

УДК 621.313

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОБРЫВА СТЕРЖНЕЙ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ РОТОРА

А.Н. НАЗАРЫЧЕВ, А.А. СКОРОБОГАТОВ, Е.М. НОВОСЕЛОВ

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», Иваново, Россия  
E-mail: captain.udgin@gmail.com

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Вопрос практического применения внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя, в частности, для контроля обрывов стержней обмотки ротора, недостаточно хорошо проработан в отечественной науке. По данной тематике очень мало статей на русском языке.

**Материалы и методы:** Для исследования вопроса разработан экспериментальный стенд, с помощью которого проведены измерения магнитного поля в воздушном зазоре и за пределами корпуса двигателя. В качестве метода исследования использовался спектральный анализ.

**Результаты:** Исследована возможность использования внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя с «беличьей» клеткой для контроля обрывов стержней обмотки ротора. Показано, что внешнее магнитное поле электродвигателя может быть использовано для контроля обрывов стержней обмотки ротора.

**Выводы:** Результаты экспериментов показали, что в спектре внешнего магнитного поля присутствуют гармоники, амплитуды которых значительно возрастают при обрывах стержней обмотки ротора.

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель, внешнее магнитное поле, обрыв стержней обмотки ротора, спектральный анализ, фиктивная обмотка ротора.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EXTERNAL MAGNETIC FIELD OF INDUCTION MOTOR FOR SQUIRREL CAGE WINDING ROTOR WINDING BREAKAGE BARS CONTROL

A.N. NAZARYCHEV, A.A. SKOROBAGATOV, E.M. NOVOSELOV

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia  
E-mail: captain.udgin@gmail.com

### Abstract

**Background:** The issue on application of external magnetic field of induction motor especially for rotor winding breakage bars control isn't properly developed in this country. Scientific papers on this issue in Russia are very few.

**Materials and methods:** Test bench to measure magnetic field in air gap and outside electric motor case was developed. Spectrum analysis was used as a testing method.

**Results:** Possibility of squirrel-cage induction motor external magnetic field use for rotor winding bars breakages control is examined. It was presented that electric motor external magnetic field can be used for rotor winding bars breakages control.

**Conclusions:** Experiments results have shown that in spectrum of an external magnetic field there are harmonic components magnitudes of which increase considerably under breakages of rotor winding bars.

**Key words:** induction motor, external magnetic field, rotor winding bars breakage, spectrum analysis, imaginary rotor winding.

В настоящее время объекты энергетики и промышленные предприятия характеризуются высокой оснащенностью сложным электро-техническим оборудованием, содержащим электропривод. В качестве привода чаще всего используется асинхронный электродвигатель (АД). Большая часть оборудования электростанций и крупных промышленных предприятий жестко связана между собой в едином технологическом цикле, поэтому нарушение работы в каком-либо из механизмов может оказать существенное воздействие на весь технологический процесс в целом. Такие нарушения приводят к значительному матери-

альному ущербу, который может достигать до нескольких тысяч долларов.

Практика эксплуатации АД показывает, что увеличение срока службы и повышение надежности их работы дает больший экономический эффект, чем улучшение других технико-экономических показателей, таких как КПД, коэффициент мощности, коэффициент использования и т. д. Таким образом, для обеспечения надежности работы электростанции или промышленного предприятия важным является выбор рациональной стратегии технического обслуживания и ремонта, учитывающей фактическое техническое состояние АД.

В настоящее время на электростанциях и предприятиях в основном используется стратегия плано-предупредительного ремонта. Это система периодических ремонтов, которая предусматривает проведение мероприятий по техническому обслуживанию и плановых ремонтов каждой единицы оборудования после отработки ею определенного времени. Однако такая стратегия не является оптимальной с точки зрения экономической эффективности и повышения надежности, так как в этом случае не учитывается реальное состояние оборудования.

В последние годы, в связи с переходом к рыночным механизмам управления в энергетике и промышленности, появилось понимание необходимости внедрения системы технического обслуживания и ремонта с учетом фактического состояния оборудования. Однако для реализации данной стратегии необходимы методы и средства, позволяющие достоверно определять текущее состояние оборудования, то есть системы контроля и диагностики. Причем оценка состояния должна производиться во время работы оборудования и не должна затрагивать технологический процесс. На повреждения, связанные с подшипниками, приходится свыше 40 % отказов высоковольтных электродвигателей, 35 % отказов приходится на обмотку статора и более 10 % на короткозамкнутую обмотку ротора [1]. Пока в целом не существует какой-либо системы для комплексной оценки технического состояния АД. Для контроля состояния механической части АД, прежде всего подшипников, в процессе его работы обычно используется вибродиагностика, которая де-факто уже стала своего рода промышленным стандартом. Что касается контроля состояния обмоток электродвигателя, то подобной, зарекомендовавшей себя технологии пока не существует. И первый вопрос, на который необходимо ответить в ходе решения этой задачи, – выбор источника диагностического сигнала.

Можно выделить три критерия, которыми следует руководствоваться при выборе источника диагностического сигнала:

- 1) информативность;
- 2) доступность;
- 3) безопасность.

На сегодняшний день большинство авторов научных работ в качестве источника выбирают ток статора. Это вполне оправдано, так как он отвечает критериям информативности и доступности. Также можно отметить использование внутреннего магнитного поля электродвигателя, которое очевидно обладает максимальной информативностью, однако не удовлетворяет критериям безопасности и доступности.

Публикаций по использованию внешнего магнитного поля электродвигателя в качестве диагностического сигнала очень мало. При

этом внешнее магнитное поле является легкодоступным и безопасным источником сигнала, однако оценка его информативности требует проведения дополнительных исследований.

Нами ставится задача доказать возможность использования внешнего магнитного поля АД для контроля обрыва стержней обмотки ротора.

На начальной стадии обрыв стержней ротора незначительно сказывается на эксплуатационных характеристиках электродвигателя и может быть обнаружен не сразу. При обрыве стержня нагрузка перераспределяется на целостные проводники (стержни обмотки). Основная нагрузка ложится на стержни, соседние с оборванным, создавая ненормированные условия их эксплуатации. Таким образом, обрыв одного стержня в конечном итоге чаще всего приводит к повреждению и других стержней.

Со временем оборванный стержень может отогнуться (как правило, при пуске) и повредить обмотку статора, что приведет к тяжелым последствиям для электродвигателя (рис. 1, 2), требующим капитального ремонта или замены поврежденного АД на новый.

На рис. 1 показаны два стержня, которые оторвались от короткозамыкающего кольца и отогнулись под воздействием значительных электродинамических усилий. На рис. 2 показана обмотка статора, на которой отчетливо видны повреждения, нанесенные отогнувшимися стержнями.



Рис. 1. Фотография поврежденной обмотки ротора

Обрыв стержня «беличьей» клетки ротора АД приводит к перераспределению тока по стержням. Новое распределение тока, согласно [3, 4], можно представить в виде суммы первоначального тока (при отсутствии обрыва стержня) и фиктивного тока от оборванного стержня, причем в оборванном стержне фиктивный ток равен и противоположен первоначальному, что обеспечивает равенство нулю тока в оборванном стержне. Из этого следует,

что любую реальную обмотку ротора с поврежденными стержнями можно заменить двумя обмотками. Одна из них является исправной, а другая – фиктивной обмоткой ротора (ФОР), в которой по оборванным стержням протекают упомянутые выше фиктивные токи, которые далее замыкаются по исправным стержням.

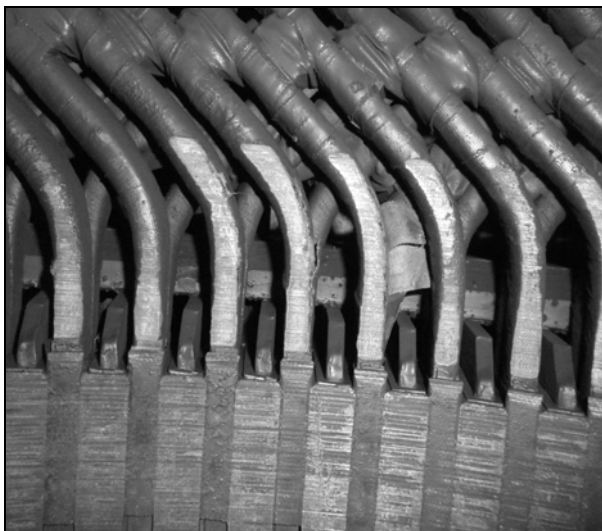


Рис. 2. Фотография обмотки статора в месте повреждения

Из [4] известно, что ФОР генерирует гармоники, амплитуды которых значительно возрастают при повреждениях обмотки ротора. Этот факт предлагается использовать в качестве диагностического признака обрыва стержней обмотки ротора АД.

Частота гармоник ФОР зависит от текущего скольжения АД и определяется по выражению [3]

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

где  $v = 1, 2, 3, \dots$  – порядок пространственной гармоники;  $f_c$  – частота сети;  $s$  – скольжение;  $p$  – число пар полюсов.

Каждому порядку гармоник ФОР принадлежат две гармоники, значения которых отличаются на величину

$$\Delta f^{(v)} = 2f_c s. \quad (2)$$

Гармоники ФОР всегда присутствуют в магнитном поле воздушного зазора электродвигателя даже при исправной обмотке ротора. Это связано с тем, что ни одна обмотка не является полностью симметричной. Однако следует заметить, что при исправной обмотке ротора гармоники ФОР ничтожно малы.

Так как магнитное поле выходит за пределы корпуса электродвигателя, то в нем также должны присутствовать эти гармоники. Для проверки этого предположения был разработан и использован экспериментальный стенд следующей конфигурации.

Объектом исследований является трехфазный асинхронный электродвигатель с но-

минальной мощностью  $P_{\text{НОМ}} = 250$  Вт. Нагрузка на валу двигателя создается генератором постоянного тока, к которому подключаются 3 лампы накаливания мощностью 85 Вт каждая. Для измерения внешнего магнитного поля двигателя используется электромагнитный датчик, который представляет собой П-образный разомкнутый магнитопровод с обмоткой.

Для измерения магнитного поля в воздушном зазоре использовался внутрениий индуктивный датчик, который представляет собой виток провода, намотанный на зубец статора. Для измерения текущего скольжения электродвигателя использован оптический тахометр. Сигнал с датчиков поступает в компьютер через специальную плату-осциллограф. Плата содержит 14-битный АЦП, который преобразовывает аналоговый сигнал в цифровой. Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рис. 3.

В качестве метода исследования использовался спектральный анализ ЭДС, наводимой в датчике. Обработка и анализ данных осуществлялись в программном пакете MATLAB.

Были проведены измерения магнитного поля в воздушном зазоре и магнитного поля за пределами корпуса электродвигателя в продолжительном нормальном режиме работы. Сначала были произведены измерения от электродвигателя с исправной ОР, затем последовательно высверлены два стержня и проведены еще две серии измерений. Все измерения проводились при следующих нагрузках на валу ротора:  $0; 0,5P_{\text{НОМ}}; 1P_{\text{НОМ}}; 1,5P_{\text{НОМ}}$ .

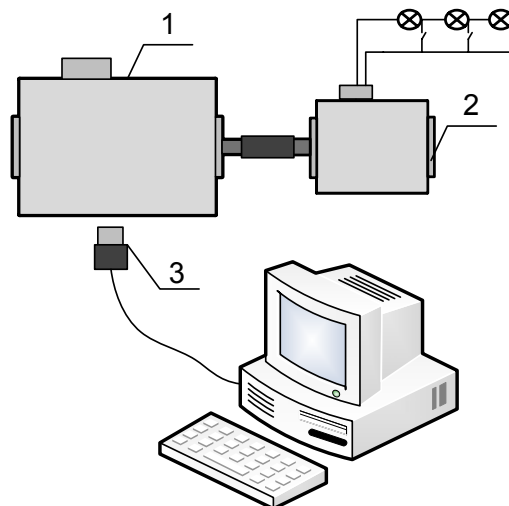


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 – асинхронный двигатель; 2 – генератор постоянного тока с подключенными к нему лампами накаливания; 3 – датчик внешнего магнитного поля

Для доказательства существования гармоник ФОР во внешнем магнитном поле был произведен расчет значений частот по форму-

ле (1), используя значения скольжения, полученные с помощью оптического тахометра (табл. 1–4).

Таблица 1. Расчетные значения частот ФОР в режиме ХХ

Порядок	1	2	3	4	5
Исправная обмотка ротора					
ФОР -	49,53	99,297	149,064	198,831	248,597
ФОР +	50,03	99,769	149,536	199,303	249,069
Один оборванный стержень					
ФОР -	49,41	99,097	148,781	198,464	248,147
ФОР +	49,95	99,636	149,319	199,003	248,686
Два оборванных стержня					
ФОР -	49,43	99,147	148,864	198,581	248,297
ФОР +	50,00	99,719	149,436	199,153	248,869

Таблица 2. Расчетные значения частот ФОР при нагрузке 0,5P<sub>ном</sub>

Порядок	1	2	3	4	5
Исправная обмотка ротора					
ФОР -	48,09	97,147	146,197	195,247	244,297
ФОР +	50,00	99,053	148,103	197,153	246,203
Один оборванный стержень					
ФОР -	47,88	96,797	145,714	194,631	243,547
ФОР +	49,95	98,869	147,786	196,703	245,619
Два оборванных стержня					
ФОР -	47,93	96,897	145,864	194,831	243,797
ФОР +	50,00	98,969	147,936	196,903	245,869

Таблица 3. Расчетные значения частот ФОР при нагрузке 1P<sub>ном</sub>

Порядок	1	2	3	4	5
Исправная обмотка ротора					
ФОР -	46,76	95,147	143,53	191,914	240,297
ФОР +	50,00	98,386	146,769	195,153	243,536
Один оборванный стержень					
ФОР -	46,41	94,597	142,781	190,964	239,147
ФОР +	49,95	98,136	146,319	194,503	242,686
Два оборванных стержня					
ФОР -	46,56	94,847	143,131	191,414	239,697
ФОР +	50,00	98,286	146,569	194,853	243,136

Таблица 4. Расчетные значения частот ФОР при нагрузке 1,5P<sub>ном</sub>

Порядок	1	2	3	4	5
Исправная обмотка ротора					
ФОР -	45,29	92,947	140,597	188,247	235,897
ФОР +	50,00	97,653	145,303	192,953	240,603
Один оборванный стержень					
ФОР -	44,74	92,097	139,447	186,797	234,147
ФОР +	49,95	97,303	144,653	192,003	239,353
Два оборванных стержня					
ФОР -	44,93	92,397	139,864	187,331	234,797
ФОР +	50,00	97,469	144,936	192,403	239,869

Опираясь на полученные расчетные значения частот гармоник ФОР, был произведен сравнительный анализ спектров внутреннего и внешнего магнитных полей.

На рис. 4, 5 представлены спектры магнитного поля в воздушном зазоре и магнитного поля за пределами корпуса электродвигателя. Используя расчетные значения частот, были выделены гармоники ФОР второго и третьего порядков (рис. 6, 7). На рис. 8 показано изменение спектра внешнего магнитного поля в зависимости от количества оборванных стержней в обмотке ротора. Как можно заметить, при появлении оборванных стержней в спектре начинают отчетливо проявляться гармоники ФОР.

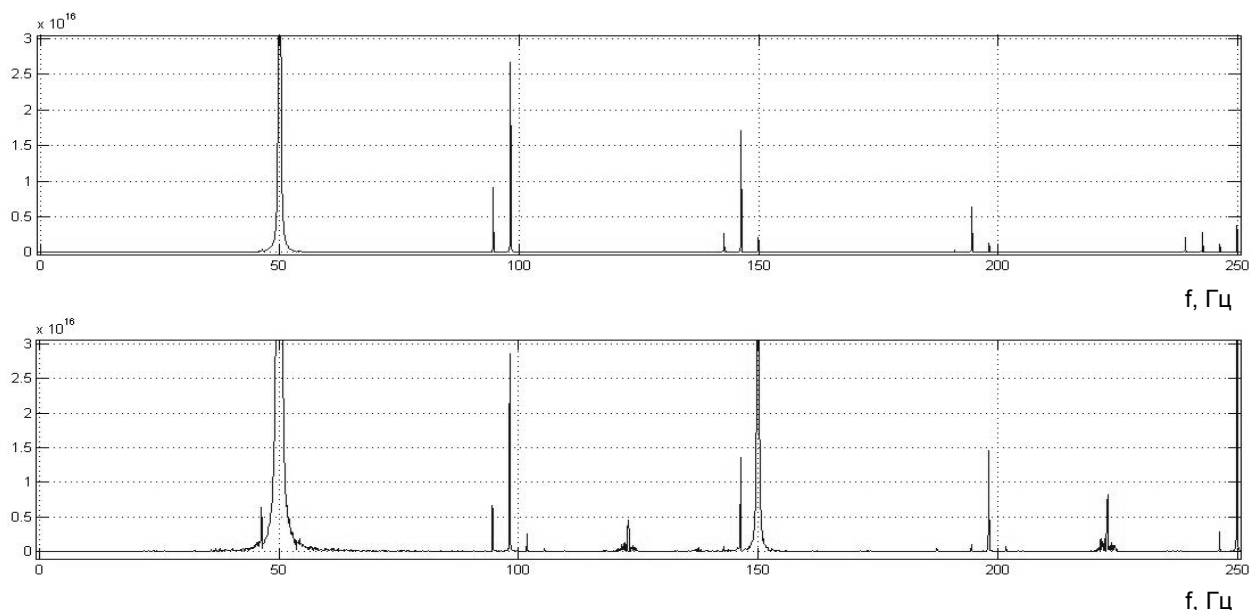


Рис. 4. Спектры магнитного поля в воздушном зазоре электродвигателя (верхний график) и внешнего магнитного поля (нижний график) при обрыве одного стержня и номинальной нагрузке на валу ротора

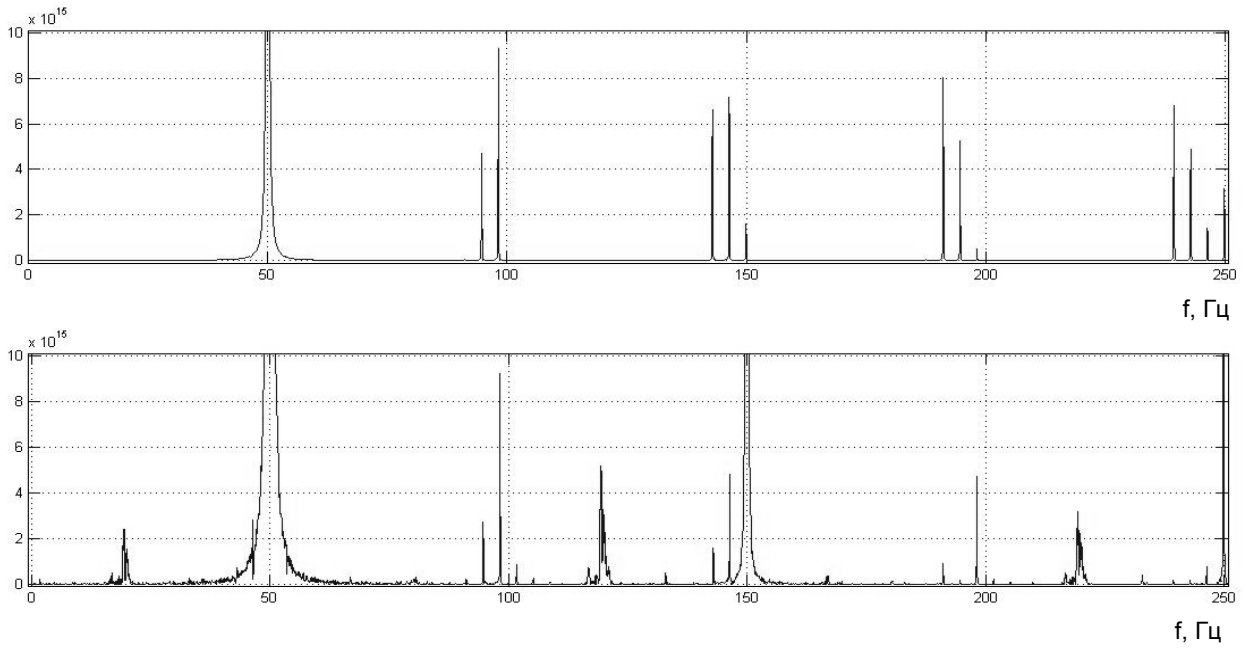


Рис. 5. Спектры магнитного поля в воздушном зазоре электродвигателя (верхний график) и внешнего магнитного поля (нижний график) при обрыве двух стержней и номинальной нагрузке на валу ротора

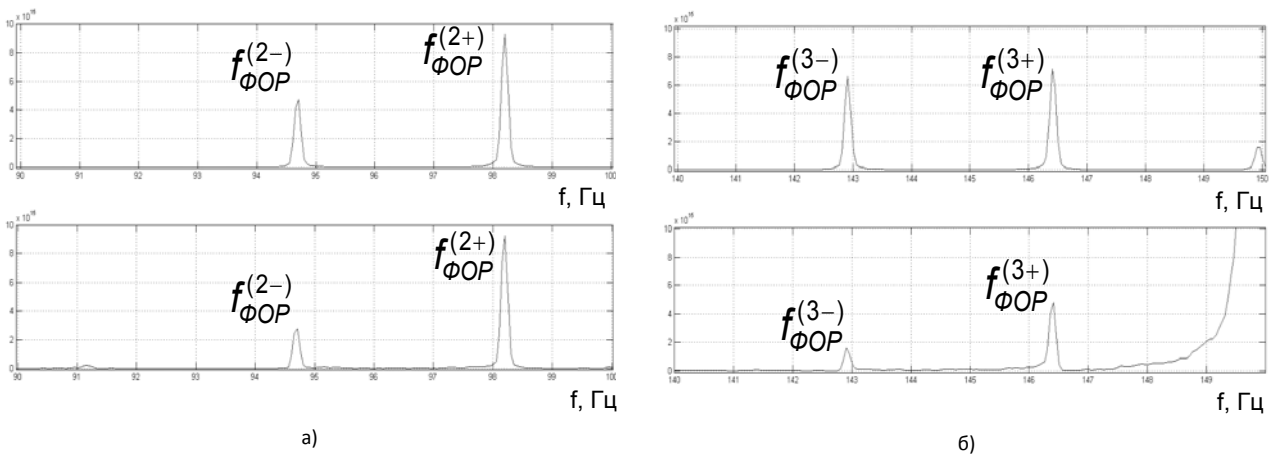


Рис. 6. Гармоники ФОР в спектрах магнитного поля в воздушном зазоре электродвигателя (верхние графики) и внешнего магнитного поля (нижние графики) при обрыве одного стержня и номинальной нагрузке на валу ротора: а – гармоники ФОР второго порядка; б – гармоники ФОР третьего порядка

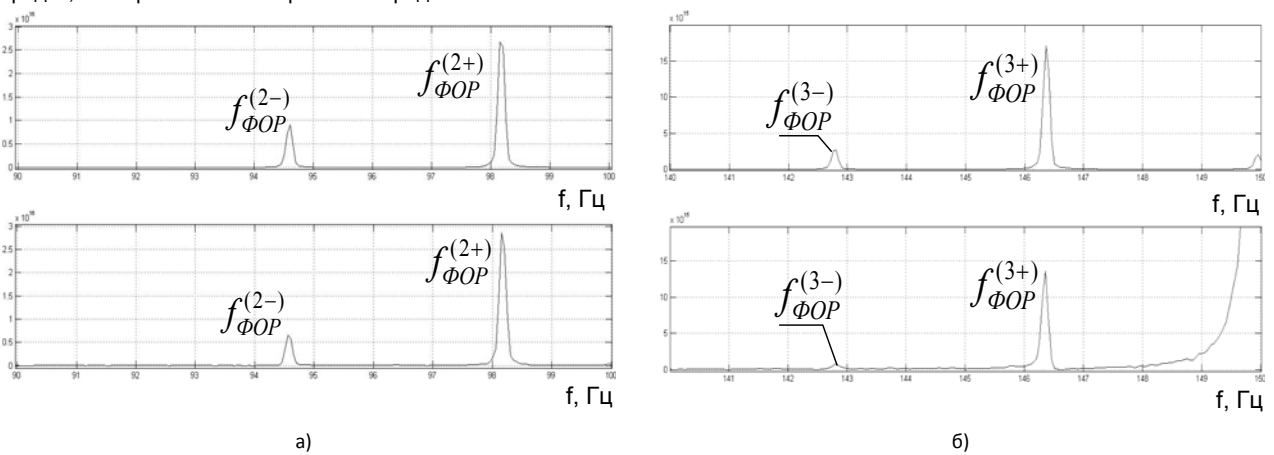


Рис. 7. Гармоники ФОР в спектрах магнитного поля в воздушном зазоре электродвигателя (верхние графики) и внешнего магнитного поля (нижние графики) при обрыве двух стержней и номинальной нагрузке на валу ротора: а – гармоники ФОР второго порядка; б – гармоники ФОР третьего порядка

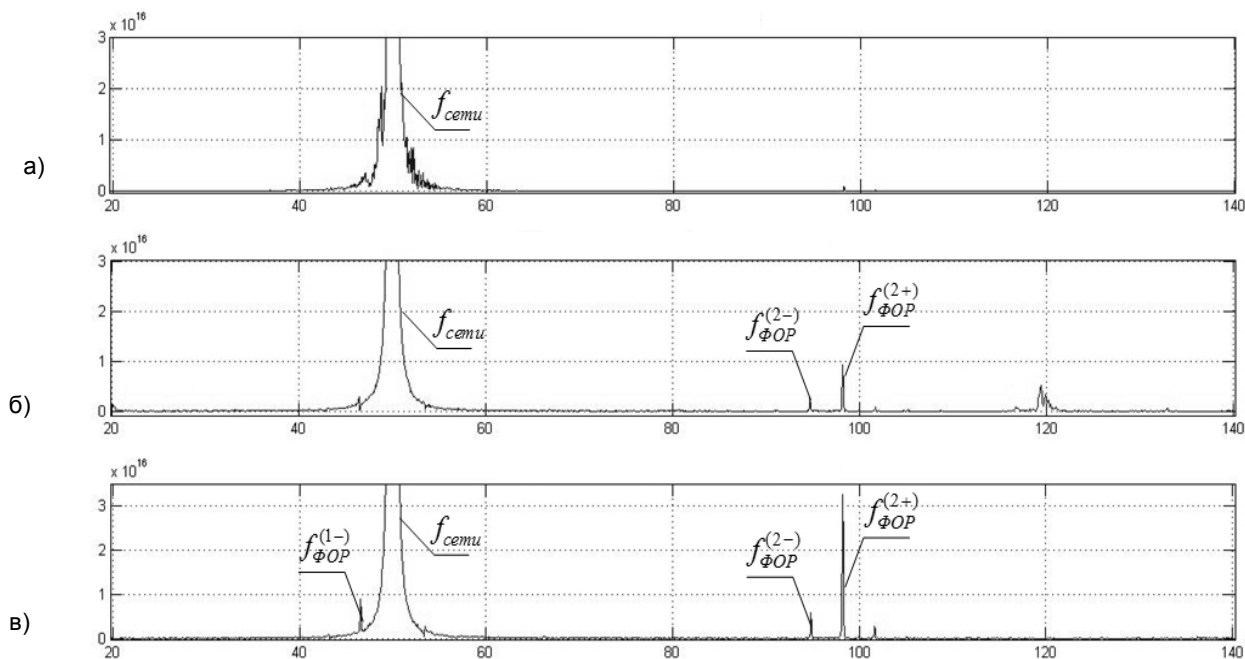


Рис. 8. Спектр внешнего магнитного поля на участке 20–140 Гц при нагрузке электродвигателя  $1P_{НОМ}$ : а – исправная обмотка ротора; б – обмотка ротора с одним оборванным стержнем; в – обмотка ротора с двумя оборванными стержнями

Анализ полученных результатов (рис. 4–8) показывает, что расчетные значения частот практически идеально совпали с результатами экспериментов. Таким образом, предположение о том, что в спектре внешнего магнитного поля АД, так же как в магнитном поле воздушного зазора, при обрыве стержней обмотки ротора проявляются гармоники ФОР, оказалось абсолютно верным. Обнаруженные гармоники ФОР продемонстрировали явное свойство значительного увеличения амплитуды при появлении оборванных стержней.

### Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что использование внешнего магнитного поля как источника диагностического сигнала возможно для контроля обрыва стержней короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного электродвигателя.

### Список литературы

1. Peter Tavner, Li Ran, Jim Penman, Howard Sedding. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. – The Institution of Engineering and Technology, 2008.

Назарычев Александр Николаевич,  
 Петербургский энергетический институт повышения квалификации,  
 доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе,  
 e-mail: captain.udgin@gmail.com

Скоробогатов Андрей Александрович,  
 ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
 кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,  
 телефон (4932) 26-99-43,  
 e-mail: kafedra@esde.ispu.ru

2. Волохов С.А., Добродеев П.Н., Кильдишев А.В. Диагностирование обрыва стержня клетки ротора электродвигателя // Электротехника. – 1999. – № 2. – С. 13–15.  
 3. Скоробогатов А.А. Математическая модель магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора, имеющей оборванные стержни // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 7. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – С. 302–310.  
 4. Скоробогатов А.А. Анализ спектра магнитного поля в зазоре асинхронного двигателя при повреждении обмотки ротора // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 2. – С. 75–78.

### References

1. Tavner, P., Ran, L., Penman, J., Sedding, H. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines, the Institution of Engineering and Technology, 2008.  
 2. Volokhov, S.A., Dobrodeev, P.N., Kil'dishev, A.V. Elektrotehnika, 1999, 2, pp. 13–15.  
 3. Skorobogatov, A.A. Matematicheskaya model' magnitnogo polya korotkozamknutoy obmotki rotora, imeyushchey oborvannyye sterzhni [Mathematical model of magnetic field of short-circuited rotor winding with broken bars], in Povyshenie effektivnosti raboty energosistem. Trudy IGEU [Effectiveness enhancement of energy system performance. Trudy IGEU], issue 7, Moscow: Energoatomizdat, 2004, pp. 302–310.  
 4. Skorobogatov, A.A. Vestnik IGEU, 2006, issue 2, pp. 75–78.

*Новоселов Евгений Михайлович*,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант, инженер кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,  
телефон (4932) 26-99-43,  
e-mail: captain.udgin@gmail.com