

# КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

С.О. Хомутов, В.Г. Тонких

В процессе эксплуатации электрических двигателей общепромышленного назначения на сельскохозяйственных предприятиях Алтайского края (основные серии двигателей, применяемых в аграрном комплексе, 4А и АИР, что составляет более 80% от всех эксплуатирующихся электрических двигателей) происходит неизбежное ускоренное старение изоляции, результатом которого является ее пробой и, как следствие, значительное сокращение реального срока службы двигателя по сравнению с нормативным. В целях избежания простоя оборудования вследствие внезапного выхода электрического двигателя из строя необходим систематический контроль и восстановление свойств изоляции. Для достижения этой цели должны применяться системы планово-предупредительных ремонтов.

Результаты исследований ряда авторов, приведенные в [1, 2], свидетельствуют о том, что работы в рамках системы планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электродвигателей в сельском хозяйстве, несмотря на очевидный экономический эффект, выполняются не всегда на должном уровне и в установленные сроки часто не проводятся. Данное обстоятельство обусловлено следующими причинами:

– отсутствует складской резерв, не позволяющий своевременно производить замену оборудования;

– ощущается острая нехватка квалифицированных специалистов, а также нормативной и материально-технической базы;

– отсутствует управленческий учет на предприятиях в разделе накопления, систематизации и анализа причин выхода электродвигателя из строя.

Более того, принятая на предприятиях система планово-предупредительного ремонта электрических двигателей обусловила отсутствие должного внимания к реальному техническому состоянию двигателя, которое в процессе эксплуатации существенно меняется [3, 4].

Ввиду того, что условия работы электродвигателя на сельскохозяйственных предприятиях неодинаковые, по-разному происходит ухудшение свойств изоляции. Так, при достижении электродвигателем наработки, соответствующей времени выполнения технического обслуживания, состояние изоляции обмотки может либо не требовать проведения технического обслуживания, либо требовать проведения ремонта. Тогда в первом слу-

чае выполнение обслуживания будет сопровождаться затратами, которых можно было бы избежать, а во втором при невыполнении соответствующего вида ремонта возможен преждевременный выход электродвигателя из строя с нанесением существенного ущерба. В рассмотренных случаях своевременный диагностический контроль состояния изоляции позволит избежать указанных трудностей и вовремя провести соответствующие мероприятия, исключив тем самым возможность дальнейшего развития возникших в изоляции дефектов.

Таким образом, внедрение системы планово-предупредительных ремонтов – не самый рациональный подход к поддержанию достаточного уровня надежности изоляции электродвигателя. На сегодняшний день актуальна проблема поиска альтернативных, более гибких методик планирования технического обслуживания и ремонта двигателей на основе оценки качества изоляции и прогноза ее срока службы по сравнению с системой планово-предупредительных ремонтов.

Все это говорит о необходимости формирования стройной системы, которая бы охватывала все стадии жизненного цикла электрического двигателя, а также разработки специального комплекса мер, позволяющего проводить диагностику и контроль изоляции с целью установления его реального состояния и прогнозирования дополнительной наработки до очередного диагностического контроля или проведения мероприятий по восстановлению изоляции обмоток. При этом следует отметить, что в рамках организационно-технического обеспечения ремонта после проведения операций по восстановлению электрической изоляции необходимы диагностический контроль и прогнозирование изменения состояния изоляции статорных обмоток с целью назначения новой наработки до следующей диагностики.

От того, насколько правильно и эффективно будет решена данная задача, во многом зависит увеличение срока службы электродвигателей.

Одним из путей решения поставленной задачи является прогнозирование срока службы электрического двигателя на основе оценки факторов, отрицательно влияющих на вероятность его безотказной работы.

Основные этапы данного исследования:

- создание базы априорных значений;
- создание методик обработки информации и количественной оценки степени влияния отрица-

# КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

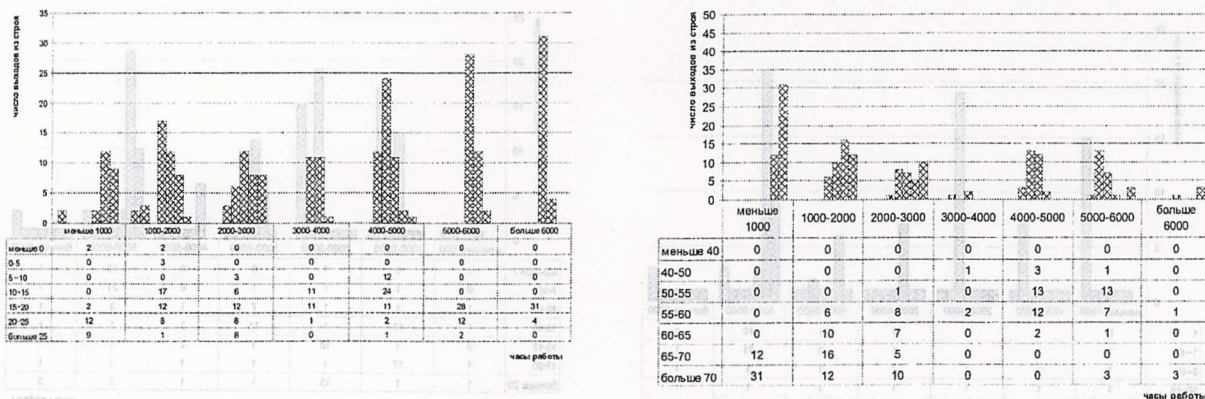


Рис. 1. Гистограмма зависимости наработки до отказа от различных температур окружающей среды и от влажности окружающей среды

тельно воздействующих факторов на вероятность безотказной работы электродвигателя;

– проведение эксперимента для проверки выдвинутой гипотезы.

При реализации первого этапа решения рассматриваемой задачи авторами была выявлена проблема, заключающаяся в полном отсутствии на сельскохозяйственных предприятиях учета аварий двигателей и анализа причин их возникновения. В большинстве случаев ведется лишь количественный учет вышедших из строя двигателей, зачастую без указания характера поломки. Вследствие этого результаты выполненных авторами исследований основывались на экспертной оценке энергетиков данных предприятий. Тем не менее была собрана информация с более чем 180 мест на различных сельскохозяйственных предприятиях Алтайского края. При этом сбор данных шел по следующим параметрам: температура и влажность окружающей среды, наличие примесей в производственных помещениях, число пусков электродвигателей, режим работы, время работы в течение суток, а также время безотказной работы (в часах) электродвигателя.

Выполнение второго этапа заключалось в проведении анализа полученной информации. Были рассмотрены три различных варианта метода исследования: дисперсионный, регрессионный и информационно-логический анализы, взвешены положительные и отрицательные стороны каждого. Наилучшие результаты показал информационно-логический анализ. Связано это со следующими причинами:

– выборка данных, собранная авторами, не является представительной, так как 180 значений не дадут достоверного результата при использовании дисперсионного и регрессионного анализов;

– данные собирались с большой степенью разнобразия, что категорически противоречит применению регрессионных методов статистической оценки;

– информационно-логический анализ позволяет создать на своей базе самообучающуюся систему, а дальнейшее пополнение базы данных приведет к повышению точности результатов, но не их опровержению.

Учитывая все вышесказанное, авторами было принято решение о применении информационно-логического анализа.

Тогда в первую очередь были количественно определены все факторы, влияющие на вероятность безотказной работы электрического двигателя. Результаты расчета приведены в таблице и на рисунках 1–3.

В таблице явление А – это вероятность безотказной работы электродвигателя, В – фактор, оказывающий влияние,  $H(A)$  – неопределенность явления,  $H(B)$  – неопределенность фактора,  $T(A,B)$  – мера информации, передаваемой от фактора к явлению,  $K(A,B)$  – коэффициент передачи информации. Подробная методика расчета изложена в [5].

Интерпретация результатов проведенной работы следующая. Из таблицы видно, что отрицательно воздействующим фактором с сильнейшим влиянием на вероятность безотказной работы электродви-

Количественная оценка влияния различных факторов на вероятность безотказной работы электрического двигателя

Наименование	Температура	Влажность	Число пусков	Время работы	Наличие примесей
$H(A)$	-2,08	-2,35	-2,31	-2,47	-1,24
$H(B)$	-2,76	-2,47	-2,63	-2,51	-2,6
$T(A,B)$	0,6	0,57	0,47	0,55	0,07
$K(A,B)$	0,216	0,232	0,177	0,208	0,025

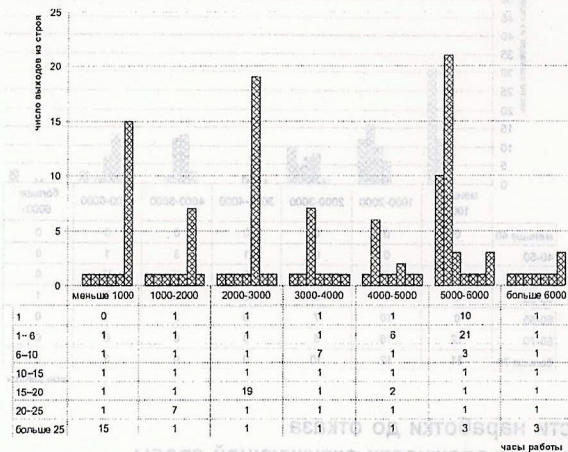


Рис. 2. Гистограмма зависимости наработки до отказа от числа пусков и времени работы

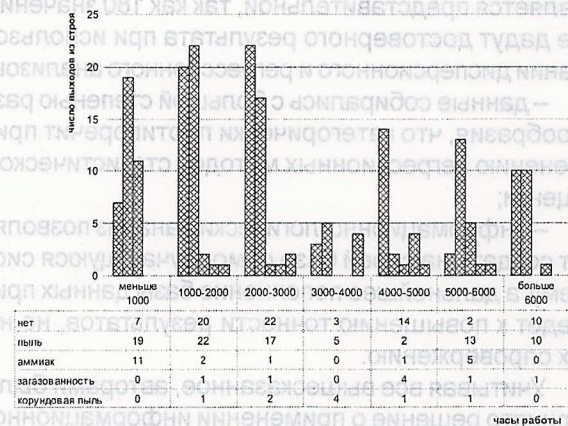
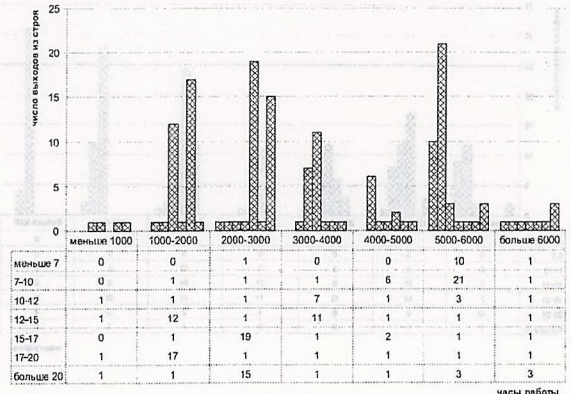


Рис. 3. Гистограмма зависимости наработки до отказа от примесей в окружающей среде

гателя является влажность, тогда как наименьшее влияние оказывает наличие примесей в окружающей среде. При этом сбор данных проводился в основном на мехтоках (2/3 от объема данных), остальные были получены на животноводческих комплексах, а также предприятиях Водоканала. В связи с вышесказанным необходимо заметить, что результаты работы предварительны, сбор данных продолжается и об окончательных результатах можно будет говорить, по крайней мере, имея 1000 и более значений.

Следующим шагом исследования является прогнозирование вероятности безотказной работы электрического двигателя. Для этого была использована разработанная на базе информационно-логического анализа математическая модель черного ящика, описывающая переход от нормального состояния работы электродвигателя к аварийному [6]. В качестве входных параметров были использованы рассмотренные выше наблюдаемые, но не управляемые параметры окружающей среды (температура, влажность, наличие примесей), а также число пусков, режим и время работы электродви-



гателя. При этом необходимо заметить, что постановка эксперимента при использовании других ранее названных методов в данных условиях была бы невозможна или очень затруднительна. Выходным параметром была вероятность безотказной работы двигателя, выраженная в часах. При этом процесс перехода состояния электродвигателя от нормального к аварийному рассматривался как стохастический.

В ходе исследования авторами были выдвинуты две рабочих гипотезы – предполагаемые логические зависимости вероятности безотказной работы от факторов эксплуатации:

гипотеза 1:  $ВБР = v \lambda t Y a * n * q$ ;

гипотеза 2:  $ВБР = v \lambda t Y a \lambda n \lambda q$ ,

где ВБР – вероятность безотказной работы;  $\lambda$  – логическое умножение;  $Y$  – логическое сложение;  $*$  – нелинейное произведение;  $v$  – влажность;  $t$  – температура;  $a$  – время работы;  $n$  – число пусков;  $q$  – наличие примесей.

Данная математическая модель позволяет совершать прогноз безотказной работы двигателя с точностью до 1000 часов, а планируемая вероятность точности прогноза составляет 61%. Большая погрешность и неточность вызваны малой выборкой. Последующее накопление исходных данных позволит уточнить коэффициенты «значимости» факторов, вид рабочей гипотезы, а также произвести более правдивый прогноз. Сделанный вывод подтверждают примеры: в аналогичных по сложности системах добивались вероятности правильности прогноза свыше 80%.

Высокий темп роста производительности компьютеров и их широкое распространение стимулируют все возрастающий интерес к современным методам обработки информации и мониторинга различных систем. В этих условиях особенно очевидна потребность в повышении эффективности применения компьютерных технологий на предприятиях.

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Так, сформированная математическая модель позволила создать программный продукт, основные функции которого – количественное определение степени влияния воздействующих на электродвигатель факторов и прогнозирование вероятности безотказной его работы. Алгоритм работы программы изображен на рисунке 4.

Раздел априорных данных, представленный на рисунке 4, является основой для определения степени влияния факторов эксплуатации. Сбор данных проводился на различных предприятиях аграрного комплекса Калманского, Первомайского и Алтайского районов Алтайского края.

Правильное ранжирование – разбиение всей совокупности данных на отдельные сегменты (ранги), – ключевой момент в определении точности и достоверности прогноза. Однако эти показатели имеют между собой обратную зависимость, т.е. увеличение точности прогноза неизменно приведет к снижению его достоверности. Поиск оптимального соотношения является отдельной проблемой, требующей разработки дополнительных алгоритмов, реализованных, например, при помощи нейросетей. На сегодняшний день в системе реализована возможность изменения рангов вручную на усмотрение пользователя.

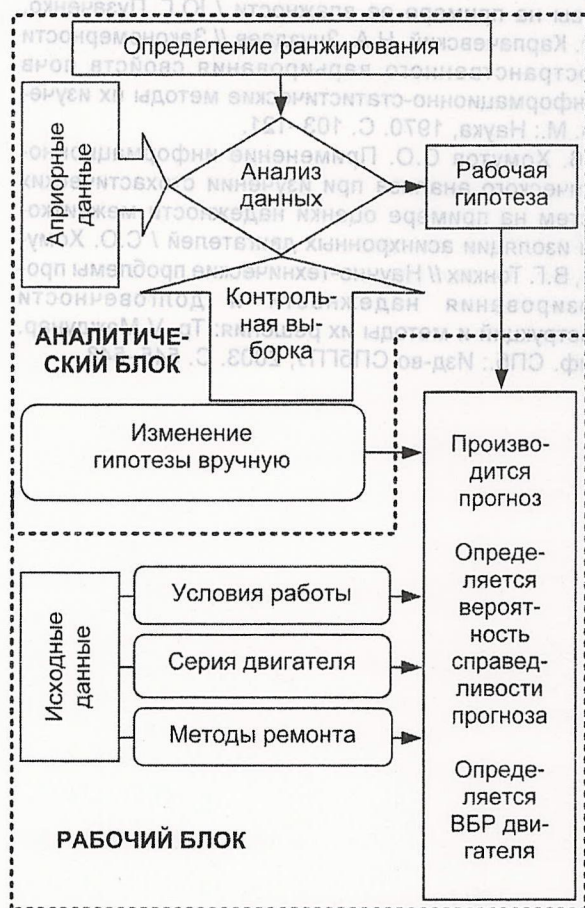


Рис. 4. Блок-схема системы прогнозирования безаварийной работы двигателя

Еще одним важным разделом предлагаемого алгоритма является анализ данных – это раздел предлагаемой системы, в котором производится оценка факторов и определение рабочей гипотезы.

Для оценки рабочей гипотезы нужна контрольная выборка, которая должна обладать необходимым разнообразием (быть представительной), а также эти данные не должны входить в априорную базу данных. Если результаты расчета при помощи рабочей гипотезы не опровергают данные выборки, то гипотеза утверждается. Иначе производят изменения рабочей гипотезы.

Рабочий блок позволяет осуществить прогноз вероятности безотказной работы электродвигателя, а также моделирование различных процессов старения межвитковой изоляции двигателя в зависимости от применяемых методов повышения ее надежности.

Рассмотренная система позволяет оценить количественно факторы, негативно влияющие на вероятность безотказной работы электродвигателя. Большую сложность при этом вызывает ограниченное количество априорных данных, поэтому в системе реализована возможность самообучения, алгоритм которого изображен на рисунке 5. Возможность самообучения позволяет накапливать «опыт» (можно добавлять данные в априорную базу данных), автоматически анализировать данные, при изменении базы априорных значений, и, как следствие, изменять рабочую гипотезу без вмешательства пользователя.

Ввиду того, что сбор априорных данных производился авторами на сельскохозяйственных предприятиях, данная система должна применяться именно в аграрном комплексе, однако при расширении априорной выборки, с учетом условий промышленных предприятий, может применяться и там. Но наибольший экономический эффект от внедрения программного продукта будет достигнут в аграрном комплексе, ввиду полного отсутствия планирования ремонтов.

Данная система прогнозирования безаварийной работы двигателя позволяет:

- производить гибкое планирование ремонтов электрических двигателей;
- сократить до минимума общее время простоя оборудования во время внезапных поломок двигателей;
- осуществлять выбор более рациональных методов ремонта электродвигателей.

Таким образом, проведенные авторами исследования на сельскохозяйственных предприятиях Алтайского края показали отсутствие комплексного подхода к организации планирования проведения ремонтов и осмотров электрических двигателей, несмотря на то, что в условиях сезонной работы

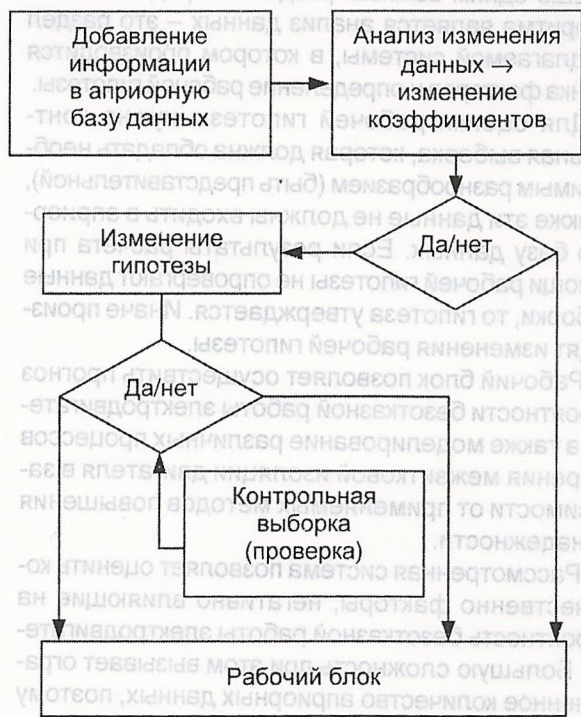


Рис. 5. Алгоритм самообучения

большей части агрегатов необходимость контроля за состоянием электродвигателя особенно велика. Для разработки планов профилактического осмотра и ремонта электрооборудования необходимо знать время безаварийной работы двигателя. Проведенные исследования, направленные на количественное определение степени влияния различных факторов на вероятность безотказной работы электрического двигателя, позволили выявить основные влияющие факторы, рассмотреть различные их совокупности. На базе проведенных

экспериментов была разработана система прогнозирования вероятности безотказной работы электродвигателей.

Литература

1. Исследование надежности электрооборудования и разработка энергосберегающих, экологически чистых технологий его восстановления: Отчет о НИР (заключит.) / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова; Рук. О.И. Хомутов. №ГР 01970000744; Инв. №02990001280. Барнаул, 1999. 221 с.
2. Хомутов О.И. Эксплуатация, диагностика и ремонт изоляции электрических машин: Учеб. пособие для студентов вузов / О.И. Хомутов, В.И. Сташко, С.О. Хомутов. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1999. 146 с.
3. Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования сельскохозяйственных предприятий / Госагропром СССР. М.: Агропромиздат, 1987. 191 с.
4. Синягин Н.Н. Система планово-предупредительного ремонта оборудования и сетей промышленной энергетики: 3-е изд., перераб. и доп. / Н.Н. Синягин, Н.А. Афанасьев, С.А. Новиков М.: Энергоатомиздат, 1984. 448 с.
5. Пузаченко Ю.Г. Возможности применения информационно-логического анализа при изучении почвы на примере ее влажности / Ю.Г. Пузаченко, Л.О. Карпачевский, Н.А. Знудзаев // Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информационно-статистические методы их изучения. М.: Наука, 1970. С. 103–121.
6. Хомутов С.О. Применение информационно-логического анализа при изучении стохастических систем на примере оценки надежности межвитковой изоляции асинхронных двигателей / С.О. Хомутов, В.Г. Тонких // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: Тр. V Междунар. конф. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. С. 545–548.

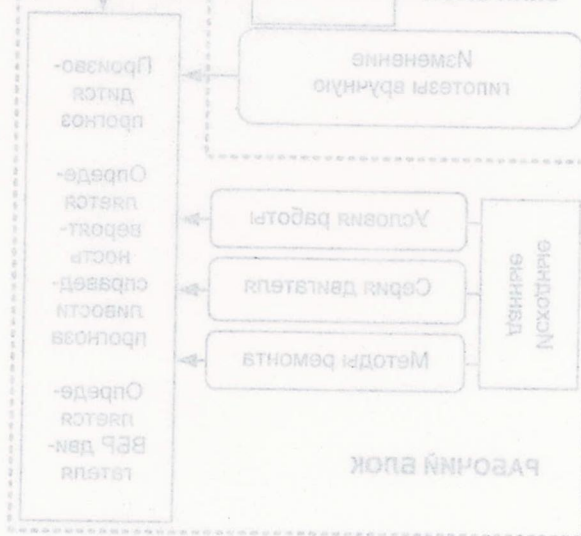


Рис. 4. Блок-схема системы прогнозирования безаварийной работы электродвигателя