

На правах рукописи



Сафин Наиль Рамазанович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ТОКОВОЙ
ДИАГНОСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: кандидат технических наук
Прахт Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты: **Сарваров Анвар Сабулханович,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государствен-
венный технический университет имени
Г.И. Носова», профессор кафедры
«Автоматизированный электропривод и
мехатроника»

Митрофанов Сергей Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ
ВО «Оренбургский государственный
университет», декан электроэнергетического
факультета, заведующий кафедрой
«Электро- и теплоэнергетика»


Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет», г. Пермь

Защита диссертации состоится «21» июня 2017 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?id=51&rid=268689>

Автореферат разослан «___» апреля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зюзев Анатолий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (АД) являются наиболее массовой продукцией электромашиностроения, на долю которых приходится свыше половины мирового энергопотребления.

Оценка технического состояния АД представляет собой важную задачу, решение которой способствует повышению надежности, снижению аварийных ситуаций, сокращению расходов и потерь рабочего времени, связанных с внеплановыми ремонтами оборудования. Диагностика технического состояния АД, работающих в качестве ответственных приводов, является важной задачей, авария которых может вызвать задержку технологического процесса. Проблема обеспечения высокой надежности работы двигателей с каждым годом становится все более актуальной в России, так как старение оборудования значительно опережает темпы технического перевооружения.

В целом существует несколько основных методов диагностирования электрических машин: вибрационные, электромагнитные (на основе измерения электромагнитный полей) и тепловые. Менее распространен метод токовой диагностики на основе анализа амплитудно-частотной характеристики потребляемого двигателем тока. В ряде случаев использование традиционных методов диагностирования (вибрационные и электромагнитные методы) может быть экономически неоправданным, либо эксплуатируемое оборудование может находиться в труднодоступном месте, в таком случае методика токовой диагностики является альтернативным вариантом, позволяющим выполнить диагностическое обследование без вмешательства в нормальную работу двигателя.

В 2016 году в России был введен в действие международный стандарт ISO 20958-2013 «Condition monitoring and diagnostics of machine systems – Electrical signature analysis of three-phase induction motors», в котором отмечены основные рекомендации и регламенты, касающиеся проведения мониторинга и диагностики асинхронных двигателей на основе анализа токов статора.

Разработки и исследования последних лет по развитию методов и средств контроля и анализа текущего состояния двигателей позволяют реализовать технологию обслуживания «по состоянию», актуальную для российской промышленности, когда можно добиться существенного повышения технико-экономических показателей за счет повышения надежности электромеханического оборудования. В этом случае происходит увеличение времени между текущими и капитальными ремонтами. Кроме того эксплуатация неисправного АД также приводит к косвенным непродуктивным затратам электроэнергии, вызванным снижением коэффициента полезного действия (КПД) ввиду дополнительных потерь, и как следствие повышения потребляемых токов. Вопросы энерго- и ресурсосбережения в промышленности в определенной степени могут решаться на основе диагностирования электромеханического оборудования.

С развитием измерительных и вычислительных технологий, и учетом тенденций методов диагностики, разработка усовершенствованных методов токовой диагностики АД, включающих уточненные диагностические признаки, является актуальной задачей. Диссертационная работа посвящена вопросам разработки и исследования методики токовой диагностики маломощных трехфазных АД.

Актуальность работы направлена на повышение надежности эксплуатации АД и, как следствие, снижение вероятности возникновения внеплановых остановок технологического процесса, сокращение расходов на ремонт электромеханического оборудования и продлению его срока службы.

Степень разработанности темы исследования. Общий вклад в исследование надежности и вопросы диагностирования электрических машин внесли многие ученые, в

том числе: Гольдберг О.Д., Котеленец Н.Ф., Клюев В.В., Муравлев О.П., Никиян Н.Г., Осипов О.И., Bonnett A.H., Habetler T.G. и др.

Вклад в разработку методик диагностирования АД по потребляемому току статора внесли: Барков А.В., Баширов М.Г., Вейнреб К.Б., Гашимов М.А., Глазырина Т.А., Козярук А.Е., Новожилов А.Н., Петухов В.С., Рогачев В.А., Сарваров А.С., Antonino-Daviu J., Bellini A., Benbouzid M.E.H., Blodt M., Cardoso A.J.M., Filippetti F., Hyun D., Mehala N., Obaid R.R., Schoen R.R., Thomson W.T., Toliyat H.A. и др.

Целью диссертационной работы является совершенствование методики токовой диагностики износа подшипников и межвитковых замыканий трехфазных АД.

Задачи, которые были поставлены для достижения указанной цели:

- оценка состояния надежности и анализ методов диагностирования электромеханического оборудования; аналитический обзор методик токовой диагностики асинхронных двигателей;
- анализ гармонических составляющих токов для некоторых типов АД, обусловленных конструктивными особенностями и неисправностями;
- обоснование методики диагностирования износа подшипников АД по спектральному составу огибающей обобщенного вектора тока статора;
- анализ методики диагностирования межвиткового замыкания АД по спектральному составу обобщенного вектора тока статора;
- проведение сравнительных экспериментальных исследований опытных АД и механизмов для оценки установленных диагностических признаков.

Областью исследования являются эксплуатационная надежность и диагностирование асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в составе механизмов.

Объектом исследования являются маломощные общепромышленного типа трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.

Научная новизна результатов исследований заключается в следующем:

- определены уточненные комплексные диагностические признаки в спектре токов при работе АД с износом подшипников и межвитковым замыканием;
- на основании результатов физических экспериментов установлены взаимосвязи: амплитудно-модулированных гармоник в спектре огибающей обобщенного вектора тока статора вследствие износа подшипников и четных гармоник низших порядков в спектре обобщенного вектора тока статора вследствие межвиткового замыкания;
- проведены сравнительные экспериментальные исследования до и после ремонтов центробежного вентилятора и консольного насоса для анализа установленных диагностических признаков.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в совершенствовании методики диагностирования износа подшипников и межвитковых замыканий трехфазных АД по потребляемым токам статора.

Работа выполнялась в рамках проведения: НИР «Токовая диагностика эксцентриситета ротора асинхронных двигателей и опытные работы по разработке методики идентификации неисправностей» по договору № 7.2.1.1. д.-13/12 (конкурс «Молодые ученые УрФУ» 2014); НИР «Разработка программного комплекса для диагностики технического состояния асинхронных двигателей» по договорам № 4170ГУ1/2014 и № 1078ГУ2/2016 (конкурс «УМНИК»).

Результаты диссертационной работы используются в АО «Жировградский завод твердых сплавов» и в учебном процессе при подготовке студентов специальности «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений» в ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург).

Методология и методы исследований. В работе аналитическим методом рассматривались режимы работы АД с износом подшипников и межвитковым замыканием. В ходе исследования экспериментальным методом поэтапно сравнивались режимы работы АД в исправном состоянии и с приведенными неисправностями. Исходными данными являлись мгновенные значения токов и напряжений маломощных АД, полученных в ходе экспериментальных исследований. В качестве инструмента для обработки полученных данных применялся программный комплекс в пакете Matlab. При выполнении экспериментальных исследований были проведены испытания методики токовой диагностики в реальных условиях эксплуатации АД в составе механизмов.

Положения, выносимые на защиту:

- Диагностические признаки при работе АД с износом подшипников в виде амплитудно-модулированных гармоник в спектре огибающей обобщенного вектора тока статора.

- Диагностические признаки при работе АД с межвитковым замыканием в виде четных гармоник низших порядков в спектре обобщенного вектора тока статора.

- Рекомендации по количественной оценке степени неисправности для определения момента перехода АД из работоспособного состояния в неработоспособное, полученные по результатам экспериментальных исследований.

- Результаты исследования по оценке механических потерь и КПД маломощных АД в зависимости от состояния подшипников.

- Результаты сопоставительных диагностических обследований механизмов в реальных условиях эксплуатации до и после ремонтов.

Степень достоверности. Достоверность научных положений и выводов в работе, а также результатов исследований обеспечивается согласованием результатов, полученных во время испытаний в лабораторных условиях и на реальных эксплуатируемых объектах.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: III Международной конференции «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» АПЭЭТ-2014 (г. Екатеринбург, 2014); 4-й Международной научно-практической конференции «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии» ЭКСИЭ-04 (г. Екатеринбург, 2015); I Международной научно-практической конференции «Материаловедение. Машиностроение. Энергетика» (г. Екатеринбург, 2015); I Международной научно-технической конференции (МНТК) «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике» (г. Пермь, 2015); IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016, ICPDS (г. Пермь, 2016); Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 60-летию филиала УГНТУ в г. Салавате «Наука. Технология. Производство – 2016: Современные методы и средства диагностики электроэнергетического и электротехнического оборудования, средств и систем автоматики» (г. Салават, 2016); МНТК «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики» IPDME-2017 (г. Санкт-Петербург, 2017).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 19 научных работ, из них 7 статей в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК, среди которых 3 статьи, индексируются в международной базе цитирования Scopus, и 1 статья, индексируется в международной базе цитирования Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 191 наименований и 2 приложений. Основной текст содержит 150 страниц, 43 рисунка, 31 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи, определяются область и объект исследования, излагается теоретическое и практическое значение работы, перечисляются положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации результатов.

В первой главе проведен анализ состояния обеспечения надежности электромеханического оборудования и методов диагностирования АД. Отмечены основные особенности традиционных методов диагностирования электромеханического оборудования. Проведен аналитический обзор методов токовой диагностики АД.

В настоящее время удельные затраты на ремонт вышедших из строя АД становятся сопоставимыми с половиной и более стоимости новых двигателей. По данным электроремонтных служб происходит ежегодное увеличение стоимости ремонтов. Основные отказы АД происходят в двух узлах: в обмотке и в подшипниках. Соотношение между ними зависит от условий эксплуатации, типа, мощности и частоты вращения ротора.

Вибродиагностика получила широкое распространение в области диагностирования АД и является одним из основных методов контроля технического состояния машин. К достоинствам вибрационных методов можно отнести возможность определения точечных дефектов подшипников, ослабление крепления опор, дефекты электромагнитной системы и т.д. К недостаткам реализации вибрационного метода относятся необходимость установки датчиков непосредственно на объект диагностирования и жесткое требование к условию крепления датчиков.

Информацию о техническом состоянии объекта можно получить на основе метода измерения характеристик поля рассеяния, существующего вблизи работающей машины, и являющегося частью общего магнитного потока. Подобные методы распространены для высоковольтных машин (6 кВ и выше). Установка датчиков магнитного поля требует непосредственного доступа к машине, что возможно при его изготовлении или ремонте.

Наряду с приведенными методами диагностирования в последнее время развивается направление диагностики на основе анализа потребляемых токов статора. Достоинствами токовой диагностики являются: возможность выполнения измерений без непосредственного доступа к двигателю, определение технического состояния электрической и механической части двигателя. К недостаткам можно отнести: наличие доминирующей составляющей тока с частотой питающей сети, превышающей на несколько порядков другие составляющие тока, отвечающие за появление повреждений в машине; изменения в силовом токе приводного двигателя из-за износа и дефектов могут иметь как периодический, так случайный и импульсный характер.

Во второй главе теоретически рассмотрены преобладающие высшие гармоники вследствие конструктивных особенностей АД. Рассмотрены особенности режимов работы АД при возникновении неисправностей вследствие износа подшипников и межвиткового замыкания. Определены диагностические признаки износа подшипников в виде амплитудно-модулированных гармоник в спектре огибающей обобщенного вектора тока статора. Отмечены диагностические признаки межвиткового замыкания в виде четных гармоник низших порядков, возникающих в несимметричной обмотке в спектре обобщенного вектора тока статора.

При работе АД происходит генерация естественных возмущений в виде возникающих колебаний, отражающих электромагнитные и электродинамические силы, которые в конечном счете оказывают влияние на гармонический состав потребляемых токов. В машинах переменного тока электромагнитные силы имеют частоту в два раза выше частоты магнитного поля, так как они пропорциональны величине магнитного поля без учета его направления: $f_{\text{эм}} = 2f_1$. Колебания в АД вследствие электродинамических

сил также возникают на удвоенной частоте сети. Сила электродинамического воздействия между двумя проводниками с синусоидальными токами имеет удвоенную частоту относительно частоты сети $f_{эд} = 2f_1$.

Следующие основные по величине колебательные силы, имеющие электромагнитную природу возникновения, действуют на зубцовых частотах, что обусловлены периодическим чередованием ферромагнитных зубцов и пазов на статоре и роторе. Зубцовая частота ротора: $f_{zr} = f_r \cdot Z_2$, где f_r – частота вращения ротора, Гц; Z_2 – количество зубцов ротора. Зубцовая частота статора: $f_{zs} = Z_1 f_1 / p$, где Z_1 – количество зубцов статора; p – число пар полюсов.

Колебания, возбуждаемые подшипниками качения представляют собой упругие волны в диапазоне средних и высоких частот, распространяющиеся по элементам конструкции. Низкочастотные колебания вызваны эксцентриситетом и неравномерностью вращающихся масс, а также несовершенством подшипников качения. Среднечастотные колебания возникают вследствие динамического взаимодействия между ротором и статором из-за высших гармоник.

Возникающие возмущения в работе электрической или механической части машины и связанного с ним механизма приводят к изменениям магнитного потока в зазоре машины и последующей слабой модуляции потребляемого тока. Преобразование Фурье позволяет сопоставить сигналу, заданному во временной области за определенный промежуток времени, его эквивалентное представление в частотной области. На рисунке 1 показана амплитудная модуляция тока статора при возникновении колебаний в работе машины, обусловленных механическим дефектом: огибающая осциллограммы тока показана штрихпунктирной линией, глубина модуляции m отмечена штриховой линией; в спектре амплитудной модуляции основную частоту f_1 условно можно назвать несущей, а частоты $(f_1 - f_r)$ и $(f_1 + f_r)$ – боковыми полосами.

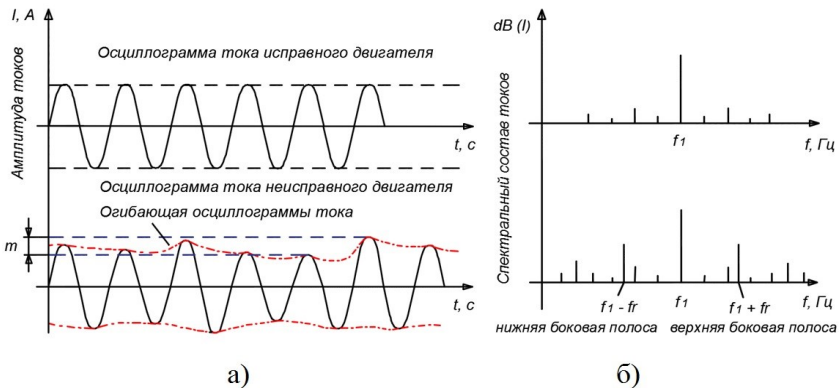


Рисунок 1 - Периодическая амплитудная модуляция токов:

- а) амплитудная модуляция тока во временном диапазоне;
- б) амплитудная модуляция тока в частотном диапазоне.

При возникновении дефекта на потребляемый двигателем ток модулируются дополнительные гармонические составляющие, соответственно в частотной области появляются дополнительные гармоники на различных частотах.

Основным и надежным признаком износа подшипников двигателя является модуляция тока статора частотой вращения ротора f_r . При повреждении подшипников или нарушении центровки валов двигателя и приводимого им механизма, момент сопротивления, действующий на вал двигателя, периодически изменяется с частотой,

пропорциональной частоте вращения вала. Периодическое изменение момента сопротивления вызывает появление в токе статора двигателя составляющих с частотой, пропорциональной частоте вращения вала ($f_1 - f_r$) и ($f_1 + f_r$).

Как правило, износ подшипников приводит к эксцентриситету воздушного зазора в АД. При подработке подшипников возникает статический эксцентриситет, когда ось вращения ротора совпадает с его осью симметрии и не совпадает с осью симметрии статора. Вследствие этого в воздушном зазоре появляются дополнительные поля, что вызывают в обмотках АД дополнительные токи.

В работах Никияна Н.Г. отмечается, что при наличии эксцентриситета в воздушном зазоре дополнительно возникают гармоники проводимости, определяемые разложением проводимости неравномерного зазора в ряд Фурье. При эксцентриситете в воздушном зазоре возникают гармоники порядка $p \pm 1$, вращающиеся асинхронно с ротором, обусловленные составляющими магнитной проводимости. Вместе с этим, при эксцентриситете в воздушном зазоре дополнительно присутствуют гармоники с числом пар полюсов $p \pm k$ (где $k = 1, 2, 3 \dots$) и порядком $\nu = 1 \pm k/p$, обусловленные периодическими изменениями магнитной проводимости. В обмотке статора данные гармоники наводят составляющие ЭДС с частотой вращения ротора ввиду того, что магнитная проводимость воздушного зазора, обусловленная механической неисправностью, изменяется с частотой вращения ротора f_r .

Возникающая механическая неисправность приводит к увеличению ряда пространственных гармоник в зазоре машины. Наиболее выраженными колебательными силами являются зубцовые гармоники статора и ротора. При допущении, что при износе подшипников зубцовая гармоника ротора $1 \pm kZ_r/p$ вследствие эксцентриситета напрямую взаимодействует с изменениями магнитной проводимости в неравномерном воздушном зазоре, предположим, что впоследствии приводит к увеличению только данной пространственной гармоники.

При статическом эксцентриситете минимальный воздушный зазор сохраняет свое положение в пространстве неизменным. При динамическом вращается вместе с ротором. При наихудшем случае, т.е. при динамическом (вращающемся) эксцентриситете магнитная проводимость воздушного зазора, обусловленная эксцентриситетом, будет изменяться с частотой вращения ротора f_r . Амплитуда колебаний ротора и пульсации дополнительных токов зависят от степени эксцентриситета, определяемых износом подшипников.

Износ подшипников способствует увеличению степени эксцентриситета, что приводит к периодическому изменению магнитной проводимости воздушного зазора, и впоследствии к изменению гармонического состава магнитной индукции в воздушном зазоре. Составляющая магнитной проводимости воздушного зазора, вследствие эксцентриситета будет изменяться с частотой вращения ротора f_r . В итоге, в статорной обмотке помимо токов, индуцированных обратным полем ротора, возникают дополнительные токи, индуцированные в результате изменения гармонического состава магнитной индукции в воздушном зазоре. На основании этого, следует предположить, что износ подшипников в обмотке статора способствует возникновению дополнительных токов на частотах $f_1 \pm \nu f_r$, $f_1(1 \pm k/p)$ и $f_1(1 \pm k/p \pm kZ_r/p)$.

При допущении, что амплитуды зубцовых гармоник статора $i^{\nu} Z_s$ изменяются в меньшей степени, чем амплитуды зубцовых гармоник ротора $i^{\nu} Z_r$, то режим работы неисправного двигателя с износом подшипников аппроксимируем соотношениями:

$$\left\{ \begin{aligned}
 i_a(t) &= \sum_{v=1}^{\infty} i_{mmf}^v \cos(v\omega_1 t) + \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr}^v \cos[(\omega_1 \pm v\omega_r)t] + \\
 &+ \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr\pm\lambda}^v \cos[(\omega_r(1 \pm k/p))t] + \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr\pm Zr}^v \cos[(\omega_r(1 \pm k/p \pm kZ_r/p))t] \\
 i_b(t) &= \sum_{v=1}^{\infty} i_{mmf}^v \cos(v\omega_1 t - 2\pi/3) + \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr}^v \cos[(\omega_1 \pm v\omega_r)t - 2\pi/3] + \\
 &+ \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr\pm\lambda}^v \cos[(\omega_r(1 \pm k/p))t - 2\pi/3] + \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr\pm Zr}^v \cos[(\omega_r(1 \pm k/p \pm kZ_r/p))t - 2\pi/3] \\
 i_c(t) &= \sum_{v=1}^{\infty} i_{mmf}^v \cos(v\omega_1 t - 4\pi/3) + \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr}^v \cos[(\omega_1 \pm v\omega_r)t - 4\pi/3] + \\
 &+ \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr\pm\lambda}^v \cos[(\omega_r(1 \pm k/p))t - 4\pi/3] + \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr\pm Zr}^v \cos[(\omega_r(1 \pm k/p \pm kZ_r/p))t - 4\pi/3]
 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где i_{fr}^v - амплитуды модулирующих гармоник частотой вращения ротора, А; $i_{fr\pm\lambda}^v$ - амплитуды модулирующих гармоник обусловленные составляющими магнитной проводимости воздушного зазора, возникающими при эксцентриситете, А; $i_{fr\pm Zr}^v$ - амплитуды модулирующих гармоник, обусловленные взаимодействием магнитной проводимости воздушного зазора с зубцовыми гармониками ротора, возрастающие при эксцентриситете, А.

При классическом анализе спектральных составов используются исходные осциллограммы потребляемых токов. В работе предлагается исследовать спектральные составы огибающих осциллограмм токов для диагностирования износа подшипников ввиду того, что они вследствие неисправности являются характеристикой изменения амплитуд потребляемых токов. Можно допустить, что результирующая кривая по амплитудам осциллограмм тока исправного двигателя аппроксимируется прямой линией, в случае работы неисправного двигателя аппроксимируется в виде отдельного колебания (пульсации). Огибающие низкочастотных и среднечастотных колебаний получают посредством преобразования Гильберта.

В соответствии с (1) аналитическое соотношение огибающих осциллограмм токов при износе подшипников:

$$\left\{ \begin{aligned}
 i_a(t) &= \sum_{v=1}^{\infty} i_{mmf}^v \left[1 + \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr}^v \cos(\omega_r t - \phi_r) + \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr\pm\lambda}^v \cos[(\omega_r(1 \pm k/p))t - \phi_{r\pm\lambda}] \right] + \\
 &+ \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr\pm Zr}^v \cos[(\omega_r(1 \pm k/p \pm kZ_r/p))t - \phi_{r\pm Zr}] \Big] e^{j(\omega_1 t - \phi)} \\
 i_b(t) &= \sum_{v=1}^{\infty} i_{mmf}^v \left[1 + \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr}^v \cos(\omega_r t - \phi_r) + \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr\pm\lambda}^v \cos[(\omega_r(1 \pm k/p))t - \phi_{r\pm\lambda}] \right] + \\
 &+ \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr\pm Zr}^v \cos[(\omega_r(1 \pm k/p \pm kZ_r/p))t - \phi_{r\pm Zr}] \Big] e^{j(\omega_1 t - 2\pi/3 - \phi)} \\
 i_c(t) &= \sum_{v=1}^{\infty} i_{mmf}^v \left[1 + \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr}^v \cos(\omega_r t - \phi_r) + \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr\pm\lambda}^v \cos[(\omega_r(1 \pm k/p))t - \phi_{r\pm\lambda}] \right] + \\
 &+ \sum_{v=1}^{\infty} i_{fr\pm Zr}^v \cos[(\omega_r(1 \pm k/p \pm kZ_r/p))t - \phi_{r\pm Zr}] \Big] e^{j(\omega_1 t - 4\pi/3 - \phi)}
 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

Полученные соотношения (2) показывают, что в огибающих осциллограмм токов содержится постоянная составляющая результирующих МДС обмотки статора и

переменные составляющие амплитудно-модулированных гармоник вследствие неисправности двигателя.

Приведем диагностические признаки при работе АД с износом подшипников: гармонические составляющие $f_1 \pm \nu f_r$, обусловленные модуляцией тока и частотой вращения ротора; гармонические составляющие $f_i(1 \pm k/p)$, обусловленные периодическим изменением магнитной проводимости воздушного зазора вследствие эксцентриситета; гармонические составляющие $f_i(1 \pm k/p \pm kZ_r/p)$, обусловленные периодическим взаимодействием зубцовых гармоник ротора с изменениями магнитной проводимости воздушного зазора вследствие эксцентриситета.

В соответствии с этим можно отметить, что в выражении $f_1 \pm \nu f_r$, первая составляющая является основной гармоникой питающей сети f_1 , вторые составляющие модулируются вследствие неисправности. Преобразование Гильберта позволяет получить огибающие осциллограмм токов и их спектры, содержащие амплитудно-модулированные колебания с отсутствием доминирующей составляющей f_1 . В данной работе рассмотрен ряд типоразмеров АД с числом пар полюсов $2p=2$ соответственно, частота вращения ротора которых приближенно равна частоте питающей сети $f_r \approx f_1$. Исходя из этого, в спектре огибающих осциллограмм токов следует анализировать следующие амплитудно-модулированные колебания составляющих токов при работе АД с износом подшипников: νf_r , $f_i k/p$ и $f_i(k/p \pm kZ_r/p)$.

Анализ огибающих осциллограмм токов выполняют с полосой пропускания до максимальных амплитудно-модулированных колебаний. Вследствие анализа только амплитудно-модулированных колебаний без основной составляющей тока спектр огибающей осциллограммы тока следует выполнять в линейном масштабе (А/Гц), что способствует определенному повышению разборчивости при графическом анализе в зависимости от логарифмического масштаба (дБ/Гц).

Режим работы АД с межвитковым замыканием характеризуется повышенным нагревом соответствующих частей обмотки, происходит уменьшение витков в обмотке. При снижении количества витков обмотки происходит увеличение фазных токов. С ростом степени несимметрии обмотки статора дополнительные гармоники МДС увеличиваются, помимо нечетных гармоник порядков, определяемых $\nu = 6 \cdot c \pm 1$, вследствие неисправности дополнительно возникают гармоники МДС четного и дробного порядков. Несимметричная обмотка статора приводит к появлению нечетных и четных гармоник в двухполюсной машине, а в четырехполюсной к ним добавляются дробные гармоники. В данной работе рассмотрены АД с $2p=2$, поэтому целесообразно учитывать только нечетные и четные гармоники.

Для получения гармоник токов был произведен гармонический анализ в пакете Matlab, определены действующие значения гармоник токов по трем фазам, полученных в ходе испытаний для АИР 71А2У2 (0,75 кВт, 2820 об/мин) и АДМ 80А2У2 (1,5 кВт, 2850 об/мин). Моделирование неисправности выполнялось в фазе А. Испытания показали, что межвитковое замыкание приводит к увеличению основной гармоники на частоте питающей сети f_1 . Происходят изменения в сторону увеличения гармоник, кратных f_3 . Изменения нечетных гармоник на частотах f_5 и f_7 идут в сторону уменьшения. Согласно усредненным значениям при работе АД с симметричной обмоткой нечетные гармоники отсутствуют, кроме f_2 и f_4 , которые имеют малые значения. При работе АД с несимметричной обмоткой поочередно с замыканием 2 и 4 витков происходит рост четных гармоник на частотах $f_2 \div f_{10}$.

При симметричной обмотке статора токи в обмотках имеют форму, приближенную к синусоидальной, и, как следствие, постоянная составляющая отсутствует. При несимметрии обмотки статора, вызванной межвитковым замыканием, токи в обмотках отклоняются от синусоидальной формы. Появляются четные гармоники ввиду появления

постоянной составляющей фазных токов. Для диагностирования межвитковых замыканий в АД с $2p=2$ по спектрам токов необходимо проанализировать четные гармоники низших порядков $\nu = 2 \div 10$ ввиду их наибольших амплитуд и, как следствие, более чувствительных к межвитковым замыканиям по сравнению с гармониками высоких порядков. Следует допустить, что межвитковые замыкания в обмотке статора приводят к появлению дополнительных токов на частотах $f_1 \nu_{2 \div 10}$.

Ввиду того, что основным признаком неисправности обмотки статора АД является модуляция тока частотой питающей сети f_1 , при диагностировании межвитковых замыканий исследуется спектр на основе исходной осциллограммы тока. При этом спектр тока следует выполнять в логарифмическом масштабе (дБ/Гц) вследствие доминирующей составляющей тока на частоте питающей сети f_1 .

При диагностировании необходимо измерение спектров тока во всех фазах обмотки машины. В связи с этим полагаются, что целесообразно формировать обобщенный вектор тока статора. Мгновенные значения токов трех фаз статора следует преобразовать одним обобщенным вектором тока в виде:

$$\overline{I}_s = \frac{2}{3}(i_a + a \cdot i_b + a^2 \cdot i_c), \quad (3)$$

где $a = e^{j2\pi/3}$ и $a^2 = e^{j4\pi/3}$ – операторы; i_a, i_b, i_c – мгновенные значения токов соответствующих фаз, А.

Периодическая амплитудная модуляция тока вследствие неисправности может быть незначительной по сравнению с амплитудой тока одной фазы, поэтому более информативным является анализ обобщенного вектора тока статора (3).

Таким образом при диагностировании формируется обобщенный вектор тока статора для анализа токов во всех фазах.

Вместе с этим определяются огибающие осциллограмм токов каждой фазы и формируется обобщенный вектор огибающей тока статора.

Полученные данные подвергаются спектральному анализу в пакете Matlab.

В условиях эксплуатации при проведении диагностических обследований важным вопросом является определение количественного критерия перехода АД из работоспособного состояния в неработоспособное. В таких условиях возможны два подхода: первый – определение пороговых значений исходя из набора статических данных по результатам периодических диагностических обследований; второй – определение эмпирического критерия, характеризующего наличие или отсутствие неисправности АД.

Предлагается оценивать межвитковое замыкание в спектре тока (дБ/Гц) исходя из усреднения по амплитудам четных гармоник низших порядков $f_{2 \div 10}$ для последующего сопоставления с основной гармоникой на частоте f_1 :

$$A_{st} = 20 \log \left(\frac{I_{1m}}{\sum I_{2 \div 10}} \right) \leq 60. \quad (4)$$

Предполагается, что достижение усредненного значения A_{st} равным 60 дБ, (4) является диагностическим признаком, информирующим о межвитковом замыкании в обмотке статора. Исходя из соотношения (4), уточним, что если разница амплитуд:

- составляющих токов I_{1m} и $I_{2 \div 10}$ в спектре равна 20 дБ – означает, что сумма составляющих токов $I_{2 \div 10}$ в 10 раз меньше основного тока;
- составляющих токов I_{1m} и $I_{2 \div 10}$ в спектре равна 40 дБ – означает, что сумма составляющих токов $I_{2 \div 10}$ в 100 раз меньше основного тока;
- составляющих токов I_{1m} и $I_{2 \div 10}$ в спектре равна 60 дБ – означает, что сумма составляющих токов $I_{2 \div 10}$ в 1000 раз меньше основного тока.

Исходя из этого, и в соответствии с результатами гармонического анализа токов (с симметричной обмоткой и при замыканиях 2÷4 витков) при диагностировании межвитковых замыканий на основе спектрографического анализа в логарифмическом масштабе степень неисправности следует условно разделить до 4 порогов:

- порог «нормированное состояние» - ≥ 60 dB;
- порог «предупреждение» - 40-60 dB;
- порог «опасность» - 30-40 dB;
- порог «аварийное состояние» ≤ 30 dB.

В этой работе полагается, что при анализе спектра тока гармонические составляющие, вызванные неисправностями, следует сопоставлять с доминирующей гармоникой. В спектре тока на основе исходной осциллограммы доминирующая гармоника - частота $f_1 = 50$ Гц. В спектре тока на основе огибающей осциллограммы доминирующая гармоника - частота $f_0 = 0$ Гц, т.к. оператор Гильберта имеет функцию $h(t)=1/\pi t$. Соответственно амплитудно-модулированные колебания, вызванные износом подшипников, следует сопоставлять с доминирующей гармоникой, в данном случае f_0 на частоте 0 Гц. При диагностировании износа подшипников по огибающим осциллограммам токов статора АД для количественной оценки предлагается использовать соотношение:

$$\gamma_{HT} = \frac{I_{DC}}{I_m [v f_r + f_r k / p + f_r (k / p \pm k Z_r / p)]}, \quad (5)$$

где I_{DC} – амплитуда доминирующей гармоники в спектре огибающей тока на частоте $f_0 = 0$ Гц (постоянная составляющая спектра), А; I_m – амплитуды модулирующих гармоник токов на характерных частотах, А.

Для исследования установленных критериев оценки по одиночным измерениям степени межвитковых замыканий (4) и износа подшипников (5) необходимо провести испытания АД в исправном и неисправном состояниях. С целью проверки корректности количественной оценки степени неисправности требуется также провести сопоставительные испытания АД в условиях эксплуатации до и после ремонта. Определение и обоснование количественной оценки степени неисправности позволит установить принципиальную возможность диагностирования АД при отсутствии исходных статистических данных.

В третьей главе приведены результаты испытаний в лаборатории на опытных АД. Произведена количественная оценка диагностических признаков износа подшипников и межвиткового замыкания. Рассмотрены результаты испытаний опытов холостого хода при работе АД с износом подшипников.

В целях экспериментального исследования диагностических признаков неисправностей АД был разработан стенд, который позволяет проводить сравнительные испытания АД мощностью 0,55÷1,5 кВт. При проведении испытаний мгновенные значения токов и напряжений оцифровывались и записывались на ноутбук для дальнейшей обработки и сопоставительного анализа в пакете Matlab.

В ходе проведенной работы были проведены серии испытаний с изношенными подшипниками, которые были получены в ремонтном предприятии ООО «Уральский электротехнический центр». Испытания АД (тип АИР71В2) были проведены поочередно в три этапа: исправные подшипники (радиальный зазор 0,04 мм); один неисправный подшипник № 1 (радиальный зазор 0,09 мм); один неисправный подшипник № 2 (радиальный зазор 0,12 мм).

При экспериментальных исследованиях неисправные подшипники № 1 и № 2 поочередно устанавливались со стороны привода (передняя часть). Частоты амплитудно-модулированных колебаний $v f_r$, $f_r k / p$ и $f_r (k / p \pm k Z_r / p)$ для АИР71В2 (1,1 кВт; $2p=2$) приведены в таблице 1. Полученные частоты амплитудно-модулированных колебаний $v f_r$

и $f_r k/p$ совпадают, т.к. в двигателе $2p=2$. Для упрощения приведены частоты при нагрузках, равных 100 % от номинальной.

Таблица 1 - Частоты амплитудно-модулированных колебаний АИР71В2

Момент нагрузки, Нм	Частота вращения ротора, Гц	Частоты амплитудно-модулированных колебаний, Гц (при $\nu, k = 1 \div 3; p = 1; Z_r = 16$)								
		νf_r и $f_r k/p$			$f_r(k/p+kZ_r/p)$			$f_r(k/p-kZ_r/p)$		
		$\nu=1$	$\nu=2$	$\nu=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
3,75	46,6	46,6	93,2	139,8	792,2	1584,4	2376,6	699	1398	2097

В таблицах 2-4 приведены значения амплитуд частот амплитудно-модулированных колебаний при нагрузке 100 % от номинальной. При работе АД с неисправным подшипником № 1 и № 2 происходит увеличение амплитудно-модулированных колебаний νf_r и $f_r(k/p \pm kZ_r/p)$.

Таблица 2 - Испытания АИР71В2 с исправными подшипниками

Момент нагрузки, Нм	Амплитуда I_{DC} , А	Амплитуды частот амплитудно-модулированных колебаний - $I_{\Sigma am}$, А (при $\nu, k = 1 \div 3; p = 1; Z_r = 16$)								
		νf_r и $f_r k/p$			$f_r(k/p+kZ_r/p)$			$f_r(k/p-kZ_r/p)$		
		$\nu=1$	$\nu=2$	$\nu=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
3,75	2,53	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,009	0,001	0,001

Таблица 3 — Испытания АИР71В2 с неисправным подшипником № 1

Момент нагрузки, Нм	Амплитуда I_{DC} , А	Амплитуды частот амплитудно-модулированных колебаний - $I_{\Sigma am}$, А (при $\nu, k = 1 \div 3; p = 1; Z_r = 16$)								
		νf_r и $f_r k/p$			$f_r(k/p+kZ_r/p)$			$f_r(k/p-kZ_r/p)$		
		$\nu=1$	$\nu=2$	$\nu=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
3,75	2,56	0,005	0,004	0,003	0,001	0,001	0,001	0,017	0,001	0,001

Таблица 4 - Испытания АИР71В2 с неисправным подшипником № 2

Момент нагрузки, Нм	Амплитуда I_{DC} , А	Амплитуды частот амплитудно-модулированных колебаний - $I_{\Sigma am}$, А (при $\nu, k = 1 \div 3; p = 1; Z_r = 16$)								
		νf_r и $f_r k/p$			$f_r(k/p+kZ_r/p)$			$f_r(k/p-kZ_r/p)$		
		$\nu=1$	$\nu=2$	$\nu=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
3,75	2,62	0,010	0,004	0,003	0,001	0,001	0,001	0,015	0,001	0,001

На рисунке 2 можно отметить, что при работе АД с неисправным подшипником № 1 происходит увеличение амплитуд частот амплитудно-модулированных колебаний νf_r . При дальнейших испытаниях спектральный состав токов при работе АД с неисправным подшипником № 2 показал схожие результаты.

Просуммируем амплитуды частот (таблица 5) амплитудно-модулированных гармоник $I_{\Sigma am}$ для сопоставления с амплитудой постоянной составляющей спектра I_{DC} по соотношению (5). В таблице 5 также внесены результаты при нагрузках 50 % ($M_H = 1,87$ Нм) и 75 % ($M_H = 2,81$ Нм) от номинальной.

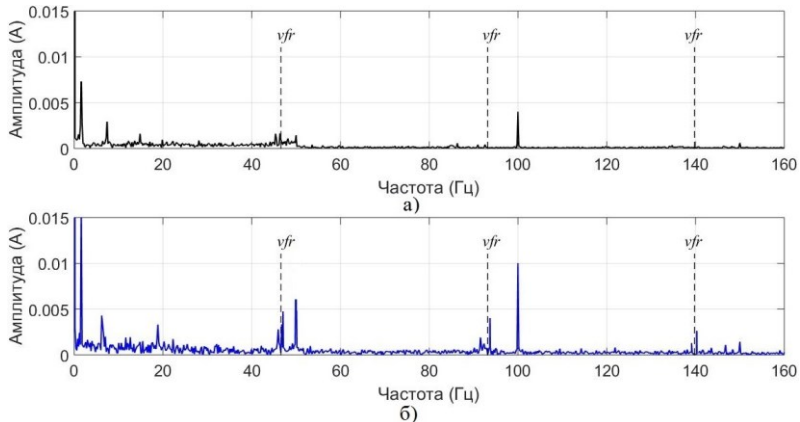


Рисунок 2 - Спектральный состав огибающей обобщенного вектора тока статора:
 а) АИР71В2 при работе с исправными подшипниками;
 б) АИР71В2 при работе с неисправным подшипником № 1

Таблица 5 - Количественная оценка степени неисправности АИР71В2

Момент нагрузки, Нм	АД с исправными подшипниками			АД с неисправным подшипником № 1			АД с неисправным подшипником № 2		
	I_{DC}, A	$I_{\Sigma am}, A$	γ_{HT}	I_{DC}, A	$I_{\Sigma am}, A$	γ_{HT}	I_{DC}, A	$I_{\Sigma am}, A$	γ_{HT}
1,87	1,21	0,0165	65,5	1,19	0,0277	36,1	1,28	0,0258	38,7
2,81	2,01	0,0089	111,7	2,04	0,0191	52,3	2,07	0,0198	50,5
3,75	2,53	0,0071	140,5	2,56	0,0133	75,3	2,62	0,0141	70,8

При работе АД с исправными подшипниками (таблица 5) при полной установившейся нагрузке сумма амплитуд в спектре амплитудно-модулированных гармоник $I_{\Sigma am}$ меньше в 140,5 раз постоянной составляющей спектра I_{DC} . При работе АД с неисправным подшипником № 1 при полной установившейся нагрузке $I_{\Sigma am} \leq I_{DC}$ в 75,3 раз. При работе АД с неисправным подшипником № 2 при полной установившейся нагрузке $I_{\Sigma am} \leq I_{DC}$ в 70,8 раз.

При этом стоит отметить (таблица 5), что при нагрузках, равных 50 % и 75 % от номинальной, увеличение амплитудно-модулированных колебаний при работе АД поочередно с неисправным подшипником № 1 и № 2 становится выше, чем при нагрузке 100 % от номинальной. При работе АД с полной нагрузкой происходит частичное демпфирование исправной клеткой ротора дополнительных колебаний, связанных с неполадками двигателя. Подобное также отмечается в работах Геллера Б. и Гаматы В.

Следует предположить гипотезу, что при достижении суммы амплитуд в спектре амплитудно-модулированных гармоник $I_{\Sigma am}$ в 50 раз меньше постоянной составляющей спектра I_{DC} , двигатель работает с износом подшипников. В реальных условиях эксплуатации АД нередко работает при нагрузках равных 70-75 % от номинальной. Поэтому приведенный количественный критерий оценки степени неисправности при износе подшипников $I_{\Sigma am} \leq I_{DC}$ равный $l \leq 50$ является допустимым.

Как отмечено в диссертации (согласно статистическим данным), АД находят широкое применение в качестве приводного двигателя в вентиляторах. Были проведены аналогичные испытания АД в составе центробежного вентилятора ВЦ 4-75 (АИР63В2). Испытания ВЦ 4-75 (АИР63В2) были проведены поочередно в четыре этапа (рисунок 3):

- исправные подшипники (радиальный зазор 0,04 мм) и рабочее колесо;

- один неисправный подшипник № 1 (радиальный зазор 0,08 мм);
- один неисправный подшипник № 2 (радиальный зазор 0,11 мм);
- исправные подшипники и неисправное рабочее колесо.



Рисунок 3 - Испытания АД в составе вентилятора ВЦ 4-75

В таблице 6 приведены частоты амплитудно-модулированных колебаний для вентилятора ВЦ 4-75 (АИР63В2; 0,55 кВт; $2p=2$), в таблицах 7-10 их амплитуды в зависимости от этапов испытаний.

Таблица 6 - Амплитудно-модулированные колебания ВЦ 4-75 (АИР63В2)

Момент нагрузки, Нм	Частота вращения ротора, Гц	Частоты амплитудно-модулированных колебаний, Гц (при $\nu, k = 1 \div 3; p = 1; Z_r = 18$)						
		νf_r и $f_r k/p$			$z_m \cdot f_r$	$f_r(k/p \pm kZ_r/p)$		
		$\nu=1$	$\nu=2$	$\nu=3$	$z_m=12$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
1,9	46,3	46,3	92,6	138,9	555,6	879,7	1759,4	2639,1
						787,1	1574,2	2361,3

Таблица 7 - ВЦ 4-75 (АИР63В2) в исправном состоянии

Момент нагрузки, Нм	Амплитуда I_{DC} , А	Амплитуды частот амплитудно-модулированных колебаний - $I_{\Sigma am}$, А (при $\nu, k = 1 \div 3; p = 1; Z_r = 18$)						
		νf_r и $f_r k/p$			$z_m \cdot f_r$	$f_r(k/p \pm kZ_r/p)$		
		$\nu=1$	$\nu=2$	$\nu=3$	$z_m=12$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
1,9	1,42	0,001	0,0005	0,0005	0,0023	0,0005	0,0005	0,0005
						0,0018	0,0005	0,0005

Таблица 8 - ВЦ 4-75 (АИР63В2) с неисправным подшипником № 1

Момент нагрузки, Нм	Амплитуда I_{DC} , А	Амплитуды частот амплитудно-модулированных колебаний - $I_{\Sigma am}$, А (при $\nu, k = 1 \div 3; p = 1; Z_r = 18$)						
		νf_r и $f_r k/p$			$z_m \cdot f_r$	$f_r(k/p \pm kZ_r/p)$		
		$\nu=1$	$\nu=2$	$\nu=3$	$z_m=12$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
1,9	1,46	0,002	0,002	0,001	0,0031	0,001	0,0005	0,0005
						0,0059	0,0005	0,0005

Таблица 9 - ВЦ 4-75 (АИР63В2) с неисправным подшипником № 2

Момент нагрузки, Нм	Амплитуда I_{DC} , А	Амплитуды частот амплитудно-модулированных колебаний - $I_{\Sigma am}$, А (при $\nu, k = 1 \div 3; p = 1; Z_r = 18$)						
		νf_r и $f_r k/p$			$z_m \cdot f_r$	$f_r(k/p \pm kZ_r/p)$		
		$\nu=1$	$\nu=2$	$\nu=3$	$z_m=12$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
1,9	1,51	0,0024	0,0018	0,0028	0,004	0,001	0,001	0,001
						0,0051	0,001	0,001

Таблица 10 - ВЦ 4-75 (АИР63В2) с неисправным рабочим колесом

Момент нагрузки, Нм	Амплитуда I_{DC} , А	Амплитуды частот амплитудно-модулированных колебаний - $I_{\Sigma am}$, А (при $\nu, k = 1 \div 3; p = 1; Z_r = 18$)						
		νf_r и f_k/p			$z_m \cdot f_r$	$f_r(k/p \pm kZ_r/p)$		
		$\nu=1$	$\nu=2$	$\nu=3$	$z_m=12$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
1,9	1,58	0,0038	0,0015	0,0028	0,0074	0,001	0,001	0,001
						0,0052	0,001	0,001

Рассмотрим спектральный состав токов (рисунок 4) в диапазоне частот от 0 до 160 Гц при работе ВЦ 4-75 в номинальном режиме с исправными подшипниками и при работе ВЦ 4-75 с неисправным подшипником № 2. При работе ВЦ 4-75 с неисправным подшипником № 2 происходит увеличение амплитудно-модулированных гармоник νf_r .

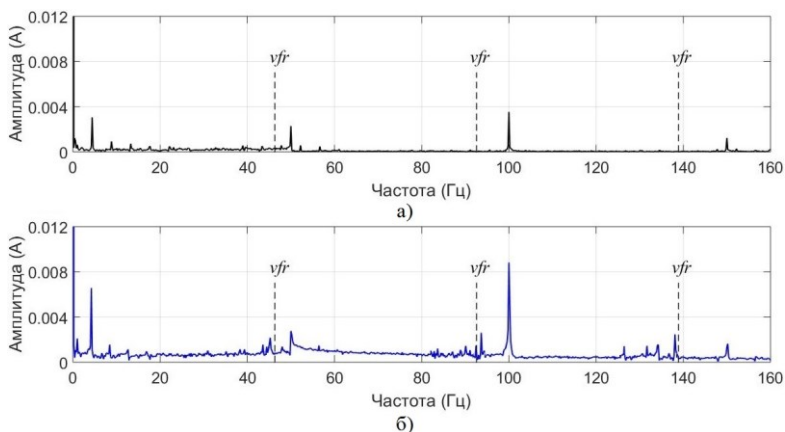


Рисунок 4 - Спектральный состав огибающей обобщенного вектора тока статора:

- а) ВЦ 4-75 в исправном состоянии;
б) ВЦ 4-75 с неисправным подшипником № 2

На рисунке 5 приведен спектральный состав токов в диапазоне частот от 0 до 160 Гц при работе ВЦ 4-75 в номинальном режиме в исправном состоянии и при работе ВЦ 4-75 с неисправным рабочим колесом. При работе ВЦ 4-75 с неисправным рабочим колесом происходит увеличение амплитудно-модулированных гармоник νf_r . При работе вентилятора ВЦ 4-75 в исправном состоянии амплитуды частот амплитудно-модулированных гармоник меньше, чем при работе с неисправным подшипником, но наилучшим режимом является работа вентилятора с неисправным рабочим колесом.

В таблице 11 приведены результаты для количественной оценки степени неисправности, где просуммированы амплитуды частот амплитудно-модулированных гармоник $I_{\Sigma am}$ (таблицы 7-10) и сопоставлены с амплитудой постоянной составляющей спектра I_{DC} по соотношению (5).

Таблица 11 - Количественная оценка степени неисправности ВЦ 4-75

ВЦ 4-75 в исправном состоянии			ВЦ 4-75 неисправным подшипником № 1			ВЦ 4-75 неисправным подшипником № 2			ВЦ 4-75 неисправным рабочим колесом		
I_{DC} , А	$I_{\Sigma am}$, А	γ_{HT}	I_{DC} , А	$I_{\Sigma am}$, А	γ_{HT}	I_{DC} , А	$I_{\Sigma am}$, А	γ_{HT}	I_{DC} , А	$I_{\Sigma am}$, А	γ_{HT}
1,42	0,0086	165	1,46	0,017	85,9	1,51	0,0211	71,5	1,58	0,0257	61,4

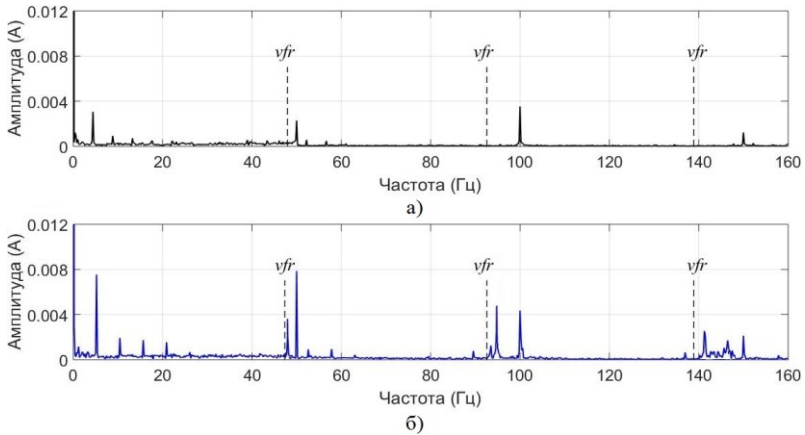


Рисунок 5 - Спектральный состав огибающей обобщенного вектора тока статора:
 а) ВЦ 4-75 в исправном состоянии;
 б) ВЦ 4-75 с неисправным рабочим колесом

Диагностирование износа подшипников и неисправности рабочего колеса вентиляторов требует измерения частот амплитудно-модулированных гармоник, и для каждой частоты необходимо измерение их амплитуд. Неисправность рабочего колеса вентилятора вызывает наибольшие изменения амплитудно-модулированных гармоник, чем износ подшипников.

При испытаниях АД с межвитковым замыканием были использованы АИР 71А2У2 (0,75 кВт, 2820 об/мин, $Z_s = 24$, число катушек $K = 12$, число витков обмотки статора $w_s = 312$) и АДМ 80А2У2 (1,5 кВт, 2850 об/мин, $Z_s = 24$, число катушек $K = 12$, число витков обмотки статора $w_s = 244$). Опыты были проведены с каждым АД в режимах: с симметричной обмоткой; с замыканием 2 витков, 4 витков, и 6 витков. Моделирование межвитковых замыканий выполнялось посредством искусственного замыкания между различными витками в одной фазной обмотке при помощи специальных предварительно выведенных наружу из обмотки статора выводов.

Построение спектрограмм токов выполнялось в логарифмической шкале до частотной полосы 550 Гц для учета четных гармоник на частотах f_{iV2+10} .

На рисунке 6 представлен спектральный состав обобщенного вектора тока при работе АИР71А2 с симметричной обмоткой. Среди спектрального состава выделяется основная гармоника и ряд нечетных гармоник порядков $\nu = 6 \cdot c \pm 1$ МДС обмотки статора.

На рисунке 7 представлен спектральный состав обобщенного вектора тока при работе АД с замыканием 6 витков. Можно отметить существенный рост четных гармоник f_{iV2+10} , среди которых гармоники f_{iV2} равная $-36,37$ дБ превышает значение – порог «опасность» (40 дБ) и f_{iV4} , f_{iV6} равных $-49,82$ дБ и $-55,89$ дБ соответствуют уровню – порог «предупреждение» (40-60 дБ).

Приведем полученные в экспериментах усредненные значения по амплитудам четных гармоник f_{iV2+10} для количественной оценки степени неисправности A_{st} (4):

- АИР71А2 с симметричной обмоткой $A_{st} = 82,43$ дБ;
- АИР71А2 с замыканием 2 витков $A_{st} = 63,11$ дБ;
- АИР71А2 с замыканием 4 витков $A_{st} = 54,2$ дБ;
- АИР71А2 с замыканием 6 витков $A_{st} = 53,97$ дБ.

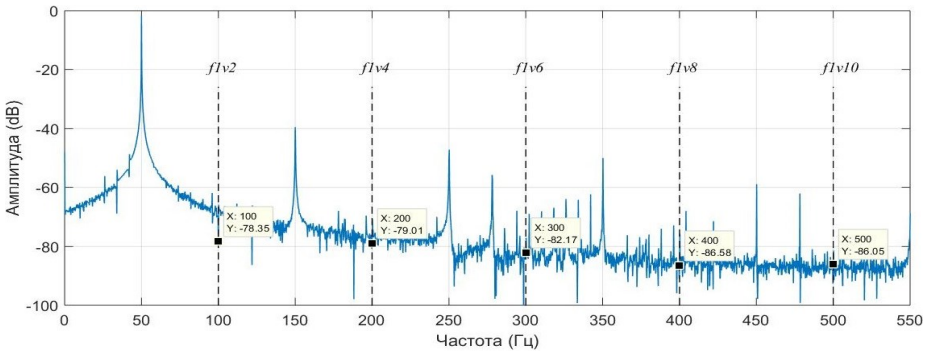


Рисунок 6 - Спектральный состав обобщенного вектора тока статора: АИР71А2 с симметричной обмоткой

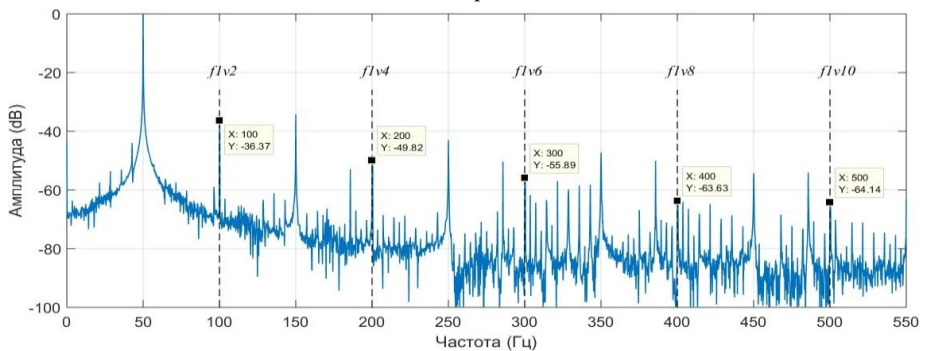


Рисунок 7 - Спектральный состав обобщенного вектора тока статора: АИР71А2 с замыканием 6 витков

Полученные значения A_{St} при работе АИР71А2 с межвитковым замыканием 4 и 6 витков соответствовали уровню - порог «предупреждение» (40-60 дБ), также в этих условиях с замыканием 4 и 6 витков четная гармоника f_{1v2} соответствовала уровню - порог «опасность» (30-40 дБ). При испытаниях АД с замыканием 2 витков значение A_{St} соответствовало уровню - порог «нормированное состояние» ≥ 60 дБ. Вместе с этим, четные гармоники f_{1v2} и f_{1v4} равны уровню - порог «предупреждение» (40-60 дБ).

При испытаниях АДМ80А2 спектральный состав обобщенного вектора тока статора при работе с симметричной обмоткой и с замыканием 2÷6 витков показал подобные результаты. Приведем усредненные значения амплитуд четных гармоник $f_{1v2÷10}$ для количественной оценки степени неисправности A_{St} (4): с симметричной обмоткой $A_{St} = 74,68$ дБ; с замыканием 2 витков $A_{St} = 65,90$ дБ; с замыканием 4 витков $A_{St} = 56,49$ дБ; с замыканием 6 витков $A_{St} = 54,65$ дБ.

В целом испытания подтвердили возможность диагностирования межвитковых замыканий на основе спектрального анализа четных гармоник низших порядков $f_{1v2÷10}$, но при межвитковых замыканиях АД от 4 витков и выше. Диагностирование межвитковых замыканий выполняется по спектрам исходных осциллограмм токов, при сопоставлении суммы амплитуд четных гармоник с амплитудой основной гармоники на частоте питающей сети. Анализируется спектральный состав от 0 до 80-90 дБ. Для измерительной аппаратуры необходимо использование АЦП с разрядностью не ниже 14 бит, динамический диапазон которых равен 81 дБ (для АЦП с разрядностью 16 бит динамический диапазон равен 91 дБ).

В четвертой главе проведены диагностические обследования в реальных условиях эксплуатации. Представлены результаты экспериментов при диагностировании механизмов: центробежного вентилятора и консольного насоса до и после ремонтов.

После проведения исследований в лаборатории, требуется проведение соответствующих работ, в том числе снятие токовых характеристик работающих АД, в реальных условиях эксплуатации.

Следует учитывать возможное влияние высших гармоник в сетях электроснабжения. В соответствии с ГОСТ 32144-2013 нормируются показатели качества электроэнергии, относящиеся к гармоническим составляющим напряжения. В работах Баширова М.Г. для отделения гармонических составляющих фазных токов и напряжений, поступающих из сети, от гармонических составляющих, генерируемых двигателем, используются углы сдвига по фазе $\varphi_{ui(n)}$ между соответствующими гармоническими составляющими фазных токов I_n и напряжений U_n . В случае, когда фазовый угол сдвига $\varphi_{ui(n)}$ между n -ой гармонической составляющей $U_{(n)}$ напряжения и n -ой гармонической составляющей $I_{(n)}$ тока $> 90^\circ$ или $< -90^\circ$, то АД, присоединенный к линии, на рассматриваемом интервале усреднения содержит источник n -ой гармонической составляющей $I_{(n)}$ тока. Наоборот, если фазовый угол сдвига $\varphi_{ui(n)} < 90^\circ$ или $> -90^\circ$, то потребитель (АД) не является источником гармонических составляющих (в таком случае полученные данные для последующего анализа исключаются).

В работе было проведено диагностическое обследование в условиях эксплуатации АД вентилятора ВЦ 14-46-5 до и после ремонта. Тип АД - 4A160S8 (7,5 кВт; 725 об/мин; $2p=8$, $Z_r=44$). Измерения были выполнены в номинальном режиме нагрузки 4A160S8, потребляемые токи в фазах статора соответствовали номинальному $I_{ном}=18,4$ А. После ремонта вентилятора ВЦ 14-46-5 была произведена замена подшипников АД, рабочее колесо соответствовало исправному состоянию. В таблицах 12-13 приведены значения амплитуд частот амплитудно-модулированных гармоник νf_r , $f_r k/p$ и $f_r(k/p \pm kZ_r/p)$.

Частоты амплитудно-модулированных гармоник νf_r и $f_r k/p$ отличаются, т.к. $2p=8$.

Таблица 12 - Испытания 4A160S8 до ремонта

Момент нагрузки, Нм	Амплитуда I_{DC} , А	Амплитуды частот амплитудно-модулированных колебаний - I_{sam} , А (при $\nu, k = 1 \div 3; p = 4; Z_r = 44$)								
		νf_r			$f_r k/p$			$f_r(k/p \pm kZ_r/p)$		
		$\nu=1$	$\nu=2$	$\nu=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
98,8	9,62	0,012	0,004	0,017	0,013	0,04	0,03	0,004	0,004	0,004
								0,024	0,004	0,004

Таблица 13 - Испытания 4A160S8 после ремонта

Момент нагрузки, Нм	Амплитуда I_{DC} , А	Амплитуды частот амплитудно-модулированных колебаний - I_{sam} , А (при $\nu, k = 1 \div 3; p = 4; Z_r = 44$)								
		νf_r			$f_r k/p$			$f_r(k/p \pm kZ_r/p)$		
		$\nu=1$	$\nu=2$	$\nu=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
98,8	9,14	0,001	0,001	0,001	0,013	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
								0,004	0,001	0,001

На рисунке 8 приведен спектральный состав огибающей обобщенного вектора тока статора 4A160S8 после ремонта и до ремонта (износ подшипников). Следует уточнить, что 4A160S8 является тихоходным ($f_r=12,2$ Гц), поэтому для упрощения приведен частотный диапазон до 40 Гц. При работе 4A160S8 до ремонта (рисунок 8-(б)) среди спектрального состава выделяются амплитудно-модулированные гармоники $f_r k/p$ и νf_r , т.е. имеется рост их амплитуд. После ремонта (рисунок 8-(а)), т.е. после замены подшипников двигателя происходит снижение их амплитуд.

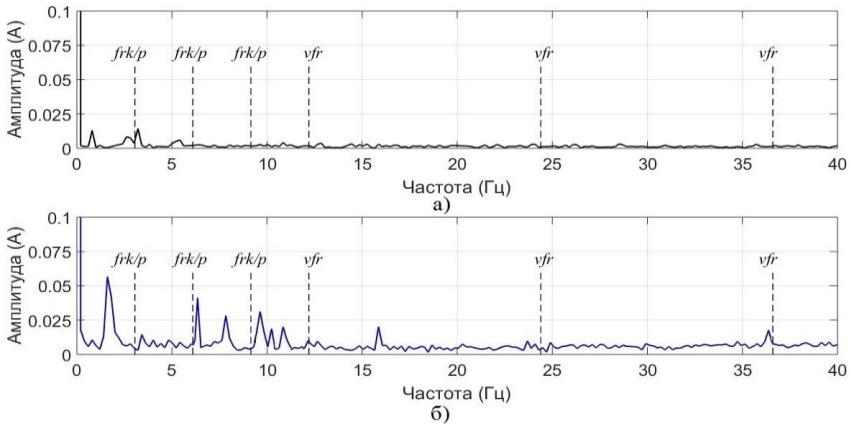


Рисунок 8 - Спектральный состав огибающей обобщенного вектора тока статора:
а) 4A160S8 после ремонта; б) 4A160S8 до ремонта

При работе 4A160S8 до ремонта $\gamma_{HT} = 60,12 > 50$, что возможно обусловлено не критичным, но близким к предаварийному режиму работы двигателя. При работе 4A160S8 после ремонта $\gamma_{HT} = 338,51 > 50$, т.е. имеется значительное снижение амплитудно-модулированных гармоник vfr , frk/p и $f_r(k/p \pm kZ_r/p)$ в спектре огибающей обобщенного вектора тока статора после замены подшипников.

Следующим механизмом АД был выбран насос консольного типа - 1К 20/30м (рисунок 9). Тип АД - АИР100L2 (5,5 кВт; 2850 об/мин; $2p=2$, $Z_r=20$). Измерения были выполнены в номинальном режиме нагрузки АИР100L2, потребляемые токи в фазах статора соответствовали номинальному $I_{ном}=11,3$ А. Частоты амплитудно-модулированных колебаний vfr и frk/p совпадают, т.к. $2p=2$.



Рисунок 9 - Внешний вид диагностируемого АД насоса 1К 20/30м

В таблицах 14-15 приведены значения амплитуд частот амплитудно-модулированных гармоник vfr , frk/p и $f_r(k/p \pm kZ_r/p)$.

Таблица 14 - Испытания АИР100L2 до ремонта

Момент нагрузки, Нм	Амплитуда I_{DC} , А	Амплитуды частот амплитудно-модулированных колебаний - $I_{\Sigma am}$, А (при $v, k = 1 \div 3$; $p = 1$; $Z_r = 20$)								
		vfr и frk/p			$f_r(k/p + kZ_r/p)$			$f_r(k/p - kZ_r/p)$		
		$v=1$	$v=2$	$v=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
18,4	5,84	0,052	0,014	0,013	0,001	0,001	0,001	0,007	0,001	0,001

Таблица 15 - Испытания АИР100L2 после ремонта

Момент нагрузки, Нм	Амплитуда I_{DC} , А	Амплитуды частот амплитудно-модулированных колебаний - $I_{\Sigma am}$, А (при $\nu, k = 1 \div 3; p = 1; Z_r = 20$)								
		νf_r и $f_r k/p$			$f_r(k/p + kZ_r/p)$			$f_r(k/p - kZ_r/p)$		
		$\nu=1$	$\nu=2$	$\nu=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
18,4	5,72	0,006	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,001	0,001

На рисунке 10 приведен спектральный состав огибающей обобщенного вектора тока статора АИР100L2 после ремонта и до ремонта (износ подшипников). При работе АИР100L2 до ремонта (рисунок 10-(б)) среди спектрального состава существенно выделяются амплитудно-модулированные гармоники νf_r , которые снижаются после ремонта, т.е. после замены подшипников двигателя (рисунок 10-(а)).

При работе АИР100L2 до ремонта $\gamma_{HT} = 64,17 > 50$, что возможно обусловлено не критичным, но близким к предаварийному режиму работы двигателя. При работе АИР100L2 после ремонта $\gamma_{HT} = 336,47 > 50$, следовательно, аналогично имеется значительное снижение амплитудно-модулированных гармоник νf_r , $f_r k/p$ и $f_r(k/p \pm kZ_r/p)$ в спектре огибающей обобщенного вектора тока статора после замены подшипников.

Экспериментальные исследования показали, что после замены подшипников амплитудно-модулированные гармоники νf_r , $f_r k/p$ и $f_r(k/p \pm kZ_r/p)$ в спектре огибающей обобщенного вектора тока статора снижаются и их сумма равна: $I_{\Sigma am} = 0,027$ А - для АД вентилятора ВЦ 14-46-5 (до ремонта $I_{\Sigma am} = 0,16$ А); $I_{\Sigma am} = 0,017$ А - для АД насоса 1К 20/30м (до ремонта $I_{\Sigma am} = 0,091$ А).

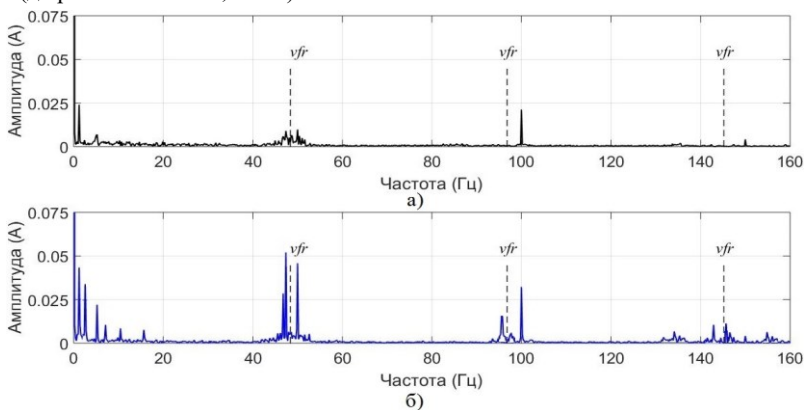


Рисунок 10 - Спектральный состав огибающей обобщенного вектора тока статора: а) АИР100L2 после ремонта; б) АИР100L2 до ремонта

Полученные результаты предварительных исследований были подтверждены положительными испытаниями в производственных условиях АО «Кировградский завод твердых сплавов». При измерениях было принято допущение, что механизмы работают с исправными рабочими узлами, что было подтверждено непосредственно при ремонтах.

В заключении обобщаются выводы, полученные по результатам работы:

1. Проведена общая оценка состояния надежности и анализ методов диагностирования электромеханического оборудования. Проведен аналитический обзор методик токовой диагностики АД.

2. Рассмотрены гармонические составляющие токов для некоторых типов АД, обусловленных конструктивными особенностями и режимами работ при возникновении неисправностей, вызванных износом подшипников и межвитковым замыканием.

3. Разработан стенд и проведены экспериментальные исследования опытных АД, в ходе которых были проанализированы установленные диагностические признаки при возникновении износа подшипников и межвитковых замыканий.

4. Исследована методика токовой диагностики износа подшипников и межвитковых замыканий маломощных АД. Мобильность методики токовой диагностики позволяет проводить измерения дистанционно от исследуемого АД и способствует повышению надежности электромеханического оборудования. Обнаружение и достоверная диагностическая оценка неисправностей методом спектрального анализа тока статора возможны при учете информации о токах всех фаз обмотки, состоянии системы питания и виде нагрузки.

5. На основе анализа литературы и опытных данных отмечено, что степень развития межвиткового замыкания зависит от серьезности дефекта и нагрузки двигателя. Приведенная методика диагностирования межвитковых замыканий имеет рекомендательный характер. В большинстве случаев межвитковое замыкание имеет быстротекущий характер, приводящий к возникновению других типов неисправностей (межвитковое замыкание между катушками, междуфазное замыкание, однофазное замыкание на корпус и т.д.), приводящих к срабатыванию систем релейной защиты.

6. Обосновано, что несимметрия обмотки статора, вызванная межвитковым замыканием, приводит к возникновению дополнительных высших гармоник, в частности четных гармоник низших порядков в АД с $2p=2$. Методика диагностирования межвитковых замыканий основывается на спектральном анализе обобщенного вектора тока статора, с сопоставлением четных гармоник низших порядков f_{1V2-10} с амплитудой основной гармоники f_1 питающей сети в логарифмическом масштабе дВ/Гц.

7. Обосновано, что износ подшипников приводит к возникновению дополнительных высших гармоник, обусловленных модуляцией тока частотой вращения ротора ω_r , периодическим изменением магнитной проводимости воздушного зазора вследствие эксцентриситета f_k/p , периодическим взаимодействием зубцовых гармоник ротора с изменениями магнитной проводимости воздушного зазора вследствие эксцентриситета $f_r(k/p \pm kZ_r/p)$. Методика диагностирования износа подшипников заключается в спектральном анализе огибающей обобщенного вектора тока статора с сопоставлением суммы амплитудно-модулированных гармоник $I_{\Sigma am}$ с амплитудой постоянной составляющей спектра I_{DC} в линейном масштабе А/Гц.

8. На основе анализа литературы и экспериментальных исследований приведены рекомендации по количественной оценке степени неисправности для определения момента перехода АД из работоспособного состояния в неработоспособное.

9. Проведены сравнительные испытания АД с высотой оси вращения 63, 71 и 80 мм для определения механических потерь и КПД в зависимости от состояния подшипников. Эксплуатация АД с неисправным подшипником приводит к увеличению доли механических потерь и впоследствии к снижению КПД двигателя.

10. Для диагностического обследования АД в условиях эксплуатации был разработан регистратор с накопителем памяти для последующей обработки данных на ПК.

11. Рассмотренная методика токовой диагностики маломощных АД в составе механизмов была испытана в производственных условиях АО «Кировградский завод твердых сплавов».

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования: построение трехмерных математических моделей для анализа основных индуктивностей АД в исправном и неисправном состояниях; использование экспертных систем, на основе нейронных сетей и нечеткой логики для прогнозирования технического состояния АД.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Сафин, Н.Р. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, А.А. Дмитриевский, В.М. Казакбаев // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2014. – № 3 (57). – С. 34-39. (0,55 п.л. / 0,35 п.л.)
2. Сафин, Н.Р. Обзор методов мониторинга изоляции асинхронных двигателей, работающих от преобразователей частоты / Н.Р. Сафин, В.М. Казакбаев, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский // Промышленная энергетика. – 2015. – № 7. – С. 58-61. (0,3 п.л. / 0,15 п.л.)
3. Safin, N. Analysis of spectrums instantaneous values of active and reactive powers for the diagnosis of mechanical faults in induction motors / N. Safin, V. Prakht, V. Dmitrievskii // 4th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2015). – Shenzhen, China. – Destech Publicat Inc. – pp. 383-285. (0,3 п.л. / 0,15 п.л.) (Web of Science)
4. Сафин, Н.Р. Диагностика неисправностей вентиляторных установок с помощью спектрального анализа токов статора / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский // Энергобезопасность и энергосбережение, 2016. – № 4 (70). – С. 37-42. (0,6 п.л. / 0,4 п.л.)
5. Safin, N. Condition monitoring and reliability of bearing units of induction machines / N. Safin, V. Prakht, V. Dmitrievskii // 9th International Conference on Power Drives Systems, ICPDS 2016. – Perm, Russian Federation. – pp. 1-4. (0,45 п.л. / 0,35 п.л.) (Scopus)
6. Сафин, Н.Р. Токовая диагностика неисправностей подшипников асинхронных двигателей на основе быстрого преобразования Фурье / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, А.А. Дмитриевский // Электротехника. – 2016. – № 12. – С. 14-19. (0,5 п.л. / 0,35 п.л.) (Scopus)
7. Сафин, Н.Р. Диагностика повреждений подшипников асинхронных двигателей в условиях горнодобывающих предприятий / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский // Горный журнал. – 2017. – № 1. – С. 60-64. (0,45 п.л. / 0,35 п.л.) (Scopus)

Публикации в других научных изданиях:

8. Сафин, Н.Р. Диагностика неисправностей асинхронных двигателей на основе спектрального анализа токов статора и вопросы энергосбережения / Н.Р. Сафин, В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт, А.А. Дмитриевский, В.М. Казакбаев // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сборник материалов научно-практической конференции. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2013. – С. 182-185. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.)
9. Сафин, Н.Р. Токовая диагностика эксцентриситета ротора асинхронных двигателей / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, А.А. Дмитриевский, В.М. Казакбаев // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий (АПЭЭТ-2014): Сборник научных трудов. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2014. – С. 244-248. (0,35 п.л. / 0,25 п.л.)
10. Сафин, Н.Р. Токовая диагностика подшипников асинхронных двигателей на основе вейвлет-анализа и задачи энергоресурсосбережения / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, И.А. Смольянов // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: материалы VIII Всероссийской научно-технической интернет-конференции с международным участием. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2014. – С. 72-80. (0,3 п.л. / 0,15 п.л.)
11. Сафин, Н.Р. К вопросам методов мониторинга изоляции асинхронных двигателей / И.А. Смольянов, Н.Р. Сафин, В.А. Прахт // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии (ЭКСИЭ-04): Сборник докладов 4-й международной научно-практической конференции в рамках выставки

«Энергосбережение. Отопление. Вентиляция. Водоснабжение». – Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2015. – С. 197-199. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.)

12. Сафин, Н.Р. Анализ спектральных характеристик токов и мощностей при диагностике механических неисправностей асинхронных машин / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: в 3 ч.: сборник научных трудов VII Международной научной конференции молодых ученых. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015, часть 1. – С. 59-63. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.)

13. Сафин, Н.Р. Анализ КПД асинхронной машины при работе с дефектными подшипниками / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский // Материаловедение. Машиностроение. Энергетика: сборник научных трудов. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2015. – С. 613-622. (0,4 п.л. / 0,35 п.л.)

14. Сафин, Н.Р. Диагностика неисправностей обмотки статора асинхронных двигателей / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы I Международной научно-технической конференции. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2015. – с. 139-147. (0,4 п.л. / 0,3 п.л.)

15. Safin, N.R. Diagnosis of bearing faults of induction motors by spectral analysis of stator currents / N.R. Safin, V.A. Prakht, V.A. Dmitrievskii, A.A. Dmitrievskii // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 1070-1072. – pp. 1187-1190. (0,3 п.л. / 0,15 п.л.)

16. Сафин, Н.Р. Контроль состояния и надежности подшипниковых узлов асинхронных машин / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. – С. 364-368. (0,35 п.л. / 0,25 п.л.)

17. Сафин, Н.Р. Диагностирование асинхронного двигателя в составе центробежного вентилятора по показаниям потребляемых токов / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: материалы IV российской молодежной научной-школы конференции. В 2 т. Т. 1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ООО «ЦРУ», 2016. – С. 21-25. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.)

18. Сафин, Н.Р. Диагностирование асинхронного двигателя по спектральным характеристикам огибающей обобщенного вектора тока статора / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский, И.В. Соколов // Наука. Технология. Производство – 2016: Современные методы и средства диагностики электроэнергетического и электротехнического оборудования, средств и систем автоматики: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. – С. 243-247. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.)

19. Сафин, Н.Р. Совершенствование методики токовой диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором / Н.Р. Сафин, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики (IPDME-2017): сборник трудов Международной научно-технической конференции. – СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2017. – С. 198-201. (0,3 п.л. / 0,2 п.л.)