

На правах рукописи

НЕКРАСОВ АНТОН АЛЕКСЕЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**

05.20.02 – электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ФГБНУ ВИЭСХ)

Научный руководитель

Сырых Николай Николаевич
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
лаборатории “Электротехнические системы
и электрооборудование” ФГБНУ ВИЭСХ

Официальные оппоненты:

Кондратьева Надежда Петровна
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой “Автоматизированный
электропривод” ФГБОУ ВПО
Ижевская ГСХА

Шмигель Владимир Викторович
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры “Электрификация”
ФГБОУ ВПО Ярославская ГСХА

Ведущая организация:

Северо-Кавказский
научно-исследовательский институт
механизации и электрификации
сельского хозяйства
(ФГБНУ СКНИИМЭСХ)

Защита состоится « 08 » декабря 2015 г. 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 006.037.01 в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ФГБНУ ВИЭСХ) по адресу: 109456, г. Москва, 1-ый Вешняковский проезд, д.2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБНУ ВИЭСХ.

Автореферат разослан « » 2015 г. и размещен на сайте www:viesh.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета

Алексей Иосифович Некрасов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Актуальность темы диссертации обосновывается высокой аварийностью электродвигателей в условиях сельскохозяйственного производства, большими затратами трудовых и материально-технических ресурсов, нестабильностью технологических процессов при отказах электрооборудования. Среди этих причин, как показал многолетний опыт эксплуатации электрооборудования электротехническими службами сельскохозяйственных предприятий и объединениями Агропромэнерго, существенной причиной является несовершенство Системы планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования сельскохозяйственных предприятий (ППРЭСх) и в частности отсутствие научно обоснованных рекомендаций по применению наиболее прогрессивной стратегии обслуживания электродвигателей по их фактическому состоянию.

В последние годы в ВИЭСХе и других научно-исследовательских и учебных учреждениях выполнены фундаментальные исследования по обоснованию и применению планово-предупредительных стратегий технического обслуживания и ремонта электрооборудования, реализующих упреждающий принцип профилактической замены изделия до его отказа. При этом из-за высоких требований к обеспечению надежности функционирования технологических процессов оптимальная периодичность профилактических замен осуществляется при некотором остаточном ресурсе. Кроме того из-за отсутствия технических средств диагностирования оборудования при ТО и Р часто имеют место дополнительные затраты на разборку и сборку вполне исправного оборудования.

В последние годы выполнены некоторые исследования по разработке и применению средств и методов диагностирования, которые ограничиваются выявлением технического состояния изделия, без прогнозирования возможностей наработки изделий до последующей проверки.

В настоящей работе основное внимание уделено обоснованию основных параметров стратегии обслуживания электродвигателей по их фактическому состоянию и возможности её применения в условиях сельскохозяйственного производства.

Цель работы.

Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта электродвигателей в сельском хозяйстве для повышения его эксплуатационной надежности.

Задачи исследования.

1. Провести анализ системы и стратегий технического обслуживания электрооборудования, обосновать требования к диагностируемому параметру для реализации стратегии обслуживания электрооборудования по состоянию.

2. Разработать математическую модель стратегии обслуживания электродвигателей по состоянию, устанавливающую связь периодичности

диагностирующих проверок с упреждающим допуском на диагностирующий параметр при заданном уровне безотказности.

3. Разработать методику расчета основных параметров стратегии обслуживания электродвигателей по состоянию, определить показатели надежности, а также зависимости предотказового значения диагностирующего параметра и упреждающего допуска от периодичности диагностических проверок, на примере подшипников электродвигателей.

4. Разработать новый метод эксплуатационного контроля состояния изоляции и прогнозирования ресурса обмоток электродвигателей с учетом различных эксплуатационных факторов сельскохозяйственного производства.

5. Разработать и изготовить новые технические средства и устройства для контроля технического состояния электродвигателей в процессе их эксплуатации.

6. Провести технико-экономическую оценку применения выполненных исследований и разработок.

Объект исследования: электродвигатели сельскохозяйственных предприятий.

Предмет исследования: закономерности системы обслуживания электродвигателей с учетом его технического состояния в условиях сельскохозяйственного производства.

Методика исследования. Анализ теоретических и экспериментальных данных по эксплуатации электродвигателей в сельскохозяйственном производстве, полученных при помощи методов математической статистики, теории вероятностей, математического моделирования, теоретических основ электротехники.

Научная новизна.

1. Обоснованы требования к диагностирующим параметрам, используемым в качестве определяющих технического состояния электротехнических изделий в процессе их функционирования.

2. Разработана математическая модель обоснования основных параметров стратегии обслуживания электродвигателей по их фактическому состоянию с выявлением предотказового состояния и упреждающего допуска на контролируемый диагностирующий параметр при различной периодичности диагностирования и заданном уровне безотказности.

3. Разработана методика расчета основных параметров стратегии обслуживания электродвигателей по состоянию с использованием в качестве диагностирующего параметра величины радиального зазора подшипников.

4. Разработан метод эксплуатационного контроля состояния изоляции и прогнозирования ресурса обмоток электродвигателей по графическим зависимостям с учетом эксплуатационных факторов сельскохозяйственного производства.

5. Разработаны новые технические средства и устройства для контроля технического состояния электродвигателей в процессе их эксплуатации.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель обоснования стратегии обслуживания электродвигателей по их фактическому состоянию с использованием обоснованных диагностических параметров, позволяющая оценивать предотказовое состояние изделия, величину упреждающего допуска на диагностический параметр при различной периодичности диагностирования и заданном уровне безотказности.

2. Методика расчета основных параметров стратегии обслуживания электродвигателей по состоянию с использованием в качестве диагностирующего параметра величины радиального зазора подшипников.

3. Метод эксплуатационного контроля состояния изоляции и прогнозирования ресурса обмоток электродвигателей по графическим зависимостям с учетом эксплуатационных факторов сельскохозяйственного производства.

4. Новые технические средства и устройства для контроля технического состояния электродвигателей в процессе их эксплуатации.

Практическая ценность и реализация

1. Методика обоснования основных параметров стратегии обслуживания электрооборудования в сельском хозяйстве по состоянию.

2. Результаты практического применения полученной модели обслуживания по состоянию с использованием величины радиального зазора подшипников электродвигателей в качестве диагностирующего параметра.

3. Методические рекомендации по эксплуатационному контролю состояния изоляции и прогнозированию ресурса обмоток электродвигателей по графическим зависимостям с учетом эксплуатационных факторов сельскохозяйственного производства.

4. Экспериментальные образцы: прибор для контроля сопротивления изоляции обмоток электродвигателей; испытательный стенд с электромагнитным нагрузочным модулем для исследования эксплуатационных режимов сельскохозяйственных электроприводов; способ и устройство эксплуатационного контроля нагрева и защиты электродвигателей.

5. Результаты научных исследований и разработок по совершенствованию системы эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве приняты для использования в работе Торгово-сервисного объединения ОАО «Росагроснаб», использованы при обосновании дополнений и уточнений Системы ТОРЭСх, а также использованы в учебном процессе энергетического и инженерно-педагогического факультетов МГАУ им. В.П. Горячкина.

Апробация результатов исследований. Основные положения диссертационной работы доложены, рассмотрены и опубликованы в материалах: 6-й, 7-ой и 8-й Международных научно-технических конференций (май 2008, 2010, 2012 гг., Москва, ГНУ ВИЭСХ); Симпозиума «Электротехника 2010» - 2 Конференция-2006. Среднесрочная программа развития энергетики и электротехники (17-18 мая 2006, Московская обл., ТРАВЭК-ВЭИ); 23-й

Международной межвузовской школе-семинаре “Методы и средства технической диагностики” (Йошкар-Ола, 2006, Марийский ГТУ); *Materialy na konferencje* (25-26 wrzesnia 2007, Warszawa, IVMER); 3-й, 7-й Международной научно-технической конференции (2005, 2009гг. Минск); 6-й, 7-й и 8-й Международной научно-практ. конференции (2009, 2011, 2013гг. Санкт-Петербург); 2-ой Международной научно-практической конференции. Национальный университет биоресурсов и природопользования (2014г. Киев).

Публикация. Результаты исследований и основное содержание диссертации опубликованы в 23 печатных работах, из них 10 публикаций в изданиях Перечня ВАК, 5 патентов РФ, 2 методических рекомендаций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы и приложений. Работа содержит 131 с. основного текста, 30 рис., 13 табл., 127 библ. наим.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, поставлена цель исследований и сформулирована научная новизна, приведены основные положения, выносимые на защиту, указана связь работы с научно-техническими программами.

Глава 1. Анализ системы и стратегий технического обслуживания электрооборудования, методов оценки его технического состояния

Выполнен анализ системы эксплуатации электрооборудования сельскохозяйственных предприятий с выявлением видов отказов, причин высокой аварийности и мероприятий по повышению эффективности использования электрооборудования. Рассмотрены применяемые стратегии обслуживания, дана оценка особенностей их реализации, отмечены достоинства и недостатки. Сформулированы задачи исследования.

Проблемой повышения эксплуатационной надежности и эффективности использования сельских электроустановок занимались многие известные ученые: Будзко И.А., Буторин В.А., Воробьев В.А., Воронин Е.А., Гольдберг О.Д., Данилов В.Н. Ерошенко Г.П., Казимир А.П., Литвин В.И., Мусин А.М., Немировский А.Е., Некрасов А.И., Оськин С.В., Пахомов А.И., Прищеп Л.Г., Пястолов А.А., Русан В.И., Сырых Н.Н., Таранов М.А., Хомутов О.И. и их ученики.

Действующая Система ППРЭСх базируется на усреднённых по отрасли нормативных типовых объёмов работ по обслуживанию и ремонту электродвигателей и другого электрооборудования, периодичности и длительности проведения профилактических мероприятий, номенклатуры и расхода материалов и запасных частей на выполнение операций.

Важной составной частью системы ТО и Р является стратегия технического обслуживания и ремонта, которая в соответствии с ГОСТ 24212-80

представляет собой систему правил назначения и проведения профилактических мероприятий, а также управления техническим состоянием изделия в процессе его эксплуатации. Наиболее изученными и применяемыми в сельском хозяйстве являются следующие стратегии.

Стратегия *послеотказового* технического обслуживания электрооборудования не предусматривает проведения профилактических мероприятий, а замена электрооборудования или его элементов осуществляется лишь после отказа

Стратегия *обслуживания по расписанию* предусматривает проведение через определенные периоды времени принудительного обслуживания изделия независимо от его технического состояния и продолжительности работы после восстановления при отказе.

Стратегия *обслуживания по наработке* предусматривает восстановительные мероприятия либо в заранее запланированный момент с заданной периодичностью, либо в случае отказа, если он произошел раньше этого момента. При такой стратегии профилактические мероприятия выполняют также с постоянной периодичностью, но время работы отсчитывают заново от проведенного мероприятия (аварийного или профилактического).

Каждая из этих рассматриваемых стратегий обслуживания имеет свои особенности применения, а эффективность их использования осуществляется путем сравнения средних удельных затрат на эксплуатацию при их реализации.

Стратегия *обслуживания по состоянию* является наименее изученной и предусматривает проведение восстановительных мероприятий, опираясь на фактическое состояние электроустановок, определяемое регулярно проводимым диагностированием с применением специальных технических средств. Для реализации этой стратегии требуется решение некоторых технических, методических и организационных вопросов.

Диагностика позволяет прогнозировать приближающуюся неисправность в элементах электротехнического устройства и своевременно принимать меры по восстановлению номинальных параметров его основного элемента или узла.

Недостаточно изученными и требующими научного исследования и обоснования для применения в сельском хозяйстве являются вопросы эксплуатации электродвигателей с учетом их технического состояния на основе данных диагностики. При решении этих задач и разработке математической модели использованы труды известных ученых Смирнова Н.Н., Ицковича А.А., Барзиловича Е.Ю., Герцбах И.Б., Соловьева А.Д и др.

Для обоснования и реализации стратегии обслуживания электрооборудования в сельском хозяйстве по его техническому состоянию, снижения материальных и трудовых затрат на эксплуатацию электроустановок проведен анализ существующих методов и технических средств диагностирования электродвигателей. Сформулированы цель и задачи исследования.

Глава 2. Разработать математическую модель и методику обоснования основных параметров стратегии обслуживания электродвигателей по состоянию

Процесс возникновения отказов электрооборудования состоит в накоплении различных повреждений в виде износа, старения и разрегулирования. Поэтому состояние электродвигателя может характеризоваться величиной одного или нескольких основных параметров, которые с достаточной вероятностью могут прогнозировать ожидаемый отказ. Эта информация использована для планирования профилактических мероприятий при реализации стратегии обслуживания электродвигателей по их фактическому состоянию в условиях сельскохозяйственного производства, являющейся наиболее эффективной, так как не выполняют лишних ремонтов, сборок и разборок электротехнического изделия, а также более полно используют его ресурс.

На рисунке 1 дано схематическое представление процесса обслуживания электрооборудования по состоянию.

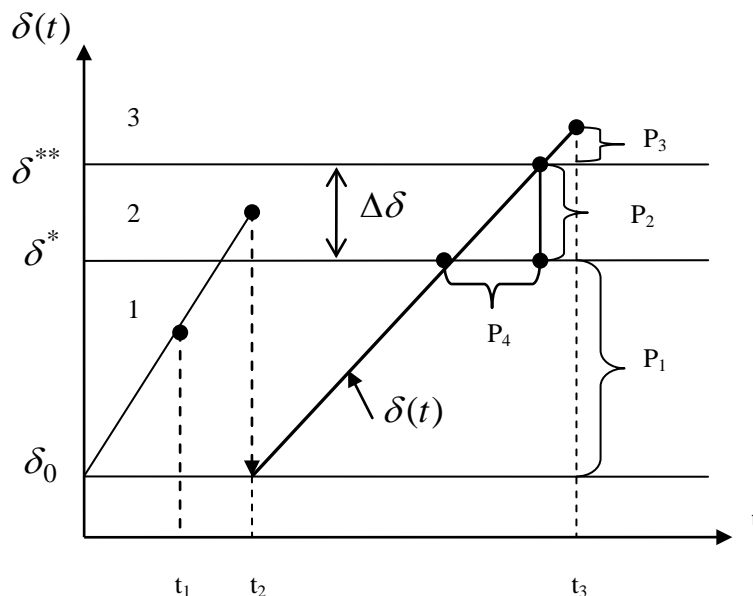


Рисунок 1. Схема процесса обслуживания электрооборудования по состоянию

Согласно рисунка 1: $\delta(t)$ - случайный процесс изменения диагностирующего параметра δ , информирующего о состоянии изделия и его приближение к отказу с течением времени t ; δ^{**} - предельный уровень параметра; δ^* - предкритический (предотказовый) уровень, при котором интервал $\Delta\delta = \delta^{**} - \delta^*$ определяет упреждающий допуск, зависящий от периодичности $\tau = t_2 - t_1$ проверки технического состояния изделия (диагностики); δ_0 - начальное (номинальное) значение диагностирующего параметра.

Области изменения значений параметра δ рассматриваемого изделия соответствуют состояниям:

$\delta_0 - \delta^*$ - работоспособное (исправное) - состояние 1;

$\delta^* - \delta^{**}$ - профилактическое воздействие - состояние 2;

$\delta^{**} - \infty$ - неработоспособное (отказовое) - состояние 3;

t_1, t_2, t_3 – моменты первой, второй и третьей проверок состояния изделия.

В моменты времени t_1, t_2, t_3 случайный процесс $\delta(t)$ соответствует:

исправному (работоспособному) состоянию с вероятностью

$$P_1 = P\{\delta_0 < \delta(t) < \delta^*\},$$

состоянию профилактических воздействий с вероятностью

$$P_2 = P\{\delta^* < \delta(t_2) < \delta^{**}\},$$

неработоспособному (отказавшему) состоянию с вероятностью

$$P_3 = P\{\delta^{**} < \delta(t_3) < \infty\}.$$

Изделие, подлежащее эксплуатации по стратегии обслуживания и ремонта по состоянию имеет контролируемый (диагностирующий) параметр $\delta(t)$, который должен удовлетворять следующим требованиям:

- параметр должен зависеть от времени и характеризовать “внутреннее” состояние объекта;

- отказ устройства наступает либо при выходе значений параметра в “недопустимую” область, либо есть некоторое состояние системы (отказ), вероятность перехода в которое зависит от значений параметра, то есть по величине этого параметра помимо состояний “система новая” и “система отказала” можно определить ряд промежуточных состояний системы;

- параметр должен быть доступен непрерывному или периодическому контролю;

- случайный процесс изменения параметра во времени должен быть монотонный с вероятностной закономерностью его изменения, как случайного процесса, и стохастической связью между значениями параметра и вероятностью отказа изделия.

При одномерном случайном процессе случайная функция $F(t, \delta)$ зависит от двух аргументов: от значения времени t , для которого берется сечение процесса и от значения δ , меньше которого должна быть случайная величина $\delta(t)$:

$$F(t, \delta) = P\{\delta(t) < \delta\}. \quad (1)$$

При большом количестве эксплуатационных факторов, оказывающих влияние на величину параметров случайного процесса закон распределения отказов для стареющих изделий будет нормальным:

$$F(t, \delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\delta(t)} \int_0^\delta \exp\left(-\frac{[\delta - m_\delta(t)]^2}{2\sigma_\delta^2(t)}\right) d\delta; \quad (2)$$

$$f(t, \delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\delta}(t)} \exp\left(-\frac{[\delta - m_{\delta}(t)]^2}{2\sigma_{\delta}^2(t)}\right), \quad (3)$$

где $m_{\delta}(t)$ - математическое ожидание скорости изменения параметра δ ; $\sigma_{\delta}^2(t)$ - дисперсия параметра δ ; $\sigma_{\delta}(t)$ - среднее квадратическое отклонение параметра δ от среднего $m_{\delta}(t)$; $f(t)$ - плотность распределения времени работы изделия до отказа.

Поскольку закон распределения процесса не меняется во времени, а меняется лишь его числовые характеристики, то возможна его линейная аппроксимация. Математическое ожидание аппроксимируется функциями вида:

$$\begin{aligned} m_{\delta}(t) &= m_a + m_{\epsilon}t, \\ \sigma_{\delta}(t) &= \sigma_a + \sigma_{\epsilon}t, \end{aligned} \quad (4)$$

где m_a и m_{ϵ} - коэффициенты аппроксимации математического ожидания; σ_a и σ_{ϵ} - коэффициенты аппроксимации среднего квадратического отклонения.

На рисунке 1 для определения связи периодичности проверок и упреждающего допуска на контролируемый параметр при соблюдении уровня безотказности, через P обозначены вероятности соответствующих случайных величин в виде законов распределения на указанных отрезках прямых. Исходя из принципа минимальной возможности отказа $P_2=P_4$, используя уравнение (3) получим известное выражение:

$$\int_{t_1}^{t_2} f_1(t_1, \delta^*) dt = \int_{\delta^*}^{\delta^{**}} f_2(t_2, \delta^{**}) d\delta. \quad (5)$$

Подставив в (5) выражения (4), после преобразований получим

$$\frac{\delta^* - m_a - m_{\epsilon}t_1}{\sigma_a + \sigma_{\epsilon}t_1} = \frac{\delta^{**} - m_a - m_{\epsilon}t_2}{\sigma_a + \sigma_{\epsilon}t_2}. \quad (6)$$

Выражение (6) является обобщенной математической моделью, устанавливающей для монотонного случайного процесса $\delta(t)$ с заданными моментом проведения первой проверки t_1 , предельным значением параметра δ^* , связь с очередным сроком диагностирования t_2 и наименьшим предотказовым значением параметра δ^* .

Из выражения (6) после преобразования также получим:

$$\delta^* = \frac{\delta^{**}(\sigma_a + \sigma_\varepsilon \cdot t_1) - (m_\varepsilon \sigma_a - m_a \sigma_\varepsilon) \cdot \tau}{\sigma_a + \sigma_\varepsilon t_1 + \sigma_\varepsilon \tau}; \quad (7)$$

$$\Delta\delta = \delta^{**} - \delta^* = \frac{\left[(\delta^{**} - m_a) \sigma_\varepsilon + m_\varepsilon \cdot \sigma_a \right] \tau}{\sigma_a + \sigma_\varepsilon t_1 + \sigma_\varepsilon \tau}.$$

Момент первой проверки t_1 , определяется из условия заданного уровня вероятности безотказной работы $\bar{F}(t_1)$

$$t_1 = \frac{\eta^{**} - m_a - U_{1-\varepsilon} \cdot \sigma_a}{m_\varepsilon + U_{1-\varepsilon} \cdot \sigma_\varepsilon}, \quad (8)$$

где $U_{1-\varepsilon}$ - квантиль нормального распределения, соответствующая вероятности $\bar{F}(t_1)$, а ε - допустимая погрешность.

Разработанная математическая модель обоснования применения стратегии обслуживания электрооборудования по его фактическому состоянию с использованием обоснованных диагностических параметров, позволяет оценивать предотказовое состояние изделия, величину упреждающего допуска на диагностический параметр при различной периодичности диагностирования и заданном уровне безотказности.

Полученная общая математическая модель обслуживания электрооборудования по состоянию включает также, как частный случай, послеотказовую стратегию при $\delta^* = \delta^{**}$ и планово-предупредительную стратегию по наработке при $\delta^* = 0$, что позволяет их уточнять и совершенствовать в процессе практического применения.

Разработанная математическая модель применена для практических расчетов при определении параметров стратегии обслуживания электродвигателя по его техническому состоянию с использованием характеристик надежности подшипникового узла, основным параметром которого является величина радиального зазора. При превышении радиального зазора выше допустимого (конструктивный параметр) происходит выход из строя электродвигателя. Изменение величины радиального зазора при работе электродвигателя удовлетворяет требованиям к диагностирующим параметрам, и возможно его использование при применении стратегии обслуживания по состоянию.

Рассмотрено применение полученной математической модели к определению параметров стратегии обслуживания по состоянию с использованием характеристик надежности подшипникового узла электродвигателя 4А160, 3000 об/мин., 15 кВт, подшипник 6 – 310, радиальный зазор δ которого является диагностирующим параметром. При среднем

значении расчетного срока службы электродвигателя по наработке $\bar{T}=12000$ ч (или 16,7 мес.), $\delta_n = 0,015$ мм, $\delta_{np} = 0,1$ мм, скорость изнашивания подшипника происходит по нормальному закону с параметрами: $m_a = 0,015$ мм, $\sigma_a = 0,005$ мм, $m_g = 0,00509$ мм/мес. $\sigma_g = 0,00170$ мм/мес. Среднее квадратическое отклонение скорости изнашивания подшипника σ_g определено (пессимистическая оценка) из правил “трех сигма” для нормального закона. Исходя из изложенных выше условий, принимаем $\bar{F}(t_1)=0,998$, $U_{1-\varepsilon}=2,9$.

Для проведения расчетов по выражению (2) использованы таблицы функции Лапласа для нормального закона распределения нормированной случайной величины. Результаты расчета момента первой проверки t_1 , по выражению (7) для различных значений средней наработки \bar{T}_0 за срок службы электродвигателя при $U_{1-\varepsilon} = 2,9$ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчета момента первой проверки, t_1 ($U_{1-\varepsilon} = 2,9$)

Общая наработка \bar{T} , час/мес.	m_g , мм/мес.	σ_g , мм/мес.	t_1 , мес.
13000 / 18,06	0,0047	0,00157	9,19
12500 / 17,36	0,0049	0,00163	8,83
12000 / 16,67	0,0051	0,00170	8,47
11500 / 15,97	0,0053	0,00177	8,15
11000 / 15,28	0,0057	0,00185	7,68

Анализируя результаты расчетов в таблице 1. и округляя до стандартных периодичностей в сторону уменьшения, получим $t_1=6$ мес.

Из формулы (7) и таблицы 1 следует, что момент первой проверки для подшипника при прочих равных условиях непосредственно зависит от принимаемой вероятности безотказной работы $\bar{F}(t_1)$, которая должна соответствовать максимальному значению за время t_1 (близкой к единице - 0,998) и квантили $U_{1-\varepsilon}$ (близкой к трем - 2,9).

Кроме того, очередные проверки (например, в момент времени t_2) выполняются на подшипниках, параметры, которых уже отличаются от таковых для новых изделий. Поэтому дальнейшую периодичность контроля с профилактическими восстановлениями параметра целесообразно выполнять за время $t_2 < t_1$, которое следует округлять до ближайшего меньшего установленного стандартного значения, например, найденного по экономическим соображениям или рекомендуемого Системой ППРЭсх.

При принятии допустимой вероятности отказа подшипника до момента времени t_2 , с учетом периодичности проверок τ , следует иметь в виду, что вероятность безотказной работы для момента времени $t_2 = t_1 + \tau_1$ должна быть также достаточна для его практического использования в работе, например, не менее 0,90 - 0,95.

В рассматриваемой обобщенной модели начальное значение зазора подшипника является случайной величиной, что неизбежно требует привлечения дополнительной исходной информации. Поэтому ограничимся наиболее часто встречающимся на практике случаем детерминированного значения начального параметра δ_0 , при котором $\sigma_a = 0$. В этом случае формула для δ^* и $F(t, \delta)$ принимают вид:

$$\delta^* = \frac{\delta^{**} \cdot t_1 + m_a \cdot \tau}{t_1 + \tau}; \quad (9)$$

$$F(t, \delta) = \Phi \left(\frac{\delta^* - m_a - m_g t}{\sigma_g t} \right), \quad (10)$$

где Φ – функция Лапласа.

Наименьшее предотказовое значение параметра δ^* в соответствии с формулой (9) будет:

$$\delta^* = \frac{0,00102 + 0,0000255 \tau}{0,0102 + 0,0017 \tau}. \quad (11)$$

Определим вероятность отказа подшипника и его вероятность безотказной работы за время $t_2 = t_1 + \tau$, используя формулу (10):

$$F(t_2) = \Phi \left(\frac{0,085 - 0,00509 t_2}{0,0017 t_2} \right), \quad \bar{F}(t_2) = 1 - F(t_2). \quad (12)$$

Вычисленные по формуле (11) предотказовые значения параметра δ^* при различных периодичностях τ контроля параметра, а также вычисленные по формуле (12) вероятности отказа $F(t_2)$ для различных значений t_2 и вероятности безотказной работы $\bar{F}(t_2)$ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры обслуживания подшипникового узла электродвигателя по состоянию

τ мес.	t_2 мес.	δ^* мм	$\Delta\delta$ мм	$F(t_2)$	$\bar{F}(t_2)$	Примечание
0	6	0,10	0	0	1,0	$\delta^{**} = 0,1$ мм $\bar{F}(t_1) = 0,998$ $t_1 = 6$ мес. $T = 16,7$ мес
2	8	0,079	0,021	0,0006	0,9994	
4	10	0,066	0,034	0,0223	0,9777	
6	12	0,0575	0,0425	0,121	0,879	
8	14	0,0514	0,0482	0,282	0,718	
10	16	0,0469	0,0531	0,448	0,552	

На рисунке 2 приведены зависимости предотказового значения параметра δ^* и упреждающего допуска $\Delta\delta$ от периодичности проверок τ .

На рисунке 3 приведены зависимости вероятности безотказной работы $\bar{F}(t_2)$ и вероятности отказа $F(t_2)$ от момента времени t_2 .

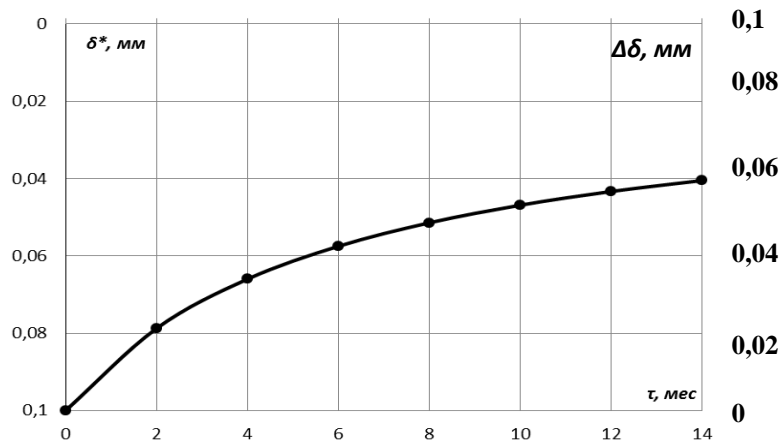


Рисунок 2. Совмещенные зависимости предотказового параметра δ^* и упреждающего допуска $\Delta\delta$ от периодичности проверок τ

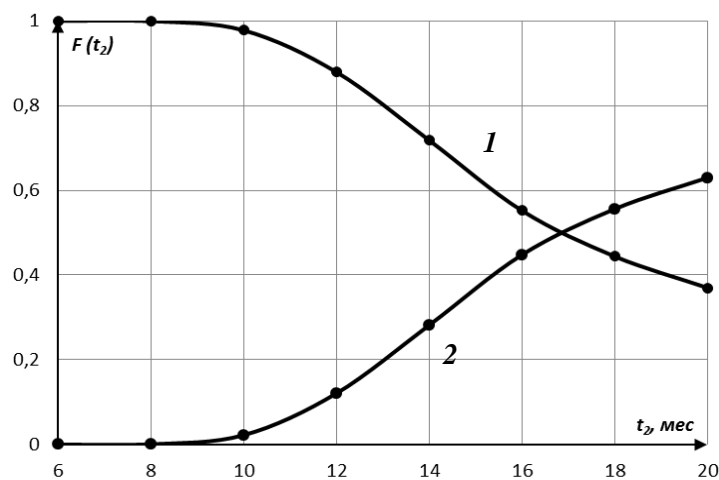


Рисунок 3. Зависимости: 1- вероятности безотказной работы $\bar{F}(t_2)$; 2 - вероятности отказа $F(t_2)$ от времени проведения проверок $t_2 = t_1 + \tau$

Построенные зависимости позволяют определять основные параметры стратегии обслуживания по состоянию при различной периодичности τ проведения профилактического контроля подшипникового узла электродвигателя и заданного времени первого профилактического контроля t_1 , исходя из максимально допустимой вероятности отказа.

Аналогичные зависимости можно построить для других типов подшипников электродвигателей, используемых в сельскохозяйственном производстве. Для практического применения и удобства пользования такие зависимости могут быть сгруппированы по начальным δ_n и предельно допустимым δ_{no} величинам радиального зазора. Это позволит иметь не только качественные, но и количественные показатели технического состояния подшипников для принятия своевременных предупредительных мер по их техобслуживанию или замене.

При обслуживании электродвигателей по состоянию с учетом данных диагностирования значительно увеличивается срок службы и использование его ресурса. Оценка эффективности применения стратегии обслуживания электродвигателей по состоянию в сравнении с планово-предупредительной

стратегией его обслуживания по календарной наработке, показывает, что при $\bar{T} = 16,7$ мес., $t_2 = t_1 + \tau = 12$ мес. одинаковая вероятность отказа равная $F(t) = 0,121$ возникает в данном случае при $t = 9,9$ мес., т.е. на 2,1 мес. раньше. Это говорит о том, что при обслуживании по состоянию расчетное значение использования ресурса подшипника электродвигателя увеличивается на 21,2 %.

Проведены экспериментальные исследования технического состояния подшипников электродвигателей в условиях эксплуатации с использованием прибора ФВД АЛ-2-3МТ (разработчик з-д “Промприбор” г. Екатеринбург). Прибор состоит из измерительного блока и вибропреобразователя /датчика/, соединяемого с измерительным блоком на период работы гибким кабелем. На рисунке 4 представлены моменты диагностики электродвигателей магнитным и стержневым вибродатчиками.

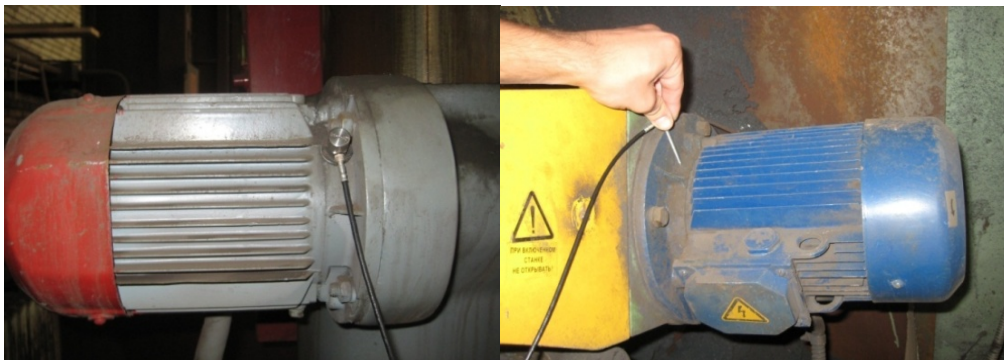


Рисунок 4. Диагностика электродвигателей магнитным и стержневым вибродатчиками

При помощи указанного прибора проведена диагностическая проверка состояния подшипников 23 электродвигателей мощностью 1,5-14 кВт станков и другого технологического оборудования. Составлен протокол испытаний и произведена функциональная оценка технического состояния подшипниковых узлов приводных электродвигателей. Полученная информация о состоянии подшипниковых узлов приводных электродвигателей, принята к использованию в работе эксплуатационной службой экспериментального производства.

Для рассматриваемого примера с подшипником 6-310 электродвигателя 4А160, 3000 об/мин, 15 кВт составлена таблице 3 и построен график соответствия радиального зазора подшипника с делениями индикатора прибора, приведенный на рисунке 5.

Таблица 3

Взаимосвязь величины радиального зазора δ и показаний прибора с делениями индикатора

Величина зазор δ , мм,	0,015-0,05	0,05-0,07	0,07-0,10	$\delta^{**} = 0,1$
N, число делений	0-10	10-17	17-25	$\delta^* = 0,07$ мм $\Delta\delta = 0,03$
состояние подшипника	Хорошее и нормальное	Средний износ	Сильный износ - отказ	Подшипник 6-310

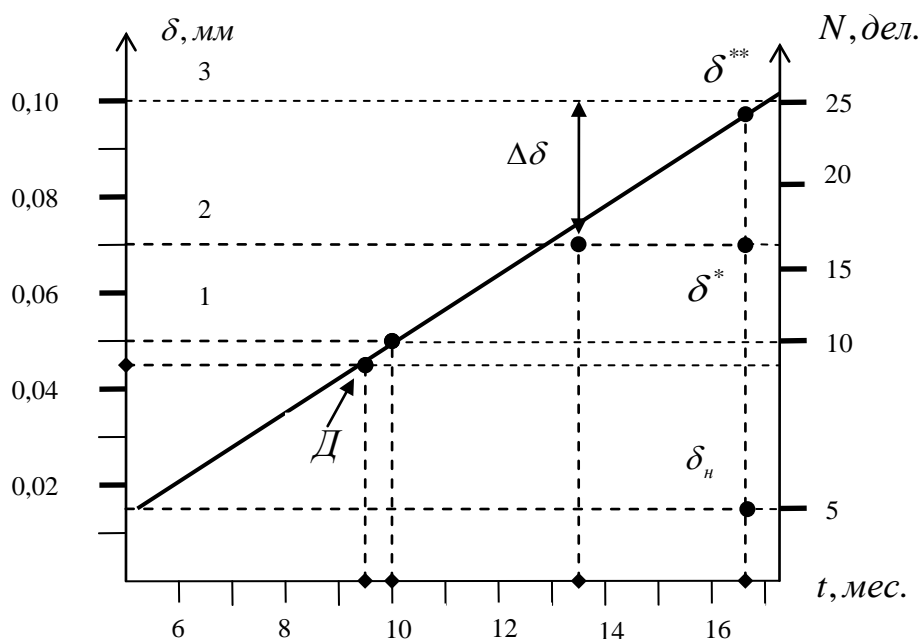


Рисунок 5. График зависимости радиального зазора δ подшипника 6-310 от показаний стрелочного индикатора прибора ФВД АЛ-4-МТ

Установлена взаимосвязь величины показаний в делениях стрелочного индикатора прибора с полученными расчетными значениями величины радиального зазора подшипника. В соответствии с рисунком 5 и таблицей 3 для данного подшипника имеем, что:

- “хорошее и нормальное состояние” соответствует радиальному зазору $\delta = 0,015 - 0,05 \text{ мм}$, делениям шкалы 0-10 единиц;
- “средний износ” соответствует радиальному зазору $\delta = 0,05 - 0,07 \text{ мм}$, делениям 10-17 единиц;
- “сильный износ, отказ” соответствует радиальному зазору $\delta = 0,07 - 0,1 \text{ мм}$, делениям 17-25 единицам шкалы прибора.

Рассматриваемый нами подшипник 6-310 электродвигателя 15 кВт, является идентичным по типу подшипнику и радиальному зазору электродвигателя 14 кВт, установленного на сварочном агрегате и прошедшему диагностическую проверку. Измеренное значение его радиального зазора составляет 8 делений, и согласно таблицы 1 и графика на рисунке 3, равно 0,044 мм, что соответствует износу за 9,5 мес. непрерывной работы и говорит о хорошем состоянии подшипника (точка Д на рисунке 5). То есть, на основании полученных путем измерений показаниям прибора, сравнивая их с построенной зависимостью, можно также спрогнозировать время последующей диагностической проверки и определить периодичность её проведения. Диагностические проверки радиального зазора подшипников следует совмещать со временем проведения технического обслуживания электродвигателей.

Глава 3. Разработать новые средства, способы и практические рекомендации по контролю технического состояния электродвигателей

Для контроля сопротивления изоляции обмоток электродвигателей, в процессе их эксплуатации разработано и изготовлено устройство УКИ-5, позволяющее осуществлять периодический контроль сопротивления изоляции обмотки тестовым напряжением 500 В постоянного тока. Функциональная блок-схема устройства содержит высоковольтный блок, преобразователь, измерительный блок с компаратором и световыми индикаторами на светодиодах по пяти диапазонам фиксированных значений сопротивления изоляции 0,5 - 30 Мом. В условиях реальной эксплуатации для сельского электрика не всегда требуется знать точное значение сопротивления изоляции электроустановок, а вполне достаточной является информация о том, на каком уровне в известных пределах находится сопротивление изоляции, и не снизилось ли его значение ниже допустимых 0,5 МОм. Разработанное устройство дает такую информацию, а отсутствие точной и сложной измерительной системы значительно упрощает конструкцию устройства, снижает его массогабаритные показатели и стоимость. Применение разработанного устройства позволит сельским электромонтерам в эксплуатационных условиях с достаточной точностью осуществлять текущий контроль сопротивления изоляции, своевременно производить замену с последующей сушкой или ремонтом электрооборудования, сопротивление изоляции обмоток которого достигло значения ниже 0,5 МОм, упреждая их полный выход из строя, а также сократить время простоев технологического оборудования, уменьшить связанные с этим ущербы, снизить аварийность сельских электроустановок и повысить надежность работы электрооборудования.

Разработан и изготовлен испытательный стенд электромагнитным нагрузочным модулем для исследования эксплуатационных режимов электродвигателей и систем их защиты. Стенд обеспечивает возможность создавать для электродвигателя различную нагрузку и воспроизводить основные аварийные режимы, возникающие при эксплуатации электродвигателей: перегрузка, неполнофазный режим, работа при пониженном и несимметричном напряжении, а также осуществлять настройку и регулировку тепловых реле и других средств защиты, проводить износные испытания. Вертикальный щит стенда с измерительными и коммутирующими приборами выполнен съемным, снабжен кабельными разъемами, что дает возможность применять его для проведения исследований электроприводов с выездом на объекты сельскохозяйственного производства. Нагрузочная часть стенда состоит из испытуемого асинхронного электродвигателя и нагрузочной машины, момент сопротивления которой регулируется путем изменения силы притяжения электромагнитами стального диска-маховика, являющегося частью их общего магнитопровода, и определяется указателем по специальной шкале. Измерение частоты вращения осуществляется при помощи тахогенератора, а

величина питающего электродвигатель напряжения регулируется трехфазным трансформатором или частотным преобразователем.

Разработанный испытательный стенд значительно расширяет функциональные возможности аналогичных установок, отдельно взятых приборов и при значительно меньшей стоимости существующих современных измерительных комплексов позволяет осуществить выполнение ряда задач по оценке и применению новых типов защит. Стенд может быть использован в хозяйствах по настройке и регулировке устройств защиты перед их установкой и вводом в действие.

Разработан способ и устройство эксплуатационного контроля нагрева и защиты электродвигателей. Способ основан на измерении и контроле температуры корпуса электродвигателя в зоне гнезда рым-болта и установлении количественной связи между фактической температурой нагрева обмотки $T_{обм}$ и температурой нагрева корпуса $T_{корп}$ электродвигателя в непосредственной близости от обмотки. Здесь нет обдувающего движения потока воздуха, воздействующего на показания термодатчика. Установлена зависимость соотношения температур и определено значение коэффициента $K_T = K_{обм}/K_{корп} = 1,4-1,7$. Измеренное значение температуры корпуса электродвигателя $T_{корп}$ умножают на соответствующее значение K_T и получают фактическое значения температуры нагрева обмотки. Вворачиваемое в гнездо рым-болта устройство удобно применять для визуального и звукового контроля обслуживающим персоналом степени нагрева электродвигателей. Может быть также эффективным использование устройства с его действием на отключение. Постоянно имеющаяся информация о температурном состоянии обмоток статора электродвигателей позволяет персоналу своевременно принимать необходимые меры по устранению аварийных ситуаций и предотвращению преждевременного выхода электродвигателя из строя. В сельскохозяйственном производстве устройство наиболее целесообразно применять для контроля относительно мощных электродвигателей, задействованных в технологических процессах, не допускающих внезапных перерывов и связанных с потерей продукции и большими материальными ущербами.

Разработан новый способ эксплуатационного контроля состояния изоляции и прогнозирования ресурса обмоток электродвигателей по графическим зависимостям, которые построены на основании выявленных закономерностей по полученным эмпирическим уравнениям, путем определения коэффициентов этих уравнений, для заданного сочетания эксплуатационных факторов: температуры, влажности, концентрации в воздухе агрессивных примесей и числа пусков электродвигателей в сутки, исходя из первоначальной величины сопротивления изоляции. По этим графическим зависимостям для известного сочетания эксплуатационных факторов определяют в процессе практической эксплуатации ожидаемое сопротивление изоляции и ресурс обмоток электродвигателей на данный момент времени, на основании которых принимают решение о продолжении использования в

работе, проведении мероприятий по техобслуживанию, ремонту или замене электродвигателей.

На рис.6 представлена в общем виде зависимость для определения величины сопротивления изоляции и прогнозирования ресурса обмоток в процессе эксплуатации электродвигателей.

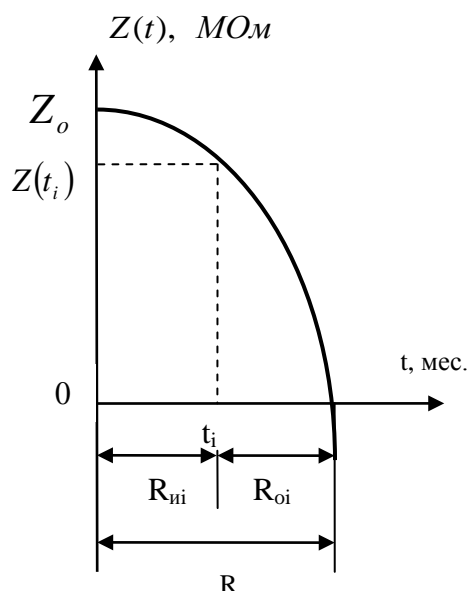


Рисунок 6. Зависимость для определения сопротивления изоляции и прогнозирования ресурса обмоток электродвигателей (R – полный, $R_{иi}$ – использованный, R_{oi} – остаточный ресурс)

По результатам исследований разработаны методические рекомендации по прогнозированию и контролю технического состояния электродвигателей в сельскохозяйственном производстве. В рекомендациях рассмотрены основные требования к изоляции и подшипниковым узлам электродвигателей, предложены методы прогнозирования текущих значений сопротивления изоляции и величины зазоров в подшипниковых узлах, их полного и остаточного ресурсов для разных сочетаний эксплуатационных факторов; указаны максимально допустимые и предельные зазоры в подшипниках основной номенклатуры электродвигателей; приводятся справочные таблицы, графики и формулы для расчета и прогнозирования технического состояния электродвигателей; даны предложения по совершенствованию эксплуатации электродвигателей.

Представлены результаты расчета показателей эффективности применения выполненных исследований и разработок. Расчеты выполнены для среднего в сельском хозяйстве электродвигателя мощностью 5,5 кВт, 1500 об/мин. Годовой экономический эффект от применения стратегии технического обслуживания по состоянию включает экономию средств за счет снижения трудозатрат и аварийности электродвигателей и составляет 134,655 руб. на одно сельхозпредприятие с парком 300 электродвигателей.

Основные выводы и результаты

1. Одним из направлений повышения эффективности использования электродвигателей в сельскохозяйственном производстве является совершенствование системы их эксплуатации путем разработки и внедрения стратегии обслуживания по фактическому состоянию с обоснованием необходимых условий и предпосылок для её реализации с использованием диагностирующего параметра.

2. Для реализации стратегии обслуживания по состоянию разработана математическая модель обоснования основных её параметров с использованием монотонного случайного процесса и значения диагностического параметра с тремя дискретными состояниями изделия (работоспособном, состоянием профилактических воздействий и отказовом) и непрерывным временем.

3. Предложенная модель позволяет выявлять предотказовое состояние диагностического параметра (δ^*) и упреждающего допуска на диагностический параметр ($\Delta\delta = \delta^{**} - \delta^*$), который создает запас работоспособности, обеспечивающий при периодическом контроле с профилактическими мероприятиями безотказную работу подшипника до очередной проверки.

4. Разработана методика расчета основных параметров стратегии обслуживания электродвигателей по состоянию с определением показателей надежности, зависимости предотказового значения диагностирующего параметра и упреждающего допуска от периодичности диагностирующих проверок при использовании в качестве диагностирующего параметра радиального зазора подшипников электродвигателя. Получены следующие параметры обслуживания: $\bar{F}(t_1) = 0,998$, $\bar{F}(t_2) = 0,879$, $\delta^* = 0,0575$ мм, $\Delta\delta = 0,0425$ мм, $t_1 = 6$ мес., $\tau = 6$ мес., $t_2 = 12$ мес. (табл. 2).

Установлено, что при обслуживании по состоянию расчетное значение использования ресурса подшипника электродвигателя увеличивается на 21,2 %.

5. Для совершенствования технической оснащенности электротехнических служб сельхозпредприятий и обеспечения эксплуатационной надежности, используемых электродвигателей разработаны: устройство для контроля сопротивления изоляции обмоток электродвигателей в процессе их эксплуатации; испытательный стенд с электромагнитным нагрузочным модулем для исследования эксплуатационных режимов сельскохозяйственных электроприводов; способ и устройство эксплуатационного контроля нагрева и защиты электродвигателей.

6. Предложен новый метод эксплуатационного контроля состояния изоляции и прогнозирования ресурса обмоток электродвигателей по полученным графическим зависимостям, для существующих сочетаний эксплуатационных факторов: температуры, влажности, концентрации в воздухе агрессивных примесей и числа пусков электродвигателей в сутки.

7. Разработаны методические рекомендации по прогнозированию и контролю технического состояния электродвигателей в сельскохозяйственном производстве, в которых представлены основные положения по обслуживанию

электродвигателей с учетом их технического состояния, которые могут использоваться персоналом электротехнических служб в практической деятельности. Новизна выполненных разработок защищена 5 патентами РФ на способы и устройства.

8. Проведена технико-экономическая оценка выполненных исследований и разработок. Годовой экономический эффект включает экономию средств за счет снижения трудозатрат и аварийности электродвигателей и составляет 134 655 руб. на одно сельхозпредприятие с парком 300 электродвигателей.

**Основное содержание диссертации опубликовано
в следующих работах:**

В изданиях перечня ВАК:

1. Сырых Н.Н., Некрасов А.А. Математическая модель обоснования стратегии обслуживания электрооборудования /Техника в сельском хозяйстве, № 3, 2009, с.17-20.

2. Сырых Н.Н., Некрасов А.А. Диагностирование электродвигателя по радиальному зазору подшипника / Механизация и электрификация сельского хозяйства, №1, 2012, с. 16-18.

3. Некрасов А.И., Сырых Н.Н., Некрасов А.А. Методика обоснования периодичности выполнения профилактических мероприятий при обслуживании электрооборудования /Техника в сельском хозяйстве, № 2, 2007, с. 10-13.

4. Сырых Н.Н., Некрасов А.И., Некрасов А.А. Методика применения диагностирующего параметра при стратегии обслуживания электродвигателей по состоянию /Ползуновский вестник, №2/2, 2011, с. 144-149.

5. Некрасов А.А. Диагностика подшипников электродвигателей / Механизация и электрификация сельского хозяйства, №3, 2013, с. 15-17.

6. Борисов Ю.С., Некрасов А.А., Марчевский С.В. Подшипниковый узел электродвигателей /Сельский механизатор, №6, 2012, с. 29-30.

7. Некрасов А.И., Борисов Ю.С., Некрасов А.А., Ефимов А.В. Совершенствование контроля технического состояния асинхронных электродвигателей / Ползуновский вестник, №2/2, 2011, с. 151-154.

8. Борисов Ю.С., Некрасов А.А., Марчевский С.В. Подшипники электродвигателей / Сельский механизатор, 2012, №9, с. 28-29.

9. Некрасов А.И., Сырых Н.Н., Юферев Л.Ю., Некрасов А.А., Сопротивление изоляции обмоток двигателей/ Сельский механизатор, 2003, №12, с.32.

10. Борисов Ю.С., Некрасов А.А. Прогнозирование сопротивления и ресурса изоляции обмоток. / Техника в сельском хозяйстве -2010, №3, с. 10-13.

Патенты:

11. Патент РФ № 92544. Устройство контроля состояния изоляции электрооборудования /Некрасов А.А., Сырых Н.Н., Юферев Л.Ю. и др. // БИ. 2010. №8.

12. Патент РФ № 2442995. Стенд с электромагнитным нагрузочным модулем для исследования и испытания электроприводов / Некрасов А.И., Некрасов А.А., Сырых Н.Н. и др. // БИ. 2012. №5.

13. Патент РФ № 2 473160. Способ эксплуатационного контроля состояния изоляции и прогнозирования ресурса обмоток электродвигателей/ Некрасов А.И., Борисов Ю.С., Некрасов А.А. // БИ. 2013. № 24.

14. Патент РФ на полезную модель № 90942 / Некрасов А.И., Некрасов А.А., Борисов Ю.С., Сырых Н.Н. /Устройство эксплуатационного контроля нагрева и защиты электродвигателей // БИ. 2010. № 2.

15. Патент РФ № 2 409 884. Некрасов А.И., Некрасов А.А., Борисов Ю.С. и др. / Способ эксплуатационного контроля нагрева и защиты электродвигателей // БИ. 2011. № 2.

В других изданиях:

16. Борисов Ю.С., Некрасов А.И., Некрасов А.А. Методические рекомендации по прогнозированию и контролю технического состояния электродвигателей в сельскохозяйственном производстве. - М.: ГНУ ВИЭСХ, 2011. -108 с.

17. Борисов Ю.С., Некрасов А.И., Некрасов А.А.(под ред. академика Стребкова Д.С.). Методические рекомендации по определению остаточного ресурса электрооборудования в сельском хозяйстве. – М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2006. – 48с.

18. Сырых Н.Н., Некрасов А.А. Разработка ресурсосберегающих стратегий технического обслуживания электрооборудования в сельском хозяйстве. Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Труды 5-й Международной научно-технической конференции 16-17 мая 2006. Часть 3. – М., 2006, ГНУ ВИЭСХ, с. 342-350.

19. Некрасов А.А. Диагностическая проверка технического состояния подшипников электродвигателей. Вестник ГНУ ВИЭСХ, № 1. -М.:2013, с.62-67.

20. Сырых Н.Н., Некрасов А.И., Некрасов А.А. Обоснование стратегии обслуживания электрооборудования по состоянию в сельском хозяйстве. 14 Międzynarodowa Konferencja Naukowa. «Problemy intensyfikacji produkcji zwierzecej z uwzględnieniem ochrony środowiska i standardów UE». -Warszawa, IBMER, 2008, str.47-57.

21. A.Nekrasov, Yu. Borisov, A. Nekrasov. Operational control of the insulation state and forecasting of service life of electric motor windings. Research in Agricultural Electric Engineering. Vol. 3, 2013, №3. с.112-115.

22. Некрасов А.А. Оценка экономического ущерба от отказов электродвигателей в животноводстве. Материалы 3-й Международной научно-технической конференции. - Минск, 2005, с.117-121.

23. Nekrasov A.A. Techniczna obsługa rolniczych obiektów energetycznych. Problemy intensyfikacji produkcji zwierzecej z uwzględnieniem ochrony środowiska i standardów UE. – Warszawa, IBMER, 2007, str. 280-284.