

На правах рукописи



Кобозев Евгений Владимирович

**ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ
НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИХ
ДИАГНОСТИКИ В УСЛОВИЯХ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование
в сельском хозяйстве

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Барнаул 2009

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

Научный руководитель:	кандидат технических наук, профессор П. И. Семичевский (ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина»)
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор А. И. Тищенко (ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»); кандидат технических наук, доцент В. Г. Ляпин (ФГОУ ВПО «Новосибирский государственный аграрный университет»)
Ведущая организация	ФГОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится «26» июня 2009 года в 9-00 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.
e-mail: jvk2@yandex.ru

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

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

Автореферат разослан «25» мая 2009 г.

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



Л. В. Куликова

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время, в результате спада промышленного производства, снизилась обеспеченность сельскохозяйственных предприятий электрическим оборудованием, особенно электрическими машинами. Кроме того, техническое обслуживание данного электрооборудования часто проводится несвоевременно, а его ремонт осуществляется не всегда удовлетворительно. Задача повышения эффективности сельскохозяйственного производства не может быть успешно решена без повышения надежности работы электрооборудования и, в частности, электродвигателей, как наиболее распространенного в сельском хозяйстве типа электрических машин.

В свою очередь, показатели надежности и безотказности любой электроэнергетической системы, в том числе и столь сложного объекта как асинхронный двигатель (АД), зависят от условий и режимов эксплуатации, а также применяемых методов и средств его технического обслуживания и ремонта. Основными факторами воздействия на изоляцию электрических двигателей внешней среды являются влияние химически-агрессивных примесей, а также действие влаги, содержащейся в воздухе, газе или попадающей на изоляцию в виде жидкости. Кроме того, возможно абразивное действие пыли, содержащейся в воздухе. Механическим воздействиям изоляция подвергается как во время изготовления и ремонта, так и во время эксплуатации.

В сельском хозяйстве АД нередко работают в весьма тяжелых условиях. Отсутствие квалифицированного электротехнического персонала также играет немаловажную роль, поскольку зачастую функции энергетиков исполняют люди, далекие от вопросов грамотного решения проблем и вопросов, возникающих в процессе эксплуатации электрооборудования. Поэтому в большинстве случаев причинами отказов асинхронных двигателей являются неправильное их применение (15 – 35 % отказов), недостатки эксплуатации (35 – 50 % отказов) или низкое качество ремонта. Примерно 30 – 35 % отказов происходит вследствие недостатков конструкции и технологии производства двигателей. Лишь 10 – 12 % двигателей выходят из строя вследствие естественных процессов старения и износа.

Как правило, АД используются сезонно, а условия их хранения в период эксплуатационной паузы не всегда удовлетворительны, что также снижает уровень надёжности. Кроме того, АД определённой части сельскохозяйственного оборудования часто работают с недогрузкой по мощности, а качество питающего напряжения не всегда соответствует установленным нормам, что снижает срок службы двигателя. При этом предприятия сталкиваются с проблемой планирования сроков ремонта АД, так как под влиянием дестабилизирующих факторов двигатель может выйти из строя гораздо раньше расчетного срока.

Существуют и другие причины, влияющие на эксплуатационную надёжность АД в агропромышленном комплексе (АПК), такие как, например, использование двигателей старых серий и частые капитальные ремонты, качество которых, как правило, недостаточно высокое. К этому следует добавить и тот факт, что предприятия АПК испытывают недостаток (а иногда и полное отсутствие) технических средств диагностики и контроля. Длительная и безаварийная работа двигателей во многом определяет эффективность всего производства, поэтому повышение эффективности производства напрямую зависит от надёжной работы двигателей.

В настоящее время в сельском хозяйстве страны эксплуатируется более 4 млн. электродвигателей. При аварийности электродвигателей хотя бы в 1 % сельское хозяйство страны ежегодно может терпеть ущерб, превышающий 500 млн. руб., поскольку отказы в их работе ведут к остановке отдельных механизмов и часто к полному прекращению всего производственного процесса. В результате наносимый предприятиям ущерб связан не только с заменой или ремонтом вышедших из строя электродвигателей, но и с браком и недовыпуском сельхозпродукции. Это обстоятельство требует более действенных мер по определению времени до выхода из строя электродвигателя – наработки до отказа.

Исходя из этого, сформулирована проблемная ситуация, заключающаяся в противоречии между необходимостью определения момента выхода из строя электродвигателя и отсутствием простых и доступных способов прогнозирования остаточного срока службы двигателя.

Целью настоящей диссертационной работы является разработка системы прогнозирования срока службы электрических двигателей на основе логической зависимости, позволяющей дать количественную оценку степени влияния на показатель наработки до отказа факторов, воздействующих на электродвигатель в процессе эксплуатации, а также пропитки и сушки изоляции АД как одного из важнейших этапов ремонта.

Объект исследования. Процессы изменения состояния изоляции электродвигателей под влиянием внешних воздействующих факторов.

Предмет исследования состоит в выявлении логической зависимости показателя наработки до отказа от воздействующих на электродвигатель в процессе эксплуатации и ремонта факторов.

Основные задачи:

- обоснование целесообразности прогнозирования наработки до отказа электродвигателей в сельском хозяйстве;
- выбор и обоснование методов оценки степени влияния внешних воздействующих факторов на состояние изоляции асинхронных двигателей;
- исследование используемых на практике технологий пропитки и сушки, а также разработка математической модели пропитки и сушки изоляции электродвигателей, устанавливающей взаимосвязь между параметрами процесса пропитки и сушки изоляции и значениями показателя качества ремонта;

- разработка методики оптимизации параметров пропитки и сушки изоляции электродвигателей;
- построение зависимости, позволяющей оценить степень влияния внешних воздействующих факторов на наработку до отказа АД;
- разработка экспертной системы прогнозирования срока службы электрических двигателей на основе математической модели прогнозирования наработки до отказа АД, позволяющей оценить остаточный срок службы электродвигателя при дестабилизирующем воздействии внешних факторов.

Методы исследования. При выполнении работы использовались методы математического моделирования, математической статистики, теории случайных функций, теории оптимизации, информационно-логический анализ. Экспериментальная часть исследования выполнена с помощью компьютерного моделирования и натурных экспериментов.

Научная новизна. Разработана математическая модель процесса пропитки и сушки изоляции АД, устанавливающая взаимосвязь между воздействующими в процессе пропитки и сушки изоляции факторами и показателем качества ремонта. На основе данной модели создана методика оптимизации параметров пропитки и сушки изоляции АД.

Разработана экспертная система прогнозирования срока службы электрических двигателей на основе математической модели прогнозирования наработки до отказа АД, позволяющая оценить остаточный срок службы изоляции электродвигателя при дестабилизирующем воздействии внешних факторов, а также учитывающая качество проведенных восстановительных мероприятий.

Практическая значимость. Использование полученной математической модели и современных средств вычислительной техники дает возможность повысить эффективность сельскохозяйственного производственного процесса путём прогнозирования наработки до отказа АД в условиях реального производства. Разработанные модели оценки срока службы АД могут быть использованы при эксплуатации парка электродвигателей агропромышленных предприятий Алтайского края, а также за его пределами. Применение данной системы позволит снять с человека большую часть трудоемкого процесса принятия решений при планировании ремонта и, тем самым, значительно сократить время на проведение вычислительных операций.

Реализация и внедрение результатов работы. Основные результаты работы использованы и внедрены на объектах агропромышленного комплекса Алтайского края. Разработанная методика и рекомендации по восстановлению работоспособности АД, а также модель прогнозирования наработки до отказа АД, работающих в условиях сельскохозяйственного производства, внедрены на ОАО Алтайский приборостроительный завод «Ротор», ООО «Агропромэнерго» г. Камень-на-Оби, ЗАО «Тайминский» Красногорского района, ЗАО «Горный нектар» Красногорского района,

ООО «Восточное» с. Целинное, ООО АКХ «Ануйское» Петропавловского района.

Апробация. Основные положения были доложены и одобрены на Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Техника. Инновации» (Новосибирск, 2003 г.), IV Международной научно-технической конференции «Электрическая изоляция» (Санкт-Петербург, 2006 г.), IV Всероссийской научно-технической конференции «Вузовская наука – региону» (Вологда, 2006 г.), Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (Барнаул, 2006-2007 гг.), Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2006-2007 гг.), II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (Тольятти, 2007 г.), IX научно-практической конференции «Молодежь – Барнаулу» (Барнаул, 2007 г.), ежегодных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава АлтГТУ (Барнаул, 2004-2007 гг.).

На защиту выносятся:

- математическая модель процесса пропитки и сушки изоляции АД, устанавливающая зависимость показателя качества ремонта от воздействующих в процессе пропитки и сушки на обмотку факторов;

- методика оптимизации параметров пропитки и сушки изоляции АД, позволяющая с учётом специфики и сезонности работы электродвигателей на предприятиях АПК разрабатывать рекомендации по режимам выполнения восстановительных мероприятий в каждом конкретном случае;

- экспертная система прогнозирования срока службы электрических двигателей на основе математической модели прогнозирования наработки до отказа АД, позволяющей оценить остаточный срок службы электродвигателя при дестабилизирующем влиянии во время эксплуатации внешних воздействующих факторов.

Публикации. По материалам проведенных исследований опубликовано 25 печатных работ, из них 1 монография и 1 учебное пособие.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованной литературы, включающего 148 наименований. Работа изложена на 132 страницах машинописного текста, содержит 15 рисунков и 45 таблиц.

Автор выражает искреннюю благодарность Хомутову Станиславу Олеговичу и Грибанову Алексею Александровичу за помощь в работе над диссертацией, ценные советы, замечания и предложения.

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 частности, асинхронных электродвигателей в агропромышленном комплексе, общие сведения об условиях эксплуатации и статистика отказов электродвигателей в сельском хозяйстве. Кроме того, приведены результаты анализа причин и последствий отказов электродвигателей, закономерностей появления отказов.

Для определения характера и причин отказов электродвигателей проводилось систематическое изучение материалов эксплуатации значительного количества асинхронных двигателей (АД) в различных отраслях народного хозяйства. Были установлены основные виды повреждений изоляции обмоток электродвигателей, последовательно проанализированы причины, вызывающие те или иные повреждения, поскольку не все они одинаково влияют на надежность электрооборудования.

Из проведенного анализа статистических данных причин выхода электродвигателей из строя сделан вывод о том, что значительную их долю составляют отказы АД, вызванные старением изоляции обмоток статора под воздействием ряда факторов, таких как влага, агрессивные газы, тепловые и механические нагрузки. Поскольку условия эксплуатации в сельском хозяйстве отличаются разнообразием негативно воздействующих на электродвигатель факторов, была проведена их группировка и классификация. Принципиально все факторы были разделены на две группы: внешние, обусловленные воздействием окружающей среды и условий работы АД, и внутренние, определяемые воздействием человека в процессе изготовления и эксплуатации. Внешние факторы, в свою очередь, разделены на три группы: климатические, механические, технологические. Внутренние же факторы определяют старение и износ оборудования. При этом, под старением мы подразумеваем естественный процесс постепенного изменения физических и химических свойств материалов, а износ обусловлен, в основном, трением, а также действием электрического тока и напряжения.

Так как ущерб от выхода электродвигателей складывается из прямого ущерба (стоимости электродвигателя или его капитального ремонта и расходов по его замене) и технологического ущерба, который наносится производству из-за простоя технологического оборудования или порчи продукции, вследствие аварии электродвигателя, каждая авария электродвигателя в среднем наносит сельскохозяйственному производству ущерб 10 – 12 тыс. руб., то требуются действенные меры по определению времени до выхода из строя электродвигателя. Особенно остро данный вопрос

встает при авариях электродвигателей в крупных автоматизированных комплексах, когда авария одного электродвигателя влечет за собой остановку целого ряда технологически связанного оборудования.

В результате проведенного комплексного анализа, сделан вывод о том, что для оценки наработки до отказа электродвигателей необходимо создание математической модели, позволяющей без значительных затрат описать все влияющие на изоляцию электродвигателей параметры.

Во втором разделе проведен комплекс теоретических исследований, посвященных оценке влияния воздействующих на изоляцию факторов, а также построению математической модели прогнозирования наработки до отказа электродвигателей.

Так как сложный процесс, как и любая сложная система, представляет собой составной объект, то части его мы рассматривали как составляющие системы, объединенные в единое целое в соответствии с определенными принципами или связанные между собой заданными отношениями. Также была рассмотрена возможность применения информационно-логического анализа для изучения стохастических процессов в технических системах.

Проведенные исследования показали, что как статистика, так и теория информации имеет дело с разнообразием элементов некоторой совокупности, но их подход к задачам совершенно различен. Статистика пытается выяснить, что же можно все-таки утверждать или сделать, несмотря на разнообразие. Теория информации рассматривает разнообразие как положительное явление, без которого такие операции, как отбор, связь, спецификация, были бы не возможны; эта теория стремится выяснить, что можно достичь благодаря некоторой степени разнообразия. Наше суждение о появлении того или иного значения функции A в какой-то мере неопределенно, и величину этой неопределенности можно оценить количественно. Она обозначается как $H(A)$ для явления A или $H(B)$ для явления, фактора, параметра B и определяется по формуле:

$$H(A) = - \sum p(a_i) \cdot \log_2 p(a_i) \quad (1)$$

Смысл этой формулы можно изложить так: неопределенность появления разных значений функции A равна сумме произведений вероятности появления каждого ранга $p(a_i)$ на двоичный логарифм этой же вероятности. Максимального значения неопределенность явления достигает при равновероятности всех его состояний. Если же изучается зависимость явления A от параметра (фактора) B , необходимо учесть также и неопределенность фактора B , которая находится таким же образом по условной вероятности появления каждого ранга $p(b_j)$. Обозначение b_j показывает, что число рангов B может быть произвольным и отличаться от числа рангов появления A . В этом случае вероятность рангов a_i в каждом ранге обозначается через $p(a_i/b_j)$. Для каждого b_j можно рассчитать неопределенность:

$$H(A/b_j) = - \sum p(a_i/b_j) \cdot \log_2 p(a_i/b_j) \quad (2)$$

Вычленение прямого влияния параметра на изучаемое явление основывается на сопоставлении частных информаций, передаваемых каждым параметром, с величиной информации, передаваемой ими совместно.

Заключительным этапом было сопоставление теоретических и наблюдаемых распределений частот различных значений. На основе этого была выбрана наиболее подходящая гипотеза. Результатом явилась модель, где входные параметры – некоторые значения различных факторов, а выходные параметры – значение функции.

Рассмотренные в работе сильные и слабые стороны различных видов анализа экспериментальных данных позволили сделать вывод о том, что из-за большого множества сочетаний различных факторов, влияющих на состояние изоляции, а также ограниченного количества данных, для поставленных задач наиболее подходящим является информационно-логический анализ. Выбранный математический метод позволяет оценить и неучтенные ранее факторы, что делает анализ более достоверным. Также данный метод является более подходящим для определения количественной оценки степени влияния факторов.

В процессе изучения физико-химических явлений, протекающих при восстановлении изоляции статорных обмоток, особое место мы отвели переносу энергии и массы вещества, являющимся одним из важнейших предметов исследования в современной науке и имеющим большое практическое значение в энергетике. Существующие на сегодняшний день методы восстановления электрической изоляции, в частности, пропитки и сушки обмоток ЭД, не позволяют в полной мере реализовать основные положения теории тепломассообмена.

Как известно, проникновение вещества через пленку складывается из адсорбции (растворения), диффузии, десорбции с другой стороны пленки. Любое твердое вещество обладает поверхностью и, следовательно, потенциально является адсорбентом. Таким образом, обмотка статоров асинхронных электродвигателей с развитой внутренней поверхностью может быть представлена как твердый адсорбент.

При отсутствии сильного взаимодействия между сорбентом и сорбатом равновесие устанавливается довольно быстро и скорость суммарного процесса определяется скоростью процесса диффузии, описываемого уравнением Фика:

$$q = -D \cdot \frac{dc}{dx} \cdot S_{\tau}, \quad (3)$$

где q – количество продиффундировавшего вещества,

D – коэффициент диффузии,

$\frac{dc}{dx}$ – градиент концентрации,

S – площадь,

τ – время.

Однако на практике для оценки количества прошедшего через пленку вещества чаще используют коэффициент проницаемости, который представляет собой произведение коэффициента диффузии D на коэффициент сорбции δ .

В данном разделе мы подробнее остановились на таких показателях качества пропитки, как высота поднятия жидкого адгезива в щелях и порах твердой поверхности, а также глубина проникновения пропитывающего состава внутрь тела обмотки. Высотой капиллярного поднятия пропитывающей жидкости может быть охарактеризована пропитка образцов типа пучка проволок или волокон, т. е. в данном случае будет справедливо следующее равенство:

$$h = \frac{\sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot R}. \quad (4)$$

Как известно, явление переноса энергии и вещества при сушке подчиняется общим закономерностям термодинамики необратимых процессов. Для изучения физической системы ее заменяют абстрактной системой с теми же отношениями, и задача становится чисто математической.

На основе анализа полученных в работе зависимостей был сделан вывод о том, что связь между безразмерной температурой и безразмерным потенциалом массосодержания имеет вид:

$$U = \frac{1}{(1 - \&) \cdot Ko} \cdot T. \quad (5)$$

Критерием Ko в данной формуле (5) характеризуются компоненты связанного вещества в обмотке статора. При этом, зная физические параметры удаляемого компонента из обмотки, критерий термомеханического увлечения и безразмерную температуру T , можно определить количество удаляемого компонента.

Практическая же реализация сделанных теоретических предпосылок позволила внести необходимые коррективы в выбор режимов пропитки и сушки.

Существует проблема выбора методов оптимизации для решения конкретных практических задач, поскольку разные методы решения оптимизационных задач обеспечивает различную точность, и каждый метод обладает той или иной сложностью вычислений.

Для разработки алгоритма оптимизации сочетания технологий пропитки и сушки изоляции с условиями эксплуатации электродвигателей (рисунок 1) мы использовали метод сплошного перебора вариантов, как наиболее простой по реализации процедур сравнения. Он заключается в последовательном отборе вариантов, удовлетворяющих поставленным условиям.

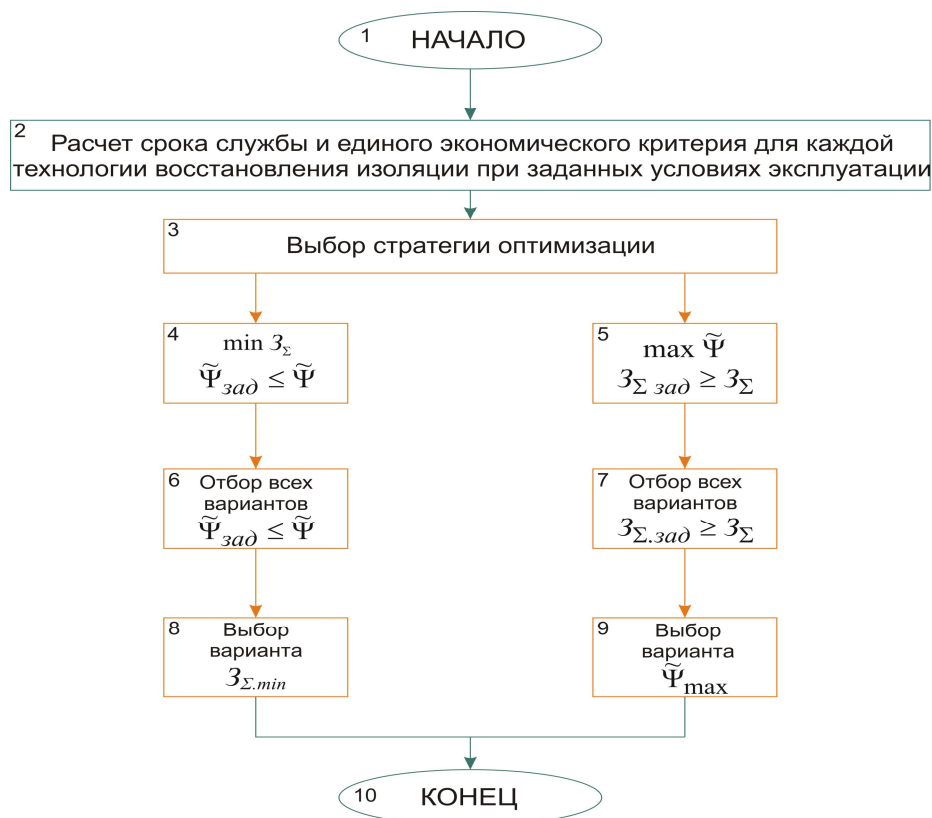


Рисунок 1 – Алгоритм оптимизации сочетания технологий пропитки и сушки изоляции с условиями эксплуатации электродвигателей

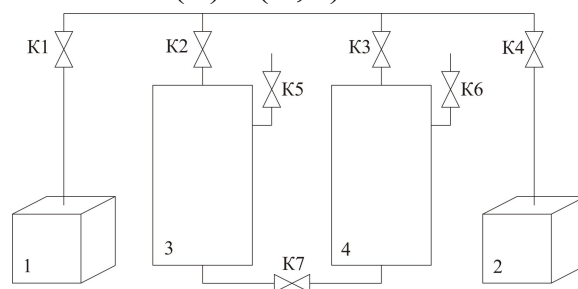
На первом этапе рассчитываются значения срока службы и единого экономического критерия, характеризующих то, насколько эффективно использование каждой из технологий восстановления изоляции в заданных условиях эксплуатации (блок 2). Для дальнейшего решения задачи оптимизации производится выбор стратегии оптимизации, который обусловлен практической необходимостью выбора технологии (блок 3).

В случае выбора стратегии минимизации единого экономического критерия при ограничении срока службы (блок 4) производится последовательный отбор вариантов по условиям ограничения минимального срока службы (блок 6). Из оставшихся выбирается вариант с минимальным значением единого экономического критерия (блок 8).

В случае выбора стратегии максимизации срока службы при ограничении значений единого экономического критерия (блок 5) производится последовательный отбор вариантов по условиям ограничения единого экономического критерия (блок 7). Из оставшихся выбирается вариант с максимальным значением срока службы (блок 9).

Воплощением результатов исследований на практике явилось применение разработанных методик оптимизации для решения конкретных производственных задач. При этом необходимо использование при решении задач разумных ограничений, которые должны обеспечивать законченность процесса и реальность решения задачи.

Третий раздел посвящен экспериментальным исследованиям зависимости качества изоляции от режимов пропитки и сушки, а также построению зависимости качества восстановления обмоток электродвигателей от параметров технологических режимов. Для решения данной задачи был использован информационно-логический анализ, преимущество которого заключается в возможности с его помощью оценивать многочисленные и самые разнообразные состояния факторов, оказывающих влияние в принципе на любые явления. Используя экспериментальные данные, полученные в результате лабораторных испытаний на установке по пропитке и сушке (рисунок 2), определяем энтропию $H(A)$, энтропию $H(T)$, количество информации $T(A,T)$, коэффициент эффективности передачи информации фактором B к явлению A ($K(A,B)$).



1 – вакуумный насос, 2 – нагнетающий насос, 3 – автоклав для пропитки и сушки обмоток, 4 – сосуд для хранения лака, K1 – K7 – система вакуумных трубопроводов, вакуумные быстродействующие задвижки и клапаны.

Рисунок 2 – Функциональная схема установки для вакуумной пропитки и сушки

По результатам расчетов были выстроены коэффициенты эффективности передачи информации в порядке убывания, т. е. по степени влияния каждого конкретного фактора на наработку до отказа:

- 1) глубина вакуума – 0,262.
- 2) время сушки – 0,171.
- 3) время пропитки – 0,167.
- 4) температура пропитки – 0,103.
- 6) температура сушки – 0,033.

В результате логического анализа была получена следующая зависимость для обобщенного диагностического параметра Ψ :

$$\Psi = K_{Г.В.} \vee (K_{Тс} \vee K_{Тпр} \vee K_{тн}) \otimes K_{В.Ц.} \otimes K_{тс}, \quad (6)$$

где K^* - эффективность канала связи:

- $K_{Г.В.}$ – глубина вакуума;
- $K_{Тс}$ – время сушки;
- $K_{Тпр}$ – время пропитки;
- $K_{тн}$ – температура пропитки;
- $K_{В.Ц.}$ – количество циклов создания вакуума;
- $K_{тс}$ – время сушки.

Данная логическая зависимость выражает следующее:

а) в модели параметры выстроены по степени влияния на ОДП слева направо, а значения эффективностей канала связи каждого из параметров выражают количественное влияние каждого из параметров на ОДП,

б) логическая функция дизъюнкции, обозначаемая $\vee$, отражает прямо пропорциональную зависимость между соответствующим параметром и ОДП. Функция логического умножения $\otimes$ отражает неоднородный характер зависимости между ОДП и параметром, в нашем случае прямо пропорциональную зависимость до определенного значения параметра,

в) скобки обозначают примерно одинаковое значение эффективности канала связи параметров, находящихся в них, а следовательно примерно одинаковое влияние каждого параметра в скобках на ОДП.

Построенная логическая зависимость позволила перейти к следующему этапу исследований – выбору оптимальных параметров режимов пропитки и сушки. В случае выбора стратегии минимизации времени пропитки и сушки при ограничении срока службы и приведенных затрат производится последовательный отбор вариантов по условиям ограничения значений единого экономического критерия и ограничения минимального срока службы. Из оставшихся выбирается вариант с минимальным значением времени ремонта.

Для оценки по приведенным затратам была рассчитана себестоимость пропитки и сушки двигателя. Отметим, что себестоимость данной услуги определяется затратами ее производителя.

После перебора вариантов различных режимов работы установки и отсева по приведенным затратам был сделан вывод о том, что одной из самых энергоёмких составляющих ремонта является набор температуры, а создание вакуума напротив не так дорого в экономическом плане. Таким образом перебором данных были выбраны самые экономичные режимы установки, которые обеспечивают минимум затрат при возможном максимальном качестве ремонта.

Четвертый раздел посвящен построению модели прогнозирования наработки до отказа асинхронных двигателей.

В результате проведенного экспертного анализа стало возможным ранжирование воздействующих на изоляцию АД в процессе эксплуатации факторов по степени влияния и исключение из перечня тех из них, влиянием которых можно пренебречь.

На основе использования экспериментальных данных была определена энтропия $H(A)$, энтропия $H(T)$, количество информации $T(A,T)$, коэффициент эффективности передачи информации фактором T к явлению A - $K(A,T)$. В результате расчетов мы получили значения коэффициентов эффективности передачи информации $K(A,T)$ для каждого из факторов и, расположив их в порядке убывания, т. е. по степени влияния фактора на наработку до отказа, получили:

$K(A,D) = 0,069$ – химически-агрессивные примеси в воздухе = D;

$K(A,C) = 0,063$ – влажность воздуха окружающей среды = C;

$K(A,B) = 0,052$ – температура воздуха окружающей среды = B;

$K(A,E) = 0,046$ – загруженность работой = E;

$K(A,F) = 0,043$ – запылённость воздуха окружающей среды = F;

$K(A,G) = 0,021$ – вибрация = G.

В результате логического анализа была получена следующая зависимость для ОДП:

$$A = D (C (B (E (F (G)))))) . \quad (7)$$

Затем по направлению информативности к максимальным или минимальным ранговым значениям предполагаем вид связи между параметрами:

$$A = D \vee C \vee (B \vee (E \otimes F \vee (G))) . \quad (8)$$

В соответствии с принципом «от простого к более сложному» предположили, что модель исследуемого процесса является линейной и имеет вид:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3, \quad (9)$$

где b_0 – значение функции отклика Y в центре плана;

b_i – коэффициент, характеризующий степень влияния i -го фактора на функцию отклика Y .

Таблица 2 – Нарботка до отказа (Y) при минимальных и максимальных значениях входных параметров

X_1	X_2	X_3	Y
-30 °C	20 %;	0,005 г/м ³	20000
-30 °C	20 %;	0,08 г/м ³	12500
-30 °C	100 %;	0,005 г/м ³	8000
-30 °C	100 %;	0,08 г/м ³	5000
+ 50 °C	20 %;	0,005 г/м ³	19000
+ 50 °C	20 %;	0,08 г/м ³	9500
+ 50 °C	100 %;	0,005 г/м ³	13000
+ 50 °C	100 %;	0,08 г/м ³	5000

Проведя информационно-логический анализ, мы выявили, что однородные по природе факторы, действующие в наибольшей степени на выходной параметр Y – это температура воздуха окружающей среды, влажность воздуха окружающей среды и химически-агрессивные примеси. Таким образом:

X_1 – влияние температуры воздуха окружающей среды;

X_2 – влияние влажности воздуха окружающей среды;

X_3 – влияние химически-агрессивной среды;

$x_{12}, x_{13}, x_{23}, x_{123}$ – влияние входящих параметров друг на друга;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ – коэффициенты модели;

Y – наработка до отказа.

Проведение эксперимента обеспечило сведение к минимуму влияния случайных параметров исследуемого процесса на функцию отклика.

Для полноты представления математической модели были рассчитаны коэффициенты по следующим формулам:

$$b_0 = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8}{8}, \quad (10)$$

$$b_1 = \frac{(-)Y_1 + (-)Y_2 + (-)Y_3 + (-)Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8}{8}, \quad (11)$$

$$b_2 = \frac{(-)Y_1 + (-)Y_2 + Y_3 + Y_4 + (-)Y_5 + (-)Y_6 + Y_7 + Y_8}{8}, \quad (12)$$

$$b_3 = \frac{(-)Y_1 + Y_2 + (-)Y_3 + Y_4 + (-)Y_5 + Y_6 + (-)Y_7 + Y_8}{8}, \quad (13)$$

$$b_{12} = \frac{Y_1 + Y_2 + (-)Y_3 + (-)Y_4 + (-)Y_5 + (-)Y_6 + Y_7 + Y_8}{8}, \quad (14)$$

$$b_{13} = \frac{Y_1 + (-)Y_2 + Y_3 + (-)Y_4 + (-)Y_5 + Y_6 + (-)Y_7 + Y_8}{8}, \quad (15)$$

$$b_{23} = \frac{Y_1 + (-)Y_2 + (-)Y_3 + Y_4 + Y_5 + (-)Y_6 + (-)Y_7 + Y_8}{8}, \quad (16)$$

$$b_{123} = \frac{(-)Y_1 + Y_2 + Y_3 + (-)Y_4 + Y_5 + (-)Y_6 + (-)Y_7 + Y_8}{8}. \quad (17)$$

Таблица 1 – Результаты расчетов

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
11500	125	-3750	-3500	1125	-875	750	-375

В результате была получена математическая модель:

$$Y = 11500 + 125 \cdot X_1 - 3750 \cdot X_2 - 3500 \cdot X_3 + 1125 \cdot X_{12} - 875 \cdot X_{13} + 750 \cdot X_{23} - 375 \cdot X_{123}. \quad (18)$$

Проверка: для опыта №1

$$Y = 11500 + 125 \cdot 1 - (-3750 \cdot 1) - (-3500 \cdot 1) + 1125 \cdot 1 + (-875 \cdot 1) + 750 \cdot 1 - (-375 \cdot 1) = 20000.$$

Данная модель была получена для случая ввода в эксплуатацию либо нового двигателя, либо 100 % восстановленного. Если же состояние двигателя после ремонта оценивается диагностическим параметром Ψ в величину меньшую, чем 100 %, то в модель необходимо внести корректировку на величину ОДП, и тогда правомерна запись:

$$Y = \Psi \cdot (11500 + 125 \cdot X_1 - 3750 \cdot X_2 - 3500 \cdot X_3 + 1125 \cdot X_{12} - 875 \cdot X_{13} + 750 \cdot X_{23} - 375 \cdot X_{123}). \quad (19)$$

Данная модель явилась завершающим и результирующим звеном в построении экспертной системы прогнозирования состояния электродвигателей (рисунок 3), позволившей объединить в себе как оценку влияния параметров пропитки и сушки на показатель качества ремонта, так и оцен-

ку влияния воздействующих на электродвигатель в процессе эксплуатации факторов.

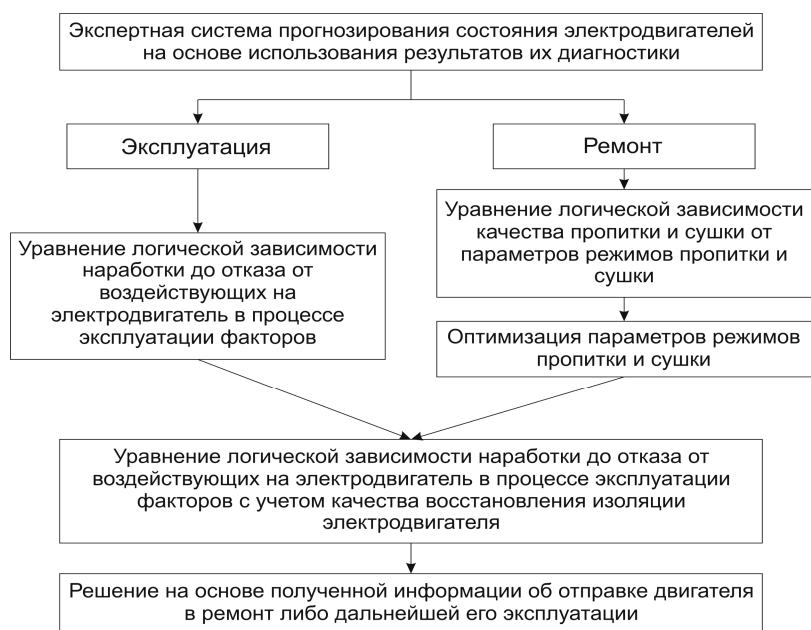


Рисунок 3 – Блок-схема экспертной системы прогнозирования состояния электродвигателей

Таким образом, в результате проведенных исследований была обоснована целесообразность прогнозирования наработки до отказа электродвигателей в сельском хозяйстве, также был проведен выбор и обоснование методов оценки степени влияния внешних воздействующих факторов на состояние изоляции асинхронных двигателей. Кроме того, была разработана математическая модель пропитки и сушки изоляции электродвигателей, устанавливающая взаимосвязь между параметрами процесса восстановления изоляции и значениями показателя качества ремонта, практическим воплощением использования которой явилась разработка методики оптимизации параметров режимов пропитки и сушки.

С учетом данных результатов, а также на основе полученной зависимости, позволяющей оценить степень влияния внешних воздействующих факторов на наработку до отказа АД, была разработана экспертная системы прогнозирования наработки до отказа электрических двигателей на основе математической модели прогнозирования наработки до отказа АД, оценивающей остаточный срок службы электродвигателя при дестабилизирующем воздействии внешних факторов.

Основные выводы и результаты исследований

1. В ходе исследований было установлено, что на сельскохозяйственных предприятиях Алтайского края за период с 1987 по 2007 гг. процент выхода из строя электродвигателей увеличился, в среднем, в 2 раза. Определено, что повышение эффективности производственного процесса в со-

временной экономической ситуации возможно во многом на основе прогнозирования наработки до отказа АД, учитывая факторы, влияющие на его работу.

2. Рассмотренные в работе сильные и слабые стороны различных видов анализа экспериментальных данных позволили сделать вывод о том, что из-за большого множества сочетаний различных факторов, влияющих на состояние изоляции, а также ограниченного количества данных, для поставленных задач наиболее подходящим является информационно-логический анализ.

3. Проведённые исследования режимов работы технологических установок позволили разработать математическую модель пропитки и сушки изоляции электродвигателей, устанавливающую взаимосвязь между наиболее значимыми параметрами технологического процесса пропитки и сушки изоляции АД и значениями показателя качества ремонта. Данная модель была положена в основу методики оптимизации.

4. Разработана методика оптимизации параметров пропитки и сушки изоляции АД, учитывающая специфику работы электродвигателей на предприятиях АПК, в частности были рассчитаны режимы, обеспечивающие максимальное качество при заданном уровне затрат. Например, при затратах, составляющих 800 рублей на один двигатель, температура пропитки должна составлять 110 °С, температура сушки 100 °С, время пропитки 18 минут, время сушки 12 минут, при этом величина обобщенного диагностического параметра достигает значения 100 %.

5. На основе проведенных экспериментов информационно-логическим методом была получена логическая зависимость, которая позволила определить количественную оценку степени влияния факторов, воздействующих на электродвигатель в процессе эксплуатации, на показатель наработки до отказа, а также степень совместного влияния на выходной параметр. Было установлено, что наиболее дестабилизирующее воздействие оказывают химически-агрессивные примеси в воздухе, степень влияния которых на наработку до отказа составляет 0,069, а наименьшее влияние на наработку до отказа оказывает вибрация, коэффициент влияния которой равен 0,021.

6. Разработана экспертная система прогнозирования срока службы электрических двигателей на основе математической модели прогнозирования наработки до отказа электродвигателей, позволяющая с вероятностью 78 % оценить остаточный срок службы двигателя при дестабилизирующем воздействии факторов: комплексного влияния температуры, загрузки электродвигателей, несимметричных режимов работы и других факторов в процессе эксплуатации. В результате расчета было установлено, что использование данной системы позволит сократить издержки, связанные с внезапным выходом электродвигателя из строя, в 1,5 – 1,8 раза.

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

1. **Хомутов, С. О.** Повышение эффективности восстановления изоляции электрических двигателей на основе комплексной оценки воздействующих факторов [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев, П. И. Семичевский // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1-2. – С. 182-191.
2. **Хомутов, С. О.** Совершенствование технологии пропитки и сушки электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа влияния воздействующих факторов [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев, П. И. Семичевский // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1-2. – С. 191-196.
3. **Семичевский, П. И.** Методика оптимизации режимов и технологий пропитки и сушки изоляции электродвигателей сельскохозяйственных электроприводов применительно к условиям эксплуатации [Текст] / П. И. Семичевский, А. А. Грибанов, Е. В. Кобозев // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1-2. – С. 197-201.

Статьи в других изданиях

4. **Хомутов, С. О.** Комплексный подход к информатизации научных исследований в области повышения качества электроизоляционных покрытий [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев, И. Б. Губин // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. Приложение к журналу "Ползуновский альманах". – 2003. – №1. – С. 5-7.
5. **Кобозев, Е. В.** Экспериментальное исследование высокоскоростной передачи данных при различных видах широкополосной модуляции [Текст] / Е. В. Кобозев, В. Н. Ларионов, А. Н. Попов // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. Приложение к журналу "Ползуновский альманах". – 2003. – №1. – С. 10-11.
6. **Кобозев, Е. В.** Снижение влияния эффекта Доплера в зашумленных каналах связи с ортогонально-частотным мультиплексированием [Текст] / Е. В. Кобозев, В. Н. Ларионов, А. Н. Попов // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. Приложение к журналу "Ползуновский альманах". – 2003. – №1. – С. 12-15.
7. **Хомутов, С. О.** Прогнозирование вероятности безотказной работы электродвигателей на основе количественной оценки степени влияния воздействующих факторов [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. – 2006. – №2. – С. 4-8.
8. **Игнатовский, С. В.** Совершенствование эксплуатации трансформаторного оборудования [Текст] / С. В. Игнатовский, Е. В. Кобозев, О. И. Хомутов // Сборник научных трудов кафедры ЭПП / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2002. – С. 5.
9. **Железняков, А. Ю.** Анализ токовой асимметрии фаз при диагностике состояния обмоток АД [Текст] / А. Ю. Железняков, Е. В. Кобозев,

О. И. Хомутов // Сборник научных трудов кафедры ЭПП / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2002. – С. 17.

10. **Кобозев, Е. В.** Информатизация исследований в области диагностики состояния полимерных электроизоляционных материалов [Текст] / Е. В. Кобозев, С. О. Хомутов // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях. Сборник трудов. Вып. 8 (по итогам VIII Международной открытой науч. конф.). – Воронеж : Центрально-Черноземное книжное изд-во, 2003. – С. 19-20.

11. **Свистелко, Д. А.** Моделирование параметров изоляции электрических двигателей с использованием современного программного обеспечения [Текст] / Д. А. Свистелко, А. Н. Попов, П. П. Стыдов, Е. В. Кобозев // Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука. Техника. Инновации" (НТИ-2003) : Материалы науч.-техн. конф. – Новосибирск, 2003. – С. 14-18.

12. **Киселева, Е. В.** Проектирование и разработка Региональной системы управления надежностью асинхронных двигателей [Текст] / Е. В. Киселева, Е. В. Кобозев // Молодежь-Барнаул : Материалы шестой городской науч.-практ. конф. молодых ученых. – 2004. – С. 326-327.

13. **Попов, А. Н.** Применение интегральных аналого-цифровых преобразователей для измерения параметров высокочастотных трактов на этапах проектирования и эксплуатации [Текст] / А. Н. Попов, Е. В. Кобозев // Сборник научных трудов кафедры ЭПП / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004. – С.43-48.

14. **Хомутов, С. О.** Планирование сроков обслуживания и ремонта электродвигателей на основе комплексной оценки воздействующих факторов [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Электрическая изоляция – 2006: Труды Четвертой Международной науч.-техн. конф. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2006. – С. 231-232.

15. **Кобозев, Е. В.** Комплекс технических средств оценки состояния изоляции электродвигателей [Текст] / Е. В. Кобозев // Электрическая изоляция – 2006: Труды Четвертой Международной науч.-техн. конф. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2006. – С. 233-234.

16. **Хомутов, С. О.** Количественная оценка степени влияния воздействующих факторов как основа прогноза вероятности безотказной работы электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Вузовская наука – региону: Материалы 4-й Всероссийской науч.-техн. конф. – Вологда : ВоГТУ, 2006. – С. 298-299.

17. **Хомутов, С. О.** Оценка параметров надежности асинхронных электродвигателей на основе использования информационно-логического анализа [Электронный ресурс] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Наука и молодежь: Труды 3-й Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых // Горизонты образования. – Барнаул, 2006. – Вып. 8. – Режим доступа: <http://edu.secna.ru/main/review/2006/n8/nim2006/nim2006.htm>. - Загл. с экрана.

18. **Хомутов, С. О.** Информационная система управления надежностью электродвигателей [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Измерение, контроль, информатизация: Материалы седьмой международной науч.-техн. конф. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2006. – С. 240-242.

19. **Хомутов, О. И.** Комплексная автоматизация электрических сетей как средство повышения надежности электроснабжения [Текст] / О. И. Хомутов, А. Н. Попов, Е. В. Кобозев. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2006. – 309 с.

20. **Грибанов, А. А.** Комплексная оценка воздействующих факторов как основа прогноза вероятности безотказной работы электродвигателей [Текст] / А. А. Грибанов, Е. В. Кобозев // Материалы IV Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь -2007». – Барнаул : Изд-во АГТУ, 2007. – С. 38-39.

21. **Кобозев, Е. В.** Комплексная оценка воздействующих факторов как основа прогноза вероятности безотказной работы электродвигателей [Текст] / Е. В. Кобозев // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Труды II Всероссийской науч.-практ. конф. с международным участием. – Тольятти : ТГУ, 2007. – С. 246-259.

22. **Хомутов, С. О.** Совершенствование и автоматизация технологий пропитки и сушки изоляции обмоток электрических двигателей [Текст] / С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Измерение, контроль, информатизация: Материалы восьмой международной науч.-техн. конф. – Барнаул : АлтГТУ, 2007. - С. 98-99.

23. **Хомутов, О. И.** Высокочастотная связь в силовых распределительных сетях [Текст] / О. И. Хомутов, А. Н. Попов, Е. В. Кобозев. – Новосибирск : Наука, 2007. – 214 с.

24. **Скрябина, М. Г.** Прогнозирование срока службы асинхронного двигателя путем создания математической модели его работы [Текст] / М. Г. Скрябина, Л. В. Моисеева, С. О. Хомутов, Е. В. Кобозев // Молодежь – Барнаулу: Материалы девятой городской научно-практической конференции молодых ученых. – 2007. – С. 224-225.

25. **Хомутов, О. И.** Моделирование систем обеспечения надежности и качества электроснабжения [Текст] : учеб. пособие / О. И. Хомутов, А. Н. Попов, Е. В. Кобозев. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2009. – 169 с.

Подписано в печать 21.05.09. Формат 60×84 1/16

Печать – цифровая. Усл.п.л. 1,16

Тираж 100 экз. Заказ 2009 – 306.

Отпечатано в типографии АлтГТУ

656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

Лицензия на полиграфическую деятельность

ПЛД № 28-35 от 15.07.97 г.