

На правах рукописи

Рыбаков Валерий Алексеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТА
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ
НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Барнаул 2007

Работа выполнена в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Станислав Олегович Хомутов

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Александр Андреевич Сошников,
- кандидат технических наук, профессор
Юрий Александрович Меновщиков

Ведущая организация Алтайский государственный аграрный университет

Защита диссертации состоится «23» мая 2007 года в 13⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д212.004.02 при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, факс (3852) 36-71-29.
www.astu.secna.ru, e-mail: valera2281@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Автореферат разослан «23» апреля 2007 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Л. В. Куликова

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Совершенствование процесса агропромышленного производства невозможно без рациональной организации всех его элементов, в том числе системы ремонта электродвигателей (ЭД), являющихся основным видом электрооборудования в сельском хозяйстве. Главными факторами снижения затрат при обеспечении требуемой надежности работы электрических двигателей являются объемы и сроки их ремонта. На сегодняшний день для определения значений данных факторов используется разработанная во времена СССР система планово-предупредительного ремонта электрооборудования в сельском хозяйстве (ППРЭСх), применение которой в современных условиях является неэффективным по следующим причинам:

- планирование длительностей межремонтных периодов ведется на основе нормативов заводов-изготовителей, при этом отсутствует учет текущего состояния электродвигателей и условий их эксплуатации;

- интенсивность отказов, производительность ремонтной базы и экономическое состояние хозяйства рассматриваются отдельно, что не позволяет прогнозировать полноту выполнения разработанных ремонтных мероприятий;

- высокие цены на горюче-смазочные материалы усложняют транспортировку вышедших из строя электродвигателей на значительные расстояния и вынуждают хозяйства обращаться к близко расположенным мелким мастерским, нормы технологического процесса на которых зачастую не соблюдаются.

Наиболее эффективным с экономической точки зрения является ремонт ЭД непосредственно перед накоплением в нем серьезных дефектов, делающих последующую его эксплуатацию невозможной, либо ведущих к ремонтнепригодности. Выбор данного момента времени невозможен без использования методов прогнозирования состояния двигателей. Неполное выполнение запланированных ремонтных мероприятий приводит к значительному повышению количества внезапных отказов и связанных с этим простоев технологического оборудования. Следствием ремонта электродвигателей с несоблюдением технологического процесса является возрастание процента послеремонтного брака, влекущее за собой значительное снижение суммарного остаточного ресурса установленных ЭД.

Все вышесказанное приводит к высоким затратам на эксплуатацию парка электродвигателей предприятиями агропромышленного комплекса (АПК).

Таким образом, существует проблема низкой эффективности ремонта ЭД в сельском хозяйстве и невозможности ее решения путем применения системы ППРЭСх.

Целью настоящей диссертационной работы является совершенствование системы планово-предупредительного ремонта электродвигателей на предприятиях АПК путем введения в ее состав новой методики планирования ремонта ЭД, учитывающей их текущее состояние, а также взаимосвязь между всеми элементами процесса их ремонта.

Объект исследования. Система ремонта электродвигателей на предприятиях АПК.

Предмет исследования состоит в повышении эффективности системы ремонта ЭД путем достижения минимальных длительностей простоев отказавших электродвигателей в ограниченных условиях агропромышленного предприятия.

Основные задачи:

- обосновать целесообразность совершенствования системы планово-предупредительного ремонта электродвигателей в сельском хозяйстве;
- провести анализ методов планирования ремонтов ЭД, исследовать статистику выхода их из строя и связанные с этим убытки на предприятиях сельхозпроизводителей;
- разработать методику комплексного прогнозирования технического состояния электрических двигателей, на основе которого возможно получение данных об интенсивностях их отказов во времени;
- разработать математическую модель системы ремонта ЭД, позволяющую определять показатели процесса их массового обслуживания (ПМО);
- разработать методику оптимизации найденных показателей ПМО, на основе которой возможно создание максимально экономичных графиков ремонтов электродвигателей в сельском хозяйстве;
- создать методику практического применения усовершенствованной системы планово-предупредительного ремонта электрических двигателей в сельском хозяйстве;
- обосновать экономическую эффективность использования усовершенствованной системы ППРЭсх.

Методы исследования

При выполнении работы использовались методы математического моделирования, математической статистики, теории случайных функций и математической теории массового обслуживания, теории оптимизации. Экспериментальная часть исследования выполнена с помощью компьютерного моделирования и натуральных экспериментов.

Научная новизна

- Разработана математическая модель системы ремонта ЭД, устанавливающая взаимосвязь между различными сроками их ремонта и длительностями простоев технологического оборудования предприятия;
- создана методика расчета потребностей агропромышленных предприятий в количестве обслуживающих линий при наличии или отсутствии собственной ремонтной базы;
- предложен способ расчета длительностей ремонтов различных с точки зрения приоритетности электрических двигателей;
- найдена зависимость коэффициентов использования ремонтного оборудования и обслуживающего персонала от интенсивности выходов ЭД из строя;
- предложен способ прогнозирования технического состояния электродвигателей на основе вибрационного метода их диагностики, позволяющий получать данные об интенсивностях их отказов во времени;
- разработана методика оптимизации показателей ПМО.

Практическая значимость. Использование полученной математической модели и современных средств вычислительной техники дало возможность изучить динамику процессов массового обслуживания ЭД в сельском хозяйстве и определить параметры, влияющие на эффективность процесса планирования их ремонта. Разработанная модель выхода из строя и восстановления технических средств производства может быть использована при эксплуатации парка электродвигателей большинства агропромышленных предприятий Алтайского края, а также за его пределами. Созданные методики удобны в использовании, не требуют специальной подготовки персонала. Применение данной системы позволит снять с человека большую часть трудоемкого процесса принятия решений при планировании его ремонта и, тем самым, значительно сократить время на проведение вычислительных операций и эффективность данного процесса.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты работы использованы и внедрены на объектах агропромышленного комплекса Алтайского края. Разработанная методика рекомендована к применению главным управлением сельского хозяйства администрации Алтайского края в качестве эффективной ресурсосберегающей технологии для предприятий АПК. Созданные вероятностные модели процессов выхода из строя и восстановления электрооборудования используются отделами ППР ОАО “Барнаульский станкостроительный завод”, ОАО “Русский хлеб”. Система повышения эффективности процесса ремонта электрооборудования используется в АКГУП “Центральный” Калманского района и совхозе “Санниковский” Первомайского района.

Апробация. Основные положения были доложены и одобрены на IX Всероссийском семинаре “Нейроинформатика и ее приложения” (Красноярск, 2003 г.), IV Всероссийской научно-технической конференции “Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях” (Бийск, 2003 г.), Международной научно-практической конференции “Информационные технологии моделирования и управления” (Воронеж, 2004 г.), III Всероссийской научно-технической конференции “Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике” (Пенза, 2004 г.), Всероссийской конференции аспирантов и студентов по направлению “Энергетика и энергосбережение” (Барнаул, 2005 г.), научно-практической конференции “Молодежь – Барнаулу” (Барнаул, 2005 г.), Всероссийской научно-практической конференции “Экономико-математические методы анализа хозяйственной деятельности” (Пенза, 2006 г.), ежегодных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава АлтГТУ (Барнаул, 2003-2007 гг.).

На защиту выносятся:

- математическая модель системы ремонта ЭД, позволяющая определять показатели процесса их массового обслуживания;
- способ прогнозирования технического состояния электрических двигателей на основе данных вибрационной диагностики;
- методика оптимизации найденных показателей ПМО.

Публикации. По материалам проведенных исследований опубликовано 11 печатных работ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованной литературы, включающего 152 наименования. Работа изложена на 168 страницах машинописного текста, содержит 14 рисунков и 4 таблицы.

Содержание работы

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

В первом разделе приведены результаты анализа современного состояния электрооборудования в АПК, общие сведения об организации процесса ремонта электродвигателей в сельском хозяйстве, факторах, воздействующих на показатели экономичности их работы, методиках управления процессом массового обслуживания.

Проведен анализ действующей системы ППРЭСх. Показано, что применения данной, разработанной во времена СССР, системы в современных условиях является неэффективным из-за ряда присущих этой системе ограничений.

Определено, что большинство существующих систем управления массовым обслуживанием (СМО), разработанных такими учеными как А.Я. Хинчин, В.И. Нейман, М.В. Бурлаков, не могут быть напрямую использованы как системы, позволяющие повысить эффективность ремонта электродвигателей в сельском хозяйстве по следующим причинам:

- использование табличных управляемых дисциплин обслуживания, которые имеют высокую эффективность в ряде прикладных задачах, является неэффективным в условиях АПК из-за высокой сложности их внедрения, связанной с необходимостью проведения большого количества математических вычислений для описания всех технологических процессов;

- аналитические дисциплины массового обслуживания, несмотря на большую универсальность в использовании, имеют ряд существенных ограничений, часто сводящих к нулю эффективность их использования.

В результате проведенного комплексного анализа, сделан вывод о том, что для разработки методики эффективной организации системы ремонта электродвигателей необходимо создание математической модели, позволяющей без значительных затрат описать все, влияющие на данный процесс параметры.

Второй раздел посвящен анализу методов диагностики и прогнозирования остаточного ресурса ЭД, используемых в АПК, с целью получения данных об интенсивностях их отказов во времени.

Техническое состояние электрических двигателей определяется, в первую очередь, допустимыми интервалами изменения значений основных рабочих параметров. Если произошёл выход за эти границы, то либо наступает авария, и двигатель теряет работоспособность, либо создаются дефекты, которые необходимо своевременно выявлять. Во втором разделе приведены основные возможные дефекты ЭД и показано, как их выявить с помощью существующих методов вибродиагностики машин и механизмов, разработанных учеными Балтийского технического центра, г. Санкт-Петербург.

Вибрации в двигателях переменного тока могут вызываться пятью силами электромагнитной природы, имеющими свои собственные частоты:

- первая сила связана с частотой питающей сети F_1 , имеет пик на частоте 50 Гц;

- вторая сила $F_{эм}$ генерирует колебания с частотой проявления электромагнитных процессов в меди и стали электрической машины, имеет пик на частоте 100 Гц, проявляется в вибрации сердечника и обмоток всех машин переменного тока;

– третья связана с частотой вращения электромагнитного поля в зазоре электрической машины и есть частное от деления частоты питающей сети на число пар полюсов статора;

– четвертая F_p связана с частотой вращения ротора и в асинхронных машинах всегда на несколько процентов меньше частоты вращения электромагнитного поля;

– пятая F_n вызывается наличием зубцово-пазовой структуры в зазоре электрической машины. Вибрация может быть пропорциональна произведению частоты вращения на число пазов статора, ротора или их частоте биений. В результате прогиб ротора различен при повороте его на 90 градусов. Это приводит, при частоте вращения ротора с частотой 50 Гц, к увеличенным вибрациям в вертикальном направлении с частотой в 100 Гц.

Основной признак того, что диагностируемый дефект имеет электромагнитную причину, – мгновенное исчезновение его признаков в спектре вибрации после отключения ЭД от сети.

Очень важным является то, что диагностика причин повышенной вибрации электрических машин должна проводиться при возможно большей нагрузке двигателя. Если исследования проводятся на холостом ходу, то очень часто удается выявить только малую часть всех имеющихся в оборудовании электромагнитных дефектов.

Для успешной диагностики различных электромагнитных дефектов в электрических двигателях необходим спектроанализатор с числом спектральных линий не меньше 3200.

Каждому виду дефекта соответствует своя вибродиаграмма.

Наиболее важные дефекты статора, которые можно определить по вибропараметрам:

- ослабление прессовки пакета стали, обрыв или замыкание в обмотке;
- эксцентриситет, эллипсность внутренней расточки статора относительно оси вращения ротора;
- неправильный взаимный осевой монтаж активных пакетов ротора и статора.

При всех дефектах статора асинхронных электродвигателей, имеющих первопричину электромагнитной природы, возникающих в активной стали или в обмотке, в спектре вибросигнала возникает специфическая картина. В основном это вибрация с высокой амплитудой гармоники на частоте электромагнитных процессов $F_{эм}$.

Основные дефекты ротора, диагностируемые по вибрации:

- эксцентриситет внешней поверхности ротора относительно оси его вращения;
- обрыв или нарушение контакта в стержнях или кольцах “беличьей клетки” в асинхронном двигателе;
- ослабление прессовки всего пакета стали ротора или только в области зубцов.

На рисунках 1 и 2 приведены вибродиаграммы для некоторых дефектов статора и ротора.

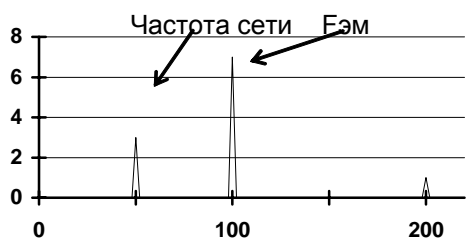


Рисунок 1 – Спектр вибрации при наличии дефектов статора

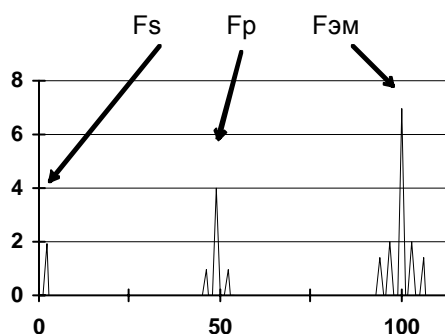


Рисунок 2 – Спектр вибрации при эксцентриситете ротора

Далее в главе рассмотрен вопрос прогнозирования остаточного и межремонтного ресурса электродвигателей.

Под критериями предельных состояний оборудования понимаются такие отличительные признаки, при наличии которых следует считать невозможным дальнейшую эксплуатацию оборудования. Определение остаточного ресурса оборудования осуществляется на основе совокупности имеющейся информации прогнозирования его технического состояния.

Для анализа состояния электроприводного оборудования в АКГУП «Центральный» Калманского района, Ащегульском коллективном сельхозпредприятии, совхозе Бурановский были проведены работы по сбору и обобщению статистического материала по эксплуатации трёх характерных видов технологических механизмов. В результате обобщения полученных материалов установлено, что отказы электродвигателей происходят как в механической, так и электрической части. Наиболее часто выходят из строя электродвигатели серии 4А выпуска после 1989 года.

В механической части выходят из строя подшипники и валы. Как минимум, в течение года имеются отказы по валу у 7% электродвигателей. Подшипники выходят из строя чаще на 14%.

С целью выявления наиболее оптимальных методов расчета остаточного ресурса были проведены предварительные замеры вибросостояния ЭД на действующих зернотоках. В результате установлено, что в ряде случаев по известным нормам виброскорость не должна превышать 7,1 мм/с. Фактически на зернотоках в эксплуатации находились электродвигатели, замеры на которых показывали виброскорость, превышающую допустимые нормы и достигающую значения 11,2 мм/с.

С точки зрения математической статистики, величина остаточного ресурса является величиной случайной. Поэтому для получения его математического ожидания $R(t)$ (рисунок 3) определен интервал от величины T до величины $T_{пр}$, где T и $T_{пр}$ – назначенный ресурс времени, характеризующий время сверхресурсной эксплуатации, что практически недопустимо.

Для определения величины используются кривые вибросостояний электрических машин, полученные по результатам лидерной эксплуатации специально подготовленных для этой цели образцов оборудования. При этом эксплуатация ведется в нормальном рабочем режиме, но с более интенсивным нагружением для увеличения коэффициента эксплуатации. По результатам лидерной эксплуатации можно определить величину $R_i(T)$, отличную от величины $R(T)$ и являющуюся «остаточным ресурсом» в интервале времени $(T; T+t)$. Исходными данными для расчетов являются наработки T_i для m отказавших и $n-m$ неотказавших объектов на время лидерной эксплуатации t в интервале времени $(T; T+t)$.

Точной оценкой показателя $R_i(T)$ служит величина математического ожидания, определяемая по формуле:

$$\bar{R}_i(t) = \frac{\sum_{i=1}^m T_i + (n-k-m)t}{n-k} \quad (1)$$

В соответствии с принятыми условиями, считается, что

$$R_i(T) \leq R(T) \text{ и } R_i(T) \leq t \quad (2)$$

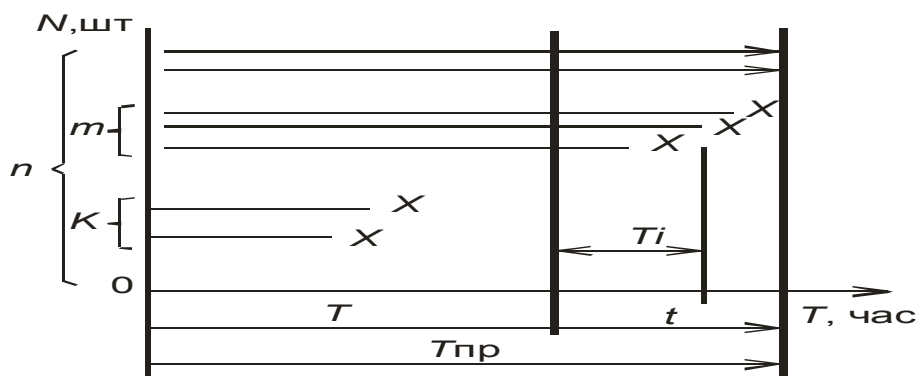


Рисунок 3 – Диаграмма распределения отказов ЭД во времени:

k – число отказавшего оборудования до момента времени T ; m – число отказавшего оборудования после времени T ; n – общее число оборудования от начала эксплуатации; T_i – наработка оборудования после времени T ; t – наработка не отказавшего оборудования

Если число лидерных объектов n мало (меньше 48), то рекомендуется определять доверительную оценку для показателя $R_i(T)$ при заданной доверительной величине безотказной работы P в интервале $(T; T+t)$. Нижняя доверительная оценка показателя $R_i(T)$ или «усеченный остаточный ресурс» определяется по формуле

$$R_i^H(T) = \bar{R}_i(t) - \frac{t}{2} \sqrt{\frac{P}{n(1-P)}}, \quad (3)$$

где $\bar{R}_i(t)$ – средний остаточный ресурс в интервале $(T; T+t)$, рассчитанный по формуле (1);

$P > 0,9$ – вероятность безотказной работы объекта в интервале $(T; T+t)$.

Если у электроприводного оборудования в процессе эксплуатации отсутствуют отказы в интервале наблюдения за лидерными объектами, то первое слагаемое в формуле (3) определяется из выражения

$$\bar{R}_i(t) = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^m T_i + (n-m)t \right). \quad (4)$$

Найденные в данном разделе зависимости позволяют прогнозировать интенсивности выходов из строя электродвигателей для последующего планового периода:

$$\lambda(T_p) = \frac{\sum_{i=1}^n R_i T_i}{T_i}, \quad (5)$$

где T_p – длительность планового периода.

Таким образом, после проведения комплекса мероприятий по вибродиагностике и последующего прогнозирования остаточного ресурса электродвигателей, появляется возможность определения интенсивностей выходов из строя ЭД не на основе статистики отказов, которая может оказаться неточной, отсутствующей или сильно отличающейся от будущей статистики расчетного периода, а на основе объективного прогноза их состояния. Построенные планы ремонтных мероприятий при данном подходе имеют большую точность и адекватность.

В третьем разделе проведен комплекс теоретических исследований, посвященных построению математической модели системы ремонта ЭД как процесса массового обслуживания электродвигателей.

Целью данного раздела является нахождение зависимостей между показателями эксплуатации парка электрических двигателей, интенсивностями их отказов и объемом выделенных денежных средств.

Рассматриваются следующие показатели эксплуатации:

- длительность ожидания ремонта $T_{ож}$ и длительность ремонта $T_{рем}$ вышедших из строя электродвигателей;
- количество линий обслуживания и связанная с этим длина очереди на обслуживание;
- коэффициент загрузки ремонтных мощностей при наличии или отсутствии собственной ремонтной базы.

Для нахождения данных показателей процесс эксплуатации ЭД агропромышленного предприятия рассматривается как марковский процесс “гибели и размножения” с непрерывным временем.

Определены вероятностные характеристики жизненного цикла (показатели работы) одного электродвигателя.

На электрический двигатель, находящийся в состоянии S_1 , действует поток отказов с интенсивностью $\lambda(t)$, переводящий его в состояние S_2 . Предполагается, что на двигатель, находящийся в состоянии S_2 , действует

поток восстановлений с интенсивностью $\mu(t)$ (рисунок 4); оба потока пуассоновские, независимые. Состояние S_1 – двигатель исправен (работает); S_2 – двигатель неисправен (находится в ремонте или ожидает замены на аналогичный).

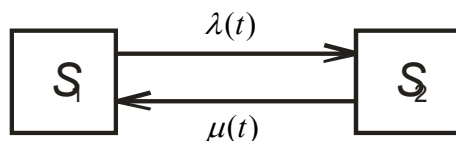


Рисунок 4 – Граф возможных состояний электродвигателя во времени

Уравнения Колмогорова для данной системы имеют вид

$$\begin{aligned} dp_1(t)/dt &= p_2(t)\mu(t) - p_1(t)\lambda(t) \\ dp_2(t)/dt &= p_1(t)\lambda(t) - p_2(t)\mu(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где $p_1(t)$ и $p_2(t)$ – вероятности нахождения двигателя в состояниях S_1 и S_2 соответственно, $p_1(0) = 1$, так как двигатель исправен в начальный момент времени.

Решение этого линейного дифференциального уравнения с переменными коэффициентами, следующее:

$$p_1(t) = e^{-\int_0^t ((\lambda(\tau) + \mu(\tau)) dt} \left[\int_0^t \mu(\tau) e^{\int_0^{\tau} ((\lambda(x) + \mu(x)) dx} d\tau + 1 \right]. \quad (7)$$

Вычисление $p_1(t)$ при произвольных зависимостях $\mu(t)$ и $\lambda(t)$ достаточно трудоемко. Непосредственный численный метод решения уравнения (7) на ЭВМ оказывается более простым и менее трудоемким. В случае, если принять допущение, что финансовое положение хозяйства стабильно, и средства на ремонт выделяются равномерно, а качество ремонта не зависит от времени (например, ремонт производится на одном и том же предприятии), то можно рассмотреть частный случай, когда интенсивности $\mu(t)$ и $\lambda(t)$ не зависят от времени:

$$\mu(t) = \mu = const, \lambda(t) = \lambda = const. \quad (8)$$

В этом случае нет необходимости решать уравнение (7), а достаточно будет решить линейное дифференциальное уравнение, в которое превратится уравнение (6) при $\mu(t) = \mu, \lambda(t) = \lambda$, при начальном условии $p_1(0) = 1$, нормировочном условии: $p_1(t) + p_2(t) = 1$, откуда

$$dp_1(t)/dt + (\lambda + \mu)p_1(t) = \mu. \quad (9)$$

Решение этого уравнения дает:

$$p_1(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}, \quad (10)$$

откуда

$$p_2(t) = 1 - p_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} (1 - e^{-(\lambda + \mu)t}). \quad (11)$$

Графики зависимостей $p_1(t)$ и $p_2(t)$ ($\mu > \lambda$) показаны на рисунке 5. При $t \rightarrow \infty$ в системе устанавливается стационарный режим, для которого определены такие показатели работы СМО как p_1, p_2 , которые уже не зависят от времени и равны: $p_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} p_1(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$,

$$p_2 = \lim_{t \rightarrow \infty} p_2(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}. \quad (12)$$

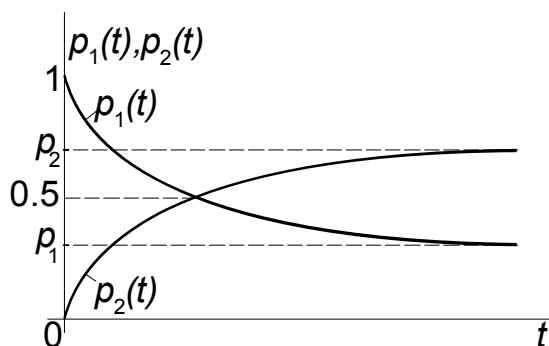


Рисунок 5 – Кривые относительных вероятностей состояний электродвигателя во времени

В стационарном режиме электродвигатель будет менять свое состояние, переходя из S_1 в S_2 (работая и ожидая ремонта) и обратно, но вероятности этих состояний уже не зависят от времени и соответствуют среднему относительному времени пребывания ЭД в соответствующих состояниях S_1 и S_2 .

Вышедший из строя на сельхозпредприятии электрический двигатель способен ожидать ремонта неограниченное количество времени, и с точки зрения теории массового обслуживания, данная система является системой с ожиданием. Данная система отличается следующими особенностями функционирования:

- ремонтная база состоит из ограниченного числа n ремонтных линий;
- каждая ремонтная линия способна обслуживать одновременно только один двигатель;
- каждый вновь вышедший из строя двигатель, застав все обслуживающие линии уже занятыми, становится в очередь и находится в ней до тех пор, пока одна из линий не освободится.

Если вышедший из строя электродвигатель застаёт хотя бы одну свободную линию ремонта, то он сразу же принимается на обслуживание.

Функционирование системы рассматривается при условии поступления в нее пуассоновского потока ремонтных заявок. Поток требований не ограничен по своим возможностям, однако его плотность λ имеет конеч-

ное значение. Время ремонта каждого ЭД $t_{обс}$ является случайной величиной, которая подчиняется показательному закону распределения с параметром μ . Все линии ремонта обладают одинаковой производительностью. Принципиальная схема системы представлена на рисунке 6.

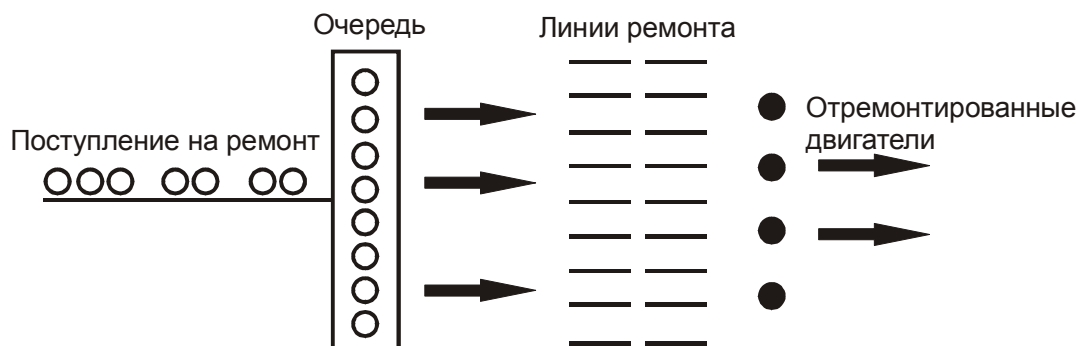


Рисунок 6 – Схема системы массового обслуживания электродвигателей с неограниченным потоком требований

В качестве основных показателей работы системы были взяты: вероятность того, что все линии обслуживания свободны или заняты, математическое ожидание длины очереди, коэффициенты занятости или простоя линий обслуживания.

Если принять интенсивность потоков выходов из строя и восстановления постоянными, то появляется возможность сравнительно легкого непосредственного вычисления характеристик процесса. При данных допущениях и конечном числе состояний $n+1$ будет иметь место стационарный режим. Это вытекает из того, что множество W всех состояний процесса выхода из строя и восстановления (гибели и размножения) является эргодическим. Следовательно, системы S с конечным числом состояний $n+1$, в которой протекает процесс гибели и размножения, является простейшей эргодической системой, граф состояний которой представлен на рисунке 7.

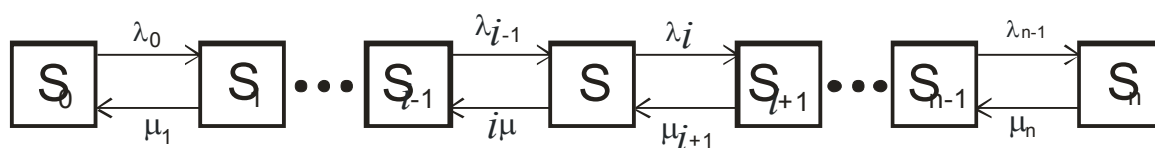


Рисунок 7 – Размеченный граф состояний для простейшей эргодической системы с конечным числом состояний

Предельные вероятности состояний для простейшего эргодического процесса гибели и размножения, находящегося в стационарном режиме, получены из следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned}
dp_0(t)/dt &= \mu_1(t)p_1(t) - \lambda_0(t)p_0(t), \\
&\dots\dots\dots \\
dp_i(t)/dt &= \lambda_{i-1}(t)p_{i-1}(t) + \mu_{i+1}(t)p_{i+1}(t) - (\lambda_i(t) + \mu_i(t))p_i(t) \\
&(i=1, 2, \dots, n-1), \\
&\dots\dots\dots \\
dp_n(t)/dt &= \lambda_{n-1}p_{n-1}(t) - \mu_n(t)p_n(t).
\end{aligned} \tag{13}$$

Решение данной системы дает:

$$p_i = P(i/a) / R(n, a) \quad (i=0, 1, \dots, n). \tag{14}$$

Данное распределение подчиняется усеченному закону Пуассона и зависит от двух параметров – α и n . Таким образом, число электродвигателей, находящихся в эксплуатации в стационарном режиме, при условии, что их общее число не может быть больше n , распределено по усеченному закону Пуассона с параметрами α и n , где параметр α равен отношению интенсивности потока ремонта электродвигателей в хозяйство λ к интенсивности потока выхода из строя каждого электродвигателя μ .

Найден следующий показатель работы СМО – математическое ожидание числа эксплуатируемых электродвигателей в стационарном режиме:

$$M[X(t)] = \frac{aR(n-1, a)}{R(n, a)}, \tag{15}$$

где $R(n, a)$ – распределение Пуассона.

Дисперсия:

$$\begin{aligned}
D[X(t)] &= M[X^2(t)] - (M[X(t)])^2 = \frac{aR(n-1, a)}{R(n, a)} + \\
&+ a^2 \left[\frac{R(n-2, a)}{R(n, a)} - \left(\frac{R(n-1, a)}{R(n, a)} \right)^2 \right] \quad (n > 1).
\end{aligned} \tag{16}$$

Формулы (15), (16) позволяют вычислять среднее количество и дисперсию числа эксплуатируемых ЭД при известных постоянных интенсивностях процессов выхода из строя и восстановления.

Рассмотрен полнодоступный пучок обслуживающих линий с ожиданием. Поступившему запросу на обслуживание приходится ждать обработки тогда и только тогда, когда он застает все n линий занятыми. На первый план выходит такая величина как вероятность ожидания. Эта величина играет значительную роль в оценке качества работы пучка. Однако, для систем с ожиданием эта роль сравнительно невелика, так как, если даже значительному большинству электродвигателей приходится ожидать, обслуживание должно быть признано вполне удовлетворительным во всех тех случаях, когда длительности ожидания оказываются в своем большинстве очень малыми. Решающую роль играет не частота ожидания ремонта, а природа времени ожидания γ как случайной величины; частота же ожидания дает нам только один штрих этой картины – вероятность неравенства $\gamma > 0$. Конечной целью исследования данного полнодоступного пучка

линий с ожиданием служит отыскание закона распределения времени ожидания ремонта электродвигателем γ .

При решении данной задачи наличие или отсутствие упорядоченности пучка линий значения не имеет. Входящий поток вызовов простейший с параметром λ . Электрические двигатели обслуживаются в порядке их поступления. Очевидно, что длительности обслуживания конкретных двигателей независимы друг от друга и от течения потоков вызовов.

Длительность обслуживания ℓ подчиняется показательному закону.

$$P\{\ell > t\} = e^{-\beta t}, \quad t > 0 \quad \beta > 0 \text{ – постоянная.}$$

Было определено, что вероятность найти все линии занятыми (“вероятность ожидания ремонта”) равна

$$\Pi = \frac{u^n}{n!} \frac{p_0}{1 - \frac{u}{n}}, \quad (17)$$

где $\frac{\lambda}{\beta} = u$, p_0 – количество занятых линий в начальный момент времени, n – количество линий обслуживания.

Вероятность того, что длительность ожидания γ больше некоторой величины t равна

$$P\{\gamma > t\} = \prod e^{-(n\beta - \lambda)t} \quad (t \geq 0). \quad (18)$$

В принятых условиях время ожидания подчиняется показательному закону распределения с параметром $n\beta - \lambda$. Вместе с тем очевидно, что

$$P\{\gamma > 0\} = \prod . \quad (19)$$

Аналогично были определены следующие показатели СМО:

1) вероятность того, что все линии ремонта свободны

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{n-1} \frac{a^k}{k!} + \frac{a^n}{(n-1)!(n-a)}}, \quad \text{при } \frac{a}{n} < 1, \quad (20)$$

где $a = \frac{\lambda}{\mu}$, k – число вышедших из строя ЭД;

2) вероятность того, что все линии ремонта заняты

$$D = \frac{a^n P_0}{(n-1)!(n-a)} \quad \text{при } \frac{a}{n} < 1; \quad (21)$$

3) вероятность того, что все линии заняты ремонтом и S электродвигателей находится в очереди

$$P_{n+s} = \frac{a^{n+s}}{n! n^s} P_0, \quad \text{при } S > 0; \quad (22)$$

4) среднее число свободных от обслуживания линий ремонта

$$N_0 = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{n-k}{k!} a^k P_0; \quad (23)$$

5) коэффициент простоя линий ремонта

$$K_n = \frac{N}{n_0}. \quad (24)$$

В замкнутой СМО отремонтированные электродвигатели возвращаются в источник требований и дополняют его. Число линий обслуживания n . Схематично работа такой системы представлена на рисунке 8.

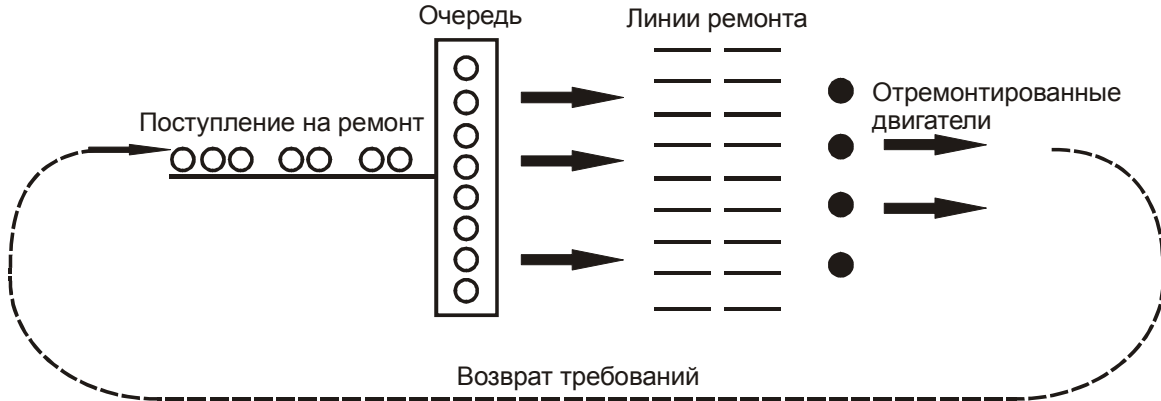


Рисунок 8 – Схема замкнутой системы массового обслуживания электродвигателей

Всевозможные состояния данной системы описываются следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} dp_0(t) / dt &= \mu p_1 - \lambda m p_0(t), \\ &\dots\dots\dots \\ dp_k(t) / dt &= -((m-k)\lambda + k\mu) p_k(t) + \\ &+ (m-k+1)\mu p_{k+1}(t) + \lambda p_{k-1}(t) \quad (k = 1, 2, \dots, n), \\ &\dots\dots\dots \\ dp_m(t) / dt &= -\lambda p_{m-1}(t) + n\mu p_m(t). \end{aligned} \quad (25)$$

Решение вышеприведенной системы позволило получить следующие показатели работы СМО:

Вероятность того, что все линии свободны от обслуживания:

$$P_0 = \left(\sum_{k=0}^n \frac{m!}{k!(m-k)!} a^k + \sum_{k=n+1}^m \frac{m! a^k}{n^{k-n} n!(m-k)!} \right)^{-1}, \quad (26)$$

где m – наибольшее число требований в системе;
 n – число линий в системе обслуживания.

Вероятность того, что в системе находится k требований, из них n обслуживается, а $k-n$ ожидают обслуживания:

$$P_{kn} = \frac{m!a^k}{n^{k-n}n!(m-k)!}P_0 \text{ при } n \leq k \leq m. \quad (27)$$

Среднее число электродвигателей, ожидающих ремонта:

$$M_{ож} = \sum_{k=n+1}^m \frac{(k-n)m!a^k}{n^{k-n}n!(m-k)!}P_0. \quad (28)$$

Полученные вероятности позволяют провести полный анализ системы массового обслуживания электродвигателей на предприятиях АПК, найти влияние количества линий обслуживания на длительность ожидания электродвигателями ремонта, а соответственно, и на размер убытков в результате его простоя. Количество линий обслуживания является прямым следствием выделенного объема денежных средств. Таким образом, разработанная система позволяет получить зависимость между объемом выделенных денежных средств и убытками от простоя электродвигателей.

Четвертый раздел посвящен разработке и практическому применению методики оптимизации показателей СМО с целью нахождения минимума затрат на обслуживание электродвигателей. Для решения данной задачи был использован метод линейного программирования, как наиболее простой метод, позволяющий находить экстремумы линейных функций.

Задачей линейного программирования в канонической форме является задача нахождения минимума линейных функций затрат на эксплуатацию парка электродвигателей при наличии или отсутствии собственной ремонтной базы.

Целевая функция затрат при наличии собственной ремонтной базы:

$$G_{nn} = (N_{np}q_{ож} + q_{py}N_0 + \sum_{i=1}^{N_g} q_{kmi})t_{ож}, \quad (29)$$

где G_{nn} – величина затрат в системе за время $t_{ож}$;

N_{np} – количество простаивающих в ожидании ремонта электродвигателей;

$q_{ож}$ – убытки, связанные с простаиванием одного электродвигателя в очереди в единицу времени;

q_{py} – стоимость единицы времени существования одного ремонтного участка в мастерской;

N_0 – количество ремонтных участков в мастерской;

q_{kmi} – стоимость материалов на ремонт i – го электродвигателя;

N_g – количество вышедших из строя электродвигателей.

Целевая функция затрат при отсутствии собственной ремонтной базы:

$$G_{no} = (\lambda q_{ож} + \sum_{i=1}^{N_g} q_{ki})t_{ож}, \quad (30)$$

где G_{no} – величина затрат в системе за время $t_{ож}$;

q_{ki} – затраты на ремонт i – го электродвигателя.

Критерием оптимизации является такой параметр, как вероятность безотказной работы, последовательность нахождения которого дана ниже.

Количество возможных линий обслуживания (K_l) определяется в зависимости от наличия или отсутствия собственной ремонтной базы. При отсутствии ремонтной базы K_l определяется как:

$$K_l = \frac{W_{рем}}{q_k}, \quad (31)$$

где q_k - стоимость ремонта наиболее распространенной в хозяйстве модели электродвигателя;

$W_{рем}$ - средства, выделенные на ремонт всего парка электродвигателей.

В случае, если стоимость ремонта конкретного электродвигателя отличается от q_k , то двигатель всегда занимает пропорционально большее или меньшее количество линий обслуживания, число которых в этом случае может быть дробным.

K_l при наличии ремонтной базы определяется как:

$$K_l = \frac{W_{рем}}{q_{py} + q_{kmi}}. \quad (32)$$

Обозначим S_p – численное решение нашей задачи (P), $Arg(P)$ – множество решений задачи (P), т.е. множество допустимых точек критериев, принадлежащих множеству R^n для которых $S_p = G_{nn}$, или $S_p = G_{no}$.

Согласно теореме Минковского о том, что выпуклый компакт в R^n является выпуклой оболочкой своих крайних точек, число крайних точек, множества D , задаваемого в виде конечного числа линейных равенств и неравенств, является конечным. Таким образом, для решения поставленной задачи линейного программирования достаточно перебрать значения функций G_{nn} и G_{no} во всех крайних точках множества D . Но нахождение всех этих крайних точек и перебор значений функций G_{nn} и G_{no} – довольно трудоемкая операция, поэтому вместо перебора был использован симплекс-метод, который для решения задач линейного программирования позволяет, начиная с некоторой исходной крайней точки, переходить к другой по направлению наибольшего убывания искомым функций.

Выход из строя любого электродвигателя является причиной возникновения убытков, которые можно оценить следующим образом. Вероятность того, что вышедший из строя двигатель будет ожидать ремонта больше некоторого времени t равна:

$$P\{\gamma > t\} = \prod e^{-(K_l(T)\beta-\lambda)t} \quad (t \geq 0). \quad (33)$$

Величина убытков в результате выхода из строя электрооборудования равна:

$$V_{y\bar{o}}^* = \left(\sum_{i=1}^n C_{\partial\bar{o}i} \right) \cdot (t + t_{рем}), \quad (34)$$

где $C_{\partial\bar{o}i}$ – убытки от выхода из строя электродвигателя;

t – время ожидания ремонта;

$t_{рем}$ – время ремонта;

n – количество электродвигателей, находящихся в ремонте.

Также в статью расходов необходимо включить затраты на ремонт электрооборудования $V_{рем}$. Тогда суммарные затраты $V_{y\bar{o}}$ равны:

$$V_{y\bar{o}} = \left(\sum_{i=1}^n C_{\partial\bar{o}i} \right) \cdot (t + t_{рем}) + V_{рем}.$$

Каждый работающий электродвигатель приносит некоторую прибыль $W_{раб.i}$. Математическое ожидание количества работающих электродвигателей определено по (15). Тогда математическое ожидание объема прибыли в течение установленного периода времени:

$$M[W] = \sum_{i=1}^{\frac{aR(n-1,a)}{R(n,a)}} W_{раб.i} \cdot t_{раб.i}, \quad (35)$$

где $t_{раб.i}$ – время работы i -го электродвигателя в течение установленного периода времени.

Для соблюдения условия безубыточности работы необходимо, чтобы прибыль была больше убытков $M[W] > V_{y\bar{o}}$ или

$$\sum_{i=1}^{\frac{aR(n-1,a)}{R(n,a)}} W_{раб.i} \cdot t_{раб.i} > \left(\sum_{i=1}^n C_{\partial\bar{o}i} \right) \cdot (t_{ож} + t_{рем}) + V_{рем}, \text{ откуда } t_{ож} < B - t_{рем},$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^{\frac{aR(n-1,a)}{R(n,a)}} W_{раб.i} \cdot t_{раб.i} - V_{рем}}{\left(\sum_{i=1}^{n_g} C_{\partial\bar{o}i} \right)}.$$

где

Вероятность того, что $t_{ож}$ будет меньше расчетного времени t , равна $P(t_{ож} < t) = 1 - \prod e^{-(K_n(T)\beta-\lambda)t}$, и соответственно,

$$P(t_{ож} < \frac{B}{\left(\sum_{i=1}^{n_g} C_{\partial\bar{o}i} \right)} - t_{рем}) = 1 - \prod e^{-(K_n(T)\beta-\lambda)(B-t_{рем})}. \quad (36)$$

Условие $t_{ож} < B - t_{рем}$ является условием безубыточной работы хозяйства и, таким образом, вероятность $P_{\bar{o}y}$:

$$P_{\bar{o}y} = 1 - \prod e^{-(K_n(T)\beta-\lambda)B} \quad (37)$$

является вероятностью безубыточной работы хозяйства в заданных условиях.

Итогом работы метода линейного программирования является определение максимального значения $P_{\bar{o}y}$. Нахождение данного значения в об-

щем виде достаточно трудоемко, однако данная задача легко решается путем применения ЭВМ с использованием разработанного комплекса «Стратег». В случае отсутствия в хозяйстве вычислительной техники или квалифицированного персонала возможно для данного хозяйства произвести расчет эффективности практически всех возможных вариантов планирования ремонта ЭД и свести результаты расчетов в общие таблицы.

Работа данной методики показана на примере анализа ремонта парка электродвигателей АКГУП «Центральный» (таблица 1).

Из таблицы видно, что при пяти линиях обслуживания система может быстро прийти к насыщению, так как увеличение количества выходящих из строя электродвигателей с 20 до 25 и более увеличивает данную вероятность с 0,55 до 1 и не позволяет системе обслуживать электрооборудование данного хозяйства. В свою очередь, число ожидающих ремонта электродвигателей будет постоянно расти.

Таблица 1 – Зависимость вероятности занятости всех линий обслуживания от их количества и интенсивности отказов электродвигателей

Кол-во линий обслуживания	Количество отказов электродвигателей, шт./мес.									
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
5	0,55	0,634	0,718	0,81	0,9	1	1	1	1	1
6	0,285	0,336	0,392	0,45	0,52	0,588	0,66	0,74	0,82	0,91
7	0,059	0,075	0,094	0,12	0,14	0,167	0,2	0,23	0,27	0,31
8	0,024	0,031	0,041	0,052	0,07	0,081	0,1	0,12	0,14	0,17
9	0,008	0,012	0,016	0,022	0,03	0,036	0,05	0,06	0,07	0,08
10	0,003	0,004	0,006	0,008	0,01	0,015	0,02	0,03	0,035	0,04

В результате работы методики оптимизации хозяйству рекомендовано перейти на 6 линий обслуживания, что увеличит ремонтные затраты на 20%, однако, согласно расчетам снизит убытки от простоя оборудования на 37%. Итоговая экономия составит 17%. Дальнейшее увеличение количества линий обслуживания не приводит к росту экономичности работы хозяйства, так как уже при 7 линиях обслуживания выросшие на 40 % затраты на поддержание обслуживаемых линий сводят на нет экономический эффект от снижения убытков от простоя оборудования.

Данная методика позволяет обеспечить снижение затрат на эксплуатацию парка электродвигателей от 7% до 20% (в зависимости от количества ЭД в хозяйстве), что подтверждается результатами статистики, собранной в АКГУП «Центральный» Калманского района и комплексе предприятий ОАО «Русский хлеб».

Основные выводы и результаты исследований

1. На сельскохозяйственных предприятиях Алтайского края за период с 1987 по 2005 гг. процент выхода из строя электродвигателей увеличился в среднем в 2 раза, а затраты на их ремонт – в 3 раза, что доказывает неэффективность используемой в настоящее время системы планово-предупредительного ремонта электрооборудования в сельском хозяйстве.

2. Определено, что построение эффективной методики планирования ремонтов электродвигателей в современной экономической ситуации возможно только на основе комплексного анализа данных об их текущем состоянии, интенсивностей отказов во времени и производительности ремонтной базы.

3. Предложен способ прогнозирования, дающий состояние электродвигателей, основанный на методах вибродиагностики, даёт возможность с помощью комплекта переносного оборудования и без отключения ЭД прогнозировать состояние его основных узлов и получать данные об интенсивностях потока отказов парка электродвигателей во времени.

4. Разработана математическая модель системы ремонта ЭД, позволяющая находить зависимости между показателями эксплуатации парка электродвигателей на предприятиях АПК, интенсивностями их отказов и объемом выделенных денежных средств.

5. Создана методика оптимизации показателей процесса массового обслуживания, дающая возможность с учётом наличия или отсутствия собственной ремонтной базы создавать для сельскохозяйственного предприятия оптимальный график вывода электродвигателей в ремонт, с точки зрения снижения суммарных затрат на проведение восстановительных мероприятий и убытков от простоя оборудования.

6. Разработана методика практического применения усовершенствованной системы ППРЭсх, позволяющая с учётом специфики и сезонности работы электродвигателей на предприятиях АПК разрабатывать рекомендации по объёму и срокам выполнения восстановительных мероприятий в каждом конкретном случае.

7. Использование усовершенствованной системы ППРЭсх, имеющей в своем составе разработанную методику планирования ремонтов электродвигателей, обеспечивает снижение затрат на их эксплуатацию от 7 до 20%.

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

1. Хомутов С.О., Рыбаков В.А. Повышение экономической эффективности планово-предупредительного ремонта электрооборудования в сельском хозяйстве // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. - № 2-2. – С. 270-279.

2. Хомутов С.О., Рыбаков В.А. Система повышения эффективности обслуживания и ремонта электродвигателей в агропромышленном комплексе // Социальные, информационные и энергетические проблемы региона: Бюллетень оперативной научной информации. Приложение к журналу «Вестник Томского государственного университета». – Томск: ТГУ, 2006.. – С. 39-42.

Статьи в других изданиях

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

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

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

6. Рыбаков В.А. Повышение эффективности системы массового обслуживания электрооборудования на предприятиях агропромышленного комплекса путем оптимизации процесса планирования его ремонта // Информационные технологии моделирования и управления: Сб. статей всероссийской научно-практической конференции. – Воронеж: ВГТУ, 2004. – С. 127.

7. Рыбаков В.А., Хомутов С.О. Повышение эффективности повторного ремонта электродвигателей // Сборник научных трудов кафедры "Электрооборудование промышленных предприятий". – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004. – С. 24-25.

8. Рыбаков В.А., Сорвина О.В. Повышение эффективности ремонта асинхронных двигателей с использованием результатов разрушающе –

восстановительных экспериментов // Горизонты образования. – Барнаул, 2005. – Вып. 8. – Режим доступа:

[//edu.secna.ru/main/review/2005/n8/appendix/k4ef7.pdf](http://edu.secna.ru/main/review/2005/n8/appendix/k4ef7.pdf). – Загл. с экрана.

9. Рыбаков В.А. Повышение эффективности системы массового обслуживания электрооборудования на предприятиях агропромышленного комплекса путем оптимизации процесса планирования его ремонта // Экономико-математические методы анализа хозяйственной деятельности: Сб. статей всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2005. – С. 78-79.

10. Рыбаков В.А. Оптимизация процесса планирования ремонта электрооборудования в сельском хозяйстве // Энергетика и энергосбережение: Сб. статей всероссийской конференции аспирантов и студентов. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2005. – С. 24-27.

11. Рыбаков В.А., Хомутов С.О. Повышение эффективности эксплуатации электрооборудования путем использования автоматической системы планирования его ремонта // Информационные технологии управления: Международный сборник трудов конференции. – С-Петербург: Изд-во Нева, 2005. – С. 127-128.

Подписано в печать 20.04.07 г. Формат 60×84 1/16

Печать - ризография. Усл.п.л. 1,39

Тираж 100 экз. Заказ 2007 -

Отпечатано в типографии АлтГТУ

656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

Лицензия на полиграфическую деятельность

ПЛД № 28-35 от 15.07.97 г.