

На правах рукописи



Мартко Екатерина Олеговна

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ
ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
В АПК**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии
и электрооборудование в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул –2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научные руководители: доктор технических наук, профессор
Хомутов Олег Иванович
доктор технических наук, профессор
Куликова Лидия Васильевна

Официальные оппоненты: **Худоногов Игорь Анатольевич**
доктор технических наук, профессор кафедры
«Электроэнергетика транспорта» ФГБОУ ВПО
«Иркутский государственный университет путей сообщения»

Метельков Владимир Павлович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агро-инженерная академия»

Защита диссертации состоится «**25**» июня **2015** г. в **14.00** на заседании диссертационного совета Д212.004.02 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46; тел./факс 8(3852) 36-71-29; <http://www.altstu.ru>, e-mail: ntsc@desert.secna.ru, elnis@inbox.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» и на сайте <http://www.altstu.ru/media/f/Dissertaciya-Martko-EO.pdf>

Автореферат разослан «28» апреля 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Л.В. Куликова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Агропромышленный комплекс (АПК) в целом и его базовая отрасль – сельское хозяйство – являются ведущими системообразующими сферами экономики страны, формирующими продовольственный рынок, продовольственную и экономическую безопасность, трудовой и поселенческий потенциал сельских территорий. Наличие на предприятиях всего около 30% новых электроустановок наряду с устаревшим оборудованием отрицательно сказывается на развитии всей отрасли, именно поэтому так значительно возрастают требования к эксплуатации электрооборудования, призванные решать проблемы его надежности.

На современном этапе развития АПК наиболее массовым типом привода и основным потребителем электрической энергии остается асинхронный электропривод. Низкий уровень эксплуатационной надежности электродвигателей (ЭД) отрицательно сказывается на общей экономической эффективности сельхозпредприятий. Рекомендуемые меры плановой профилактики электроприводов зачастую не приводят к желаемым результатам и поэтому имеют достаточно ограниченное применение. Проблема эксплуатационной надежности ЭД системна и не поддается решению с помощью отдельных технических средств, только разработка и внедрение систем автоматизированного расчета остаточного ресурса ЭД позволяет перейти на качественно новую основу организации обслуживания и ремонта за счет оценки фактического состояния оборудования. Такой подход наиболее рационален, т.к. позволяет снизить эксплуатационные расходы и расходы на проведение ремонтных работ.

Большинству существующих в настоящее время методик расчета остаточного ресурса ЭД присущ основной недостаток – низкая достоверность полученных результатов из-за отсутствия учета вероятностных параметров внешней среды эксплуатации, имеющих место в реальном мире. Рассматриваемая проблема многогранна, решается довольно медленно, поскольку ситуация осложнена тем, что в рабочем режиме, как правило, возникают либо организационные и технические трудности, обусловленные необходимостью внедрения соответствующей измерительной техники, либо требуется ресурсоемкая разработка программного обеспечения реализации избранной методики.

В настоящее время используются различные методы и методики обеспечения эксплуатационной надежности двигателей. Для оборудования, используемого в АПК, могут быть применены лишь отдельные из них. Основы методологии технической диагностики заложены в работах Ю.П. Похолкова, Э.К. Стрельбицкого, О.П. Муравлева, О.Д. Гольдберга, А.А. Пястолова, А.Е. Немировского, О.И. Хомутова, С.О. Хомутова и др. Эти исследования посвящены дальнейшему развитию положений общей теории диагностики применительно к оценке технического состояния изоляции асинхронного двигателя.

В отношении прогнозирования общей чертой исследований указанных учёных является то, что они рассматривали детерминированный подход к получению моделей прогноза и практически не уделили внимания вероятностному подходу. В работах рассмотрены как краткосрочные прогнозы (до нескольких месяцев, динамические модели прогноза, применимые к изменяющимся условиям эксплуатации), так и среднесрочные (до выхода электроизоляционной системы из строя). Однако мало внимания уделялось влиянию на результаты прогноза такой особенности эксплуатации ЭД в сельском хозяйстве, как остаточный ресурс.

Поэтому необходимо разработать новую методику определения периодичности промежутка времени исправной надежной работы ЭД до понижения его работоспособности до уровня необходимости проведения ремонта. Следовательно, **выбранная тема актуальна.**

Целью работы является оценка и прогнозирование остаточного ресурса ЭД для принятия обоснованного решения по дальнейшей его эксплуатации, ремонту или замене.

Для достижения поставленной цели необходимо решение **следующих задач:**

- теоретически обосновать и определить методы отбора и ввода вероятностных характеристик для математического моделирования;

- разработать математическую модель, позволяющей прогнозировать остаточный ресурс ЭД с заранее заданной вероятностью и осуществить экспериментальную проверку разработанной модели в реальных условиях;
- разработать методику определения остаточного ресурса ЭД и рассчитать экономическую эффективность использования методики прогнозирования эксплуатационной надежности ЭД на основе вероятностной модели его технического состояния.

Объектом исследования являются процессы старения изоляции, связанные с эксплуатацией и выходом из строя ЭД на предприятиях АПК.

Предмет исследования – вероятностная математическая модель оценки технического состояния ЭД на предприятиях АПК.

Методология и методика исследований базируется на прикладной теории систем, теории диагностики и принятия решений, математическом анализе случайных процессов, математическом и компьютерном моделировании, статистической обработке и графической интерпретации экспериментальных данных, теории электрических машин, теории вероятностей, надежности, математической статистике.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- произведена оценка информативности данных, характеризующих внешние условия и состояние ЭД, полученных по результатам мониторинга и диагностического контроля;
- разработана математическая модель оценки эксплуатационной надежности ЭД, позволяющая прогнозировать его остаточный ресурс с заранее заданной вероятностью выхода из строя.

Практическая значимость и реализация работы. В ходе исследования получены:

- методика прогнозирования эксплуатационной надежности ЭД на основе вероятностной модели его технического состояния;
- программное обеспечение, позволяющее прогнозировать остаточный ресурс ЭД (свидетельство о Государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008613209).

Данная методика на практике позволяет снизить количество выходов ЭД из строя, простой оборудования на предприятии, и, как следствие, сократить материальные затраты на ремонт и от простоев производственного процесса. Разработанная технология внедрена на предприятиях Алтайского края, а именно: ООО АПГ «Алтайские закрома», ГУП АКГУП «Птицефабрика «Молодежная» Первомайского района, ООО «Птицефабрика «Комсомольская» Павловского района, ООО «Сибирь-Агро», ООО Племпредприятие «Барнаульское».

Апробация работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались, обсуждались и получили одобрение на следующих городских, всероссийских и международных конференциях: Научно-практической конференции молодых ученых «Молодежь-Барнаулу» (Барнаул, 2007–2011 гг.), Всероссийской научно-технической конференции «Наука и молодежь» (Барнаул, 2007–2011 гг.), II-я Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы сельского хозяйства горных территорий» (Горно-Алтайск, 2010 г.), II-я Международной научно-практической конференции «Электроэнергетика в сельском хозяйстве» (Новосибирск, 2011 г.), Научно-технической конференции «Энерго-эффективность и энергоресурсосбережение» (Барнаул, 2011 г.), X-я Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2009 г.), IV Международной научно-практической конференции «Применение инновационных технологий в научных исследованиях» (Курск, 2012 г.), XII Региональной студенческой научно-практической конференции (Томск, 2012 г.), Научно-технической конференции «Электроэнергия. Транспорт, надежность и учет» (Барнаул, 2012 г.), I Международной научно-технической конференции «Современные проблемы электроэнергетики. Алтай – 2013» (Барнаул, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2013 г.), II Международной научно-

технической конференции «Современные проблемы электроэнергетики. Алтай – 2014» (Барнаул, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2014 г.).

На защиту выносятся:

- математическая модель, позволяющая прогнозировать остаточный ресурс ЭД с заранее заданной вероятностью и экспериментальная проверка разработанной модели в реальных условиях;
- сравнение результатов, полученных путем математического моделирования, и результатов экспериментов;
- методика определения остаточного ресурса ЭД.

Публикации. Основное содержание диссертации представлено в 25 научных работах, 7 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. Получено свидетельство о Государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 28 рисунков, 13 таблиц, 5 приложений. Список литературы включает 129 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассмотрены актуальные вопросы использования математического моделирования для определения выходов из строя электрооборудования (ЭО) в АПК – изложены теоретические и общетехнические предпосылки математического моделирования для определения дефектов ЭО на предприятиях АПК и оценка надежности как один из наиболее прогрессивных и ресурсосберегающих методов определения степени износа и ремонтпригодности ЭД.

По данным опроса Министерства экономического развития РФ, проведенного в 2013 году, наиболее распространенный возраст ЭО составляет 5-10 лет, и лишь 4% сельскохозяйственных предприятий эксплуатирует оборудование, произведенное менее трех лет тому назад. Результаты исследования показали, что ускорение проведения диагностических мероприятий оказывает значительное влияние на восстановление вышедших из строя ЭД. При таком состоянии дел необходимо усилить работу по диагностике и определению эксплуатационной надежности ЭД. Поскольку наиболее прогрессивным методом, способным дать высокие экономические результаты, является метод математического моделирования возможных выходов двигателей из строя, то представляется необходимым разработать соответствующие программы для внедрения ресурсосберегающих технологий и повышения экономичности производства.

В связи с тем, что в АПК значительно расширилась сфера применения ЭД, в исследовании уделено особое внимание сбору и анализу статистических данных, касающихся определения их ремонтпригодности. На этой основе создана математическая модель, позволяющая упростить процесс диагностики ЭО. Особенностью использования двигателей в АПК является их эксплуатация в агрессивных средах и в наружных установках. На надежность ЭО этих предприятий оказывает влияние также его эксплуатация и режимы работы, характерная особенность которых заключается в их сезонном использовании.

Предлагаемый метод, как никакой другой, позволяет учесть все вышеперечисленные недостатки, так как предполагает разработку аналитического алгоритма для решения поставленных задач и не требует отключения и/или демонтажа ЭД. Таким образом, только на основе имеющихся в хозяйстве обязательных статистических данных можно во многом исправить серьезную ситуацию, сложившуюся в целом ряде хозяйств Алтайского края.

Оценка состояния работоспособности ЭД как объекта сводится главным образом к оценке состояния наиболее важных его частей с точки зрения надёжности. В связи с этим разработана и приводится на рисунке 1 структурная логическая схема дефектов изоляции и методов диагностики ЭД. При анализе этой схемы для исследования выбраны наиболее эффективные из них.

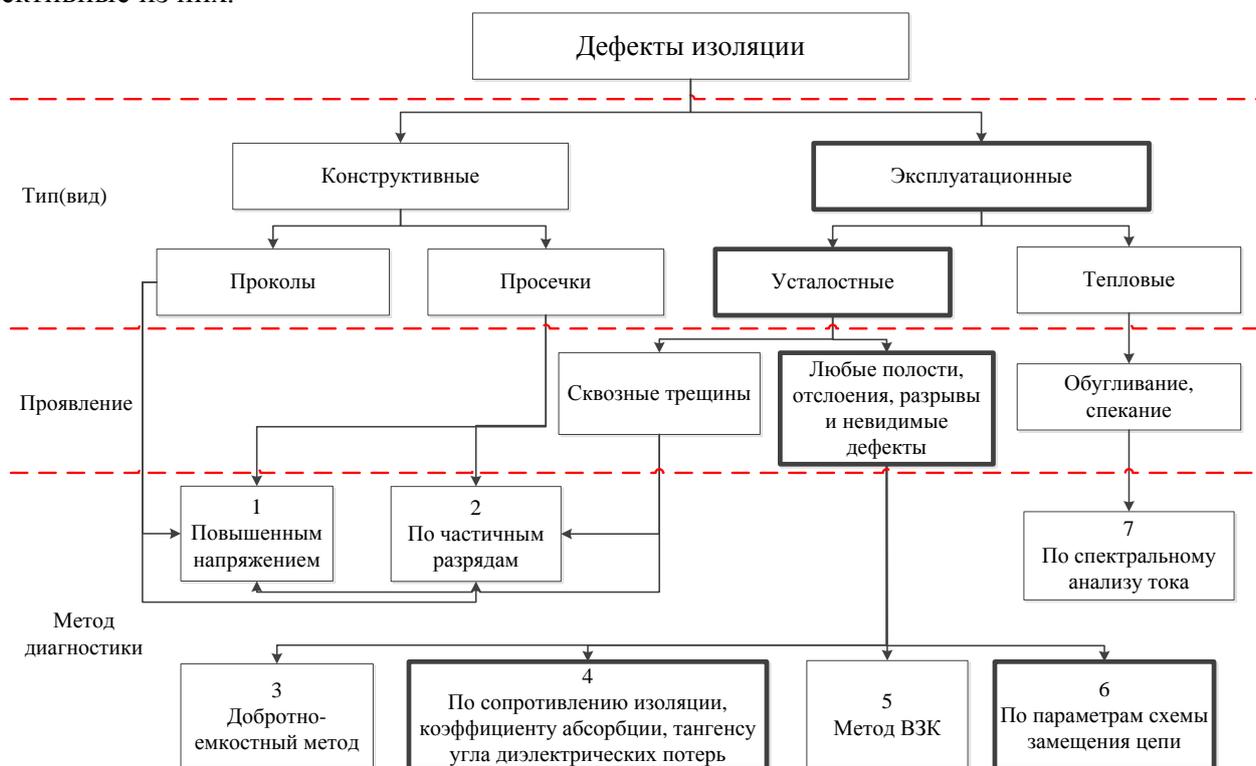


Рисунок 1 – Структурно-логическая схема дефектов изоляции и методов диагностики ЭД

Структурно-логическая схема построена таким образом, что наглядно показаны тип (вид) повреждения, его проявление и методы возможной диагностики. На схеме особо выделена ветвь эксплуатационных дефектов, которые делятся на тепловые и усталостные. К тепловым относятся изменения, являющиеся следствием недопустимого превышения температуры обмотки. Они могут быть обнаружены и предупреждены эффективными средствами эксплуатационной диагностики.

Для ЭД с повышенным отработанным ресурсом основное значение имеет диагностика усталостных повреждений изоляции. При осуществлении диагностики способами 3-6, чувствительными к любым неоднородностям изоляции, результат состояния показывает отрицательное состояние обмотки и необходимость проведения ремонта.

Таким образом, основным условием для достоверной диагностики следует считать избирательную чувствительность к сквозным повреждениям изоляционного слоя, ответственного за электрический пробой. Техническое совершенство и эксплуатационная надежность работы ЭД в значительной степени зависят от состояния изоляции обмотки. В качестве основного показателя в проведенном исследовании принято сопротивление изоляции, положенное в основу математической модели. Именно благодаря наличию такого показателя, можно более точно определить время работы ЭД до вывода его в ремонт.

Во второй главе представлены теоретические аспекты прогнозирования временных рядов – рассмотрены основные алгоритмы и математический аппарат методов, используемых в дальнейшем при создании вероятностной математической модели технического состояния ЭД.

Вероятностные факторы, влияющие на работу двигателя и описанные в главе 1 (температура, влажность, теплопроводность, режимы работы ЭД, долговечность, тока ЭД, скорость коррозии магнитопровода), можно представить в виде распределений числовых слу-

чайных величин и определить их посредством функций распределения. После определения функций распределения случайной величины возникает следующая задача: оценить параметры, которыми определяются эти распределения. Данная задача относится к классическим задачам математической статистики, решаемым с помощью различных методов оценок неизвестных параметров. Принцип их использования, достоинства и недостатки всесторонне проанализированы, чтобы выбрать наилучший из них для дальнейшего применения. Решение сформулированных задач требует обоснования и соответствующих математических выкладок, без которых определение функции распределения вероятных величин не представляется возможным. Данным вопросам и посвящена вторая глава.

В ходе анализа рассмотрен целый ряд методов оценки параметров функции распределения. В диссертации представлена сводная таблица методов, необходимых в исследовании, на основании которой выбран метод смешанного оценивания корреляционно-спектральных характеристик (КСХ). Суть метода КСХ в следующем: все вероятностные характеристики, определяемые во временной области, можно условно разделить на характеристики положения и формы кривой распределения вероятностей случайного процесса и характеристики взаимосвязи.

Измеряемая вероятностная характеристика является пределом выборочного среднего функционально преобразованного случайного процесса:

$$\Theta[X(t)] = \lim_{d \rightarrow \infty} S_d g[x_j(t)], \quad (1)$$

где Θ – измеряемая вероятностная характеристика; S_d – оператор идеального усреднения; d – параметр усреднения; g – оператор, представляющий собой преобразования, лежащие в основе определения вероятностной характеристики Θ ; $x_j(t)$ – j -ая реализация случайного процесса.

Результат определения значения вероятностной характеристики по ограниченной совокупности выборочных данных носит название оценки:

$$\hat{\Theta}[X(t)] = S_d g[x_j(t)] \quad (j=1, 2, \dots, N). \quad (2)$$

В зависимости от вида усреднения при ограниченном наборе выборочных данных выражение примет вид:

- при усреднении по совокупности:

$$\hat{\Theta}_t[X(t)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N g[x_j(t)]; \quad (3)$$

- при усреднении по времени:

$$\hat{\Theta}_j[X(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T g[x_j(t)] dt; \quad (4)$$

- при усреднении по времени и совокупности:

$$\hat{\Theta}_{cp}[X(t)] = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ T \rightarrow \infty}} \frac{1}{NT} \sum_{j=1}^N \int_0^T g[x_j(t)] dt. \quad (5)$$

При исследовании сложных объектов проводится большое число испытаний, происходит накопление большого числа массивов числовых и функциональных характеристик, что затрудняет хранение, анализ и интерпретацию полученных результатов. Решение этой проблемы осуществляется посредством методов аппроксимации, а необходимые данные определяются методом КСХ, который в ходе исследования был выбран как наилучший и основной способ.

Таким образом, метод аппроксимации позволяет на его основе исследовать числовые характеристики и качественные свойства изоляции ЭД. В данном исследовании для описания закономерностей выходов из строя ЭД выбраны два особо важных метода: аппроксимация на основе семейства распределений Пирсона и аппроксимация на основе семейства распределений Джонсона.

Поскольку на состояние изоляции во многом оказывают влияние метеорологические характеристики, были определены функции их распределения. Для достижения данной цели потребовалось вывести математические зависимости основных типов семейств распределений Пирсона и Джонсона, пригодных для составления основной математической модели и на основе которых составлены и проверены функции распределения метеорологических характеристик, полученных в ходе исследования. После определения наиболее подходящих типов распределения и их апробации были выделены те, которые вошли в основную математическую модель и ее программное обеспечение.

Функция плотности распределения Пирсона первого типа соответствует бета-распределению:

$$F_1(y) = \frac{\Gamma(\gamma + \eta + 2)}{\Gamma(\gamma + 1)\Gamma(\eta + 1)} \int_0^y y^\gamma (1 - y)^\eta dy. \quad (6)$$

Вычисления значений данной функции распределения осуществляется путем разложения интеграла (неполной бета-функции) в гипергеометрический ряд:

$$F(a, b, c, w) = 1 + \frac{ab}{1 \cdot c} w + \frac{a(a+1)b(b+1)}{1 \cdot 2 \cdot c(c+1)} w^2 + \dots, \quad (7)$$

который сходится абсолютно и равномерно при $|w| < 1$. Для ускорения сходимости ряда неполная бета-функция вычисляется по определенным формулам в зависимости от значения предела интегрирования:

$$B_z(p, q) = \begin{cases} \frac{1}{p} z^p (1-z)^q F(1, p+q, p+1, z), & \text{при } z \leq 0,5, \\ 1 - B_{1-z}(q, p), & \text{при } z > 0,5, \end{cases} \quad (8)$$

где $p = \gamma + 1$, $q = \eta + 1$.

Для семейства функций Джонсона второго вида

$$S_B = f_2(x) = \frac{\eta\lambda}{\sqrt{2\pi(x-\varepsilon)(\lambda-x+\varepsilon)}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\gamma + \eta \ln \left(\frac{x-\varepsilon}{\lambda-x+\varepsilon} \right) \right]^2 \right\}, \quad (9)$$

где γ и η – параметры формы, ε – характеризует центр, λ – масштаб распределения.

Результаты для конкретного примера и численные значения плотности вероятности для предприятия ООО «Сибирь-Агро» сведены в таблице 1.

Графики эмпирических функций распределения температуры построены с дискретностью $0,5^\circ\text{C}$. Дискретность при построении графиков влажности воздуха составляет 1%. Аппроксимирование проведено семейством распределений Пирсона и Джонсона соответственно.

Поскольку электрическое сопротивление одновременно обладает ярко выраженным случайным характером и возможной повторяемостью во времени в качестве метода моделирования выбран метод анализа сингулярного спектра (АСС). Данный метод впервые был разработан зарубежными учеными Д.С. Брумхидом (Broomhead D.S.) и Р. Ваутардом (Vautard R.), возник в 70х-80х годах XX столетия. Базовый алгоритм АСС состоит из четырех шагов, первые два шага образуют этап разложения, а последние два – этап восстановления.

АСС используется в данном исследовании для наиболее полного и точного решения задач, связанных с проектированием и моделированием работы ЭД, когда необходимо достаточно точно определить все входные факторы, начиная с климатических и заканчивая электрическими. На основе АСС сопротивление изоляции может быть представлено в виде суммы полиномиальных, экспоненциальных и периодических составляющих на фоне шума.

При разработке математической модели для прогноза остаточного ресурса ЭД была поставлена технологическая цель, т.е. принятие конкретного управляющего решения – вывод

ЭД в ремонт или его списание в связи с выходом из строя. В качестве интервала упреждения рассматривался краткосрочный и среднесрочный прогнозы.

Таблица 1 – Функции распределения климатических характеристик на примере предприятия ООО «Сибирь-Агро»

Параметр	График эмпирической функции распределения $F(X)$ или плотности вероятности $f(X)$	Выборочные оценки свойств случайной величины	Функция, аппроксимирующая распределение по	
			Пирсону	Джонсону
Температура		$\alpha_1 = 3,97;$ $\mu_2 = 193;$ $\mu_3 = -949;$ $\mu_4 = 96054;$ $\beta_1 = 0,1254;$ $\beta_2 = 2,567.$	Пирсона типа I	S _B -Джонсона
Влажность воздуха		$\alpha_1 = 72,1;$ $\mu_2 = 340;$ $\mu_3 = -4215;$ $\mu_4 = 313933;$ $\beta_1 = 0,45;$ $\beta_2 = 2,71.$	Пирсона типа I	S _B -Джонсона

Третья глава посвящена построению математической модели и проведению экспериментальных исследований технического состояния ЭД. Пошагово описана разработанная математическая модель и представлены расчеты, произведенные в процессе исследования. Они наглядно демонстрируют преимущество метода прогнозирования эксплуатационной надежности ЭД на основе вероятностной модели его технического состояния по сравнению с уже известными методами.

Распределения температуры окружающей среды и влажности воздуха в различных районах Алтайского края, полученные в ходе исследования и представленные в главе 2 диссертации, заложены в модель и программное обеспечение (ПО) в качестве одной из баз данных.

Суть алгоритма модели и ПО заключается в следующем: используя исходные данные (тип ЭД, характер работы ЭД, наименование технологического процесса, температура (Θ), влажность (φ), концентрация агрессивного агента (C), тип среды, сопротивление изоляции (R_{20}), норма вероятности, постоянная времени нагрева (T_n)) производится отслеживание и прогноз остаточного ресурса ЭД.

Норма вероятности – это априорно заданная вероятность выхода ЭД из строя, которая может быть изменена в зависимости от степени ответственности ЭД в технологическом процессе.

Типы ЭД и причины выхода из строя заложены в ПО в качестве одной из баз данных. В случае если в базе данных нет каких-либо типов ЭД, пользователь может их внести и сохранить.

Характер работы (режим) ЭД может быть следующим: длительный режим с переменной нагрузкой; длительный режим с постоянной нагрузкой; повторно-кратковременный; кратковременный. Аналогично типу ЭД указываются данные о наименовании технологического процесса.

Климатические факторы (температура, влажность) и примеси в воздухе замерялись универсальными газоанализаторами упрощенного типа DT-321S. Регистрация показаний сопротивления изоляции при проведении исследований осуществлялась с помощью мегаомметра ЭС0202/2Г.

В качестве нормы вероятности рассматривалась вероятность выхода ЭД из строя, заданная априорно, которая может быть изменена в зависимости от степени занятости ЭД в технологическом процессе.

Приведенные выше параметры не являются обязательными и вводятся для обобщения результатов статистики. Они тем самым облегчают задачу поиска и получение общей картины состояния ЭД.

В основу модели положены сопротивления, полученные в зависимости от показаний агрессивности среды (влажности, температуры), а также с учетом изменения параметров от времени и аналитических зависимостей. Общая функциональная зависимость (10):

$$R(T_{cl}, m, n, \varphi, C, R_0) = f(T_{cl}(t, \varphi)), \quad (10)$$

была получена следующим образом: срок службы ЭД выражается как $T_{cl} = f(t, \varphi)$; влажность определяется как $\varphi = f(C_0, \phi)$; сопротивление изоляции – $R_0 = f(\alpha, \theta_{экспл}^0)$, где $\theta_{экспл}^0 = f(\theta_{о.с.}^0, \tau_y)$; температура окружающей среды является средней годовой температурой $\theta_{о.с.}^0 = \Theta^0$, где $\Theta^0 = f(\bar{\Theta}^0, \psi)$; функции $\psi(t)$ и $\phi(t)$ получены и приведены в главе 2, а параметры m, n, C – постоянными справочными данными.

Таким образом, можно записать общую функциональную зависимость:

$$R \left[f(t, f(C_0, \phi)), m, n, f(C_0, \phi), C, f \left(\alpha, f \left(f(\bar{\Theta}^0, \psi), \tau_y \right) \right) \right] = f(T_{cl}(t, \varphi)) \quad (11)$$

Для получения частного вида модели (1) на основании вышеописанной цепочки зависимостей произведен ряд необходимых подстановок. Согласно О.Д. Гольдбергу, суть данной модели состоит в том, что сопротивление изоляции ЭД R (12) зависит от величины первоначального сопротивления R_0 , измеренного при эксплуатационной температуре $\theta_{экспл}^0$, времени t и срока службы ЭД T_{cl} :

$$R = R_0 e^{\frac{-t}{T_{cl}}}. \quad (12)$$

В предложенной модели (12) параметр сопротивления не зависит от изменения эксплуатационных величин на протяжении всего срока службы ЭД, что не соответствует реальным условиям его работы. В зависимости от режима работы двигателя происходит различный нагрев его активных элементов. Температура и влажность окружающей среды изменяются в течение суток и носят сезонный характер. Концентрация агрессивных примесей зависит от технологического процесса и также варьируется в течение времени. Все вышесказанное оказывает непосредственное влияние на скорость старения изоляции, а, следовательно, на срок службы ЭД, что является недостатком модели (12). В основу данного исследования положен тот факт, что все входящие величины носят вероятностный характер.

В свою очередь, параметр R_0 вычисляется следующим образом по (13):

$$R_0 = R_{20} \left(1 + \alpha \theta_{экспл}^0 \right), \quad (13)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления, $1/^\circ\text{C}$; R_{20} – начальное сопротивление изоляции ЭД, замеренное непосредственно перед вводом в эксплуатацию ЭД при температу-

ре 20°C; $\theta_{\text{экспл}}^0$ – эксплуатационная температура. Температурный коэффициент сопротивления содержится в программном обеспечении.

Эксплуатационная температура $\theta_{\text{экспл}}^0$ определяется в соответствии с режимом работы ЭД по (14):

$$\theta_{\text{экспл}}^0 = \theta_{\text{о.с.}}^0 + \tau_y, \quad (14)$$

где $\theta_{\text{о.с.}}^0$ – температура окружающей среды; τ_y – установившееся превышение температуры.

Установившееся превышение температуры τ_y определяется в зависимости от режима работы ЭД:

- для длительного режима работы ЭД с постоянной нагрузкой τ_y принимает вид (15):

$$\tau_y = \frac{P}{k_T S}, \quad (15)$$

где k_T – коэффициент теплообмена, включающий все виды охлаждения, Вт·м⁻²·°C⁻¹; S – охлаждаемая поверхность, м².

- для длительного режима работы ЭД с переменной нагрузкой (при сведении его к квазистационарному) τ_y можно рассчитать по формуле (16).

В данном режиме нагрузка на ЭД циклически меняется, не спадая до нулевого значения. В течение времени работы t_{p1} нагрузка на ЭД равна P_{p1} , а в течение времени $t_{p2} - P_{p2}$; T_n – постоянная времени нагрева:

$$\tau_y = \frac{P_{p1} \left(1 - e^{-\frac{t_{p1}}{T_n}} \right) + P_{p2} \left(e^{-\frac{t_{p1}}{T_n}} - e^{-\frac{(t_{p1}+t_{p2})}{T_n}} \right)}{1 - e^{-\frac{(t_{p1}+t_{p2})}{T_n}}}. \quad (16)$$

- для повторно-кратковременного режима работы ЭД по формуле τ_y

$$\tau_y = \frac{P \frac{1 - e^{-\frac{t_{p1}}{T_n}}}{e^{-\frac{(t_{p1}+t_{p2})}{T_n}}}}{1 + e^{-\frac{(t_{p1}+t_{p2})}{T_n}}}, \quad (17)$$

где в течение времени работы t_{p1} нагрузка на ЭД равна P_{p1} , а в течение времени $t_{p2} - P_{p2}$; T_n – постоянная времени нагрева

Параметр T_n – постоянная времени нагрева определяется согласно известной методике.

В свою очередь, совокупное влияние на срок службы изоляции температуры, влажности и агрессивных сред оценивается по следующему уравнению:

$$T_{\text{сл}}(t) = A e^{\frac{B}{\theta^0(t)} - m \cdot \varphi^{-n}}, \quad (18)$$

где $T_{\text{сл}}$ – срок службы или ресурс ЭД; $\theta^0(t)$ – средняя годовая температура, °K; C – концентрация агрессивного агента, г/м³ или %; φ – влажность, %; A , m , n – постоянные коэффициенты, зависящие от природы материала и режима работы двигателя. Они определяются экспериментально для каждого конкретного материала или оборудования; параметр $B = \frac{E_a}{R_c}$,

E_a – эффективная энергия активации процесса, вызывающего отказ. Она определяется для конкретного материала, Дж/моль; $R_c = 8,32$ Дж/град·моль – универсальная газовая постоянная. Если требуется учесть воздействие на ЭД только влажности воздуха, жидких агрессив-

ных сред или температуры, то принимается по формуле (18), соответственно: $m=0$; $n=0$; $m=0$ и $n=0$.

Характер изменения температуры во времени описывается случайным процессом:

$$\Theta^0(t) = \bar{\Theta}^0(t) + \psi(t), \quad (19)$$

где $\Theta^0(t)$ – средняя годовая температура, °K; t – время от 0 ч 1 января до 24 ч 31 декабря; ψ – случайная составляющая температуры, соответствующая времени t , °C.

Среднее значение $\bar{\Theta}^0(t)$ рассчитывается по формуле:

$$\bar{\Theta}^0(t) = A_0 + \sum_{i=1}^n (A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t), \quad (20)$$

где A_0 – коэффициент, численно равный математическому ожиданию средней годовой температуры, °C; A_i , B_i – амплитуды колебаний математического ожидания температуры, соответствующие частоте ω_i .

Характер изменения влажности описывается случайным процессом с математическим ожиданием:

$$\varphi(t) = C_0 + \sum_{j=1}^n (C_j \cos \omega_j t + D_j \sin \omega_j t) + \phi(t), \quad (21)$$

где C_0 – коэффициент, численно равный математическому ожиданию средней годовой влажности, %; C_j , D_j – амплитуды колебаний математического ожидания влажности, соответствующие частоте ω_j ; $\phi(t)$ – случайная составляющая влажности, соответствующая времени t , °C.

Таким образом, вследствие ряда необходимых подстановок и на основании вышеописанной цепочки зависимостей получена математическая модели, которая имеет вид (22):

$$R = R_{20} \left[1 + \alpha \left\langle A_0 + \sum_{i=1}^n (A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t) + \psi(t) + \tau_y \right\rangle \right] \cdot \exp \left\langle -t \cdot \left[A \cdot \exp \left\langle E_a \cdot C^{-m} \cdot \left(C_0 + \sum_{j=1}^n (C_j \cos \omega_j t + D_j \sin \omega_j t) + \phi(t) \right)^{-n} \cdot \left[R_2 \cdot \left(A_0 + \sum_{i=1}^n (A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t) + \psi(t) \right) \right]^{-1} \right\rangle \right] \right\rangle, \quad (22)$$

где R_{20} – начальное сопротивление изоляции ЭД, замеренное непосредственно перед вводом в эксплуатацию ЭД при температуре 20°C; α – температурный коэффициент сопротивления изоляции; A_0 – коэффициент, численно равный математическому ожиданию средней годовой температуры, °C; A_i , B_i – амплитуды колебаний математического ожидания температуры, соответствующие частоте ω_i ; $\psi(t)$ – случайная составляющая температуры, соответствующая времени t , °C; τ_y – установившееся превышение температуры; C – концентрация агрессивного агента, г/м³ или %; A , m , n – постоянные коэффициенты, зависящие от природы материала и режима работы двигателя. Они определяются экспериментально для конкретного материала или оборудования, приведены в диссертации О.Д. Гольдберга; E_a – эффективная энергия активации процесса, вызывающего отказ, определяемая для конкретного материала, Дж/моль; $R_2 = 8,32$ Дж/град·моль – универсальная газовая постоянная; C_0 – коэффициент, численно равный математическому ожиданию средней годовой влажности, %; C_j , D_j – амплитуды колебаний математического ожидания влажности, соответствующие частоте ω_j ; $\phi(t)$ – случайная составляющая влажности, соответствующая времени t – °C.

Полученная математическая модель (22) обладает неоспоримыми достоинствами, по сравнению с моделью Гольдберга (12). В основе разработанной модели лежит тот факт, что

температура и влажность, а также электрическое сопротивление являются вероятностными параметрами. Они рассмотрены в виде суммы тренда (медленной нерегулярной составляющей), периодических компонент (возможно, модулированных) и шума (обычно описываемого случайным процессом).

Эмпирические функции распределения температуры и влажности были построены путем аппроксимации семействами распределения Джонсона и Пирсона, а сопротивление изоляции – методом анализа сингулярного спектра. Благодаря чему модель учитывает возможные изменения температуры, влажности и сопротивления (случайные составляющие в модели), и строит прогноз работы двигателя на длительное время с относительной погрешностью 8%, что позволяет считать модель точной.

Помимо этого программное обеспечение, созданное на основе данной модели, позволяет произвести расчет и построение прогноза остаточного ресурса ЭД с минимальными затратами времени и денежных средств.

После введения данных программа производит их чтение и преобразование без участия оператора, согласно зависимостям (11)-(22), (прописанным в программном обеспечении) позволяющим осуществить выполнение поставленной задачи.

Затем осуществляется выбор закона распределения вероятности (Джонсона и Пирсона) или временного ряда (АСС, метод СС и МНК). В зависимости от выбранного варианта определяются параметры распределения α , β_2 , β_1 , B_0 , B_1 , B_2 , A , ε , η , λ , γ , ρ_0 , α_m , σ , α_n , μ , δ , рассмотренные в п. 2.2-2.4 диссертации.

После этого следует проверка модели на адекватность. В данном случае модель проходит проверку на основе значений параметра сопротивления изоляции ЭД. Иными словами, это позволит очертить границы применимости модели.

С учетом выше изложенного и на основании (22) разработан и представлен на рисунке 2 алгоритм для определения остаточного ресурса ЭД.

В завершение работы ПО на монитор выводится график прогноза остаточного ресурса ЭД или величина вероятности выхода ЭД из строя (если пользователь указал в начале работы с программой только этот параметр).

В ходе исследования проведены опыты на ЭД мощностью от 2,2 до 7,5 кВт, как наиболее распространенных в АПК (ООО АПГ «Алтайские закрома», ГУП АКГУП «Птицефабрика «Молодежная» Первомайского района, ООО «Птицефабрика «Комсомольская» Павловского района, ООО «Сибирь-Агро», ООО Племпредприятие «Барнаульское»), и построены зависимости значения сопротивления изоляции ЭД от времени его работы. У 214 двигателей были замерены токи в двух режимах с периодичностью четыре раза в месяц: при холостом ходе и при нагрузке. Экспериментальные данные заложены в программное обеспечение в виде таблиц, графическая интерпретация приведена на рисунке 3. В ходе проведения экспериментов выяснилось, что при достижении ЭД сопротивления 0,1 МОм (для ЭД мощностью от 2,2 до 7,5 кВт) он выходит из строя.

Из графиков видно, что в первый год эксплуатации сопротивление изоляции не изменяется, но в дальнейшем оно начинает уменьшаться и ближе к 3 годам в большинстве случаев ЭД выходит из строя. Для построения данных зависимостей было испытано более 200 двигателей, работающих в достаточно агрессивной среде сельскохозяйственных предприятиях.

Воздействие всех вышеупомянутых факторов экспериментально проверено в ходе исследования. Полученные результаты легли в основу разработанной модели, на основе которой создана методика, позволяющая прогнозировать остаточный ресурс ЭД с заранее заданной вероятностью.

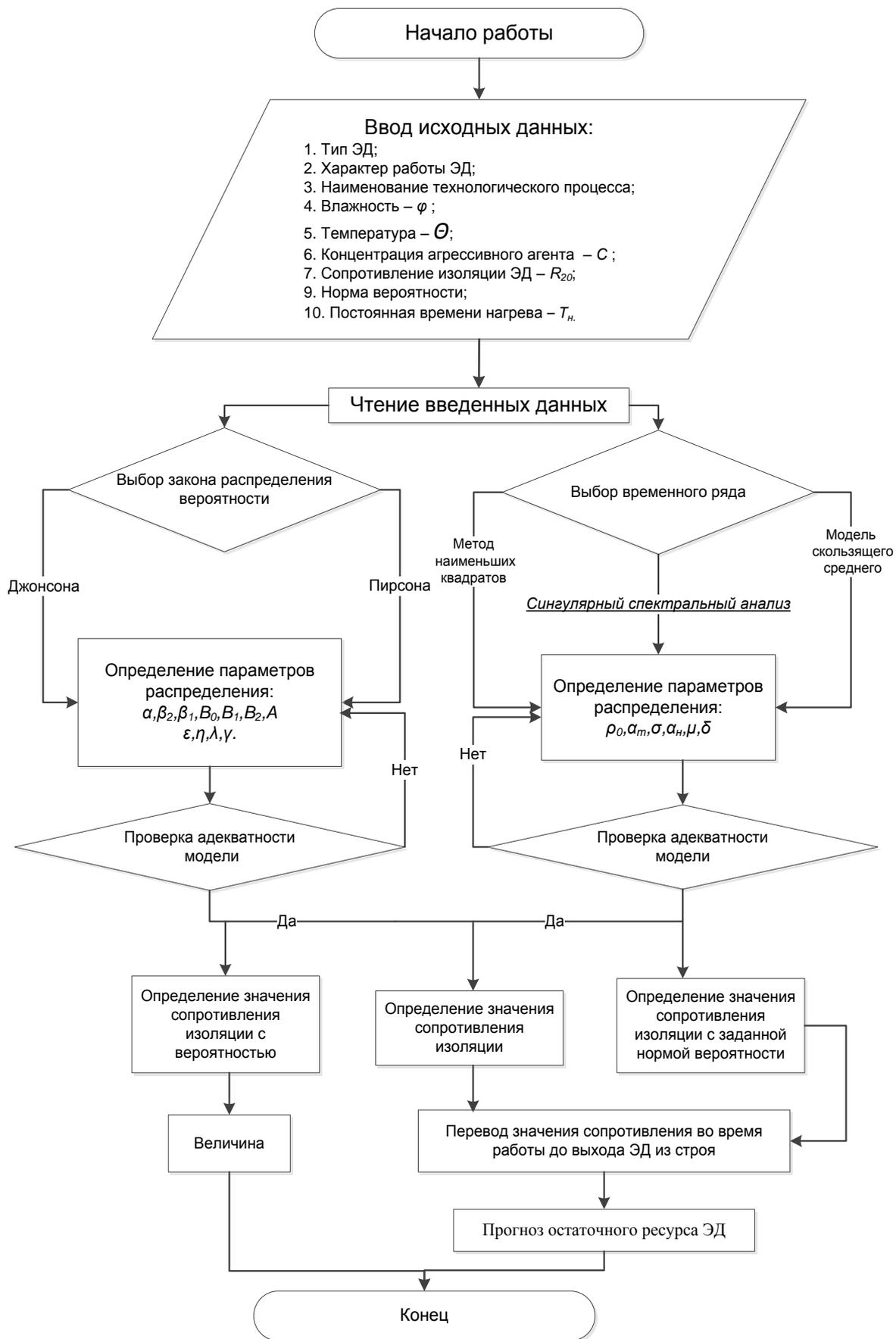
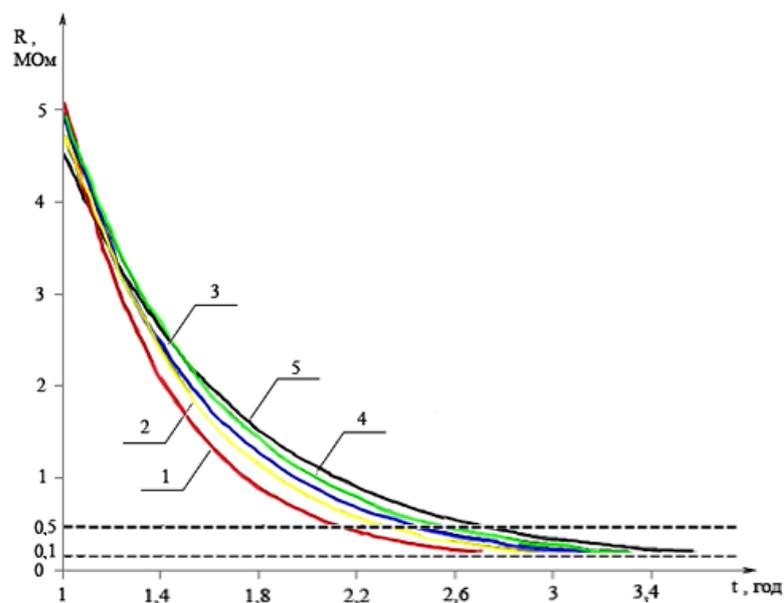


Рисунок 2 – Алгоритм работы программного обеспечения определения остаточного ресурса ЭД



1 – ЭД мощностью 7,5кВт, 2 – 5,5кВт, 3 – 4кВт, 4 – 3кВт, 5 – 2,2кВт
 Рисунок 3 – Графическая интерпретация зависимостей $R(t)$:

В качестве примера в диссертации представлены результаты использования АСС при прогнозировании сопротивления изоляции ЭД мощностью 5,5кВт в ООО Племпредприятие «Барнаульское». На основании полученных результатов сделан вывод о том, что метод АСС приемлем для моделирования и прогнозирования сопротивления. Он позволяет судить о дальнейшей работе двигателя. Длина окна, при которой достигнута наименьшая погрешность, составила 24 ч, что соответствует суточному графику.

В четвертой главе – результаты использования и внедрения разработанной методики – в качестве примера приведены результаты применения разработанной в ходе исследования методики прогнозирования надежности ЭД в двух сельскохозяйственных предприятиях Алтайского края, где она была внедрена: ООО Племпредприятие «Барнаульское» и ООО «Сибирь-Агро». В диссертации представлены таблицы с данными по ЭД, используемыми ПО в качестве исходных.

Суть методики «Прогнозирования надежности электродвигателя на основе вероятностной модели его технического состояния» заключается в следующем:

1. Определяются вводимые в программное обеспечение исходные данные (описаны в п. 3.1 диссертации).
2. Выполняются действия в соответствии с алгоритмом, представленном на рисунке 2.
3. После выполнения всех необходимых операций на монитор выводится график прогноза остаточного ресурса ЭД или величина вероятности выхода ЭД из строя (если пользователь указал в начале работы с программой только этот параметр).
4. В соответствии с полученными данными принимается решение о выполнении необходимых мероприятий по дальнейшему восстановлению/обслуживанию ЭД.

Для отработки методики прогнозирования работы ЭД использованы более 200 ЭД мощностью от 2,2 до 7,5 кВт, работающих в достаточно агрессивной среде, поскольку все они установлены на сельскохозяйственных предприятиях. 30% ЭД находились в эксплуатации больше полутора лет, 35% – эксплуатировались год, а 35% составляли новые двигатели. Регистрация показаний сопротивления изоляции велась мегаомметром ЭСО202/2Г. Климатические факторы измерялись прибором ДТ-321S, а примеси в воздухе – универсальными газоанализаторами упрощенного типа. Все значения занесены в базу данных ПО. В первый год сопротивление изоляции не изменялось, но при дальнейшей эксплуатации оно начало

уменьшаться и ближе к 3 годам большинство ЭД выходило из строя. Схема алгоритма работы ПО изображена на рисунке 3.

Возможности программного обеспечения позволяют прогнозировать объем работ, необходимых для ремонта каждого ЭД. В качестве примера, на рисунке 4 изображены графики прогноза остаточного ресурса ЭД, установленного на ООО «Сибирь-Агро». На рисунках два графика значений сопротивления изоляции – R_f^* -фактическое и R_n^* -прогнозируемое, где $R^* = R/R_{норм}$, $R_{норм} = 0,5 МОм$.

Согласно графику, изображенному на рисунке 4, эксплуатация ЭД на объекте составила около двух лет и семи месяцев. Далее происходит обрыв графика фактической работы, а график прогноза продолжается на срок около полугода и обрывается при $R^* = 0,1$ (для ЭД мощностью от 2,2кВт до 7,5кВт согласно данным исследования). В этом случае двигатель отправляется на осмотр и осуществление ремонтных работ. R_n^* практически полностью повторяет R_f^* , что позволяет судить о качестве созданной модели.

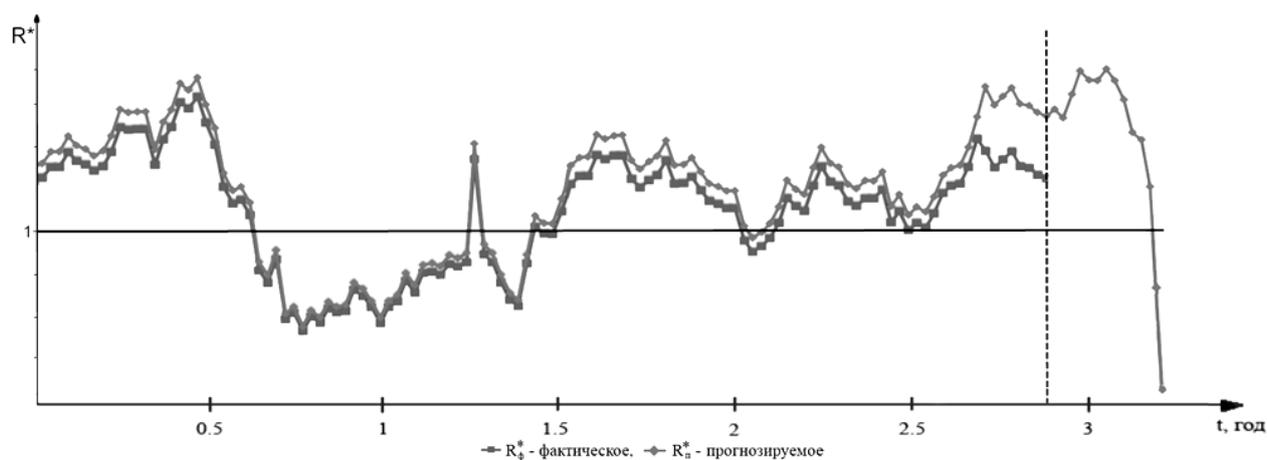


Рисунок 4 – График прогноза работы ЭД (АО2-81-4УЗ) на ООО «Сибирь-Агро» согласно предлагаемой методике

Экономический эффект от использования методики прогнозирования эксплуатационной надежности ЭД на основе вероятностной модели технического состояния обусловлен снижением потерь от простоя оборудования и выпуска продукции за счет проведения мониторинга, позволяющего своевременно применять целенаправленные защитные мероприятия. Условно-годовая экономия определяется путем сравнения базового варианта, в котором обслуживание ЭД осуществляется без использования разработанной методики, и варианта с учетом предлагаемой методики.

Обоснована экономическая эффективность использования методики прогнозирования надежности ЭД на основе вероятностной модели его технического состояния. Произведена оценка внедрения разработанной методики: эффективность ее использования составляет 3049,45 рублей в расчете на один ЭД (или 17,82%). Расчетный экономический эффект внедрения – 1,4 – 1,6 руб. на рубль затрат.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Проведенный в исследовании анализ современного состояния систем и методов диагностирования ЭО показал, что существующие в настоящее время средства диагностики, основанные на использовании методов прямых измерений, требуют больших капиталовложений от сельскохозяйственного предприятия. Следовательно, требуется разработка новых методов диагностики, позволяющих определить один из наиболее важных параметров надежности – его остаточный ресурс без значительных материальных вложений на основе обработки статистической информации о работе ЭО на исследуемом объекте.

2. В качестве функции для определения случайных величин, влияющих на остаточный ресурс ЭД, основными из которых являются температура и влажность, были использованы семейство распределений Пирсона *I-го* типа (бета-распределение) и *S_B*-Джонсона, поскольку именно они дают наименьшую погрешность, не превышающую 5% фактических значений этих величин.

3. Разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать остаточный ресурс ЭД с заранее оговоренной вероятностью выхода из строя. Точность модели составила 8%. Тот факт, что разработанная математическая модель учитывает индивидуальные особенности эксплуатируемого на предприятии ЭД (тип, характер работы и наименование технологического процесса), позволяет судить о ее гибкости (адаптивности) к прогнозу остаточного ресурса ЭД.

4. Созданное на основе математической модели программное обеспечение для определения остаточного ресурса ЭД, в котором используется метод АСС для определения сопротивления изоляции позволяет осуществить краткосрочный или среднесрочный прогноз остаточного ресурса двигателя с точностью до 85%, наилучшим краткосрочным интервалом прогнозирования, при котором достигается наименьшая погрешность, является 24 ч.

5. На основе вероятностной модели технического состояния ЭД определена экономическая эффективность использования методики прогнозирования его надежности. Произведена оценка внедрения данной методики. Эффективность использования составила 3049,45 рублей в расчете на один ЭД (или 17,82%). Расчётный экономический эффект внедрения – 1,4 – 1,6 руб. на рубль затрат.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. **Мартко, Е.О.** Вероятностный подход к оценке факторов, влияющих на работу электроустановок [Текст] / Р.С. Старухин, О.И. Хомутов, И.В. Белицын, Е.О. Мартко, А.В. Макаров // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. – № 4. – С. 215 - 224.
2. **Мартко, Е.О.** Сингулярный спектральный анализ как метод моделирования электрической нагрузки [Текст] / Е.О. Мартко, И.В. Белицын // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – № 4. – С. 76 - 86.
3. **Мартко, Е.О.** Моделирование электрической нагрузки методом сингулярного спектрального анализа [Текст] // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. – № 4. – С. 86 – 96.
4. **Мартко, Е.О.** Вероятностный анализ факторов, влияющих на изоляцию электродвигателей [Текст] // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. – № 2/1. – С. 147-153.
5. **Мартко, Е.О.** Определение остаточного эксплуатационного ресурса внутренних электрических проводок в жилых, Общественно коммунальных и производственных помещениях 220/380 В городов и сельских населенных пунктов [Текст] // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2011. – № 2/2. – С.123-128.
6. **Мартко, Е.О.** Модели надежности и технического состояния изоляции электродвигателей, используемые для прогнозирования выхода их из строя [Текст] // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. – №4/2. – С. 138-142.
7. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.** Определение типа распределения случайной величины метеорологических характеристик по Джонсону и Пирсону (Meteo) [Текст] / Е.О. Мартко [и др.]. – № **2008613209**, заявл. 04.05.2008; опубл. 10.11.2010, Бюл. №31.

Публикации в других изданиях

8. **Мартко, Е.О.** Влияние вероятностных факторов на работу электродвигателей [Электронный ресурс] / Е.О. Мартко, О.И. Хомутов // V Всероссийская научно-техническая конференция «Наука и молодежь 2008» / Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова. – Электрон, дан. – Барнаул: АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2008. – Режим доступа: http://edu.secna.ru/media/f/epp_.pdf – Загл. с экрана.
9. **Мартко, Е.О.** Новый подход к прогнозированию надежности электродвигателей [Текст] / Е.О. Мартко, И.В. Белицын // материалы 2-й международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы сельского хозяйства горных территорий». – Горно-Алтайск : РИО ГАГУ, 2010. – С. 44-45.
10. **Мартко, Е.О.** Применение метода Singular Spectrum Analysis к прогнозированию надежности электродвигателей [Электронный ресурс] / Е.О. Мартко, О.И. Хомутов // VI Всероссийская научно-техническая конференция «Наука и молодежь 2009» / Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова. – Электрон, дан. – Барнаул: АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2009. – Режим доступа: <http://edu.secna.ru/media/f/epp.pdf> – Загл. с экрана.
11. **Мартко, Е.О.** Алгоритм сингулярного спектрального анализа и его применение для моделирования электрических нагрузок [Текст] / Е.О. Мартко, О.И. Хомутов, И.В. Белицын // Материалы X-ой международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация». – Барнаул: АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2009. – С. 148-150.
12. **Мартко, Е.О.** Распределение Пирсона и его применение для задач энергетики [Текст] / Е.О. Мартко, О.И. Хомутов, И.В. Белицын // Материалы X-ой международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация». – Барнаул: АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2009. – С. 195-202.
13. **Мартко, Е.О.** Анализ структуры фермерского хозяйства на примере ферм КРС и свиноферм электродвигателей [Электронный ресурс] / Е.О. Мартко, О.И. Хомутов // VII Всероссийская научно-техническая конференция «Наука и молодежь 2010» / Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова. – Электрон, дан. – Барнаул: АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2010. – Режим доступа: http://edu.secna.ru/media/f/epp_.pdf - Загл. с экрана.
14. **Мартко, Е.О.** Анализ внешней среды работы электродвигателей в фермерском хозяйстве [Текст] / Е.О. Мартко, О.И. Хомутов // Материалы XII-ой городской научно-практической конференции молодых ученых «Молодежь Барнаулу». Т.2. – Барнаул: Изд-во ААЭП, 2011. – С. 63-65.
15. **Мартко, Е.О.** Влияние состояния межвитковой изоляции на работу двигателей на предприятии сельского хозяйства [Текст] // Ползуновский альманах. – Барнаул: АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2011. – №2. – С. 111-114.
16. **Мартко, Е.О.** Факторы, влияющие на сопротивление корпусной изоляции и межвитковое сопротивление корпусной изоляции [Текст] / Е.О. Мартко // Материалы научно-технической конференции «Энергоэффективность и энергоресурсосбережение» Филиала «МРСК Сибири» - «Алтайэнерго» и АлтГТУ им. И.И. Ползунова / Алт. гос.техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : типография АлтГТУ, 2011. –С.19-23.
17. **Мартко, Е.О.** Показатели качества изоляции электродвигателя [Электронный ресурс] / Е.О. Мартко, О.И. Хомутов // XIII Всероссийская научно-техническая конференция «Наука и молодежь 2011» / Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова. – Электрон, дан. – Барнаул: АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2011. – Режим доступа: http://edu.secna.ru/media/f/epp_.pdf – Загл. с экрана.
18. **Мартко, Е.О.** Параметры среды, влияющие на работу электродвигателей предприятия сельского хозяйства [Текст] / Е.О. Мартко // IV Международная научно-практическая конференция «Применение инновационных технологий в научных исследованиях». – Курск, 2012. – 4 с.

19. **Мартко, Е.О.** Singular Spectrum Analysis как новый подход к прогнозированию надежности электродвигателей в сельском хозяйстве [Текст] / Е.О. Мартко // XII Региональная студенческая научно-практическая конференция. – Томск, 2012. – С. 29-310.
20. **Мартко, Е.О.** Особенности работы электродвигателей в животноводстве [Текст] / Е.О. Мартко // Материалы научно-технической конференции «Электроэнергия. Транспорт, надежность и учет» Филиала «МРСК Сибири» - «Алтайэнерго» и АлтГТУ им. И.И. Ползунова / Алт. гос.техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : типография АлтГТУ, 2012. – С. 111-113.
21. **Мартко, Е.О.** Вероятностная оценка факторов, влияющих на работу электродвигателей в сельском хозяйстве [Текст] / Е.О. Мартко. – Сборник научных статей международной школы-семинара «Ломоносовские чтения на Алтае» в 4 ч. – Ч.II. – Барнаул : АлтГПА, 2012. – С. 192-197.
22. **Мартко, Е.О.** Методы оценки параметров функций распределения случайных величин, влияющих на работу электродвигателя в сельском хозяйстве [Текст] / Е.О. Мартко, Л.В. Куликова. – Электронный периодический научный журнал «SCI-ARTICLE.RU», 2013. – №3. – С. 123-126.
23. **Мартко, Е.О.** Моделирование электрической нагрузки электродвигателя методом анализа сингулярного спектра [Текст] / Е.О. Мартко, Д.А. Барсов, И.В. Плотников. – Современные проблемы электроэнергетики. Алтай 2014 [Электронный ресурс] : сборник статей II Международной научно-технической конференции / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Электрон. дан. и прогр. – Барнаул : ЦЭОР АлтГТУ, 2014. – С. 14-19.
24. **Мартко, Е.О.** Прогнозирование времени работы электродвигателя до отправки на ремонт [Текст] / Е.О. Мартко. – Современные проблемы электроэнергетики. Алтай 2014 [Электронный ресурс] : сборник статей II Международной научно-технической конференции / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Электрон. дан. и прогр. – Барнаул : ЦЭОР АлтГТУ, 2014. – С.172-179.
25. **Мартко, Е.О.** Результаты применения методики прогнозирования надежности электродвигателя на основе вероятностной модели его технического состояния [Электронный ресурс] / Е.О. Мартко, Л.В. Куликова // SCI-ARTICLE.RU. 2015. URL: <http://sci-article.ru/stat.php?i=1428063911> (дата обращения: 16.04.2015).