

*Голубев Александр Николаевич,*  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий,  
e-mail: alenikgo@yandex.ru  
*Golubev Aleksandr Nikolaevich,*  
Ivanovo State Power Engineering University,  
Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of the Department of Theoretical Basics of Electrical Engineering and Electric Technologies,  
e-mail: alenikgo@yandex.ru

*Мартынов Владимир Александрович,*  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой теоретических основ электротехники и электротехнологий,  
e-mail: zav@toe.ispu.ru  
*Martynov Vladimir Aleksandrovich,*  
Ivanovo State Power Engineering University,  
Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Head of the Department of Theoretical Basics of Electrical Engineering and Electric Technologies,  
e-mail: zav@toe.ispu.ru

УДК 621.313.3; 621.317

## **Экспериментально-аналитическое определение диагностического признака дефектов обмотки ротора асинхронного электродвигателя**

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 активно развиваются методы контроля технического состояния обмоток роторов асинхронных двигателей на основе спектрального анализа внешнего магнитного поля. Однако их существенными недостатками являются низкая достоверность в реальных условиях и отсутствие надежных признаков, характеризующих наличие дефекта. В связи с этим актуальным является получение достоверных признаков обрывов стержней ротора на работающем электродвигателе и определение допустимых значений параметра, при котором обмотка ротора переходит из исправного состояния в неисправное.

**Материалы и методы:** При моделировании внешнего и внутреннего магнитных полей машины применена математическая модель асинхронного двигателя, разработанная в программном комплексе ANSYS Maxwell, реализующая метод конечных элементов. Для регистрации и обработки сигналов внешнего и внутреннего магнитных полей на двигателе и его математической модели с различными дефектами использованы методы спектрального анализа.

**Результаты:** Проведен однофакторный анализ влияния эксплуатационных факторов на спектр внешнего магнитного поля математической модели электродвигателя, в результате которого установлено, что из всего спектра гармоник фиктивной обмотки ротора только амплитуды гармоник на нижней боковой частоте мало подвержены влиянию этих факторов. Сравнительный анализ результатов математического моделирования внешнего магнитного поля электродвигателя с экспериментальными данными показал, что амплитуды выше указанных гармоник и средние мощности сигналов, состоящие из этих гармоник, имеют близкие значения.

**Выводы:** Полученные результаты показывают, что для выявления обрывов стержней обмотки ротора на работающем электродвигателе целесообразно использовать диагностический сигнал, состоящий из гармоник фиктивной обмотки ротора на нижних боковых частотах, присутствующих во внешнем магнитном поле машины. В связи с этим в качестве диагностического параметра принята средняя мощность сигнала, состоящего из выше указанных гармоник. Пороговое значение диагностического параметра может быть определено путем математического моделирования внешнего магнитного поля электродвигателя.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, короткозамкнутая обмотка ротора, внешнее магнитное поле, спектральный анализ, средняя мощность сигнала, математическая модель асинхронного двигателя, метод конечных элементов, гармоники фиктивной обмотки ротора.

## Experimental and analytical determination of the diagnostic feature of induction motor rotor winding defects

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:** Methods of monitoring of induction motor rotor winding technical condition are now actively developing based on spectral analysis of external magnetic field. However, their significant disadvantages are low reliability in real conditions and absence of reliable defect indicators. An urgent problem now is, therefore, to obtain reliable indicators of rotor bar breakage on a running electric motor and to determine the permissible values of the parameter at which the rotor winding fault occurs.

**Materials and methods:** An induction motor mathematical model developed in the ANSYS Maxwell software complex and based on the finite element method was used in modeling the machine external and internal magnetic fields. The signals of external and internal magnetic fields on the motor and its mathematical model with different defects were recorded by spectral analysis methods.

**Results:** We have done a single-factor analysis of the influence of operational factors on the external magnetic field spectrum of the electric motor mathematical model, and, as a result, established that in the whole spectrum of the fictitious rotor winding harmonics, only the amplitudes of the lower side frequency harmonics are not affected by these factors greatly. A comparative analysis of the results of mathematical modeling of electric motor external magnetic field and experimental data has shown that the values of the amplitudes of the above mentioned harmonics and the average power of the signals consisting of these harmonics are close to each other.

**Conclusions:** The obtained results show that for detecting broken bars of the rotor winding on a running electric motor it is reasonable to use a diagnostic signal consisting of harmonics of the fictitious rotor winding at the lower side frequencies present in the external magnetic field of the machine. Thus, the average power of the signal consisting of the above harmonics is used as the diagnostic parameter. The threshold value of the diagnostic parameter can be determined by mathematical modeling of the motor external magnetic field.

**Key words:** induction motor, short-circuited rotor winding, external magnetic field, spectral analysis, average power of signal, mathematical model of the induction motor, finite element method, harmonics of fictitious rotor winding.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.4.044-053

**Состояние вопроса.** Для выявления неисправностей обмотки ротора (ОР) асинхронных двигателей (АД) широко применяются методы спектрального анализа сигналов, в качестве которых могут использоваться сигналы внутреннего [1, 2] и внешнего магнитных полей [3–7], тока статора [8–12] и т.п.

Наименее изученными, но перспективными являются методы, использующие один из параметров внешнего магнитного поля (ВМП) машины. Их преимущество над другими методами контроля заключается в отсутствии необходимости установки датчика внутри машины или подключения к токовым цепям обмотки статора.

Несмотря на это они не нашли широкого применения на практике в силу следующих недостатков:

- низкой достоверности в реальных условиях;
- отсутствия методики определения критериев (пороговых значений) перехода ОР из исправного в неисправное состояние (т. е. наличие или отсутствие оборванных стержней).

Повреждение ОР приводит к существенному изменению спектра, а именно, к росту амплитуд гармонических составляющих, которые характеризуют наличие неисправностей АД. В [2] их называют гармониками фиктивной обмотки ротора (ФОР), частоты которых определяются по выражению

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

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

Многие авторы предлагают в качестве диагностического параметра принимать возрастание амплитуды гармоники ФОР на нижней боковой частоте, порядок которой совпадает с числом пар полюсов машины, как показано, например, в [8]. При этом частота этой гармоники  $f_{\text{ФОР}}^{(p-)}$  находится рядом с частотой сети. Этот факт затрудняет точное определение данной гармоники в силу влияния эффекта растекания спектра [13]. Все это снижает достоверность результатов контроля. Поэтому целесообразнее использовать несколько гармоник ФОР, расположенных вдали от частоты сети на частотной оси.

В целях повышения достоверности результатов контроля необходимо проведение однофакторных экспериментов для исследования влияния изменения величины питающего напряжения и повреждений других узлов АД на амплитуды гармоник ФОР. К таким повреждениям можно отнести статический и динамический эксцентриситеты ротора.

Препятствием для практического применения известных методов контроля состояния ОР по ВМП является отсутствие методики определения критериев (пороговых значений) перехода ОР из исправного состояния в неисправное (т. е. наличие или отсутствие оборванных стержней). Сегодня данный критерий определяется лишь после проведения экспериментов на реальном АД, что является дорогостоящей операцией, особенно для мощных высоковольтных машин.

Появившиеся программные продукты, которые позволяют рассчитывать магнитные поля внутри и снаружи электродвигателя методом конечных элементов [14], могли бы стать незаменимым инструментом для поиска наиболее информативных гармоник, входящих в состав ФОР, а также для решения проблемы определения пороговых значений без проведения специальных экспериментов.

Исходя из вышесказанного, актуальным является определение диагностического параметра появления оборванных стержней ОР АД по радиальной составляющей ВМП и его порогового значения с помощью программного продукта, моделирующего ВМП АД методом конечных элементов.

**Материалы и методы.** Для достижения поставленной цели предлагается использовать математическую модель АД, реализованную в программном комплексе ANSYS Maxwell. Подобные модели, построенные на основе метода конечных элементов, получили широкое распространение при анализе различных параметров машины, в том числе при анализе распространения магнитных полей внутри АД (в воздушном зазоре) и за его пределами [14]. Нами предлагается использовать результаты расчетов на математической модели для контроля состояния реальных АД.

При определении граничных значений большая сложность состоит в учете различных факторов, влияющих на гармонические составляющие, отражающие дефекты ОР. Для этого в программном комплексе ANSYS Maxwell была реализована модель АД, с помощью которой можно определять амплитуды гармонических составляющих при оценке влияния несимметрии напряжения и эксцентриситета ротора. Для проверки достоверности математической модели в качестве объекта был выбран электродвигатель АИР 71А6У3, установленный на разработанном нами экспериментальном лабораторном стенде (рис. 1). В стенде использовались два ротора. Обмотка первого находилась в исправном состоянии, второго – имела один оборванный стержень. Кроме АД 1 стенд содержит генератор переменного тока 2 с выполняющими роль нагрузки лампами накаливания 3. Для регистрации внутреннего магнитного поля использовался расположенный внутри индуктивный датчик, пред-

ставляющий собой виток провода, намотанный на ярмо статора. Для регистрации сигналов ВМП использовался датчик Холла типа SS496А 4. В качестве АЦП применялась звуковая карта Focusrite Scarlett 2i2 5. Цифровой сигнал записывался на персональный компьютер 6 и в дальнейшем обрабатывался. Параметры исследуемого АД приведены в табл. 1.



Рис. 1. Внешний вид экспериментального стенда

Таблица 1. Параметры исследуемого асинхронного двигателя

Тип двигателя	Число пар полюсов	Номинальная частота вращения, об/мин	Номинальная мощность, Вт	Напряжение, кВ	Число стержней
АИР 71А6У3	3	945	370	0,4	33

Исходными данными при разработке модели выступали: напряжение, приложенное к выводам обмотки статора; момент сопротивления на валу ротора; геометрические параметры АД и характеристики материалов, из которых выполнены статор, ротор, корпус двигателя, вал, обмотки статора и ротора.

Модель машины в программном комплексе ANSYS Maxwell создавалась в несколько этапов. Первоначально была построена модель АИР 71А6У3 в программном модуле RMXprt, который использует классическую аналитическую теорию электрических машин и метод эквивалентной магнитной цепи для вычисления рабочих характеристик машины. Для построения модели использовались паспортные и обмоточные данные АД.

Для верификации модели был произведен расчет параметров АД. Те же параметры были определены на экспериментальном стенде. Результаты расчета на математической модели и результаты экспериментальных испытаний приведены в табл. 2. Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что математическая модель с достаточной точностью соответствует реальному двигателю.

Разработанная в RMXprt модель позволяет определить режимные параметры АД. Однако она не позволяет рассчитывать электромагнитные поля, что необходимо для выявления диагностических сигналов. Также RMXprt не позволяет выполнять моделирование неисправностей ОР. В связи с этим для расчета нестационарных электромагнитных полей при различных неисправностях машины были созданы двухмерные модели АД в программном модуле Maxwell 2D с исправной ОР и ОР с одним оборванным стержнем. В основе этих моделей лежит численное решение дифференциальных уравнений Максвелла в конечной области пространства с соответствующими граничными условиями методом конечных элементов.

Место расположения необходимых для измерения датчиков на математической модели показано на рис. 2. Пример расчета поля за пределами корпуса АИР 71А6У3 с исправ-

ной ОР в Maxwell 2D приведен на рис. 3. Анализ полученных результатов показывает, что поле выходит за пределы АД и имеет максимальную индукцию в шести небольших областях на его корпусе, что соответствует числу полюсов машины.

Следует отметить, что расчетная область ограничена окружностью, радиус которой на 40 см превышает внешний радиус корпуса электродвигателя. Это связано с тем, что амплитуда поля за пределами двигателя при удалении от корпуса существенно уменьшается. Проведенные экспериментальные исследования показали, что уже при удалении датчика на 40 см от корпуса амплитуда сигнала слабо различима на фоне шумов и может быть принята равной нулю. Поэтому в качестве граничного условия было принято равенство нулю векторного магнитного потенциала на границе этой области.

Таблица 2. Режимные параметры АД, полученные на математической модели в RMXprt и в результате экспериментальных испытаний

Наименование параметра	Результаты расчета на математической модели в RMXprt	Результаты испытаний на экспериментальном стенде
Фазный ток статора в номинальном режиме, А	1,383	1,38
Коэффициент мощности в номинальном режиме, о.е.	0,624	0,62
КПД двигателя, %	64,74	62,7
Номинальная скорость вращения, об/мин	945,6	943,6
Сопротивление обмотки статора, Ом	25,544	26,4

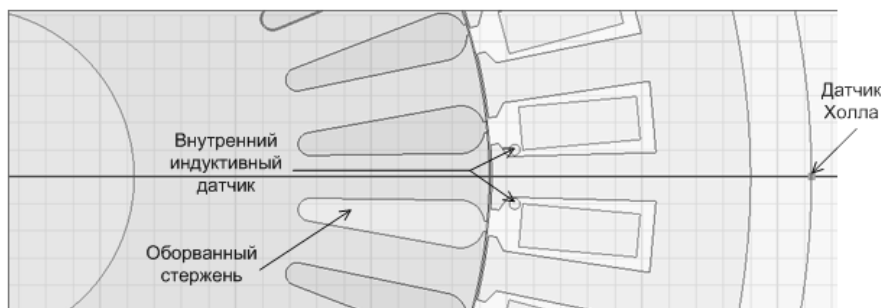


Рис. 2. Расположение датчиков для измерения сигналов внешнего и внутреннего магнитных полей АД в Maxwell 2D

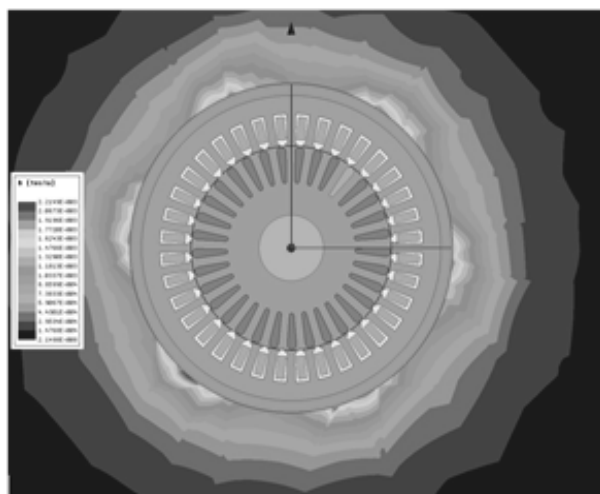


Рис. 3. Полевой расчет АД в Maxwell 2D

Для верификации созданной модели было произведено сравнение спектров внешнего и внутреннего магнитных полей математической модели и реального АД. Эти спектры были получены с помощью разработанного нами анализатора спектра на основе быстрого преобразования Фурье и алгоритма автокоррекции времени записи сигнала для оценки амплитуд и частот гармонических составляющих [15]. Данный анализатор использовался для определения амплитуд и частот первых пяти гармонических составляющих ФОР, по которым предлагается оценивать состояние ОР. Результаты расчета амплитуд этих гармоник ФОР приведены в табл. 3, 4.

Сравнивая результаты расчетов, полученные на экспериментальном стенде и с по-

мощью математического моделирования для двигателя без оборванных стержней, можно заметить, что амплитуды не всех гармоник совпадают. Это связано с тем, что амплитуды гармонических составляющих ФОР для двигателя с исправной ОР практически равны 0, что не позволяет корректно обнаружить их в сиг-

нале. Хорошо проявляющиеся гармонические составляющие в исправном двигателе могут быть обусловлены иными причинами, что будет показано ниже. Наибольшая разница заметна при сравнении амплитуд гармоник ФОР на верхних боковых частотах.

Таблица 3. Амплитуды гармонических составляющих ФОР для двигателя без оборванных стержней, мкТл (для внешнего магнитного поля) / мВ (для внутреннего магнитного поля)

Номер строки	Номер гармоники	1+	2+	3+	4+	5+	1-	2-	3-	4-	5-
1	Внутреннее магнитное поле реального двигателя	0,311	1,065	174,4	2,996	1,314	0,034	0,103	0,055	0,139	0,116
2	Внутреннее магнитное поле на математической модели	0,032	0,018	186,8	0,049	0,067	0,041	0,134	0,019	0,037	0,019
3	Отношение амплитуд гармоник внутреннего магнитного поля реального двигателя и математической модели	9,72	59,17	0,93	61,14	19,61	0,83	0,77	2,89	3,76	6,11
4	Внешнее магнитное поле реального двигателя	66,78	100,9	1028	66,77	18,70	11,80	4,565	1,92	0,738	0,968
5	Внешнее магнитное поле на математической модели	1,447	0,871	942,1	0,695	0,786	0,652	5,945	1,07	0,227	0,525
6	Отношение амплитуд гармоник внешнего магнитного поля реального двигателя и математической модели	46,15	115,8	1,09	96,07	23,79	18,1	0,77	1,79	3,25	1,84

Таблица 4. Амплитуды гармонических составляющих ФОР для двигателя с одним оборванным стержнем, мкТл (для внешнего магнитного поля) / мВ (для внутреннего магнитного поля)

Номер строки	Номер гармоники	1+	2+	3+	4+	5+	1-	2-	3-	4-	5-
1	Внутреннее магнитное поле реального двигателя	0,752	2,281	175,9	4,227	4,076	0,247	0,951	0,447	1,913	1,845
2	Внутреннее магнитное поле на математической модели	0,386	1,522	186,8	3,699	3,424	0,211	0,336	0,156	0,889	1,128
3	Отношение амплитуд гармоник внутреннего магнитного поля реального двигателя и математической модели	1,95	1,5	0,94	1,14	1,19	1,17	2,83	2,87	2,15	1,64
4	Внешнее магнитное поле реального двигателя	131,7	76,21	978,4	44,23	33,02	52,77	38,28	7,669	16,29	5,679
5	Внешнее магнитное поле на математической модели	53,13	55,22	1007	26,31	14,57	23,6	30,38	3,944	14,60	6,262
6	Отношение амплитуд гармоник внешнего магнитного поля реального двигателя и математической модели	2,48	1,38	0,97	1,68	2,27	2,24	1,26	1,94	1,12	0,91

Анализ данных табл. 4 показывает, что при наличии оборванных стержней значения амплитуд гармоник ФОР на математической модели близки к значениям на реальном двигателе, несмотря на возможное влияние различных эксплуатационных факторов. Это указывает на корректность разработанной математической модели.

Результаты исследований, приведенные в [2], показывают, что величина амплитуды одной из конкретных гармоник ФОР зависит от числа и места расположения оборванных стержней в ОР. Поэтому в некоторых случаях эта величина при наличии поврежденных стержней может быть близка к 0. Таким образом, контроль состояния АД по амплитудам отдельных гармоник малопригоден к использованию в реальных условиях.

Более интересным направлением в поиске диагностического параметра, показывающего наличие оборванных стержней ОР, является ранее представленная нами методика, основанная на оценке состояния данного узла АД путем определения значения средней мощности сигнала, состоящего только из гармоник ФОР первых пяти порядков [16]. Значение данной величины может быть определено по выражению

$$P_{\text{ср.ФОР}} = \frac{1}{2} \left( \sum_{v=1}^5 A_{v-}^2 + \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq p}}^5 A_{v+}^2 \right), \quad (2)$$

где  $A_{v-}$  – амплитуда гармоники ФОР  $v$ -го порядка на нижней боковой частоте;  $A_{v+}$  – амплитуда гармоники ФОР  $v$ -го порядка на верхней боковой частоте;  $p$  – число пар полюсов.

Для проверки возможности использования средней мощности сигнала в качестве диагностического параметра был произведен расчет этой величины на сигналах радиальной составляющей индукции ВМП и индукции внутреннего магнитного поля на математической модели двигателя и на экспериментальном стенде с исправной ОР и с ОР, имеющей один оборванный стержень. Результаты расчета приведены в табл. 5. Расчет ограничен гармониками пятого порядка, так как дальнейший

рост средней мощности гармоник ФОР незначителен и не превышает 10 % во всех рассмотренных вариантах [16]. Кроме того, в расчете не учитывается гармоника 3-го порядка на верхней боковой частоте, соответствующая частоте сети.

Анализ полученных результатов (табл. 5) подтверждает возможность использования сигналов внешнего и внутреннего магнитных полей, полученных на математической модели, в качестве диагностического параметра, так как при обрыве стержня средняя мощность этих сигналов возрастала в 100–200 раз. Однако при расчете этих же величин для реального АД средняя мощность возросла лишь в 5 раз для внутреннего магнитного поля и менее чем в 2 раза для радиальной составляющей ВМП. Столь малый рост величины средней мощности сигнала не позволяет производить контроль состояния ОР по этому параметру. Кроме того, на математической модели двигателя с одним оборванным стержнем значение средней мощности сигнала радиальной составляющей ВМП получилось гораздо ниже, чем у реального АД без обрыва, что также не позволяет использовать это значение в качестве граничного.

Таким образом, для определения причин несоответствия сигналов, полученных на математической модели, сигналам, полученным в испытаниях с реальным двигателем, были проведены дополнительные исследования, а именно, проанализировано влияние различных факторов на частотный спектр исследуемого АД на математической модели.

Для оценки подобного влияния было построено несколько моделей двигателя с различными неисправностями, а именно: со статическим эксцентриситетом (путем смещения ротора АД и оси вращения); с динамическим эксцентриситетом (ДЭ) (путем смещения положения АД в начальный момент времени, но без изменения положения оси вращения), а также при несимметрии питающего напряжения (путем увеличения или уменьшения напряжения одной из фаз). Результаты расчета приведены в табл. 6, 7.

Таблица 5. Результаты расчета средней мощности сигнала, состоящего из гармоник ФОР

Исследуемый двигатель	Средняя мощность сигнала внешнего магнитного поля, мкТл <sup>2</sup>	Средняя мощность сигнала внутреннего магнитного поля, мВ <sup>2</sup>
Реальный асинхронный двигатель с ротором без оборванных стержней	9815,1	6,1025
Реальный асинхронный двигатель с ротором с одним оборванным стержнем	15545	31,9337
Математическая модель асинхронного двигателя без оборванных стержней	20,7966	0,0258
Математическая модель асинхронного двигателя с одним оборванным стержнем	4347,7	21,9935

Таблица 6. Амплитуды гармоник ФОР на нижних боковых частотах и средняя мощность сигналов радиальной составляющей ВМП двигателя, состоящих из данных гармоник, при различных неисправностях АД

Вид неисправности	Амплитуда гармоники, мкТл					Средняя мощность сигнала, мкТл <sup>2</sup>
	№1	№2	№3	№4	№5	
Отсутствие неисправностей	0,6528	5,9451	1,0697	0,2271	0,5247	18,6663
Динамический эксцентриситет (10% от величины воздушного зазора)	1,2155	0,5392	1,1728	0,2114	0,2247	1,6668
Статический эксцентриситет (10% от величины воздушного зазора)	0,6570	5,7428	0,8578	0,1807	0,4405	17,2429
Несимметрия напряжения (напряжение одной из фаз 230 В)	0,7355	3,4394	1,2208	0,3909	0,4338	11,3985
Обрыв одного стержня обмотки ротора	23,5975	30,3846	3,9443	14,6017	6,2621	909,7069
Обрыв одного стержня обмотки ротора и динамический эксцентриситет (10% от величины воздушного зазора)	24,2827	30,0300	3,3820	14,9834	5,6117	916,6881
Обрыв одного стержня обмотки ротора и статический эксцентриситет (10% от величины воздушного зазора)	24,6566	30,6941	4,4376	14,8864	5,6807	946,6260
Обрыв одного стержня обмотки ротора и несимметрия напряжения (напряжение одной из фаз 230 В)	23,4256	32,4116	4,6155	15,2723	5,7926	998,2433

Анализ полученных результатов (рис. 6, 7) позволяет сделать следующие выводы. Статический эксцентриситет и несимметрия напряжения оказывают очень малое влияние на амплитуды гармоник ФОР ВМП и не приводят к серьезному изменению средней мощности сигнала в случае наличия оборванных стержней. При отсутствии обрывов амплитуды гармонических составляющих несколько изменяются, однако значительно меньше амплитуд гармоник при наличии повреждения.

С другой стороны, динамический эксцентриситет (табл. 6, 7, строка 3) приводит к существенному возрастанию амплитуд гармоник

ФОР на верхних боковых частотах. При этом амплитуды таких гармоник на нижних боковых частотах если и увеличиваются, то незначительно. Это обусловлено тем, что частоты гармоник динамического эксцентриситета ротора совпадают с частотами гармоник ФОР, но порядки гармоник различны. Правило соответствия порядков этих гармоник может быть описано следующим выражением:

$$\nu_{ДЭ} = \nu_{ФОР} - p, \quad (3)$$

где  $\nu_{ДЭ}$  – порядок гармонической составляющей динамического эксцентриситета ротора;  $\nu_{ФОР}$  – порядок гармонической составляющей ФОР.

Таблица 7. Амплитуды гармоник ФОР на верхних боковых частотах и средняя мощность сигналов радиальной составляющей ВМП двигателя, состоящих из данных гармоник, при различных неисправностях АД

Вид неисправности	Амплитуда гармоники, мкТл					Средняя мощность сигнала, мкТл <sup>2</sup>
	№1	№2	№3	№4	№5	
Отсутствие неисправностей	1,4479	0,8712	942,0694	0,6947	0,7857	2,1303
Динамический эксцентриситет (10 % от величины воздушного зазора)	1,7687	55,5061	940,5643	44,2391	1,6141	2522
Статический эксцентриситет (10 % от величины воздушного зазора)	1,2895	1,1618	984,0442	0,9426	0,6355	2,2101
Несимметрия напряжения (напряжение одной из фаз 230 В)	0,7466	1,0094	1182,2	0,6838	0,6651	1,3126
Обрыв одного стержня обмотки ротора	53,1357	55,2267	1006,8	26,3149	14,5747	3437,9
Обрыв одного стержня обмотки ротора и динамический эксцентриситет (10 % от величины воздушного зазора)	53,5059	109,8822	1006,3	59,8814	14,5176	9412,4
Обрыв одного стержня обмотки ротора и статический эксцентриситет (10 % от величины воздушного зазора)	52,7775	56,1470	1050,2	26,5627	14,3743	3471,2
Обрыв одного стержня обмотки ротора и несимметрия напряжения (напряжение одной из фаз 230 В)	57,8027	61,5552	1239,5	27,4607	14,4648	4102,4

Для примера в табл. 8 приведены порядки гармоник ФОР и динамического эксцентриситета ротора, а также соответствующие данным гармоникам частоты для рассматриваемого АД при скольжении 0,055 о.е. Согласно этим данным, верхним боковым частотам гармоник ФОР соответствуют частоты гармоник динамического эксцентриситета ротора низких порядков (1-го и 2-го), а нижним боковым частотам гармоник ФОР – частоты гармоник динамического эксцентриситета более высоких порядков (с 4-го по 8-й).

В [1] показано, что амплитуды гармоник динамического эксцентриситета 1-го и 2-го порядков оказывают значительное влияние на спектр анализируемого сигнала, в то время как влиянием гармоник более высоких порядков можно пренебречь.

В связи с этим мощность сигнала, состоящего из гармоник ФОР на верхних боковых частотах, при увеличении динамического эксцентриситета существенно возрастает, что и не позволяет применять эти составляющие для контроля состояния ОР. Таким образом, при дальнейших исследованиях предлагается производить анализ диагностического сигнала, состоящего только из гармоник ФОР на нижних боковых частотах.

Выделив в качестве диагностического параметра значение средней мощности сигнала, состоящего только из гармоник ФОР 1–5 порядков на нижних боковых частотах, необходимо определить граничное значение этого параметра. Для этих целей предлагается определять граничное значение на математической модели двигателя, а потом использовать его при исследованиях на реальных АД. При этом удобнее всего в качестве граничного использовать значение средней мощности при одном оборванном стержне ротора без иных повреждений, которое значительно превышает

эту величину для двигателя с исправной ОР. При этом ранее в работах было показано, что при обрыве большего количества стержней ротора значение средней мощности увеличивается [16]. Кроме того, согласно данным табл. 6, 7, различные факторы могут приводить к некоторому снижению величины средней мощности сигнала, в связи с чем пороговое значение принимается с некоторым коэффициентом запаса (в работе принимается равным 0,7). Таким образом, граничное значение может быть определено по выражению

$$P_{\text{гран}} = 0,7 \cdot P_{\text{ср.ФОР-мод}}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{ср.ФОР-мод}}$  – средняя мощность гармоник ФОР на нижних боковых частотах, полученная при математическом моделировании ВМП АД с одним оборванным стержнем.

При этом значение параметра  $P_{\text{ср.ФОР-мод}}$  будет определяться по следующему выражению:

$$P_{\text{ср.ФОР-мод}} = \frac{1}{2} \sum_{v=1}^5 A_v^2. \quad (5)$$

Соответственно, если значение средней мощности сигнала реального АД превышает граничное, то имеется как минимум один оборванный стержень в ОР. Если же это значение меньше порогового, то ОР исправна.

Для проверки работоспособности этого критерия были рассчитаны средние мощности сигналов гармоник ФОР на нижних боковых частотах для внешнего и внутреннего магнитных полей реального АД. Эти значения сравнивались с граничными, определенными по выражению (4). Результаты расчета приведены в табл. 9. Серым цветом помечены строки, где средняя мощность рассмотренных сигналов превышает граничное значение. Установлено, что во всех случаях с помощью данного критерия были получены правильные результаты.

Таблица 8. Частоты гармоник ФОР и гармоник динамического эксцентриситета ротора для двигателя АИР 71А6УЗ

Порядок гармоник ФОР	1-	2-	3-	4-	5-	1+	2+	3+/ $f_c$	4+	5+
Порядок гармоник ДЭ	4-	5-	6-	7-	8-	2-	1-	–	1+	2+
Частота, Гц	13	28,7	44,5	60,2	76	18,5	34,2	50	65,7	81,5

Таблица 9. Результаты расчета граничного значения мощности сигнала внутреннего и внешнего магнитных полей

Исследуемый сигнал	Средняя мощность сигнала, мВ <sup>2</sup> (для внутреннего магнитного поля) / мкТл <sup>2</sup> (для внешнего магнитного поля)	Граничное значение мощности сигнала, мВ <sup>2</sup> (для внутреннего магнитного поля) / мкТл <sup>2</sup> (для внешнего магнитного поля)
Сигнал внутреннего магнитного поля АД без обрывов стержней	0,0412	1,5065
Сигнал внутреннего магнитного поля АД с одним оборванным стержнем	3,7712	
Сигнал внешнего магнитного поля АД без обрывов стержней	82,7433	636,7948
Сигнал внешнего магнитного поля АД с одним оборванным стержнем	2307,7	



Таким образом, значение средней мощности сигнала, состоящего из гармоник ФОР на нижних боковых частотах, может быть эффективно использовано в качестве диагностического параметра наличия или отсутствия оборванных стержней короткозамкнутой ОР.

**Выводы.** Результаты математического моделирования показали, что для выявления обрывов стержней ОР АД наиболее целесообразно использовать диагностический сигнал, состоящий только из гармоник ФОР на нижних боковых частотах, присутствующих во ВМП машины. В качестве диагностического параметра обрыва стержней ОР предложено использовать среднюю мощность сигнала, состоящего из выше указанных гармоник, а в качестве диагностического признака наличия неисправности – значительное увеличение этого параметра. Пороговое значение диагностического параметра может быть определено до ввода в эксплуатацию электродвигателя путем математического моделирования его ВМП с помощью метода конечных элементов.

#### Список литературы

1. **Noninvasive** detection of broken rotor bars in operating induction motors / G.B. Kliman, R.A. Koegl, J. Stein // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – Dec. 1988. – Vol. 3, iss. 4. – P. 873–879.

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

3. **Волохов С.А., Добродеев П.Н., Кильдишев А.В.** Диагностирование обрыва стержня клетки ротора электродвигателя // *Электротехника*. – 1998. – № 2. – С. 13–15.

4. **Лукьянов А.В., Мухачев Ю.С., Бельский И.О.** Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // *Системы. Методы. Технологии: научный периодический журнал*. – Братск: Братский гос. ун-т, 2014. – № 2(22). – С. 61–69.

5. **Сидельников Л.Г., Афанасьев Д.О.** Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2013. – № 7. – С. 127–137.

6. **Elkasabgy N.M., Eastham A.R., Dawson G.E.** Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – Jan/Feb 1992. – Vol. 28, issue 1. – P. 165–171.

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

8. **Thomson W.T., Gilmore R.J.** 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.

9. **Induction** motors broken rotor bars detection using MCSA and neural network: experimental research / S. Guedidi, S.E. Zouzou, W. Laala et. al. // *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. – June, 2013. – Vol. 4, issue 2. – P. 173–181.

10. **Kalaskar C.S., Gond V.J.** Motor Current Signature Analysis to Detect the Fault in Induction Motor // *Int. Journal of Engineering Research and Applications*. – 2014. – Vol. 4, issue 6 (Version 1). – P. 58–61.

11. **Thakur A., Wadhvani S., Wadhvani A.K.** Motor Current Signature Analysis as a Tool for Induction Machine Fault Diagnosis // *International Journal of Computer Science and Information Technology Research*. – 2015. – Vol. 3, issue 3. – P. 309–313.

12. **Петухов В.С., Соколов В.А.** Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // *Новости Электротехники*. – 2005. – № 1(31). – С. 50–52.

13. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.

14. **Fireteanu V., Taras P.** Diagnosis of induction motor rotor faults based on finite element evaluation of voltage harmonics of coil sensors // *Proc. of IEEE Sensors Applications Symposium*. – Brescia, Italy, Feb. 7–9, 2012. – P. 1–5.

15. **Разработка** анализатора спектра для исследования сигналов от электродвигателей / А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, С.Н. Литвинов, А.А. Скоробогатов // *Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» («XIX Бенардосовские чтения»)*. Т. 1. – Иваново, 2017. – С. 126–130.

16. **Страхов А.С., Новоселов Е.М., Литвинов С.Н.** Использование средней мощности внешнего магнитного поля в качестве диагностического параметра повреждения обмотки ротора электродвигателя // *Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» («XIX Бенардосовские чтения»)*. Т. 1. – Иваново, 2017. – С. 103–107.

#### References

1. 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*, Dec. 1988, vol. 3, issue 4, pp. 873–879.

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

3. Volokhov, S.A., Dobrodeev, P.N., Kil'dishev, A.V. *Elektrotehnika*, 1998, no. 2, pp. 13–15.

4. Luk'yanov, A.V., Mukhachev, Yu.S., Bel'skiy, I.O. *Sistemy. Metody. Tekhnologii: nauchnyy periodicheskiy zhurnal*. Bratsk: Bratskiy gosudarstvennyy universitet, 2014, no. 2(22), pp. 61–69.

5. Sidel'nikov, L.G., Afanas'ev, D.O. *Vestnik PNIPIU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2013, no. 7, pp. 127–137.

6. Elkasabgy, N.M., Eastham, A.R., Dawson, G.E. Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Jan/Feb 1992, vol. 28, issue 1, pp. 165–171.

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

8. Thomson, W.T., Gilmore, R.J. 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, pp. 145–156.

9. Guedidi, S., Zouzou, S.E., Laala, W., Sahraoui, M., Yahia, K. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, June 2013, vol. 4, issue 2, pp. 173–181.

10. Kalaskar, C.S., Gond, V.J. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2014, vol. 4, issue 6 (Version 1), pp. 58–61.

11. Thakur, A., Wadhvani, S., Wadhvani, A.K. *International Journal of Computer Science and Information Technology Research*, 2015, vol. 3, issue 3, pp. 309–313.

12. Petukhov, V.S., Sokolov, V.A. *Novosti ElektroTehniky*, 2005, no. 1(31), pp. 50–52.

13. Sergienko, A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Saint-Petersburg: Piter, 2003. 604 p.

14. Fireteanu, V., Taras, P. Diagnosis of induction motor rotor faults based on finite element evaluation of voltage harmonics of coil sensors. *Proc. of IEEE Sensors Applications Symposium*. Brescia, Italy, Feb. 7–9, 2012, pp. 1–5.

15. Strakhov, A.S., Novoselov, E.M., Litvinov, S.N., Skorobogatov, A.A. *Razrabotka analizatora spektra dlya issledovaniya signalov ot elektrodvigatelye* [Devel-

opment of spectral analyzer for studying electric drive signals]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» («XIX Benardosovskie chteniya»)*, t. 1 [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «State and Development Prospects of Electrical and Thermal Technologies» («XIX Benardos Readings»), vol. 1]. Ivanovo, 2017, pp. 126–130.

16. Strakhov, A.S., Novoselov, E.M., Litvinov, S.N., Konovalov, N.N., Skorobogatov, A.A. *Ispol'zovanie sredney moshchnosti vneshnego magnitnogo polya v kachestve diagnosticheskogo parametra povrezhdeniya obmotki rotora elektrodvigatelya* [Average power density of magnetic field as a diagnostic parameter of electric drive rotor winding faults]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» («XIX Benardosovskie chteniya»)*, t. 1 [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «State and Development Prospects of Electrical and Thermal Technologies» («XIX Benardos Readings»), vol. 1]. Ivanovo, 2017, pp. 103–107.

*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

*Saveliev 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

*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

*Сульниенков 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