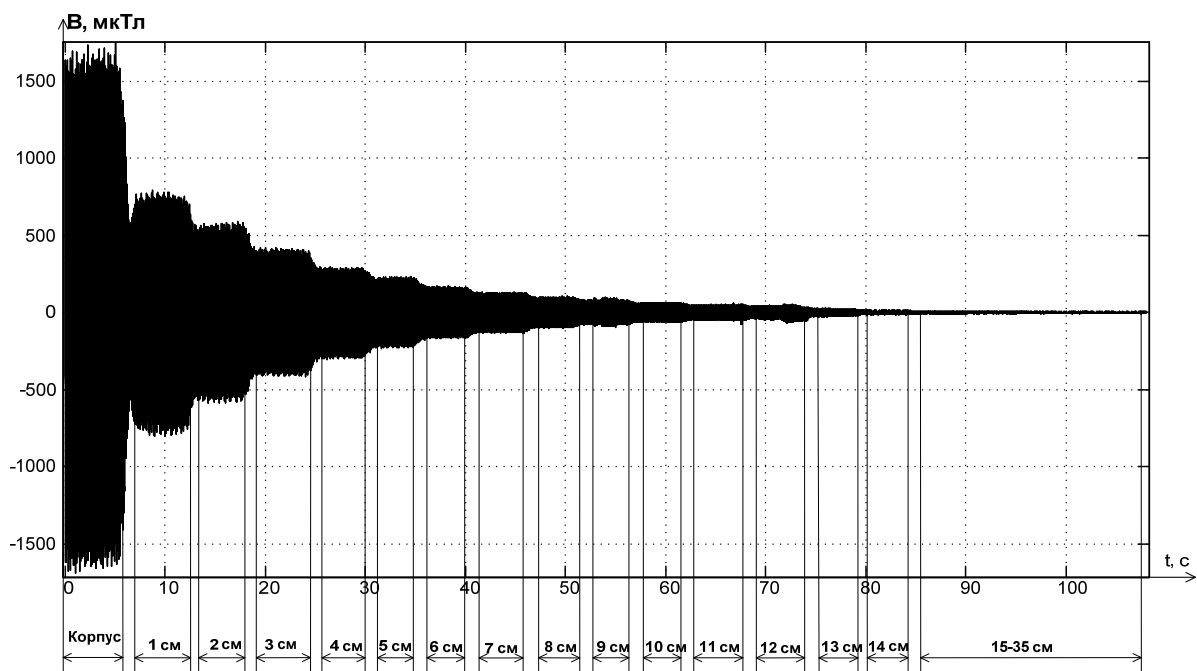


Рис. 12. Форма сигнала при удалении ДХ от корпуса электродвигателя (внизу отмечено расстояние до корпуса электродвигателя)

Таблица 4. Амплитуды гармоник ВМП при удалении датчика от корпуса АД экспериментального стенда

Расположение точки измерения	Амплитуда гармоники на частоте сети, мкТл	Амплитуда ГЭР первого порядка на нижней боковой частоте, мкТл	Амплитуда ГЭР первого порядка на верхней боковой частоте, мкТл
На корпусе двигателя	1369	68,44	41,4
1 см от корпуса	706	30,51	11,07
2 см от корпуса	515,8	15,18	5,469
3 см от корпуса	371,8	14,33	3,909
4 см от корпуса	266,3	9,958	2,357
5 см от корпуса	205,5	7,104	1,497
6 см от корпуса	150,7	5,003	0,8179
7 см от корпуса	117,1	3,859	0,5912
8 см от корпуса	85,66	2,877	0,456
9 см от корпуса	75,72	2,189	0,1875
10 см от корпуса	54,63	1,687	0,2057
11 см от корпуса	43,55	1,32	Неразличима в спектре (амплитуда около 0,1 мкТл)
12 см от корпуса	36,49	1,038	Неразличима в спектре
13 см от корпуса	20,08	0,5156	Неразличима в спектре
14 см от корпуса	9,144	0,2601	Неразличима в спектре
15 см от корпуса	4,301	Неразличима в спектре (амплитуда около 0,15 мкТл)	Неразличима в спектре
20 см от корпуса	2,789	Неразличима в спектре	Неразличима в спектре
25 см от корпуса	2,614	Неразличима в спектре	Неразличима в спектре
30 см от корпуса	1,685	Неразличима в спектре	Неразличима в спектре
35 см от корпуса	1,219	Неразличима в спектре	Неразличима в спектре



Рис. 13. Взаимное расположение АД сетевых насосов

При измерении ВМП на корпусе АД сетевого насоса №5 ДХ был равноудален от АД сетевых насосов №4 и №6. Сигнал, полученный с ДХ, установленного на корпусе АД сетевого насоса №5, представляет собой сумму магнитных полей от АД сетевых насосов №4 и №6, спектр зарегистрированного сигнала представлен на рис. 14. В спектре присутствуют гармонические составляющие с частотами 50 Гц (соответствует основной гармонике сети АД сетевого насоса №4) и 46,8–47,2 Гц (соответствует основной гармонике сети АД сетевого насоса №6 с преобразователем частоты) с амплитудами 1,9 и 1,1 мкТл соответственно. В то же время амплитуды сигналов на указанных выше частотах на корпусах двигателей, нахо-

дящихся в работе, составляют около 100 мкТл (табл. 2). Таким образом, амплитуды гармоник ВМП на исследуемом неработающем двигателе, обусловленные магнитными полями соседних АД, оказались приблизительно в 50–100 раз меньше амплитуд гармоник собственного ВМП АД, если бы он находился в работе.

Также необходимо отметить, что в спектре сигнала, полученного с АД сетевого насоса №5, удалось обнаружить только гармоники, соответствующие основным гармоникам питающей сети АД сетевых насосов №4 и №6. Другие гармоники, в частности ГЭР, на фоне помех определить невозможно.

Также было произведено исследование изменения ВМП при его удалении от корпуса

высоковольтного АД дымососа 3А. При этом регистрация ВМП производилась на расстояниях 20 см, 50 см и 1 м от корпуса данного электродвигателя, а также на корпусе соседнего, отключенного АД того же типа, который был расположен на расстоянии 4,5 м от исследуемого. В каждой точке определялись амплитуды гармоники частоты сети и ГЭР первого порядка (табл. 5).

Анализ результатов (табл. 5) показывает, что амплитуды каждой из рассматриваемых гармоник ВМП существенно уменьшаются при удалении датчика от корпуса двигателя и на расстоянии 1 метр становятся слабее как минимум в 10 раз. Вблизи корпуса соседнего неработающего АД гармоники ВМП практически неразличимы на фоне шума, уровень которого составил примерно 0,05 мкТл.

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что магнитное поле соседних АД не может оказать существенного влияния на исследуемый сигнал радиальной составляющей индукции ВМП. Исключением могут служить двигатели, управляемые с помощью преобразователей частоты (рис. 14), так как в этом случае частота основной гармонической составляющей таких двигателей может совпадать с частотой одной из

гармоник, характерной для повреждения узла машины. Следует отметить, что вероятность появления данного события крайне низкая.

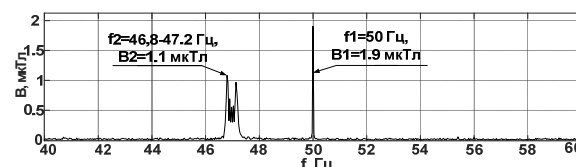


Рис. 14. Амплитудный спектр сигнала с ДХ на корпусе АД сетевого насоса №5 в отключенном состоянии

Выводы. Радиальная составляющая магнитного поля АД присутствует не только внутри, но и за пределами его корпуса и несет в себе информацию о техническом состоянии узлов АД. Техническая диагностика узлов асинхронных электродвигателей по гармоникам радиальной составляющей внешнего магнитного поля является перспективным направлением, так как, в отличие от существующих методов, не требует установки датчика внутри машины, доступа к токовым цепям и может производиться на асинхронных электродвигателях различных типов, размеров и классов напряжений.

Таблица 5. Амплитуды гармоник ВМП при удалении датчика от корпуса АД дымососа 3 А

Расположение точки измерения	Амплитуда гармоники частоты сети, мкТл	Амплитуда ГЭР первого порядка на нижней боковой частоте, мкТл	Амплитуда ГЭР первого порядка на верхней боковой частоте, мкТл
На корпусе двигателя	54,16	5,735	1,521
На расстоянии 20 см от корпуса	8,24	0,6043	0,367
На расстоянии 50 см от корпуса	4,94	0,271	0,1515
На расстоянии 100 см от корпуса	2,11	0,1794	0,1213
На корпусе неработающего двигателя (при включенном исследуемом двигателе)	0,1464	Неразличима в спектре (амплитуда помех около 0,05 мкТл)	Неразличима в спектре (амплитуда помех около 0,05 мкТл)
На корпусе неработающего двигателя (при отключенном исследуемом двигателе)	0,1469	Неразличима в спектре	Неразличима в спектре

Список литературы

1. **Tavner P., Penman J.** Condition Monitoring of Electrical Machines // Letchworth, Hertfordshire, England: Research Studies Press. – New York: Wiley, 1987. – 306 p.
2. **Noninvasive** detection of broken rotor bars in operating induction motors / G.B. Kliman, R.A. Koegl, J. Stein et al. // IEEE Transactions on Energy Conversion. – Dec 1988. – Vol. 3, issue 4. – P. 873–879.
3. **Волохов С.А., Добродеев П.Н., Кильдишев А.В.** Диагностирование обрыва стержня клетки ротора электродвигателя // Электротехника. – 1998. – № 2. – С. 13–15.
4. **Волохов С.А., Добродеев П.Н.** Проявление статического эксцентриситета ротора во внешнем магнитном поле электрических машин // Электротехника. – 2002. – № 11. – С. 28–32.
5. **Jarzyna W.** Diagnostic characteristics of axial flux in an induction machine // Electrical Machines and Drives, Conference Publication No. 4 12, IEE, Seventh International Conference on. – September 1995. – P. 141–146.
6. **Ceban A., Pusca R., Romary R.** Eccentricity and broken rotor bars faults – Effects on the external axial // Proc. 19th Int. Conf. Electr. Mach. (ICEM). – Sep. 2010. – P. 1–6.
7. **Experimental** application of axial leakage flux to the detection of rotor asymmetries, mechanical anomalies and interturn shortcircuits in working induction motors / M.F. Cabanas, M.G. Melero, G.A. Orcajo et al. // Proc. of International Conference on Electrical Machines, ICEM'98. – 1998. – P. 420–425.
8. **Assaf T., Henaoui H., Capolino G.-A.** Simplified axial flux spectrum method to detect incipient stator inter-turn short-circuits in induction machine // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – May 4–7. – 2004. – Vol. 2. – P. 815–819.
9. **Lenz J.E.** A review of magnetic sensors // Proceedings of the IEEE. – 1990. – Vol. 78. – Issue 6. – P. 973–989.
10. **Геллер Б., Гамата В.** Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.
11. **Разработка** анализатора спектра для исследования сигналов от электродвигателей / А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, С.Н. Литвинов и др. //

Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» («XIX Бенардосовские чтения»). Т. 1. – Иваново, 2017. – С. 126–130.

12. **Оценка** достоверности определения скольжения асинхронных двигателей по гармоникам эксцентриситета ротора / А.Н. Назарычев, А.С. Страхов, Е.М. Новоселов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 3. – С. 44–51.

References

1. Tavner, P., Penman, J. Condition Monitoring of Electrical Machines. Letchworth, Hertfordshire, England: Research Studies Press. New York: Wiley, 1987. 306 p.
2. Kliman, G.B., Koegl, R.A., Stein, J., Endicott, R.D., Madden, M.W. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1988, vol. 3, issue 4, pp. 873–879.
3. Volokhov, S.A., Dobrodeyev, P.N., Kildishev, A.V. *Elektrotehnika*, 1998, issue 2, pp. 13–15.
4. Volokhov, S.A., Dobrodeev, P.N. *Elektrotehnika*, 2002, issue 11, pp. 28–32.
5. Jarzyna, W. *Electrical Machines and Drives, Conference Publication No. 4 12, IEE, Seventh International Conference on*, 1995, pp.141–146.

6. Ceban, A., Pusca, R., Romary, R. *Proc. 19th Int. Conf. Electr. Mach. (ICEM)*, 2010, pp. 1–6.

7. Cabanas, M.F., Melero, M.G., Orcajo, G.A., Faya, F.R., Sarrago, J.S. *Proc. of International Conference on Electrical Machines, ICEM'98*, 1998, pp. 420–425.

8. Assaf, T., Henao, H., Capolino, G.-A. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2004, vol. 2, pp. 815–819.

9. Lenz, J.E. *Proceedings of the IEEE*, 1990, vol. 78, issue 6, pp. 973–989.

10. Geller, B., Gamata, V. *Vysshie garmoniki v asinkhronnykh mashinakh* [Higher Harmonics in Asynchronous Machines]. Moscow: Energiya, 1981. 352 p.

11. Strakhov, A.S., Novoselov, E.M., Litvinov, S.N., Konovalov, N.N., Skorobogatov, A.A. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» («XIX Benardosovskie chteniya»)*. Ivanovo, 2017, vol. 1, pp. 126–130.

12. Nazarychev, A.N., Strakhov, A.S., Novoselov, E.M., Litvinov, S.N., Skorobogatov, A.A. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 3, pp. 44–51.

Страхов Александр Станиславович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, e-mail: sstrakhov57@mail.ru

Strakhov Aleksandr Stanislavovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Post-Graduate Student of the Department of Electric Power Stations, Substations and Electric Equipment Diagnostics, e-mail: sstrakhov57@mail.ru

Новоселов Евгений Михайлович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, e-mail: captain.udgin@gmail.com

Novoselov Evgeny Mikhailovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of the Department of Electric Power Stations, Substations and Electric Equipment Diagnostics, e-mail: captain.udgin@gmail.com

Скоробогатов Андрей Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, e-mail: aaskor.andrey@yandex.ru

Skorobogatov Andrei Aleksandrovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Electric Power Stations, Substations and Electric Equipment Diagnostics, e-mail: aaskor.andrey@yandex.ru

Савельев Виталий Андреевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, e-mail: savelev-iv@yandex.ru

Savelyev Vitaly Andreyevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor of the Department of Electric Power Stations, Substations and Electric Equipment Diagnostics, e-mail: savelev-iv@yandex.ru

Сулыненков Илья Николаевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, e-mail: sulynenkov@mail.ru

Sulynenkov Ilya Nikolayevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Electric Power Stations, Substations and Electric Equipment Diagnostics, e-mail: sulynenkov@mail.ru