

*На правах рукописи*

Тонких Василий Геннадьевич

**МЕТОД ДИАГНОСТИКИ АСИНХРОННЫХ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ НА  
ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ИХ ВНЕШНЕГО  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование  
в сельском хозяйстве

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Барнаул 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Алтайский государственный  
технический университет им. И. И. Ползунова»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
С.О. Хомутов (ГОУ ВПО «Алтайский  
государственный технический универ-  
ситет им. И.И. Ползунова»)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Г.Я. Иванов (ГОУ ВПО «Новосибир-  
ский государственный технический  
университет»)

кандидат технических наук, доцент  
Ю.А. Меновщиков (ФГОУ ВПО «Но-  
восибирский государственный аграр-  
ный университет»)

Ведущая организация: ФГОУ ВПО «Алтайский государст-  
венный аграрный университет»

Защита диссертации состоится 25 июня 2009 года в 14-00 на заседа-  
нии диссертационного совета Д 212.004.02 при Алтайском государствен-  
ном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038,  
г. Барнаул, пр. Ленина, 46, факс (3852) 36-71-29.  
<http://www.altstu.ru>, e-mail: [tonkih22@yandex.ru](mailto:tonkih22@yandex.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского госу-  
дарственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью  
Вашего учреждения, просим направлять по указанному адресу на имя уче-  
ного секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан 25 мая 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



Л. В. Куликова

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Улучшению экономической эффективности процессов агропромышленного производства посвящено немало научных работ. В последние годы в нашей стране широко обсуждаются пути и методы оптимизации производства, где отдельным аспектом идет внедрение наукоемких технологий в сельское хозяйство.

Неотъемлемым элементом любого технологического процесса является электродвигатель. Именно надежность этого элемента зачастую определяет качество и количество выпущенной продукции, так как внезапный выход его из строя может привести к огромному финансовому ущербу. Асинхронный двигатель является наиболее распространённым силовым элементом сельскохозяйственных приводов. По данным Госкомстата на 2008 год в сельском хозяйстве находилось 16 млн. двигателей, в том числе на хозяйство примерно 400 электродвигателей. Отказы электродвигателей вызывают нарушения технологических процессов, что наносит значительный ущерб народному хозяйству из-за недодачи продукции. Кроме того, для восстановления электродвигателей затрачивается большое количество времени.

В сельском хозяйстве электродвигатели находятся в сложных эксплуатационных условиях: тяжелые режимы работы, низкое качество электроэнергии, пыль, влажность, агрессивные среды, колебания температуры и низкий квалификационный уровень обслуживающего персонала отрицательно сказываются на их работоспособности. Так, при среднем сроке службы 10 - 15 лет (наработка 40 тысяч часов) около 20% электродвигателей ежегодно выходят из строя. Средний ущерб от отказа электродвигателя в сельском хозяйстве достигает порядка 3000 - 3500 руб., в животноводстве с поточным производством до 10000 руб.

Из вышесказанного можно сделать вывод об актуальности проблемы повышения надежности электродвигателей. Одним из путей достижения этого является внедрение в производство современных средств диагностики. На сегодняшний день активно ведется разработка диагностических методов, основанных на вибрации различных узлов привода. Однако данное направление не нашло широкого применения в агропромышленном комплексе по следующим причинам: вибродиагностика позволяет определять дефекты подшипникового узла, эксцентриситета, и в меньшей степени - дефекты обмотки статора. При этом анализ отказов электродвигателей показывает, что до 80% электродвигателей в сельском хозяйстве выходят из строя из-за дефектов обмотки статора; сложное и дорогостоящее диагностическое оборудование целесообразно использовать для диагностики высоковольтных электродвигателей, применение которых в сельском хозяйстве невелико; сложность интерпретации результатов. Поэтому разработка недорогих, простых в эксплуатации и точных методов диагностики электродвигателей задача весьма важная.

Таким образом, обозначена проблема низкой надежности электродвигателей в сельском хозяйстве и невозможности ее разрешения средствами существующих диагностических методов.

**Целью настоящей диссертационной работы является:** разработка метода диагностики электродвигателей (ЭД), используемых в агропромышленном производстве, на основе зависимости гармонического состава внешнего магнитного поля (ВМП) от степени развития дефектов.

**Объект исследования.** Процессы изменения формы внешнего магнитного поля электродвигателя при развитии в нем различных дефектов.

**Предмет исследования.** Закономерности возникновения гармоник в спектре внешнего магнитного поля двигателя при развитии дефектов.

**Основные задачи:**

- теоретически исследовать принципы диагностирования ЭД на основе анализа параметров его внешнего магнитного поля;
- определить зависимость формы ВМП ЭД от развития различных дефектов в двигателе;
- создать лабораторный стенд, провести экспериментальные исследования для обоснования полученных результатов;
- разработать метод диагностики дефектов ЭД на основе анализа его ВМП;
- разработать экспертную систему автоматизированной оценки результатов диагностики ЭД.

**Методы исследования**

При выполнении работы использовались методы математического моделирования, математической статистики, математического анализа. Экспериментальная часть исследования выполнена с помощью компьютерного моделирования и натуральных экспериментов.

**Научная новизна:**

- теоретически определены зависимости возникновения гармоник в спектре ВМП ЭД в процессе эксплуатации, и обоснована связь между развитием дефектов обмотки статора, подшипникового узла и характером спектра ВМП;
- экспериментально доказаны закономерности проявления гармоник ВМП при развитии дефектов в двигателе;
- предложен способ расчета весовых коэффициентов гармоник спектра ВМП ЭД при определении гипотезы изменения характера поля и развития дефектов в электродвигателе;
- разработан метод диагностики ЭД на основе связи процессов развития дефектов в ЭД и ВМП;
- разработан алгоритм функционирования экспертной системы, позволяющий интерпретировать результаты диагностики электродвигателя при выявлении в нем дефектов;

- разработан алгоритм адаптации экспертной системы для конкретных производственных процессов с учетом основных воздействующих факторов.

**Практическая значимость.** Использование полученных закономерностей и современных средств вычислительной техники дало возможность изучить динамику процессов изменения спектра ВМП ЭД при развитии в нем дефектов. Разработан метод диагностики ЭД на основе полученных связей между характером ВМП и различными дефектами двигателя, который может успешно использоваться в агропромышленном производстве. Предложена техническая реализация способа диагностики электродвигателей по характеру спектра ВМП. Разработана и реализована экспертная система, позволяющая значительно повысить эффективность использования диагностического метода.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Основные результаты работы использованы и внедрены на объектах агропромышленного комплекса Алтайского края, а именно: ООО «ТОУРАК» Алтайского района, ООО «Техноград» Первомайского района, ОАО «ФСК ЕЭС» филиале Западно-Сибирского предприятия магистральных электрических сетей, Барнаульским филиалом ОАО «Кузбассэнерго» Барнаульской ТЭЦ-1, Барнаульской ТЭЦ-2, Барнаульской ТЭЦ-3, ООО «Сибпромо».

**Апробация.** Основные положения были доложены и одобрены на IX Всероссийском семинаре «Нейроинформатика и ее приложения» (Красноярск, 2003 г.), III Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике» (Пенза, 2003 г.), V Международной конференции «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения» (Санкт - Петербург, 2003 г.), Всероссийской конференции аспирантов и студентов по направлению «Энергетика и энергосбережение» (Барнаул, 2005 г.), второй Международной научно-технической конференции «Автоматизация машиностроительного производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (Вологда, 2006 г.), четвертой Международной научно-технической конференции «Электрическая изоляция - 2006» (Санкт-Петербург, 2006 г.), ежегодных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава АлтГТУ (Барнаул, 2003-2007 гг.).

**На защиту выносятся:**

- закономерности возникновения гармоник в спектре ВМП ЭД при развитии в нем дефектов;
- способ расчета весовых коэффициентов гармоник спектра ВМП ЭД при определении гипотезы развития дефектов в электродвигателе;
- метод диагностики ЭД на основе анализа их внешнего магнитного поля и его техническая реализация;

- алгоритм функционирования экспертной системы, позволяющий определять состояние электродвигателя по результатам диагностики без вмешательства пользователя.

**Публикации.** По материалам проведенных исследований опубликовано 19 печатных работ.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованной литературы, включающего 82 наименования. Работа изложена на 181 странице машинописного текста, содержит 48 рисунков и 21 таблицу.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации основных результатов работы.

**В первом разделе** приведены результаты анализа современного состояния электрооборудования в АПК, общие сведения о парке электродвигателей, применяющихся в сельском хозяйстве.

Проанализированы условия работы ЭД в агропромышленном комплексе. Выделены основные факторы, отрицательно воздействующие на процессы старения изоляции, и как следствие - на срок службы двигателя.

Проведен анализ основных причин отказов ЭД. Выявлено, что основной причиной отказов являются дефекты обмотки статора ЭД.

Проведен обзор существующих методов диагностики электродвигателей. Показаны их сильные и слабые стороны, и сделан вывод о причине отсутствия массового внедрения их в производство.

В результате проведенного комплексного анализа проблемной ситуации, обусловленной незначительным использованием новейших средств диагностики электродвигателей, сделан вывод о том, что существующие методы диагностики по тем или иным причинам не могут широко использоваться в сельскохозяйственных предприятиях. Наряду с этим обозначены предпосылки создания нового метода диагностики, позволяющего повысить экономическую эффективность технологических процессов.

**Второй раздел** посвящен определению источников внешнего магнитного поля электродвигателя и теоретическим основам диагностики ЭД с помощью анализа изменения магнитной индукции ВМП. Обосновано, что ВМП ЭД – это суммарное магнитное поле, создаваемое различными частями двигателя и экраном. Доказано, что основными первичными источниками переменного ВМП асинхронных двигателей являются обтекаемые током обмотки статора и ротора.

Вращающееся магнитное поле электрической машины было представлено в виде двух пульсирующих во взаимно перпендикулярных направлениях полей:

$$\begin{aligned}
M_{MX} &= 0 \\
M_{MY} &= M_M \cos(\omega t + \varphi_M) \\
M_{MZ} &= M_M \sin(\omega t + \varphi_M).
\end{aligned}
\tag{2.1}$$

Для простоты рассмотрим ВМП по одной оси (например, Z).

Текущее значение магнитной индукции в зазоре машины

$$B_\varphi = F_\varphi \cdot \lambda_\varphi, \tag{2.2}$$

где  $F_\varphi$  – текущее значение магнитодвижущей силы,

$\lambda_\varphi$  – текущее значение магнитной проводимости элемента воздушного зазора.

Считаем, что ротор расположен симметрично относительно статора, тогда

$$\lambda_\varphi = \lambda_0 = \frac{\mu_0}{k_\mu k_\delta \delta_0}, \tag{2.3}$$

где  $k_\delta$  – коэффициент воздушного зазора (коэффициент Картера);

$k_\mu$  – коэффициент, учитывающий насыщение зубцовой зоны.

Основная гармоника намагничивающей силы в машине переменного тока

$$F_\varphi = F_0 \cos(\omega \cdot t + p \cdot \varphi), \tag{2.4}$$

где  $\omega$  – частота вращения магнитного поля статора.

Получаем выражение

$$B = B_m \cos(\omega \cdot t + p \cdot \varphi), \tag{2.5}$$

где  $B_m = F_m \lambda_0$  – максимальное значение основной гармоники магнитной индукции при симметричном приведенном зазоре.

Появление спектра гармоник магнитной индукции в воздушном зазоре приводит к появлению аналогичного спектра во внешнем магнитном поле машины. Учитывая то обстоятельство, что индукция внешнего маг-

нитного поля с удалением от источника спадает по закону  $B \equiv \frac{1}{R^{n+2}}$ , где  $n$  – порядок гармонической составляющей индукции ВМП ЭД. Считаем, что можно пренебречь гармониками частотой выше 600 Гц в связи с их быстрым спаданием. Так как ВМП машины экранируется корпусом, это должно быть учтено, например, с помощью коэффициента экранирования  $k_\varepsilon$ . Тогда радиальную индукцию ВМП машины можно записать в виде:

$$B_R = B_0 \cos(\omega \cdot t + p \cdot \varphi),$$

где  $B_0 = k_\varepsilon B_m$ .

Таким образом, можно предположить, что индукция ВМП бездефектного двигателя изменяется по синусоидальному закону во времени. Был произведен ряд опытов на новых электродвигателях различных параметров и получены следующие зависимости изменения индукции ВМП во времени (рисунок 2.1).

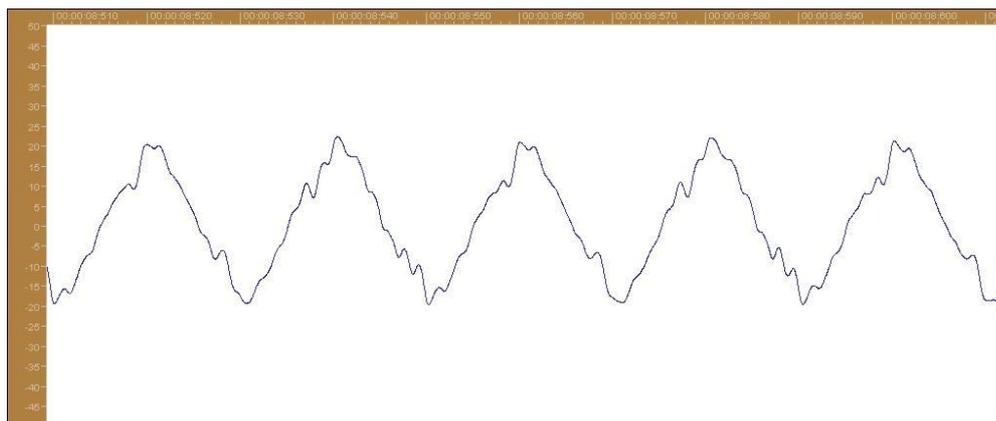


Рисунок 2.1 – Качественная картина изменения индукции ВМП бездефектного двигателя во времени

Теоретические исследования впоследствии были подтверждены экспериментом.

Магнитная индукция внешнего магнитного поля электрических машин в значительной мере определяется различного рода несимметриями обмоток и магнитной системы. Это в первую очередь относится к многополюсным машинам, собственное магнитное поле которых имеет мультипольный характер, определяемый числом пар полюсов. Несимметрии нарушают этот мультипольный характер индукции внешнего магнитного поля, вызывая спектр ее пространственных гармоник.

Одной из несимметрий, существенно влияющих на уровень внешнего магнитного поля электрических машин, является несимметрия основного воздушного зазора, вызванная, в частности статическим эксцентриситетом ротора. Статический эксцентриситет ротора является наиболее часто встречающимся видом несимметрии в электрической машине. Причины его появления – неточность установки ротора относительно расточки статора и выработка подшипников в процессе эксплуатации. Анализ (2.6) показывает, что наличие статического эксцентриситета ротора приводит к появлению в зазоре электрической машины спектра гармоник магнитной индукции с порядком выше и ниже основной.

$$\begin{aligned}
 B_{\varphi} = & B_m \cdot \cos(\omega t + p \cdot \varphi) \cdot (1 + 0.5\varepsilon^2 + \dots) - \\
 & - 0.5 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p-1) \cdot \varphi) \varepsilon \cdot (1 + 0.75\varepsilon^2 + \dots) - \\
 & - 0.5 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p+1) \cdot \varphi) \varepsilon \cdot (1 + 0.75\varepsilon^2 + \dots) + \\
 & + 0.25 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p-2) \cdot \varphi) \varepsilon^2 \cdot (1 + \varepsilon^2 + \dots) + \\
 & + 0.25 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p+2) \cdot \varphi) \varepsilon^2 \cdot (1 + \varepsilon^2 + \dots) - \dots
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Наиболее ярко выраженными являются гармоники порядка  $(p-1)$  и  $(p+1)$ , где  $p$  – основная гармоника индукции ВМП ЭД (50 Гц). Теоретические выкладки подтверждаются экспериментальными данными. Чем больше отличие порядка гармоники от основной, тем меньше её уровень,

что связано с числовым коэффициентом при  $B_m$  и с возрастающей степенью относительного эксцентриситета, который всегда меньше единицы.

Таким образом, наличие дефектов статора, а также дефектов подшипникового узла приводит к появлению во внешнем магнитном поле электрических машин пространственных гармоник, порядок которых ниже порядка основной пространственной гармоники и которые в значительной мере определяют характер изменения индукции внешнего магнитного поля электрической машины во времени.

Наряду с нарушением эксцентриситета ротора в работе были рассмотрены дефекты обмотки статора ЭД. При возникновении данных неисправностей нарушаются электрическая и магнитная симметрии обмоток статора и, как следствие этого - нарушается симметрия индукции третьей гармоники в фазных обмотках.

В этих случаях индукции третьих гармоник в трех фазах статора представляют уже несимметричную систему и их сумма не равняется нулю. В результате этого в пространстве воздушного зазора машины появляется результирующая индукция частоты  $3f_1$ , ( $f_1$  – частота сети).

При возникновении межвитковых и межфазных замыканий в обмотке статора в повреждённых фазных обмотках для токов третьей гармоники образуется отдельный самостоятельный замкнутый контур, где они будут циркулировать. Подобно эффекту, получаемому при соединении обмотки в треугольник, в поврежденных фазных обмотках должна происходить частичная компенсация высших гармонических составляющих, в том числе третьих гармонических. Благодаря этому в фазных величинах поврежденных фаз значение данных гармоник должно уменьшаться по мере увеличения тока в короткозамкнутом контуре, т. е. по мере усиления степени тяжести этих повреждений.

Одновременно электрические замыкания в фазных обмотках должны привести к определенному увеличению значений третьей гармоники в неповрежденных фазах, так как увеличение тока в короткозамкнутом контуре усиливает несимметрию токов в фазах. Это приводит к росту результирующего потока от токов третьей гармоники.

Зная, что появление спектра гармоник магнитной индукции в воздушном зазоре приводит к появлению аналогичного спектра во внешнем магнитном поле машины, можно сделать вывод, что признаком межвитковых и межфазных замыканий является наличие третьей и кратных ей гармоник во ВМП ЭД.

**В третьем разделе** проведен комплекс экспериментальных исследований, направленных на обоснование зависимостей между характером изменения индукции ВМП ЭД во времени и степенью развития различных дефектов.

Для достижения цели была создана лабораторная установка, включающая в себя:

- Асинхронный двигатель;

- Датчик;
- Экранированный кабель;
- Аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- Персональный компьютер (ПК);
- Программное обеспечение на ПК.

Структурная схема лабораторной установки изображена на рисунке 3.1.

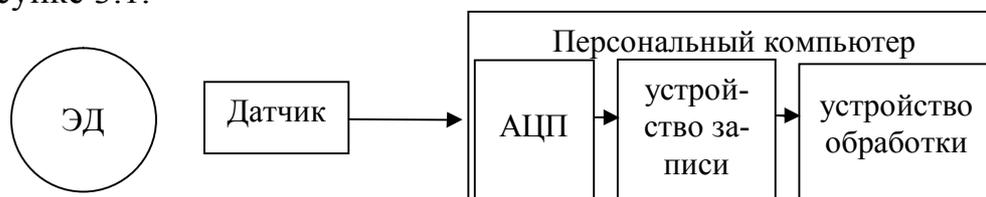


Рисунок 3.1 – Структурная схема экспериментального стенда

Магнитная индукция ВМП ЭД воздействует на первичный преобразователь (датчик), в результате чего в датчике генерируется аналоговый сигнал. Аналоговый сигнал с датчика подается на вход АЦП. Во время аналого-цифрового преобразования дискретные отсчеты преобразуются в последовательность чисел, причем поток цифровых данных, представляющий сигнал, включает как полезные, так и нежелательные высокочастотные компоненты и помехи. Для фильтрации высокочастотных помех полученные цифровые данные пропускаются через цифровой фильтр. Оцифрованный сигнал характеризуется такими величинами, как частота дискретизации и величина квантования. Для записи и предварительной оценки сигнала был использован программный продукт CoolEdit Pro 2.1. Для анализа гармонического состава сигнала была использована программа PowerGraph 3.3 (рисунок 3.2). Для спектрального анализа в программе «PowerGraph» используется алгоритм «Быстрое преобразование Фурье». Спектроанализатор позволяет строить различные типы спектральных графиков, проводить дополнительные статистические вычисления в заданных частотных полосах.

Для изучения процессов изменения ВМП ЭД применялось моделирование дефектов изоляции статора ЭД.

Разница между моделью и реальным процессом заключается в продолжительности развития дефекта. Ухудшение изоляции статора ЭД происходит при продолжительной эксплуатации, перегрузках и прочих не нормальных режимах. Процесс этот может растягиваться на долгое время, что значительно затрудняет исследования. Искусственные замыкания в обмотках статора создавались при помощи специальных предварительно выведенных из лобовой части обмотки статора выводов. Для имитации переходного сопротивления изоляционного слоя в точке замыкания эти выводы замыкаются через регулируемое активное сопротивление.

Это позволяет регулировать значение тока в короткозамкнутом контуре и получать различные степени тяжести исследуемых повреждений, которые создаются путем изменения тока в короткозамкнутом контуре. Результаты проведенных экспериментов приведены на рисунках 3.3 – 3.5.

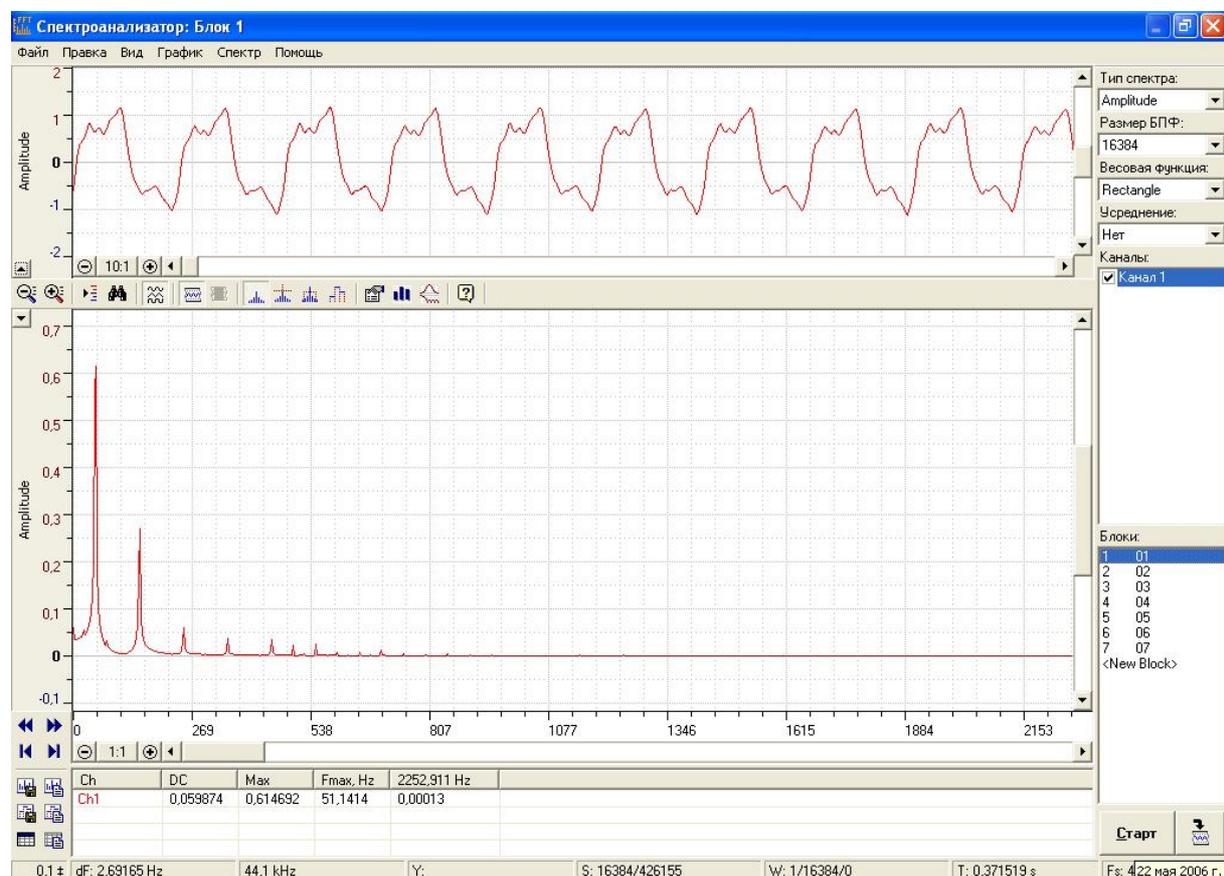


Рисунок 3.2 – Основное рабочее окно программы PowerGraph 3.3

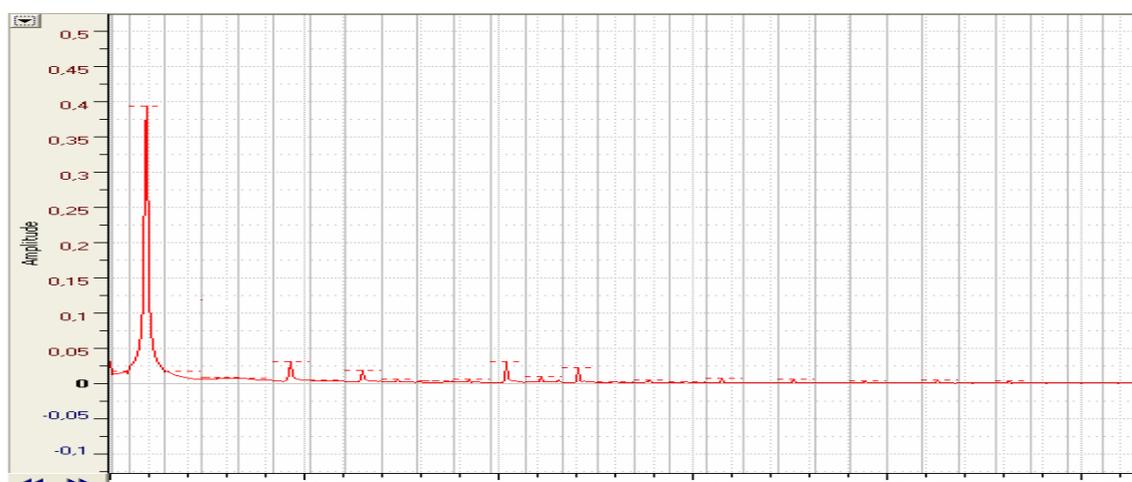


Рисунок 3.3 – Гармонический состав индукции ВМП ЭД без дефекта

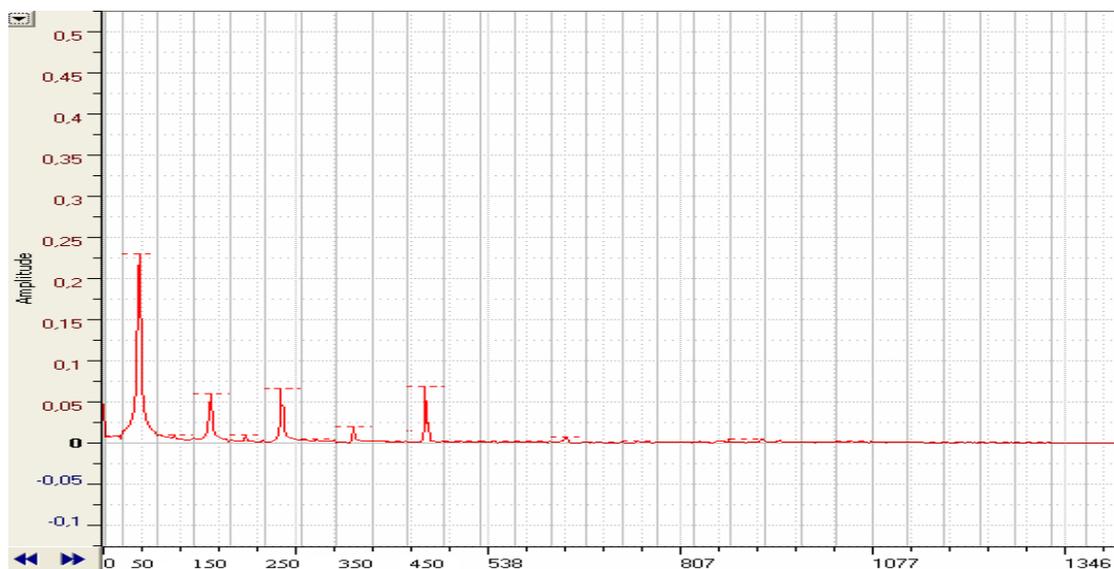


Рисунок 3.4 – Гармонический состав индукции ВМП ЭД в точке наибольшей амплитуды сигнала при межвитковом замыкании

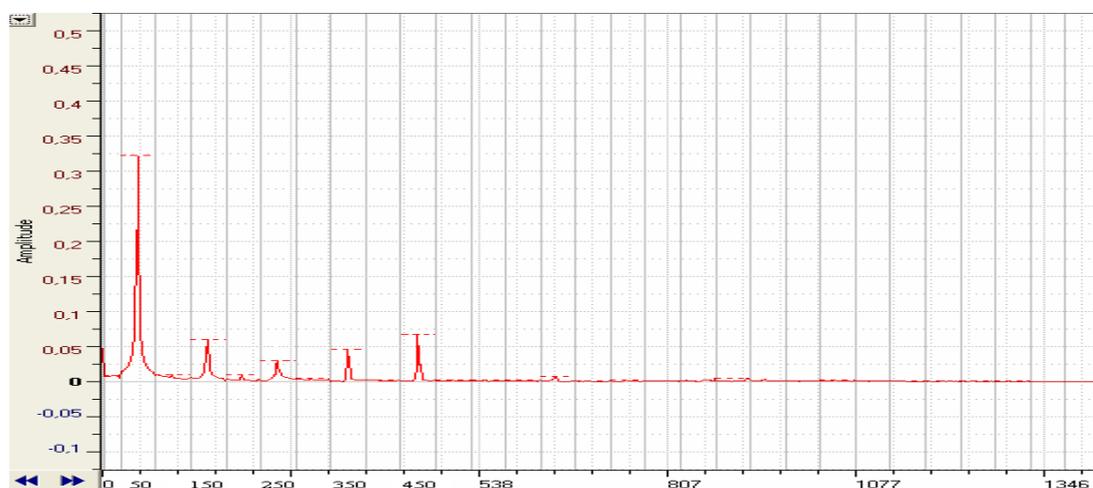


Рисунок 3.5 – Гармонический состав индукции ВМП ЭД в точке наибольшей амплитуды сигнала при межфазном замыкании

В ходе описанных лабораторных исследований, проведенных в Алтайском государственном техническом университете им. И. И. Ползунова путем ускоренного старения изоляции ЭД, моделирования витковых и межфазных замыканий обмоток, была доказана зависимость между спектром гармоник индукции внешнего магнитного поля электрического двигателя и видом дефекта. Результаты данных исследований позволили установить, что анализ спектра индукции внешнего магнитного поля асинхронного двигателя дает возможность получить достоверную информацию не только о виде дефекта, но и о степени его развития.

**Четвертый раздел** посвящен формализации метода диагностирования ЭД и экспертной системы, позволяющей определять характер повреждения двигателя по результатам диагностики. В разработанном методе диагностики использованы принципы зависимости изменения индукции внешнего магнитного поля электродвигателя от развития в нем дефектов.

При обследовании двигателей производились замеры общего уровня индукции внешнего магнитного поля ЭД, регистрировался ее спектральный анализ и фиксировались формы полученных сигналов. Средствами информационно-логического анализа строились каналы связи и оценивалось количество информации о дефектах ЭД, содержащейся в гармониках ВМП ЭД.

На основе информационного анализа удалось получить следующие результаты:

- построить оптимальную «классификацию» явлений и параметров для данных исследований (величина шага ранга, количество рангов и т.д.);
- выявить область значений параметра, где явление устойчиво (инвариантно);
- определить меру зависимости явления от каждого состояния параметра, от параметра в целом и от совокупности состояний параметров;
- исключить параметры, связанные с явлением косвенно, в основном в результате взаимной связи с некоторым третьим явлением;
- на основании выявленных связей создать возможность для научной постановки опытов по изучению данного явления.

Информационный анализ является лишь первым шагом в обработке материала. Но установление формы логической зависимости явления от рассматриваемого набора параметров разрешается с применением функций многозначной логики. В результате обработки данных, полученных экспериментальным путем, информационно - логическим анализом были получены следующие зависимости: для межфазного замыкания

$$f = K_{f9} \left[ \overline{x} \right] K_{f1} \vee (K_{f3} \wedge K_{f7}) \left[ \overline{x} \right] K_{f5} \quad (4.1)$$

для междувиткового замыкания

$$f = K_{f9} \vee (K_{f1} \left[ \overline{x} \right] K_{f5}) \left[ \overline{x} \right] K_{f3} \vee K_{f7} \quad (4.2)$$

Заключительным этапом стало сопоставление теоретических и наблюдаемых распределений частот различных значений. Результатом исследований является алгоритм, где входными параметрами будут некоторые значения различных факторов ( $K_{fi}$ ), а выходным параметром будет значение функции.

Полученные зависимости легли в основу метода диагностики. Удалось добиться диагностирования неисправностей подшипникового узла ЭД, а также определения дефектов обмотки статора двигателя. Весь возможный диапазон значений уровня дефектности разбит на четыре ранга (I ранг – дефект отсутствует; II ранг – незначительный уровень развития дефекта; III ранг – высокий уровень развития дефекта, необходимо срочное ТО; VI ранг – критическое развитие дефекта, не допустима дальнейшая эксплуатация). Используя полученные зависимости, был проведен ряд испытаний и получена значительная база знаний, достаточная для построения на ее основе экспертной системы. На рисунке 4.1 приведена блок –

схема экспертной системы. В аналитическом блоке, на основе полученных в третьем разделе зависимостей на базе информационно-логического анализа, разработан алгоритм построения канала связи между развитием дефектов ротора и статора электродвигателя и спектром его внешнего магнитного поля.

Раздел априорных данных является основой при построении канала связи. Сбор данных проводился на различных предприятиях Калманского, Первомайского и Алтайского районов аграрного комплекса Алтайского края, а также при моделировании развития дефектов в лаборатории. Правильное ранжирование – разбиение всей совокупности данных на отдельные сегменты (ранги) - ключевой момент в определении точности и достоверности прогноза. Однако эти показатели имеют между собой обратную зависимость, т.е. увеличение точности прогноза неизменно приведет к снижению его достоверности. Поиск оптимального соотношения является отдельной проблемой, требующей разработки дополнительных алгоритмов, реализованных, например, при помощи нейросетей. На сегодняшний день в системе реализована возможность изменения рангов вручную на усмотрение пользователя.

Еще одним важным разделом предлагаемого алгоритма является анализ данных – это раздел предлагаемой системы, в котором производится оценка информативности гармоник спектра и определение рабочей гипотезы. Для оценки рабочей гипотезы необходима контрольная выборка (КВ), которая должна обладать необходимым разнообразием (быть представительной), а также эти данные не должны входить в априорную базу данных. Если результаты расчета при помощи рабочей гипотезы не опровергают данные КВ, то гипотеза утверждается. Иначе необходимо произвести изменения рабочей гипотезы.

Рассмотренная система позволяет оценить количественно гармоники спектра, определяющие развитие того или иного дефекта. Большую сложность при этом вызывает ограниченное количество априорных данных, поэтому в системе реализована возможность адаптации, алгоритм которой изображен на рисунке 4.2. Данная возможность позволяет накапливать опыт, автоматически анализировать данные при изменении базы априорных значений, и как следствие - изменять рабочую гипотезу без вмешательства пользователя.

Практическая реализация алгоритма осуществлена средствами языка программирования Delphi 2006.

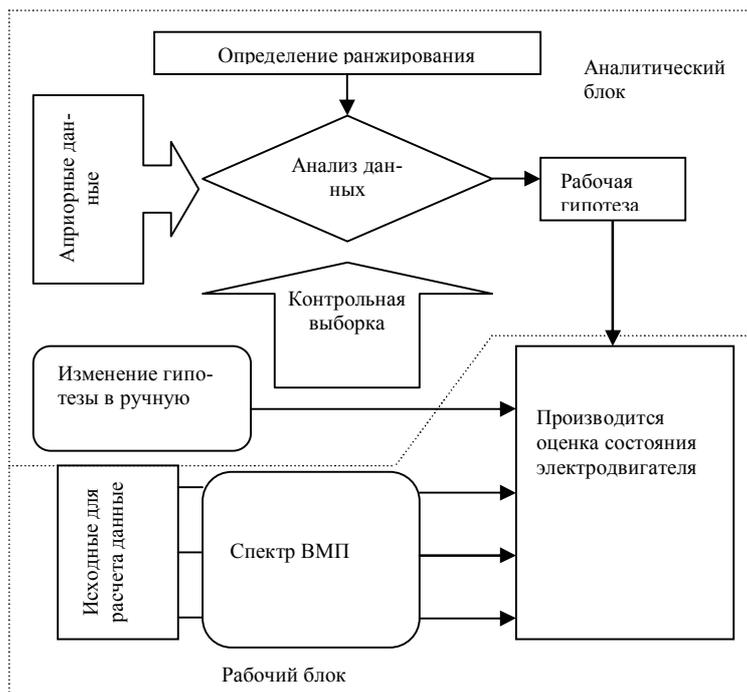


Рисунок 4.1 - Блок – схема экспертной системы

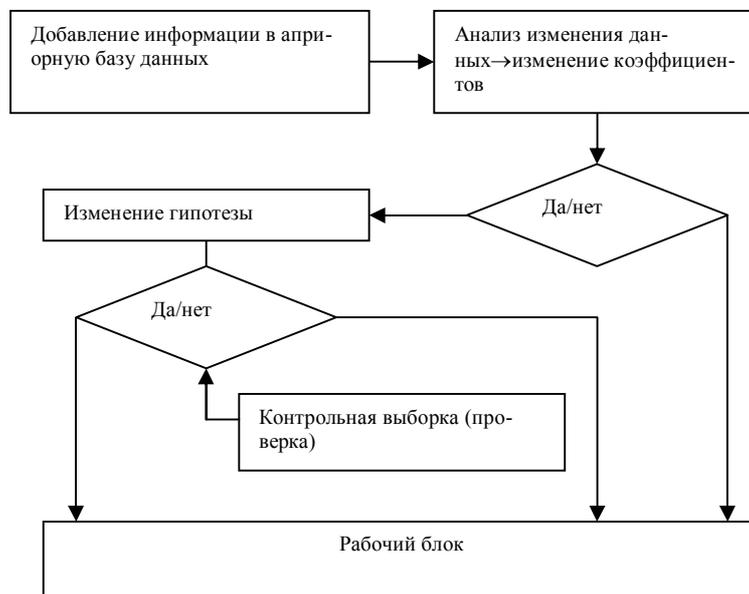


Рисунок 4.2 - Алгоритм адаптации экспертной системы

Таким образом, при анализе ситуации, сложившейся в агропромышленном комплексе, было выявлено, что показатели надежности установленного в данном секторе производства электрооборудования являются неудовлетворительными, планирование отсутствует, а ремонты происхо-

дят на 85 % по факту выхода из строя электродвигателей, что влечет за собой значительные убытки от простоя оборудования. Наиболее рациональным путем решения сложившейся ситуации является разработка метода, позволяющего наиболее точно и всесторонне оценить фактическое состояние электродвигателя при наименьших затратах, а также создание экспертных систем для оценки результатов диагностики, с целью повышения эффективности использования метода.

### **Основные выводы и результаты исследований**

1. Установлено, что внешнее магнитное поле электрических машин в значительной мере определяется различного рода несимметриями обмоток статора и магнитной системы. Несимметрии, обусловленные возникшими дефектами, изменяют характер внешнего магнитного поля, вызывая спектр пространственных гармоник индукции, что дает возможность использовать индукцию ВМП для диагностирования ЭД.

2. Теоретически доказана зависимость между наличием в двигателе дефектов и проявлением определенных гармоник в спектре ВМП ЭД, а именно:

1) наличие статического эксцентриситета ротора приводит к появлению во внешнем магнитном поле электрических машин пространственных гармоник, порядок которых ниже порядка основной пространственной гармоники и которые в значительной мере определяют уровень внешнего магнитного поля электрической машины;

2) наличие во ВМП ЭД гармоник  $k-1$  и  $k+1$ , где  $k$  – основная гармоника, может служить диагностическим признаком выработки подшипников;

3) наличие во ВМП ЭД гармоник  $3k$  может служить диагностическим признаком межвитковых и межфазных замыканий обмотки статора.

3. Создан лабораторный стенд, реализующий физическую модель процессов дефектообразования в ЭД. Проведены экспериментальные исследования, подтвердившие полученные зависимости формы ВМП ЭД от развития различных дефектов в двигателе. Экспериментально доказано, что наличие во ВМП АД гармоник, кратных  $3k$ , где  $k$  – основная гармоника, является диагностическим признаком межвитковых и межфазных замыканий обмотки статора; проявление гармоник кратных  $2k$  является признаком эксцентриситета ротора двигателя. Обосновано, что ВМП АД наиболее сильно проявляется в плоскости, перпендикулярной оси вала ротора.

4. На основе полученных результатов разработаны основные принципы регистрации ВМП двигателей, интерпретации полученных результатов и суждения о наличии в двигателе дефектов. Данные принципы явились основой нового метода диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля. Достоверность результатов диагностики данного метода составляет 92 %.

5. На базе информационно-логического анализа разработан алгоритм экспертной системы, позволяющей интерпретировать результаты диагностики, а также алгоритм адаптации диагностического метода под различные производственные процессы в сельском хозяйстве. Данные алгоритмы были реализованы в виде программного продукта, который сделал возможным использовать результаты исследования на практике.

### **Статьи в журналах, рекомендованных ВАК России для публикации научных результатов диссертационных исследований**

1. **Хомутов С. О.** Пути дальнейшего развития системы организационно-технических мероприятий обеспечения эксплуатационной надежности электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, В. Г. Тонких // Ползуновский вестник. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2005. – № 4. – Ч. 3. – С. 223-229.

2. **Хомутов, С. О.** Количественная оценка вероятности безотказной работы электрического двигателя с учетом влияния условий его эксплуатации [Текст] / С. О. Хомутов, В. Г. Тонких // Ползуновский вестник. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2005. – № 4. – Ч. 3. – С. 276-280.

3. **Хомутов, С. О.** Применение информационно-логического анализа при изучении влияния дефектов асинхронного двигателя на спектр его внешнего магнитного поля [Текст] / С. О. Хомутов, В. Г. Тонких // Социальные, информационные и энергетические проблемы региона : Бюллетень оперативной научной информации. Приложение к журналу «Вестник Томского государственного университета». – Томск : ТГУ, 2006. – С. 32-38.

### **Статьи в других изданиях**

4. **Рыбаков, В. А.** Система оценки и повышения надежности электродвигателей [Текст] / В. А. Рыбаков, В. Г. Тонких // Нейроинформатика и ее приложения : материалы XI Всероссийского семинара. – Красноярск : Изд-во СО РАН, 2003. – С. 135-136.

5. **Хомутов, С. О.** Автоматическая система планирования ремонта электродвигателей с использованием элементов экспертной системы диагностики и моделирования их технического состояния [Текст] / С. О. Хомутов, В. А. Рыбаков, В. Г. Тонких // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : Сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции. – Пенза : Приволжский дом знаний, 2003. – С. 38-40.

6. **Хомутов, С. О.** Применение информационно-логического анализа при изучении стохастических систем на примере оценки надежности межвитковой изоляции асинхронных двигателей [Текст] / С. О. Хомутов, В. Г. Тонких // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения : труды V Международной конференции – СПб. : изд-во СПбГПУ, 2003. – С. 545-548.

7. **Рыбаков, В. А.** Создание модели надежности электрооборудования в зависимости от условий эксплуатации [Текст] / В. А. Рыбаков, В. Г. Тонких // XV Международная интернет-конференция молодых ученых, аспирантов и студентов по современным проблемам машиноведения. – М., 2004. – Режим доступа: [//www.imash.ru/conf/tesys/sec8/Rybakov.doc](http://www.imash.ru/conf/tesys/sec8/Rybakov.doc). – Загл. с экрана.

8. **Хомутов, С. О.** Моделирование стохастических процессов в сложных системах на примере оценки надежности межвитковой изоляции асинхронных двигателей [Текст] / С. О. Хомутов, В. Г. Тонких // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции. – Воронеж: Изд-во "Научная книга" 2004. – С. 206.

9. **Тонких, В. Г.** Определение надежности обмотки статора асинхронного двигателя методом анализа его внешнего электромагнитного поля [Текст] / В. Г. Тонких, С. О. Хомутов // Автоматизированная подготовка машиностроительного производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы Международной научно-технической конференции. – Вологда : ВоГТУ, 2005. – С. 243.

10. **Веденев, В. Н.** Оценка технического состояния электрических двигателей на основе системного анализа характеристик их магнитного поля [Текст] / В. Н. Веденев, В. Г. Тонких, С. О. Хомутов // Измерение, контроль, информатизация: материалы Седьмой Международной НТК. – Барнаул : АлтГТУ, 2006. – С. 255.

11. **Алексеев, А. Ю.** Моделирование внешнего магнитного поля асинхронного двигателя с учетом процессов дефектообразования [Текст] / А. Ю. Алексеев, В. Г. Тонких, С. О. Хомутов // Измерение, контроль, информатизация : материалы Седьмой Международной НТК. – Барнаул: АлтГТУ, 2006. – С. 256.

12. **Алексеев, А. Ю.** Диагностика и прогнозирование состояния асинхронных двигателей на основе использования параметров их внешнего электромагнитного поля [Текст] / А. Ю. Алексеев, О. В. Бродский, В. Н. Веденев, В. Г. Тонких, С. О. Хомутов // Надежность работы электрических машин: Вестник Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова №2. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2006. – С. 24-27.

13. **Тонких, В. Г.** Информативность спектра внешнего магнитного поля асинхронного двигателя [Текст] / В. Г. Тонких, С. О. Хомутов // Автоматизация машиностроительного производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы второй Международной научно-технической конференции. Т. II. – Вологда : Изд-во ВоГТУ, 2006. – С. 217-218.

14. **Алексеев, А. Ю.** Диагностика асинхронных двигателей на основе использования параметров спектра их внешнего магнитного поля [Текст] / А. Ю. Алексеев, О. В. Бродский, В. Н. Веденев, В. Г. Тонких,

С. О. Хомутов // Наука и молодежь : Труды 3-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – Горизонты образования. – Барнаул, 2006. – Вып.8. – Режим доступа : [http : //edu.secna.ru /main/review/2006 /n8/nim2006 /nim2006.htm](http://edu.secna.ru/main/review/2006/n8/nim2006/nim2006.htm) – Загл. с экрана.

15. **Веденев, В. Н.** Методика диагностики асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором на основе анализа их внешнего магнитного поля [Текст] / В. Н. Веденев, М. Ю. Кононенко, В. Г. Тонких, С. О. Хомутов // Наука и молодежь : Труды 3-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – Горизонты образования. – Барнаул, 2006. – Вып.8. – Режим доступа : [http : //edu.secna.ru /main/review/2006 /n8/nim2006 /nim2006.htm](http://edu.secna.ru/main/review/2006/n8/nim2006/nim2006.htm) – Загл. с экрана.

16. **Тонких, В. Г.** Повышение эффективности ремонтов электродвигателей путем создания экспертной системы оценки их состояния и остаточного ресурса на основе использования результатов диагностики [Текст] / В. Г. Тонких, С. О. Хомутов // Вузовская наука – региону: материалы 4-й всероссийской научно-технической конференции. – Вологда : ВоГТУ, 2006. – С. 145-146.

17. **Тонких, В. Г.** Исследование влияния параметров изоляции обмоток статора асинхронного двигателя на характер его внешнего магнитного поля [Текст] / В. Г. Тонких, В. Н. Веденев, С. О. Хомутов // Электрическая изоляция – 2006 : труды четвертой Международной научно-технической конференции. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2006. – С. 228-230.

18. **Тонких, В. Г.** Исследование процессов изменения формы внешнего магнитного поля электродвигателя при развитии в нем различных дефектов [Текст] / В. Г. Тонких // Измерение, контроль, информатизация : материалы Девятой Международной НТК. – Барнаул: АлтГТУ, 2006. – С. 56.

19. **Хомутов, С. О.** Ситуационное планирование ремонтов электродвигателей на основе их электромагнитной диагностики [Текст] / С. О. Хомутов, В. А. Рыбаков, В. Г. Тонких. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2007. – С. 226.

---

Подписано в печать 22.05.2009. Формат 60x84 1/16.

Печать – цифровая. Усл.п.л. 1,16.

Тираж 100 экз. Заказ 2009 - 304

Отпечатано в типографии АлтГТУ,

656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

тел.: (8–3852) 36–84–61

Лицензия на полиграфическую деятельность

ПЛД №28–35 от 15.07.97 г.