

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

С.О. Хомутов, Е.В. Кобозев

Как известно, задача повышения эффективности промышленного и сельскохозяйственного производства не может быть успешно решена без оптимального планирования сроков и объемов технического обслуживания и ремонта (ТОиР) электродвигателей (ЭД), как наиболее распространенного типа привода, основанного на достоверной информации о текущем состоянии их узлов и прогнозировании вероятности их безотказной работы (ВБР) в будущем.

Теоретические исследования в области прогнозирования вероятности безотказной работы электрических двигателей построены на применении системной методологии к анализу процессов старения и восстановления, протекающих в конструктивных элементах ЭД на протяжении всего их жизненного цикла, начиная с момента ввода в эксплуатацию и заканчивая списанием. Применение системного анализа при исследовании столь сложных явлений как процессы дефектообразования и тепломассопереноса в узлах двигателей, а также столь сложного объекта как электродвигатель обусловлено необходимостью сохранения понимания целого и главного при выделении и исследовании любого положения соответствующей теории, а также любой конструктивной части ЭД.

Полученные к настоящему времени результаты многочисленных исследований и их последующий системный анализ позволили из комплекса основных задач повышения эксплуатационной надежности электрических двигателей на стадии их технического обслуживания и ремонта выделить задачу количественной оценки степени влияния различных факторов на процессы старения и восстановления узлов электродвигателя.

Данная количественная оценка позволит не только оптимизировать сроки, объем, продолжительность и режимные параметры технологических мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту двигателей с учетом условий эксплуатации, но и осуществить прогноз вероятности безотказной работы ЭД с высокой степенью достоверности, а также определить возможные пути дальнейшего повышения надежности электродвигателей.

Основными этапами прогнозирования срока службы электрического двигателя на

основе оценки факторов как отрицательно, так и положительно влияющих на вероятность его безотказной работы являются:

- создание базы априорных значений;
- разработка методик обработки информации и количественной оценки степени влияния воздействующих факторов на вероятность безотказной работы ЭД;
- проведение эксперимента для проверки выдвинутой гипотезы.

При реализации первого этапа решения рассматриваемой задачи авторами была осуществлена классификация всех воздействующих на состояние электрического двигателя факторов, представленная на рисунке 1.

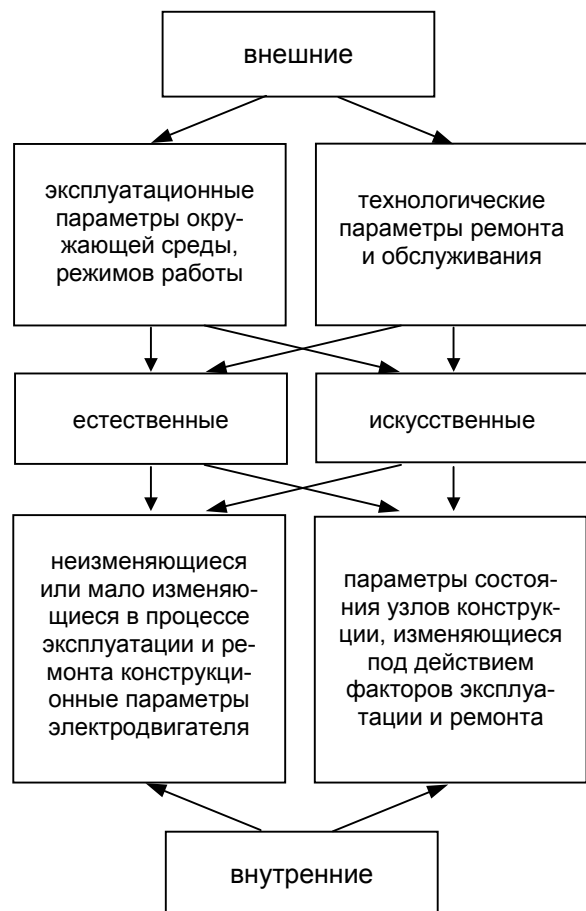


Рисунок 1 – Классификация факторов

Другими словами, показатели надежности и безотказности любой электроэнергети-

ВЕСТНИК АлмГТУ им. И.И. Ползунова №2 2006

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

ческой системы, в том числе и столь сложного объекта как электрический двигатель, зависят от условий и режимов эксплуатации, параметров конструкции, а также применяемых методов и средств его технического обслуживания и ремонта.

Известно, что отказы электродвигателей по их физической природе являются следствием физико-химических процессов, непосредственно или косвенно влияющих на работоспособность элементов и возникновение повреждений, которые определяются типом используемого материала, местом протекания процессов старения и восстановления, видом энергии, определяющей характер соответствующего процесса, эксплуатационным и ремонтным воздействием, внутренним механизмом процессов [1].

Более того, в настоящее время, как показали выполненные авторами исследования, техническое обслуживание и ремонт электрических двигателей часто проводится несвоевременно. Это вызвано тем, что выполнение ТОиР в СССР регламентировалось системой государственных и отраслевых нормативов, которые определяли планы – как, когда, в каком объеме и кем должны осуществляться соответствующие работы. Данная система планово-предупредительных ремонтов носила затратный характер, не обладала достаточной гибкостью, но обеспечивала эксплуатацию оборудования в соответствии с отраслевыми нормами и стандартами безопасности. Однако, при переходе от плановой экономики к рынку, предприятия не смогли нести расходы на ТОиР в прежнем объеме, что привело во многих отраслях к постоянному невыполнению планов по ремонтам, потере надежности электрооборудования и увеличению ресурсов, необходимых для поддержания его работоспособности в будущем. Таким образом, задача формирования новой системы обеспечения надежной работы электрических двигателей, основанной на оценке их реального состояния и прогнозе срока безаварийной работы, является актуальной. При этом, в основе такого прогноза лежит количественная оценка степени влияния всех воздействующих факторов.

Во время эксплуатации изоляция электродвигателей, как наиболее слабый и уязвимый элемент конструкции ЭД, подвергается различным воздействиям, под влиянием которых происходит как ее старение, так и восстановление. Следуя принципам системного анализа, рассмотрим основные и наиболее значимые процессы, определяющие качество изоляции и формирующие методы поддержания и восстановления работоспособности электрических двигателей.

Воздействия, вызывающие повреждения изоляционных материалов, подразделяются на следующие группы: электрические, тепловые, механические и окружающей среды.

Тепловое старение изоляции является следствием постепенного химического изменения входящих в ее состав органических веществ. Пробой изоляции электродвигателей при длительном действии напряжения имеет ионизационный характер, то есть обусловлен постепенным разрушением изоляционных материалов частичными разрядами, происходящими в имеющихся газовых включениях. Основными факторами воздействия на изоляцию электрических двигателей внешней среды являются влияние окружающего изоляцию газа, например, воздуха, а также действие влаги, содержащейся в 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 свою очередь, воздействия, направленные на восстановление изоляции, складываются из извлечения старой обмотки, укладки новой, ее пропитки и сушки. Существующие методы извлечения обмотки из пазов статора (кроме механического способа) требуют размягчения или разрушения слоя связующего, пропитывающего изоляцию и скрепляющего обмотку с железом статора электродвигателя. Применяемые способы разложения связующего используют механизмы термоокислительной или химической деструкции, которые приводят к значительному снижению к.п.д. двигателей.

В процессе изготовления и ремонта электродвигателей, после укладки в пазы статора, обмотки пропитываются лаком или компаундом с последующей сушкой, при этом происходит заполнение пропитывающим составом воздушных промежутков между проводниками и пазовой изоляцией, а также пор изоляционных материалов с последующей полимеризацией основы лака. В результате, улучшается теплопроводность обмоток за счет уменьшения воздушных прослоек между проводниками и стенками паза, повышается нагревостойкость и влагостойкость изоляции, ее электрическая и механическая прочность.

Однако при любом методе ремонта электродвигатель подвергается механическим и термическим воздействиям, которые определенным образом нарушают его внутреннюю структуру, что негативным образом влияет на параметры его дальнейшей эксплуатации.

Оценка состояния ЭД, как объекта, сводится, главным образом, к оценке состояния

наиболее важных с точки зрения надежности его частей. Все существующие в настоящее время методы диагностики, контроля и оценки состояния изоляции можно разделить на две большие группы: разрушающие и неразрушающие. К группе разрушающих методов оценки состояния изоляции относятся испытания изоляции импульсным напряжением, повышенным переменным напряжением промышленной частоты и выпрямленным напряжением. Разрушающие методы диагностики дают возможность получить наиболее полную информацию о состоянии изоляции. Но применение этих методов в реальных условиях эксплуатации электродвигателей сопряжены с определенными трудностями. Во-первых, разрушающие методы диагностики дорогостоящи по применяемой аппаратуре, а, во-вторых, двигатель, при неудовлетворительном состоянии изоляции, после испытаний теряет работоспособность и к дальнейшей эксплуатации не пригоден. Это обстоятельство является наиболее существенным с точки зрения обоснования трудностей, связанных с применением методов разрушающих испытаний изоляции в условиях эксплуатации. А условия эти таковы, что требуют обеспечения непрерывности технологических процессов за счет исключения внезапности отказов. Поэтому эти методы используются, в основном, на предприятиях, выпускающих электрические машины.

Более приемлемы для применения в условиях реального производства и широко используются в настоящее время неразрушающие методы диагностики. Неэлектрические методы, основанные на использовании физико-химических свойств изоляции, применяются, главным образом, для диагностики турбогенераторов и других мощных электрических машин. Для реализации этих методов необходимы специальные лаборатории и соответствующее оборудование.

Для диагностики состояния электрической изоляции двигателей в условиях реальной эксплуатации больше всего подходят методы, основанные на воздействии электрического тока. Подавая на обмотку статора электродвигателя постоянное или переменное напряжение, посылая тестирующие импульсы, можно простыми и доступными средствами косвенно или непосредственно измерять электрические значения диагностических параметров. По этой причине неразрушающие электрические методы диагностики являются более предпочтительными.

К электрическим методам диагностики состояния изоляции относятся методы, основанные на оценке проводимости изоляции,

абсорбции, диэлектрических потерь, поляризации и саморазряда, резонансных свойств контура, электрической емкости.

Наиболее распространенным методом диагностики является измерение поверхностной или объемной проводимости. Метод позволяет оценить основной электрический параметр изоляции – ее сопротивление. Изоляция обмоток ЭД, работающих под воздействием влаги, вибраций, резких колебаний температуры, становится пористой, расслаивается. Сквозное проникновение влаги в поры и капилляры вызывает резкое снижение ее сопротивления. Однако абсолютная величина сопротивления не является достаточной для информативного диагностического параметра состояния изоляции, так как она зависит от влажности, а также от условий измерения. Со старившаяся сухая изоляция, даже при наличии локальных дефектов, характеризуется достаточно высоким сопротивлением. Объемное увлажнение такой изоляции вполне может быть причиной пробоя, но не вызывает заметного падения сопротивления. В то же время, поверхностное увлажнение приводит к резкому снижению сопротивления, хотя и не опасно в отношении пробоя.

Другим методом диагностики изоляции электродвигателей является метод, основанный на исследовании диэлектрических потерь. Процессы старения изоляции со временем приводят к росту данного вида потерь. В качестве показателя, характеризующего этот процесс, обычно используют величину тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$.

Величина $\text{tg} \delta$ почти не зависит от размеров изоляции, так как происходит одновременное изменение сопротивления и емкости. Величина $\text{tg} \delta$ существенно зависит от температуры, причем вид этой зависимости для различных материалов неодинаков. Методы диагностики, основанные на измерении $\text{tg} \delta$, как правило, используют для оценки состояния изоляции высоковольтных и крупных электрических машин.

Большую группу представляют собой методы, основанные на изучении резонансных явлений. К ним относятся такие методы контроля состояния изоляции, как калориметрический, замещения, изменения активного и реактивного сопротивления. Эти методы имеют ряд недостатков и направлены, в основном, на определение наличия межвитковых замыканий, что отдаляет их от уровня диагностики. Наиболее предпочтительное место в этой группе методов занимает, так называемый, метод вариации. К его преимуществам относится отсутствие в расчетных выражениях частоты.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Основной причиной, сдерживающей широкое применение резонансных методов, является проведение измерений при режимах, отличных от реально имеющих место в эксплуатации, но, в месте с тем, остается возможность использования резонанса контура на высокой частоте в качестве способа неразрушающих испытаний электродвигателей напряжением до 500В, эксплуатируемых в промышленности. Этот метод получил название добротно-емкостного и позволил в определенной степени развить представления о физической природе резонансных методов.

Данный метод основан на сравнении величин добротностей последовательных колебательных контуров, образованных фазными обмотками и измерительными конденсаторами. Для увеличения чувствительности сравнение осуществляется посредством мостовой схемы.

Особого внимания в контексте рассматриваемого вопроса заслуживают такие методы диагностики, как метод волновых затухающих колебаний (ВЗК) и метод ультразвукового контроля состояния изоляции.

Метод, основанный на использовании ВЗК, является одним из наиболее достоверных и точных методов, позволяющих определить реальное состояние изоляции ЭД. Его сущность заключается в том, что на диагностируемую обмотку подается типовой единичный сигнал, в результате чего в данной обмотке возникает переходный процесс, зависящий от ее параметров.

В свою очередь, ультразвуковой контроль основан на способности энергии ультразвуковых колебаний распространяться с малыми потерями в однородной упругой среде и отражаться от нарушений сплошности в этой среде. Ультразвуковой луч вводится в образец, и индикатор измеряет интенсивность колебаний, прошедших через образец или отраженных от неоднородностей, расположенных внутри образца. Дефект выявляется либо по уменьшению прошедшей через образец энергии, либо по энергии, отраженной от дефекта.

Однако каждый из рассмотренных методов имеет свою область применения, а достоверность полученной в результате диагностирования информации зависит от множества факторов, полностью учесть которые в условиях сельскохозяйственных предприятий не представляется возможным. Кроме того, большинство методов применимы только в процессе эксплуатации, а в последнее время требования к техническому обслуживанию и ремонту таковы, что необходимо отслеживать и качество выполнения операций по восстановлению обмотки.

Одним из подходов к решению данной проблемы является синтез существующих на сегодняшний день методов и технологий оценки состояния электрооборудования. В качестве варианта практической реализации синтеза предлагается создание на базе методов ВЗК и ультразвукового контроля единого комплекса средств диагностики, способного оценивать состояние электродвигателя на всех этапах его жизненного цикла. Другими словами, в процессе эксплуатации перед обслуживающим персоналом стоит задача не допустить неисправность или восстановить нарушенное соответствие электрических двигателей техническим требованиям. Решение этой задачи невозможно без эпизодической или непрерывной диагностики состояния электродвигателя, и в этом случае применяется метод ВЗК. При ремонте же необходимо отслеживать качество выполнения каждого из его этапов, что возможно при использовании метода ультразвукового контроля.

Данный комплекс является универсальным, способным оценивать состояние обмотки как в процессе эксплуатации, так и в процессе ремонта. Применение данного комплекса диагностических средств позволит, главным образом, создать инструмент, позволяющий получить неограниченный доступ к исследованию процессов, происходящих в изоляции на всем протяжении жизненного цикла ЭД.

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

- выборка данных, собранная авторами, не является представительной, что не даст достоверного результата при использовании дисперсионного и регрессионного анализов;
- данные собирались с большой степенью разнообразия, 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. Установлено, что отрицательно воздействующим фактором с сильнейшим влиянием на вероятность безотказной работы ЭД 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 данные были получены на животноводческих комплексах, а также предприятиях водоканала. В связи с вышесказанным необходимо заметить, что результаты работы являются предварительными, 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 ЭД к аварийному [2].

Использование, в данном случае, ИЛА при малом количестве априорных данных, даст более точные результаты по сравнению с регрессионными методами, которые трудно применять из-за большого множества сочетаний различных факторов, влияющих на вероятность безотказной работы двигателя. Кроме того, информационно-логический анализ позволяет оценить и неучтенные факторы, что делает прогноз более достоверным.

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 ЭД. 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 ВБР от факторов эксплуатации:

гипотеза 1: $ВБР = v \wedge t \vee a * n * q$;

гипотеза 2: $ВБР = v \wedge t \vee a \wedge n \wedge q$,

где 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 %.

Таким образом, количественная оценка степени влияния как отрицательно, так и положительно воздействующих факторов на изоляцию ЭД, проведенная на основе применения информационно-логического анализа, а также последующий прогноз вероятности безотказной работы электродвигателей позволят спланировать не только сроки и объемы технического обслуживания и ремонта, но и весь жизненный цикл электрических двигателей с момента их поступления до списания, что, в свою очередь, значительно сократит расходы на ТОиР и повысит надежность работы электрооборудования. Более того, данная количественная оценка даст возможность оптимизировать параметры технологического процесса восстановления изоляции статорных обмоток.

На базе экспериментов, проведенных авторами в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по гранту Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук и их научных руководителей МК-7964.2006.8, была разработана система прогнозирования вероятности безотказной работы электродвигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надежность технических систем и техногенный риск: Электронное учебное пособие. – Режим доступа: http://oksion.ru/uchebnik_nadezhnost_tekhnicheskikh_sistem/index.html. – Загл. с экрана.
2. Хомутов С.О., Тонких В.Г. Применение информационно-логического анализа при изучении стохастических систем на примере оценки надежности межвитковой изоляции асинхронных двигателей: Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: Труды V Международной конференции. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – С. 545-548.