

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

---

УДК 621.313.3, УДК 621.317

### МЕТОД КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК РОТОРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ ПУСКЕ

Е.М. НОВОСЕЛОВ, Д.А. ПОЛКОШНИКОВ, В.А. САВЕЛЬЕВ, А.С. СТРАХОВ, А.А. СКОРОБОГАТОВ  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: sstrakhov57@mail.ru

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Перспективным методом контроля состояния обмоток роторов асинхронных электродвигателей, позволяющим повысить безотказность их работы, является спектральный анализ сигнала внешнего магнитного поля. Современные методы анализа внешнего магнитного поля используют только спектр сигнала в установившемся режиме, что не позволяет производить эффективный контроль на ряде высоковольтных электродвигателей собственных нужд электростанций, работающих с длительными пусками (например, машин, работающих с переменной нагрузкой, с двойной беличьей клеткой и т.п.). Оценить состояние обмотки ротора подобных машин возможно в пусковых режимах. В связи с этим исследование частотно-временных спектров внешнего магнитного поля указанных выше электродвигателей и разработка метода контроля состояния их обмоток роторов в пусковом режиме является актуальной задачей.

**Материалы и методы.** При исследованиях использованы двухмерные модели двух двигателей, являющихся приводами механизмов тягодутьевого тракта на электростанциях. Обе модели разработаны в программном комплексе ANSYS. Расчет внешнего магнитного поля произведен с помощью метода конечных элементов. Моделировались случаи при наличии или отсутствии дефектов. Обработка сигналов осуществлена с помощью метода оконного преобразования Фурье в программном комплексе MatLab.

**Результаты.** Построены частотно-временные спектры внешнего магнитного поля в режиме пуска на моделях исследуемых асинхронных двигателей при следующих дефектах: динамическом эксцентриситете, одном оборванном стержне обмотки ротора и отсутствии указанных дефектов. Результаты исследований позволили разработать метод контроля состояния обмоток роторов высоковольтных электродвигателей собственных нужд электростанций, работающих с длительными пусками, основанный на обнаружении в частотно-временном спектре при пуске нижних боковых частот гармоник фиктивной обмотки ротора, особенностью которых является «отражение» в спектре от оси времени.

**Выводы.** Разработанный метод контроля состояния обмоток роторов асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций позволяет повысить безотказность их работы путем своевременного выявления повреждения обмоток роторов.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель собственных нужд электростанций, короткозамкнутая обмотка ротора, длительный пуск, внешнее магнитное поле, частотно-временной спектр, гармоники фиктивной обмотки ротора

## METHOD OF CONDITION MONITORING OF ROTOR WINDINGS OF THE MEDIUM VOLTAGE INDUCTION MOTORS OF POWER PLANT AUXILIARIES IN START-UP MODES

E.M. NOVOSELOV, D.A. POLKOSHNIKOV, V.A. SAVELYEV, A.S. STRAKHOV, A.A. SKOROBOGATOV  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: sstrakhov57@mail.ru

### Abstract

**Background.** A promising method of monitoring rotor winding condition of induction electric motors ensuring higher reliability of their operation is spectral analysis of the external magnetic field signal. Modern methods of external magnetic field analysis use only the spectrum of this signal in the steady-state operation mode, which does not allow effective monitoring on a number of medium voltage electric motors of power plant auxiliaries operating with long start-ups (for example, machines with variable load, with a double squirrel cage, etc.). It is possible to evaluate the rotor winding condition of such machines in start-up modes, which means that an important task is to study the frequency-time spectra of the external magnetic field of the above-mentioned electric motors and to develop a method for monitoring the state of their rotor windings in the startup mode.

**Materials and methods.** In the study, the authors used two-dimensional models of two different types of motors representing drives of the mechanisms of draft systems at power stations. Both models are developed in the ANSYS software package. The calculation of the external magnetic field was carried out using the finite element method. The modelling was done for cases with or without defects. Signal processing was performed using the Fourier window transform method in the MatLab software package.

**Results.** Frequency-time spectra of the external magnetic field were built in the start-up mode on models of the investigated induction motors with the following defects: with dynamic eccentricity, with one broken bar of the rotor winding and without the indicated defects. The research results allowed us to develop a method for monitoring the rotor winding state of medium voltage electric motors of power plant auxiliaries operating with long start-ups. The method is based on detecting lower side frequencies of the fictitious rotor winding harmonics in the frequency-time spectrum during the startup. Their specific feature is «reflection» in the spectrum from the time axis.

**Conclusions.** The developed method of monitoring rotor winding condition of the above-mentioned induction electric motors allows increasing the reliability of their operation by timely detection of faults in the rotor windings.

**Key words:** induction motor of power plant auxiliaries, short-circuited rotor winding, long start-up, external magnetic field, time-frequency spectrum, harmonics of fictitious rotor winding

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2019.4.031-044

**Состояние проблемы.** В настоящее время приводом большей части механизмов собственных нужд (СН) электрических станций являются высоковольтные и низковольтные асинхронные двигатели (АД). Надежная работа АД обеспечивает эффективную работу собственных нужд и электростанции в целом. Многие высоковольтные АД системы СН электрических станций работают с тяжелыми условиями пуска. К ним относятся АД тягодутьевых механизмов (дымососов, дутьевых вентиляторов), а также механизмов топливоприготовления на пылеугольных станциях (мельницы, мельничные вентиляторы, дробилки). Время пуска таких машин обычно составляет не менее 5 с. Одной из причин отказа высоковольтного АД с тяжелыми условиями пуска мо-

гут быть обрывы стержней короткозамкнутой обмотки ротора, составляющие, по разным источникам, от 12 до 30 % от общего числа отказов [1, 2].

При обрыве стержня происходит перераспределение тока по стержням. При этом большая часть нагрузки приходится на соседние стержни, которые могут оказаться в недопустимых условиях работы, что может привести к обрыву других стержней. Повреждение 5 % и более стержней в обмотке ротора приводит к заметному ухудшению рабочих и пусковых характеристик АД, а значит, к снижению его энергетических показателей и появлению частых неуспешных пусков машинного агрегата. Кроме того, при работе оборванные стержни обмотки ротора могут отогнуться, что может привести к тяжелым

повреждениям обмотки статора и всего двигателя в целом, а также к существенной недопроизводке энергии электрической станции.

Перспективным методом контроля состояния обмоток роторов АД является спектральный анализ сигнала внешнего магнитного поля (ВМП), под которым понимается поле вблизи корпуса АД. Сегодня многие российские [3–5] и зарубежные авторы [6–11] уделяют пристальное внимание разработке и совершенствованию подобных методик. Однако работы по анализу ВМП посвящены исследованию спектров сигналов в установившемся режиме работы с использованием метода быстрого преобразования Фурье. При этом не меньший интерес представляет исследование ВМП АД в пусковых режимах.

С развитием компьютерных технологий и технических средств в настоящее время стало возможным проведение контроля методом спектрального анализа не только в установившихся, но и в пусковых режимах. Контроль состояния двигателей в пусковых режимах имеет ряд преимуществ по сравнению с установившимся режимом. Оценка состояния АД при пуске позволяет проводить контроль машин, работающих с переменной нагрузкой в процессе эксплуатации (к ним, например, относятся двигатели дробилок или мельниц на пылеугольных электрических станциях), контроль АД, которые мало загружены в нормальном режиме работы, потому что в этом случае гармоники, характеризующие наличие неисправности, практически не проявляются (данный признак характерен для всех высоковольтных электродвигателей, работающих с тяжелыми условиями пуска), а также контроль АД с двойной беличьей клеткой. Таким образом, метод контроля в пусковых режимах наиболее эффективен именно для высоковольтных АД, являющихся приводами механизмов системы топливоприготовления тягодутьевого тракта электростанций.

Известны разработки методов контроля наличия оборванных стержней при пуске АД по току статора [13–16]. Однако данные методы еще мало проработаны и требуют дальнейшего исследования. В указанных работах не рассматриваются высоковольтные двигатели. Контроль по сигналу ВМП АД, в частности, радиальной составляющей индукции ВМП обладает

преимуществом по сравнению с контролем по току статора. Это связано с тем, что наряду с высокими амплитудами гармонических составляющих, характеризующих наличие обрыва стержня короткозамкнутой обмотки ротора, амплитуда основной гармоники ВМП в пусковом режиме будет ниже, чем в установившемся режиме работы. Это позволяет эффективнее обнаруживать их в процессе спектрального анализа. Таким образом, исследование возможности применения методов спектрального анализа радиальной составляющей ВМП АД при его пуске является актуальной задачей.

**Материалы и методы.** Поскольку проведение экспериментальных исследований влияния обрывов стержней на спектр высоковольтных двигателей с длительным пуском затруднительно, для исследования пусковых режимов использованы модели двух типов высоковольтных АД (ДАМСО-15-12-8 и ДАЗО2-17-44-8/10У1), являющихся приводами механизмов тягодутьевого тракта в системе СН электростанций. Модели разработаны в программном комплексе ANSYS с использованием метода конечных элементов. Электродвигатель ДАМСО-15-12-8 имеет две обмотки ротора – пусковую и рабочую, а электродвигатель ДАЗО2-17-44-8/10У1 – только одну. Методика построения моделей прописана в [17]. Параметры исследуемых двигателей приведены в табл. 1, а их модели представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Для каждой машины регистрируется значение индукции радиальной составляющей ВМП (на корпусе двигателя). При этом модели были созданы для исправных АД и при повреждениях: обрыве стержня обмотки ротора и динамическом эксцентриситете (равном 20 % от величины воздушного зазора).

Проверка корректности разработанных моделей производилась сравнением параметров рабочих и пусковых режимов, полученных при моделировании, с паспортными данными АД. Результаты сравнения для двигателя ДАЗО-17-44-8/10У1 представлены в табл. 2. Согласно полученным данным, параметры на модели достаточно точно совпадают с параметрами реального двигателя и их паспортными данными. Аналогичные результаты получены и для двигателя ДАМСО-15-12-8.

Таблица 1. Параметры исследуемых АД

Тип двигателя	Число пар полюсов	Номинальная частота вращения, об/мин	Номинальная мощность, кВт	Напряжение, кВ
ДАМСО-15-12-8	4	740	570	6
ДАЗО-17-44-8/10У1	4/5	741/594	630/320	6

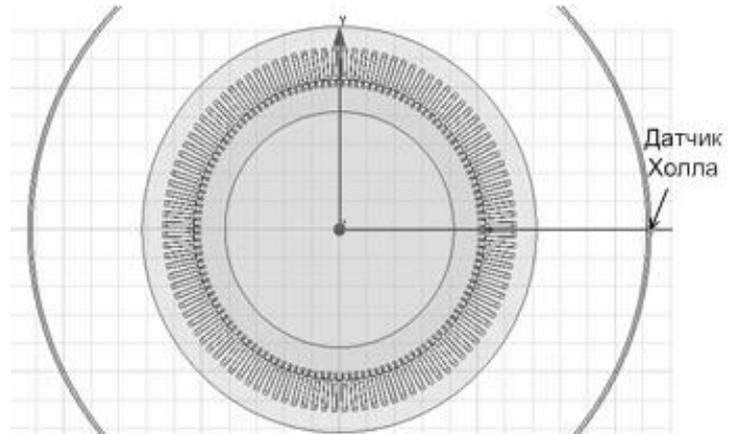
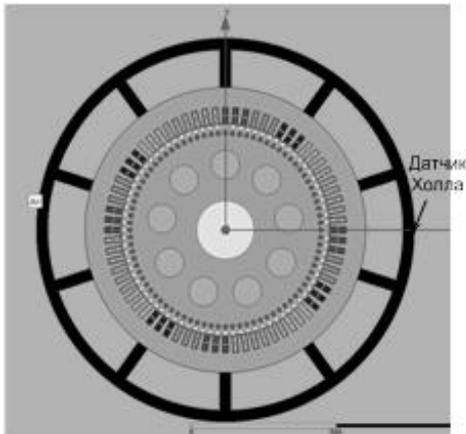


Рис. 1. Модель двигателя ДАМСО-15-12-8 Рис. 2. Модель двигателя ДАЗО-17-44-8/10У1

Таблица 2. Сравнение параметров на математической модели в RМхprt с паспортными данными двигателя ДАЗО2-17-44-8/10У1 для 10 полюсов

Наименование параметра	Результаты расчета на математической модели	Паспортные данные
Номинальная мощность на валу, кВт	319,972	320,0
Номинальная электрическая мощность, кВт	349,399	353,6
Фазный ток статора в номинальном режиме, А	43,93	44,0
Коэффициент мощности в номинальном режиме, о.е.	0,761	0,77
КПД двигателя, %	91,58	90,5
Номинальная скорость вращения, об/мин	593,3	594,0
Сопротивление обмотки статора, Ом	0,877 (при 20°С)	0,852 (при 15°С)
Фазный ток статора в режиме холостого хода, А	22,948	24,2
Фазный ток статора в пусковом режиме, А	216,064	268,4
Вращающий момент в номинальном режиме, кН·м	5,15	5,09
Потери в обмотке статора (омические), кВт	6,18	6,5

В качестве метода исследования был выбран метод спектрального анализа. Принцип его действия заключается в том, что при наличии оборванных стержней обмотки ротора в спектре ВМП АД возникают гармонические составляющие, называемые гармониками фиктивной обмотки ротора (ФОР). Их частоту можно определить по выражению [17]

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

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.

В процессе пуска АД частоты этих гармонических составляющих изменяются при изменении скорости вращения и скольжения двигателя. Поэтому для пусковых режимов данное выражение удобнее записать в следующем виде:

$$f_{\text{ФОР}}^{(v\pm)}(t) = f_c \left( \frac{1-s(t)}{p} \cdot v \pm s(t) \right), \quad (2)$$

где  $t$  – момент времени относительно начала пуска АД.

В процессе пуска гармонический состав спектра двигателя существенно изменяется и применение метода быстрого преобразования Фурье невозможно.

В качестве методов, позволяющих обрабатывать нестационарные сигналы и

строить их частотно-временные спектры, можно использовать оконное преобразование Фурье (ОПФ) или вейвлет-преобразование. Для дальнейшей работы было выбрано ОПФ, поскольку оно является более простым методом обработки и требует меньше времени для проведения расчета. Принцип ОПФ заключается в том, что весь зарегистрированный сигнал разбивается на интервалы  $\Delta T$ , в каждом из которых производится преобразование Фурье. Для получения спектра достаточной точности каждый новый интервал начинается раньше предыдущего, т. е. осуществляется перекрытие интервалов, на которые разбивается сигнал. Для снижения растекания спектра и более точной оценки амплитуд гармонических составляющих удобнее применять ОПФ с низким разрешением (например, окно Флэттоп или окно Блэкмана-Наталла). В этом случае весь сигнал радиальной составляющей ВМП АД разделяется на интервалы, продолжительность которых определяется исходя из того, что гармонические составляющие первых порядков не сливались в спектре. Разные оконные функции имеют различные характеристики, в частности различную ширину основного лепестка, поэтому для разных двигателей в зависимости от времени пуска могут применяться разные окна.

Следует отметить, что применение ОПФ накладывает ограничения на минимальную продолжительность интервала разбиения всего времени пуска (определяется разрешением сигнала по частоте) и на максимальную продолжительность, которая определяется разрешением по времени. С учетом взаимного расположения гармонических составляющих в процессе пуска (рис. 3, 4, 7, 8), было определено соотношение, по которому можно оценить необходимую продолжительность интервалов:

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

где  $\Delta F$  – относительная ширина главного лепестка используемого окна по сравнению с шириной главного лепестка прямоугольного окна ( $\Delta F = 5$  для окна Флэттоп,  $\Delta F = 4$  для окна Блэкмана-Наталла и т.д.);  $v_{\max}$  –

порядок предельно учитываемой гармоник;  $\Delta T$  – продолжительности интервалов, на которые разбивается пусковой сигнал, с;  $T_n$  – время пуска АД, с.

По выражению (3) можно оценить и минимально допустимое время пуска АД, при котором можно проводить оценку состояния обмотки ротора:

$$T_{n \min} > \frac{2 (\rho + v_{\max})^2 (\rho + v_{\max} + 1)}{f_c \rho}. \quad (4)$$

Если в выражение (4) подставить соответствующие параметры, то для корректного отображения спектра требуется время пуска в несколько секунд. Например, для выявления гармоник первых 3 порядков для рассматриваемых АД с 4 парами полюсов данное время составляет около 4 секунд, а минимальное время пуска для двигателя с 1 парой полюсов должно составлять около 3 секунд. Это обстоятельство усложняет процесс выявления неисправностей АД. Поэтому при малом и близком к граничному времени пуска требуется учитывать меньшее количество гармонических составляющих. В большинстве случаев для получения корректных результатов анализа спектра достаточно проявления в спектре первых 3 гармонических составляющих, амплитуды которых в спектре имеют большие значения. При этом время пуска АД ряда механизмов СН, в частности механизмов топливоприготовления и тягодутьевого тракта, значительно превышает указанные значения.

**Результаты.** Для определения гармонического состава АД при обрыве стержней произведена оценка значений частот гармонических составляющих по выражению (2) для двигателей с 4 и 5 парами полюсов. В соответствии с [17], динамический эксцентриситет (ДЭ) АД может привести к изменению гармонического состава АД. Для сравнения были определены значения частот гармоник динамического эксцентриситета (ДЭ), рассчитанные по выражению [5]

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

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

Величина скольжения АД  $s(t)$  связана со скоростью вращения АД  $n(t)$ , возрастающей в процессе пуска двигателя в соответствии с выражением

$$s(t) = \frac{n_c - n(t)}{n_c}, \quad (6)$$

где  $n_c$  – синхронная скорость вращения АД;  $n_c = \frac{3000}{p}$ , об/мин.

Графики изменения частот гармонических составляющих ФОР и ДЭ в зависимости от скольжения двигателя представлены на рис. 3–10. На рис. 11–14 показаны также графики изменения частот при изменении скорости вращения двигателя на примере двигателей с 4 парами полюсов. Сопоставление частот гармонических составляющих ФОР и ДЭ показывает, что частоты всех гармонических составляющих ФОР и ДЭ совпадают (за исключением гармоник «нулевого» порядка, отсут-

ствующих в спектре). Наличие ДЭ может привести к искажению спектра двигателя и осложняет определение амплитуд ряда гармонических составляющих ФОР.

Анализ полученных зависимостей также показывает, что порядок совпадающих гармонических составляющих различен. Например, нижней боковой частоте гармоники ФОР первого порядка будет соответствовать нижняя боковая частота гармоники ГЭР 5 порядка, а верхней боковой частоте гармоники ФОР первого порядка – нижняя боковая частота ГЭР 3 порядка. В результате анализа зависимостей (рис. 3–14) и математического описания получено следующее условие соответствия порядков этих гармоник:

$$\nu_{\text{ФОР}} = \nu_{\text{ДЭ}} + p, \quad (7)$$

где  $\nu_{\text{ФОР}}$  – порядок гармоники ФОР;  $\nu_{\text{ДЭ}}$  – порядок гармоники ДЭ.

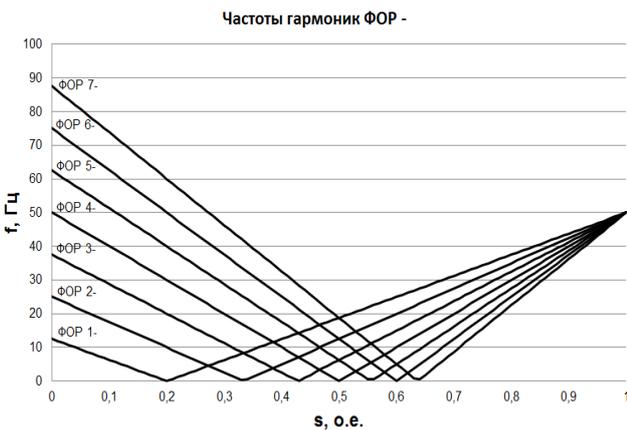


Рис. 3. Зависимость изменения нижних боковых частот гармоник ФОР от скольжения для двигателя с 4 парами полюсов

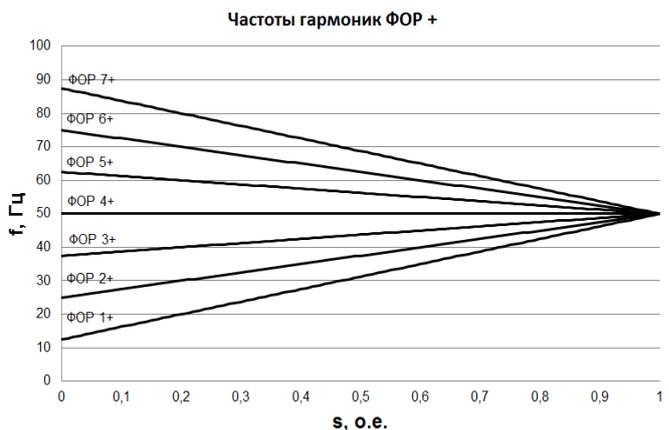


Рис. 4. Зависимость изменения верхних боковых частот гармоник ФОР от скольжения для двигателя с 4 парами полюсов

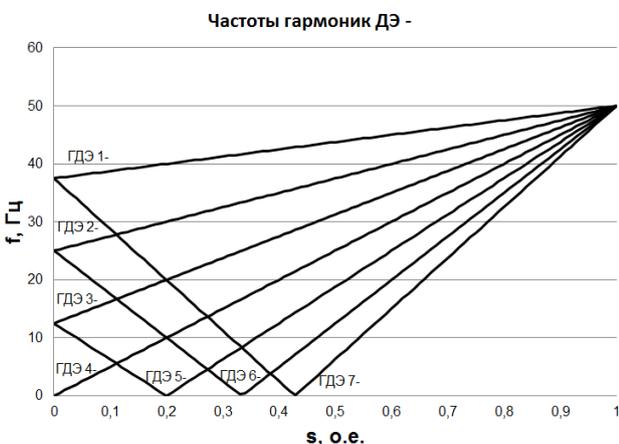


Рис. 5. Зависимость изменения нижних боковых частот гармоник ДЭ от скольжения для двигателя с 4 парами полюсов

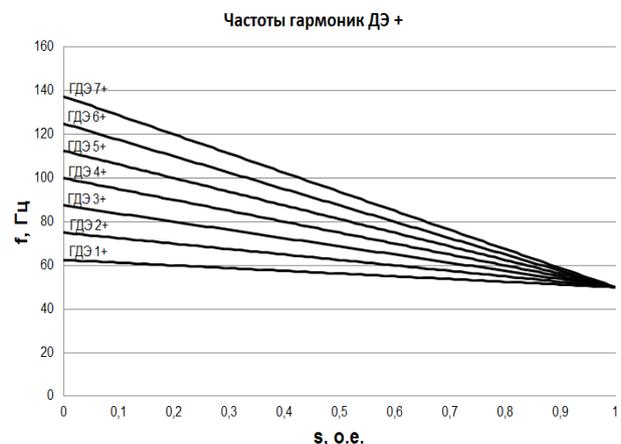


Рис. 6. Зависимость изменения верхних боковых частот гармоник ДЭ от скольжения для двигателя с 4 парами полюсов

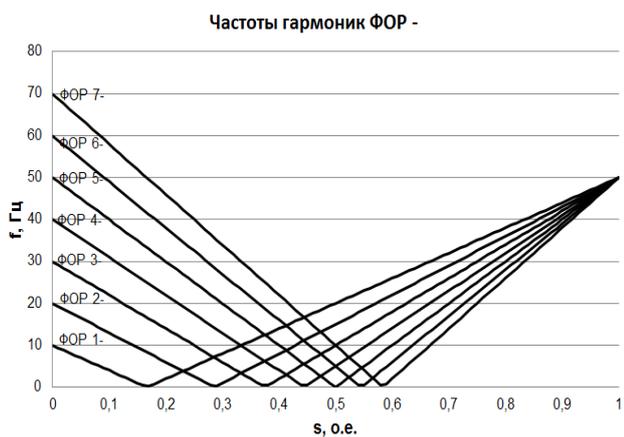


Рис. 7. Зависимость изменения нижних боковых частот гармоник ФОР от скольжения для двигателя с 5 парами полюсов

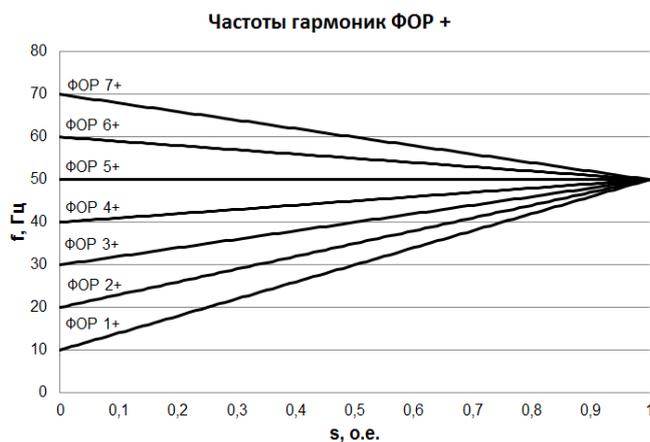


Рис. 8. Зависимость изменения верхних боковых частот гармоник ФОР от скольжения для двигателя с 5 парами полюсов

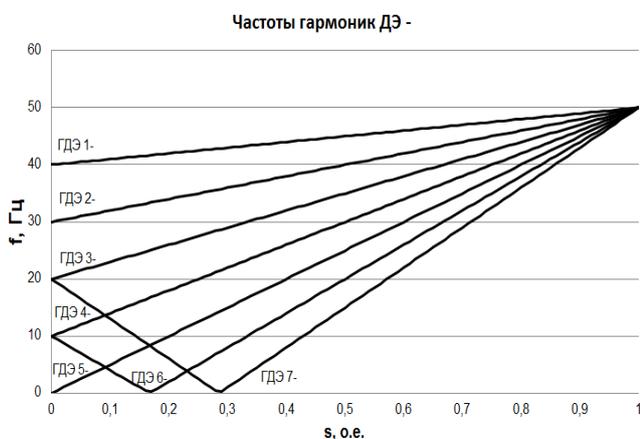


Рис. 9. Зависимость изменения нижних боковых частот гармоник ДЭ от скольжения для двигателя с 5 парами полюсов

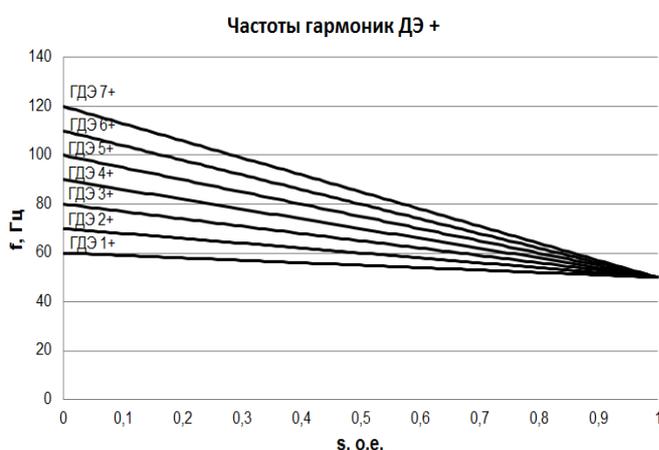


Рис. 10. Зависимость изменения верхних боковых частот гармоник ДЭ от скольжения для двигателя с 5 парами полюсов

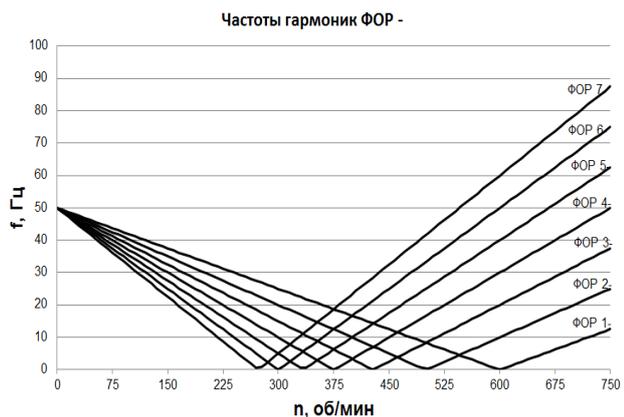


Рис. 11. Зависимость изменения нижних боковых частот гармоник ФОР от скорости вращения для двигателя с 4 парами полюсов

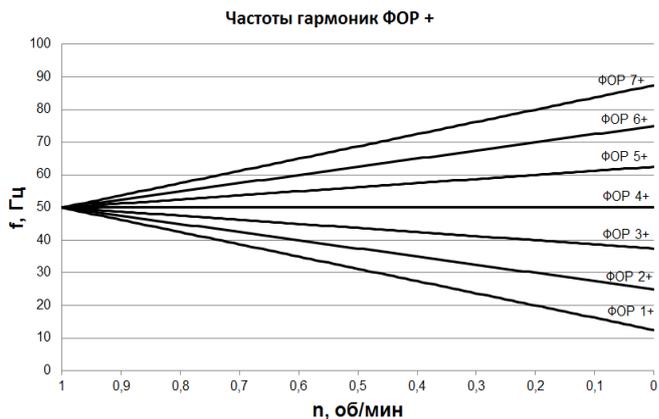


Рис. 12. Зависимость изменения верхних боковых частот гармоник ФОР от скорости вращения для двигателя с 4 парами полюсов

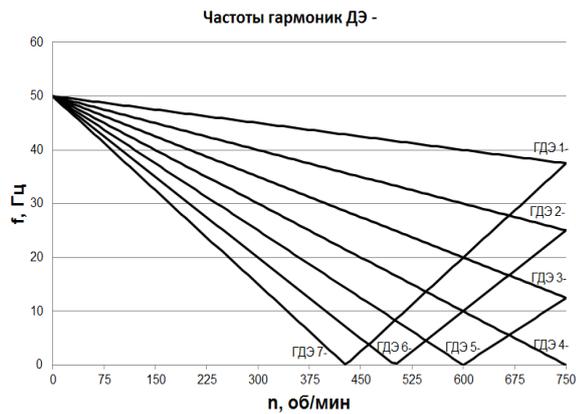


Рис. 13. Зависимость изменения нижних боковых частот гармоник ДЭ от скорости вращения для двигателя с 4 парами полюсов

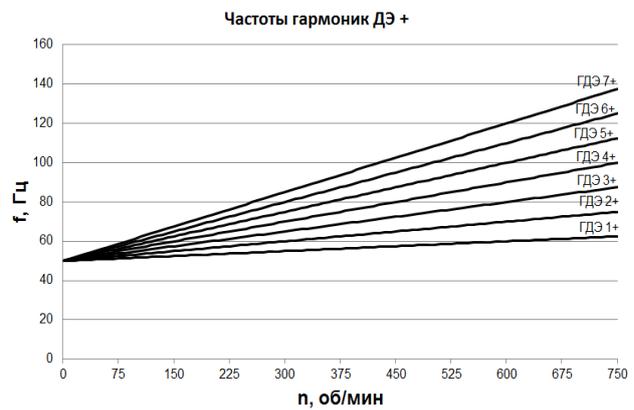


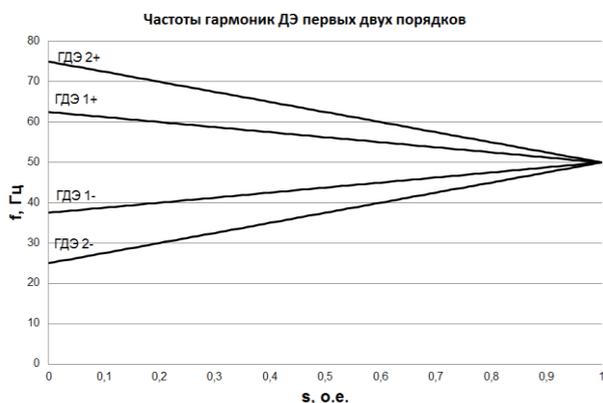
Рис. 14. Зависимость изменения верхних боковых частот гармоник ДЭ от скорости вращения для двигателя с 4 парами полюсов

В [6] показано, что в спектре сигнала ВМП АД отчетливо проявляются лишь гармоники ДЭ первых порядков (не более 2). Остальные гармоники имеют низкие амплитуды и в спектре практически не проявляются. В [17] показано, что в сигнале ВМП отчетливо проявляются гармоники ФОР первых 5 порядков на верхних и нижних боковых частотах, остальные гармоники проявляются в спектре значительно слабее. Для оценки возможности определения частот ФОР в спектре радиальной составляющей ВМП на рис. 15 сравниваются значения частот гармоник ФОР с высокими амплитудами (первых 5 порядков) со значениями частот ДЭ первых 3 порядков (для двигателя с 4 парами полюсов).

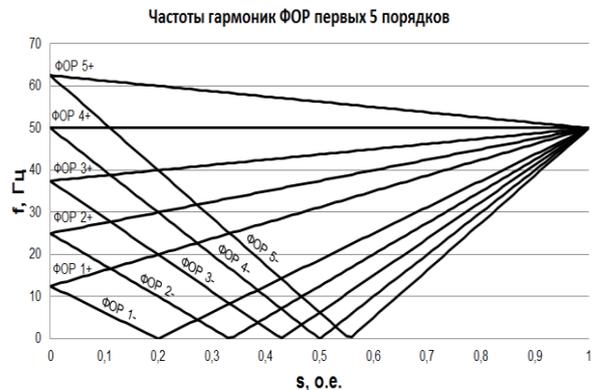
Анализ полученных результатов (рис. 15) показывает, что верхние боковые частоты гармоник ФОР совпадают с частотами гармоник ДЭ первых порядков с высокими амплитудами и с основной гармоникой сигнала (50 Гц). Гармонические составляющие ФОР на нижних боковых частотах появляются в спектре при обрывах

стержней ротора и не проявляются в спектре при наличии ДЭ. Особенность этих гармонических составляющих в спектре в том, что при разгоне двигателя их частоты сначала уменьшаются до нуля, а потом возрастают. Т. е. в спектрах они «отражаются» от оси скольжения, скорости вращения или времени (рис. 15,б) (будем эти гармоники называть отраженными). Таким образом, появление в спектре отраженных гармонических составляющих указывает на то, что в АД имеется повреждение.

Для проверки данного вывода на математической модели высоковольтного АД с 4 парами полюсов типа ДАМСО-15-12-8 были построены частотно-временные спектры для 3 случаев: для исправного АД, для АД с 1 оборванным стержнем без других повреждений и для АД с динамическим эксцентриситетом ротора. Время пуска данного двигателя составляло приблизительно 10 секунд. Это позволяет построить спектр (согласно выражению (4)). Изменение скорости вращения двигателя в процессе пуска приведено на рис. 16.



а)



б)

Рис. 15. Частоты гармоник ДЭ (а) и ФОР (б) с высокими амплитудами для двигателя с 4 парами полюсов

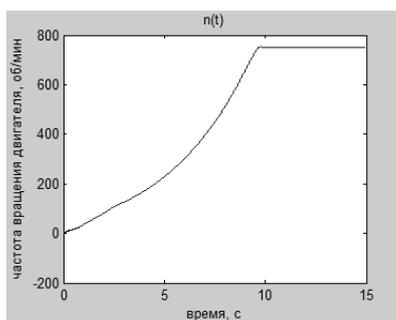
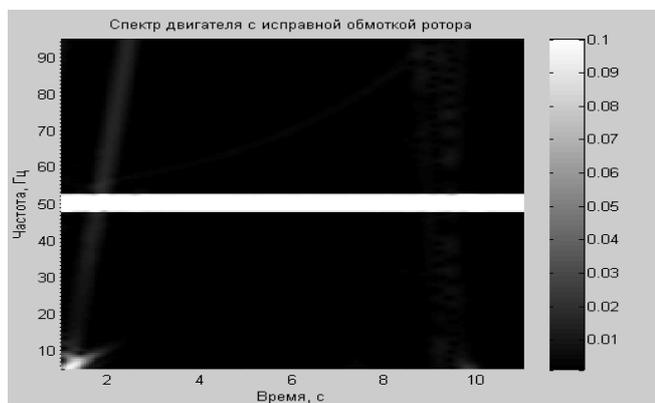


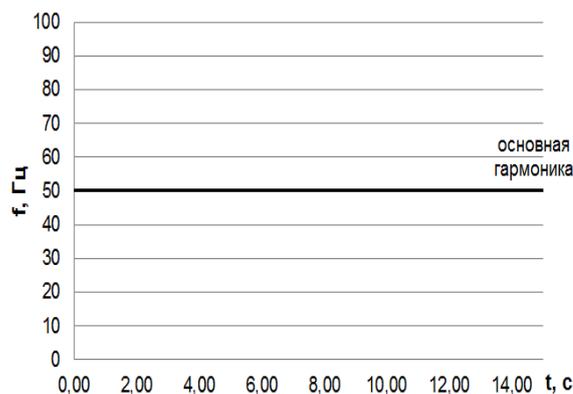
Рис. 16. Изменение скорости вращения математической модели ДАМСО-15-12-8 при пуске

Полученные спектры ВМП представлены на рис. 17–19 (для большей наглядности спектров расцветка была выбрана так, чтобы гармоники ФОР и ДЭ отчетливо проявлялись; справа указана шкала, по которой можно оценить амплитуды гармонических составляющих: если

амплитуда гармоники превышает предельное значение, в спектре она изображается белым цветом). Анализ полученных изображений показывает, что в спектре исправного АД (рис. 17) практически не проявляются гармонические составляющие, за исключением гармоники с частотой 50 Гц. При возникновении ДЭ (рис. 18) в спектре проявляются гармонические составляющие ДЭ первого порядка, причем их амплитуды при пуске значительно ниже, чем в установившемся режиме. При обрыве стержней обмотки ротора АД (рис. 19) в спектре отчетливо проявляется большинство гармоник ФОР, имеющих при пуске довольно высокие амплитуды. Хорошо проявляются отраженные гармоники ФОР, что подтверждает наличие обрыва стержня.

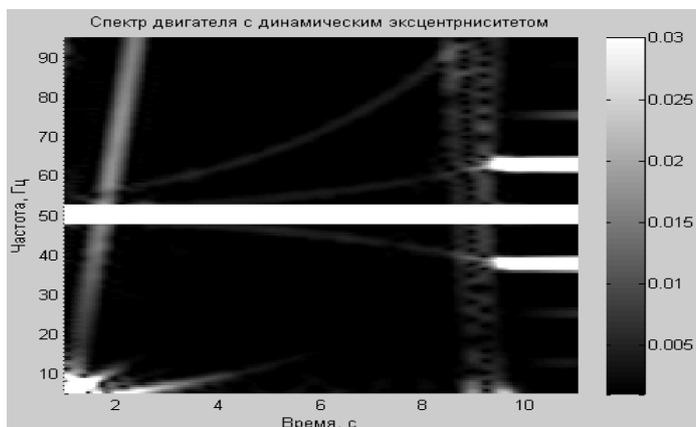


а)

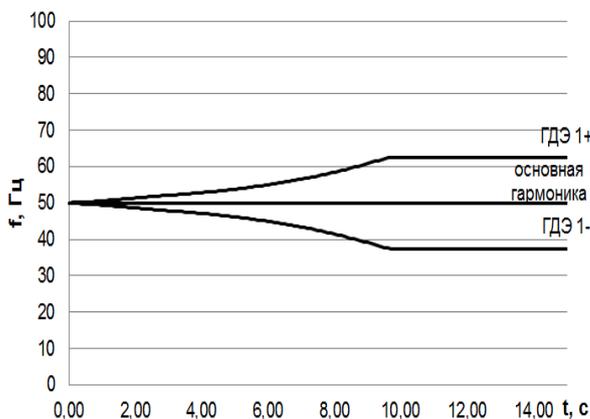


б)

Рис. 17. Частотно-временной спектр сигнала радиальной составляющей ВМП на математической модели ДАМСО-15-12-8 с исправной обмоткой ротора: а – полученные с помощью оконного преобразования Фурье; б – расчетные значения

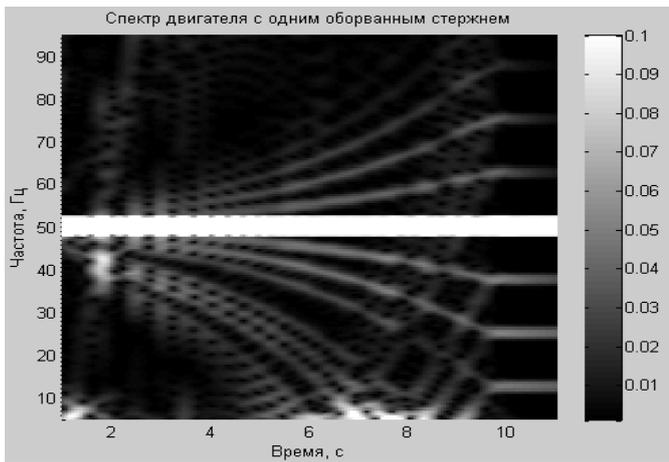


а)

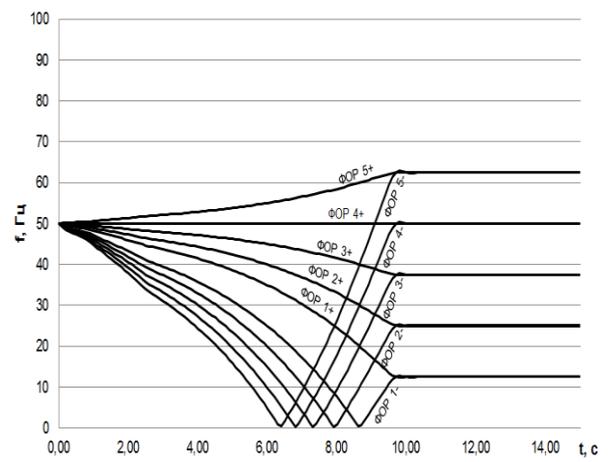


б)

Рис. 18. Частотно-временной спектр сигнала радиальной составляющей ВМП на математической модели ДАМСО-15-12-8 с ДЭ (20 % от величины воздушного зазора): а – полученные с помощью оконного преобразования Фурье; б – расчетные значения



а)



б)

Рис. 19. Частотно-временной спектр сигнала радиальной составляющей ВМП на математической модели ДАМСО-15-12-8 с 1 оборванным стержнем короткозамкнутой обмотки ротора: а – полученные с помощью оконного преобразования Фурье; б – расчетные значения

Для оценки корректности полученных спектров были рассчитаны искомые значения частот при известных значениях скорости вращения. Последние определены в ходе расчета на математической модели (рис. 16) в различные моменты времени по выражениям (2) и (5). Были построены расчетные зависимости изменения частот гармоник ФОР и ДЭ, которые должны иметь высокие амплитуды при различных видах повреждения. Они также представлены на рис. 17–19. Анализ этих зависимостей показывает, что частоты гармоник на полученных спектрах близки к расчетным значениям.

Аналогичные исследования произведены на модели двигателя ДАЗО2-17-44-8/10У1. Пуск двигателя осуществлялся при подключенной обмотке с 5 парами полюсов (т.е. с номинальной скоростью АД 594 об/мин по табл. 3). Изменение скорости вращения в течение времени пуска этого двигателя показано на рис. 20.

Аналогично с помощью модели ДАЗО2-17-44-8/10У1 были построены спектры при наличии и при отсутствии повреждений АД. Полученные спектры, а также расчетные значения частот в спектре представлены на рис. 21–23.

В результате построения спектров и расчетов значений частот (рис. 21–23) установлено, что эти спектры соответствуют расчетным зависимостям и наглядно показывают, что только при обрыве стержней в частотно-временном спектре проявляются гармонические составляющие ФОР.

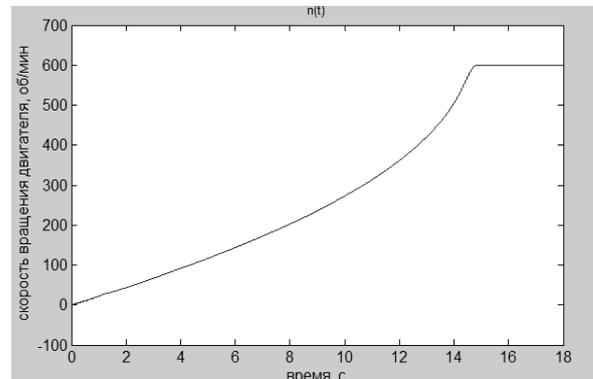


Рис. 20. Изменение скорости вращения математической модели ДАЗО2-17-44-8/10У1 при пуске

Отметим, что только в спектре двигателя с оборванным стержнем присутствуют отраженные гармоники. Это подтверждает, что сделанные ранее выводы можно распространить и на высоковольтные двигатели другого типа. Поэтому для контроля состояния обмоток роторов высоковольтных АД СН электростанций с длительным пуском может использоваться метод, основанный на выявлении в частотно-временном спектре внешнего магнитного поля при пуске отраженных гармонических составляющих. Для этого в качестве исходной информации требуются данные АЦП, число пар полюсов АД и длительность его пуска. Единственным условием возможности определения дефекта является достаточная длительность пуска исследуемого АД. Последнюю можно определить по выражению (4).

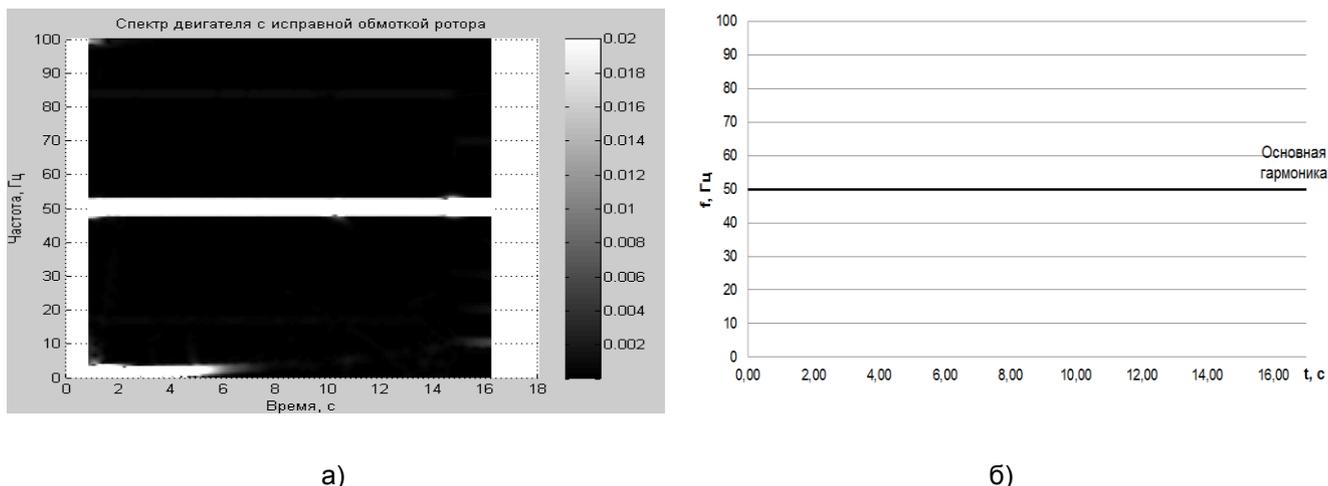


Рис. 21. Частотно-временной спектр сигнала радиальной составляющей ВМП на математической модели ДАЗО2-17-44-8/10У1 с исправной обмоткой ротора: а – полученные с помощью оконного преобразования Фурье; б – расчетные значения

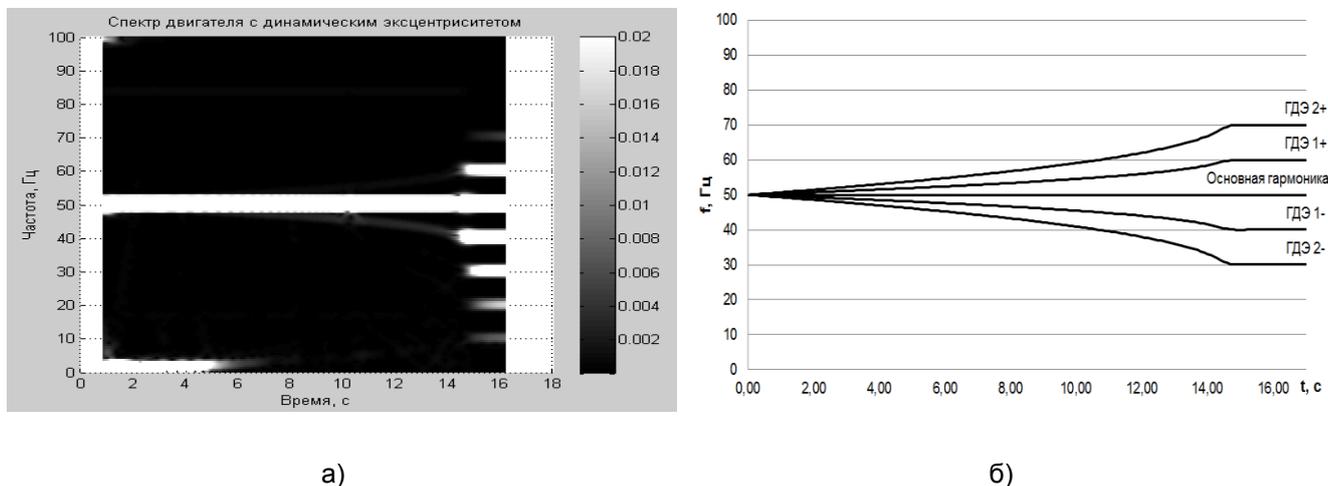


Рис. 22. Частотно-временной спектр сигнала радиальной составляющей ВМП на математической модели высоковольтного ДАЗО2-17-44-8/10У1 с ДЭ (20 % от величины воздушного зазора): а – полученные с помощью оконного преобразования Фурье; б – расчетные значения

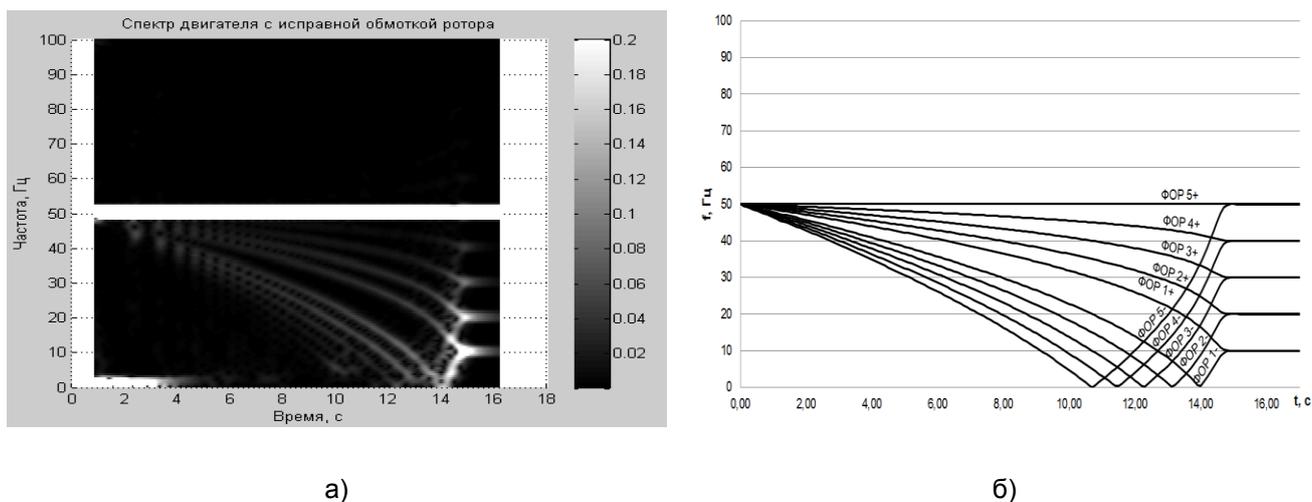


Рис. 23. Частотно-временной спектр сигнала радиальной составляющей ВМП на математической модели ДАЗО2-17-44-8/10У1 с 1 оборванным стержнем короткозамкнутой обмотки ротора: а – полученные с помощью оконного преобразования Фурье; б – расчетные значения

Подобные результаты были получены и в ходе выполненных экспериментов на низковольтном двигателе АИР71А6 при подаче пониженного напряжения. Подробное описание этих исследований приведено в [12].

**Выводы.** Сигнал радиальной составляющей ВМП в пусковом режиме для высоковольтных АД СН электростанций с длительным пуском имеет диагностическую информацию, которая может быть использована для контроля технического состояния обмоток роторов. Разработанный метод контроля состояния обмоток роторов высоковольтных электродвигателей позволяет повысить безотказность их работы путем своевременного выявления повреждения обмоток роторов.

### Список литературы

1. **Jahić A., Hederić Z., Atić M.** Detection of Failures on the High-Voltage Cage Induction Motor Rotor // *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*. – 2015. – Vol. 6. – № 1. – P. 15–21.
2. **Андреева О.А.** Разработка методов диагностики двигателей собственных нужд электрических станций. – Павлодар: Кереку, 2015. – 142 с.
3. **Бобров В.В., Хомутов С.О.** Прогнозирование состояний электродвигателей на основе анализа спектра напряженности внешнего магнитного поля // *Ползуновский альманах*. – 2011. – № 2. – С. 114–118.
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*. – 2014. – № 2(22). – С. 61–69.
5. **Оценка** возможности использования радиальной составляющей внешнего магнитного поля в целях диагностики асинхронных электродвигателей / Е.М. Новоселов, В.А. Савельев, А.А. Скоробогатов и др. // *Вестник ИГЭУ*. – 2018. – Вып. 3. – С. 38–46.
6. **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*. – 1988. – Vol. 3, issue 4. – P. 873–879.
7. **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*. – 1992. – Vol. 28, issue 1. – P. 165–171.
8. **Finite** element analysis and experimental study of the near magnetic field for detection of rotor faults in induction motors / V. Fireteanu, R. Romary, R. Pusca, A. Ceban // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2013. – Vol. 50. – P. 37–59.
9. **Henaо H., Demian C., Capolino G.A.** Frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor // *IEEE Trans. Ind. Appl.* – 2003. – Vol. 39. – P. 1511–1516.
10. **Electrical** machines fault diagnosis by stray flux analysis / R. Romary, R. Pusca, J.P. Lecointe, J.F. Brudny // *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*. – Paris, 2013. – P. 247–256.
11. **Tavner P.J., Penman J.** Condition monitoring of electrical machines // *Research Studies Press*, 1987. – 286 p.
12. **Экспериментальное** доказательство существования признаков повреждения электродвигателя с длительным пуском во внешнем магнитном поле / А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, А.Н. Морозов, А.А. Скоробогатов // *Материалы Междунар. (XX Всерос.) науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения)*. Т. 1. – Иваново, 2019. – С. 94–97.
13. **Сивокобыленко В.Ф., Кузьменко Д.И., Яременко С.П.** Диагностика стержней двухклеточных и глубокопазных короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей // *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. – 2011. – № 10 (180). – С. 148–152.
14. **Pu Shi, Chen Z., Vagapov Y.** Wavelet Transform based Broken Rotor-bar Fault detection and Diagnosis Performance Evaluations // *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887). – 2013. – Vol. 69, no.14. – P. 36–43. URL: <http://research.ijcaonline.org/volume69/number14/pxc3888033.pdf>
15. **Купцов В.В., Горзунов А.С., Сарваров А.С.** Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей по оциллограммам нестационарных режимов работы // *Вестник ЮУрГУ*. – 2009. – № 34. – С. 60–67.
16. **Pineda-Sanchez M.** Instantaneous Frequency of the Left Sideband Harmonic During the Start-Up Transient: A New Method for Diagnosis of Broken Bars // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2009. – Vol. 56, no. 11. – P. 4557–4570.
17. **Экспериментально-аналитическое** определение диагностического признака дефектов обмотки ротора асинхронного электродвигателя / В.А. Савельев, А.С. Страхов, Е.М. Новоселов и др. // *Вестник ИГЭУ*. – 2018. – Вып. 4. – С. 44–53.

### References

1. Jahić, A., Hederić, Z., Atić, M. Detection of Failures on the High-Voltage Cage Induction Motor Rotor. *International Journal of Electrical and*

*Computer Engineering Systems*, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 15–21.

2. Andreeva, O.A. *Razrabotka metodov dia-gnostiki dvigateley sobstvennykh nuzhd elektricheskikh stantsiy* [Development of methods for motor diagnostic of power plant auxiliaries]. Pavlodar: Kereku, 2015. 142 p.

3. Bobrov, V.V., Khomutov, S.O. *Polzunovskiy al'manakh*, 2011, no. 2, pp. 114–118.

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

5. Novoselov, E.M., Savel'ev, V.A., Skorobogatov, A.A., Strakhov, A.S., Sulynenkov, I.N. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 3, pp. 38–46.

6. Kliman, G.B., Koegl, R.A., Stein, J., Endicott, R.D., Madden, M.W. Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1988, vol. 3, issue 4, pp. 873–879.

7. 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*, 1992, vol. 28, issue 1, pp. 165–171.

8. Fireteanu, V., Romary, R., Pusca, R., Ceban, A. Finite element analysis and experimental study of the nearmagnetic field for detection of rotor faults in induction motors. *Progress In Electromagnetics Research*, 2013, vol. 50, pp. 37–59.

9. Henao, H., Demian, C., Capolino, G.A. Frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2003, vol. 39, pp. 1511–1516.

10. Romary, R., Pusca, R., Lecointe, J.P., Brudny, J.F. Electrical machines fault diagnosis by stray flux analysis. *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, Paris, 2013, pp. 247–256.

11. Tavner, P.J., Penman, J. *Condition Monitoring of Electrical Machines*. Research Studies Press, 1987. 286 p.

12. Strakhov, A.S., Novoselov, E.M., Morozov, A.N., Skorobogatov, A.A. Eksperimental'noe dokazatel'stvo sushchestvovaniya priznakov povrezhdeniya elektrodvigatelya s dlitel'nym puskom vo vneshnem magnitnom pole [Experimental evidence of the existence of rotor winding fault signs of the motor with a long start in the external magnetic field]. *Materialy Mezhdunarodnoy (XX Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (Benardosovskie chteniya)*. T. 1 [Proceedings of the International (XX All-Russian) Scientific and Technical Conference «Current Situation and Outlook of Electrical and Heat Technologies» (Benardos Readings). Vol. 1]. Ivanovo, 2019, pp. 94–97.

13. Sivokobylenko, V.F., Kuz'menko, D.I., Yaremenko, S.P. *Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnicheskogo universitetu*, 2011, № 10(180), pp. 148–152.

14. Pu, Shi, Chen, Z., Vagapov, Y. Wavelet Transform based Broken Rotor-bar Fault detection and Diagnosis Performance Evaluations. *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*, 2013, vol. 69, no. 14, pp. 36–43. Available at: <http://research.ijcaonline.org/volume69/number14/pxc3888033.pdf>

15. Kuptsov, B.V., Gorzunov, A.S., Sarvarov, A.S. *Vestnik YuUrGU*, 2009, no. 34, pp. 60–67.

16. Pineda-Sanchez, M. Instantaneous Frequency of the Left Sideband Harmonic During the Start-Up Transient: A New Method for Diagnosis of Broken Bars. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no. 11, pp. 4557–4570.

17. Savel'ev, V.A., Strakhov, A.S., Novoselov, E.M., Skorobogatov, A.A., Sulynenkov, I.N. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 4, pp. 44–53.

*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 Stations, Substations and Electrical 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 Stations, Substations and Electrical 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 Stations, Substations and Electrical Equipment Diagnostics, e-mail: captain.udgin@gmail.com

*Полкошников Денис Андреевич,*  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электрических систем, e-mail: pda37@yandex.ru  
*Polkoshnikov Denis Andreyevich,*  
Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of the Department of Electric Systems, e-mail: pda37@yandex.ru

*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 Stations, Substations and Electrical Equipment Diagnostics, e-mail: aaskor.andrey@yandex.ru

УДК 621.316.925

## ВЫПОЛНЕНИЕ СТУПЕНИ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ О ТОКАХ ПИТАЮЩИХ КОНЦОВ ЛИНИИ С ОТВЕТВЛЕНИЕМ

Л.М. КОЛЕСОВ<sup>1</sup>, В.В. МОЖЖУХИНА<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация

<sup>2</sup>ООО «ВиВа Энерго», г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: mvv277@gmail.com

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** В настоящее время на линиях электропередачи 110–220 кВ для действия при междуфазных коротких замыканиях в зоне дальнего резервирования в большинстве случаев используется резервная ступень токовой или дистанционной защиты. Для линий с ответвлениями разработаны также защиты, основанные на применении специального высоковольтного оборудования; на использовании различных составляющих тока и их соотношениях; на базе виртуального реле сопротивления; на контроле аварийных и ортогональных составляющих токов с адаптивным торможением и коррекцией сигналов, а также с коррекцией характеристик срабатывания на основе данных об изменении напряжения и состояния коммутационных аппаратов питающей подстанции. Ряд разработок направлен на повышение чувствительности резервных защит ответвительных подстанций за счет изменения схемы включения, усовершенствования характеристик срабатывания и уточнения методики выбора уставок. Однако указанные защиты во многих случаях не обеспечивают требуемую чувствительность при коротких замыканиях на стороне низшего напряжения маломощного трансформатора ответвления линии. В связи с этим актуальной является задача разработки алгоритма действия резервной защиты, обеспечивающей требуемую чувствительность при коротких замыканиях на стороне низшего напряжения трансформатора ответвления.

**Материалы и методы.** Применены аналитические методы определения замера сопротивления измерительного органа дистанционной защиты и имитационное моделирование в среде пакетов Simulink и SimPowerSystems системы моделирования Matlab. Использована математическая модель линии с сосредоточенными параметрами. При выводе аналитических выражений сопротивления прямой и обратной последовательностей принимались одинаковыми.

**Результаты.** Получены аналитические выражения для определения замера сопротивления предлагаемой и существующей дистанционной защиты при междуфазных коротких замыканиях за трансформатором ответвления и в режиме нагрузки. Проведенные исследования показали, что предлагаемая дистанционная защита обладает требуемой чувствительностью при коротких замыканиях на стороне низшего напряжения трансформатора ответвления и необходимой отстройкой от нагрузочных режимов. Определены характеристика и методика выбора параметров срабатывания дополнительной ступени дистанционной защиты с использованием информации о токах питающих концов линии.