

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭТАЛОННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА ИХ ИЗОЛЯЦИИ

С.О. Хомутов

Как известно, длительная и безаварийная работа электрических двигателей (ЭД) во многом определяет эффективность производства, поскольку отказы в их работе ведут к остановке отдельных механизмов и, зачастую, к полному прекращению всего технологического процесса [1]. В результате, наносимый предприятиям ущерб связан не только с заменой или ремонтом вышедших из строя двигателей, но и с браком и недовыпуском продукции.

В настоящее время на промышленных и сельскохозяйственных предприятиях городов и сел Российской Федерации широко используются асинхронные двигатели (АД). Простота их конструкции и легкость в управлении способствуют все большему расширению сферы применения АД для электроприводов различных технологических механизмов. Благодаря этому, асинхронные приводы составляют около 95% от общего количества электроприводов [2], а в сельскохозяйственном производстве они являются основным электрифицированным средством механизации трудоемких процессов.

По данным ремонтных предприятий и Главного управления сельского хозяйства администрации Алтайского края на сегодняшний день на предприятиях агропромышленного комплекса (АПК) используется около 25% АД серий АИР, около 65% – серии 4А, около 10% – других серий. Среди АД общего назначения, наибольшее распространение в сельском хозяйстве получили двигатели мощностью от 0,75 до 7,5 кВт, составляющие более 50% от всего парка электродвигателей [3]. Поэтому вопросы повышения надежности и долговечности АД, как наиболее ответственного звена в комплексе технологического оборудования, являются актуальными.

Из практики использования АД на предприятиях различных отраслей народного хозяйства известно, что наиболее слабым элементом конструкции данного типа

электродвигателей является изоляция обмотки статора, что обуславливает значительное количество выходов АД из строя по причине ее повреждения (из-за нарушения изоляции обмоток статоров прекращают свою работу около 85% электродвигателей [3]). Это приводит к простоям технологического оборудования и связанным с ним существенным убыткам.

В общем случае, изоляция АД представляет собой многокомпонентную электроизоляционную систему. В процессе эксплуатации на нее действует комплекс различных факторов, приводящих к изменению ее состояния. Открытость системы и неоднородность ее состава обуславливает сложные связи между ее внешними и внутренними факторами. Данная система многокомпонентна не только по своим составляющим (междувитковая, междуфазная, корпусная изоляция), но и по совокупности используемых материалов для ее производства (сочетание полимерных пленок, эмалевой изоляции, обмоточных проводов и пропитка этой композиции лаком, компаундом). Материалы диэлектриков, используемых при изготовлении современных изоляционных конструкций, характеризуются значительной неоднородностью структуры и различием электрофизических свойств в объеме материалов. Это обстоятельство обуславливает необходимость системного подхода при исследовании изменения состояния обмоток в процессе эксплуатации АД.

Статистические данные показывают, что срок службы АД общепромышленного исполнения на сельскохозяйственных предприятиях гораздо меньше, чем на промышленных. Это связано, в первую очередь, с особенностями условий эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве. Ухудшению состояния электрической изоляции АД, применяемых в сельскохозяйственном производстве, способствуют тяжелые режимы работы и неблагоприятные условия эксплуатации: высокая влажность и наличие агрессивных газов в производственных помещениях,

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭТАЛОННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА ИХ ИЗОЛЯЦИИ

существенные перепады и непостоянство температуры окружающей среды. Недогрузка двигателей по мощности, сезонность их использования, а также низкое качество электрической энергии осложняют эксплуатацию АД в сельском хозяйстве [4].

Как было отмечено ранее, изоляцию обмотки статора электродвигателя в зависимости от назначения можно классифицировать как корпусную и междувитковую. Диэлектрические свойства междувитковой изоляции значительно хуже соответствующих свойств корпусной, что подтверждается статистикой выходов асинхронных двигателей из строя, согласно которой число отказов, обусловленных междувитковыми замыканиями, составляет около 70% от их общего числа. Поэтому задача наблюдения за техническим состоянием электрической изоляции АД является одной из важнейших.

К вышесказанному следует добавить, что на современном этапе реформирования сельского хозяйства в нашей стране сложилась непростая ситуация, заключающаяся в отсутствии поддержки сельхозпроизводителя государством. В результате наблюдается частичное сокращение количества электродвигателей и массовое их старение, обусловленное тем, что парк асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве в течение длительного времени практически не обновлялся. Более того, количество предприятий, оказывающих ремонтные услуги, сократилось, что в большинстве случаев увеличило их удаленность от потребителей электрической энергии [5].

Анализ опыта использования асинхронных двигателей в сельском хозяйстве [3] позволил установить следующие основные пути повышения надежности АД:

- повышением качества и уровня проектировочных работ;
- повышением качества электроизоляционных материалов;
- повышением качества пропиточных и сушильных работ;
- совершенствованием технологии производства электродвигателей;
- совершенствованием методик ускоренных испытаний на надежность;
- совершенствованием систем защиты АД от аварийных режимов;
- разработкой новых методов расчета надежности элементов АД на стадии проектирования, изготовления и эксплуатации.

Применение на практике перечисленных выше способов позволяет повысить технико-экономические и энергетические характеристики АД. Вместе с тем, комплексный подход к совершенствованию проектировочных работ, технологий производства изоляционных материалов и конструкций, технологий пропитки и сушки систем изоляции не исключает выход АД из строя в процессе эксплуатации, что не позволяет рассматривать данные способы повышения надежности достаточными. Кроме того, в рассматриваемом случае остается открытым вопрос оценки качества, так как без наличия достоверного метода диагностики невозможно точно определить качество материалов и выполняемых работ.

Так, например, существующие методы испытаний, такие как измерение сопротивления корпусной изоляции и испытание междувитковой изоляции повышенным напряжением, позволяют лишь грубо произвести отбраковку некачественно изготовленных или отремонтированных АД. При этом большое значение имеет человеческий фактор субъективности суждения о качестве двигателя. Поэтому существует необходимость ужесточения контроля качества производимых работ при изготовлении и ремонте АД с целью своевременного предотвращения негативных последствий преждевременных выходов двигателей из строя на начальном этапе их эксплуатации.

В свою очередь, анализ причин низкой эффективности защиты АД показывает, что во многих случаях она связана с неправильным выбором средств защиты двигателей по техническим показателям. Используемые на практике устройства защиты надежно срабатывают при одних видах аварийных режимов и недостаточно надежно или вообще не реагируют при других. Некоторые из защитных устройств (ЗУ) не могут быть эффективными в виду низкого быстродействия и большой инерционности активных элементов, входящих в состав ЗУ. Использование же современных электронных элементов и устройств порождает еще одну немаловажную проблему – создаются сложные или громоздкие (с точки зрения схемной реализации) ЗУ, имеющие большое количество пассивных элементов.

Таким образом, на этапе эксплуатации роль основного мероприятия обеспечения надежности работы электрооборудования исполняет его комплексная диагностика.

Эффективное решение задачи повышения достоверности диагностики

конструктивных элементов электродвигателя невозможно без технической реализации методов, обеспечивающих получение объективной информации об их состоянии. Кроме того, необходимо проводить постоянную работу в области совершенствования технических характеристик приборов, реализующих существующие методы диагностирования. В рамках рассматриваемого вопроса наибольший интерес представляют устройства, выполняющие функции автоматической диагностики АД, входящие в состав стандартных средств защиты, которые не только обладают всеми вышеперечисленными свойствами и способны предотвратить преждевременный выход АД из строя, но и позволяют оценить текущее состояние изоляции обмотки, сделать прогноз состояния на будущее и приближенно определить остаточный ресурс. При этом не исключается возможность усложнения конфигурации ЗУ вплоть до интеграции с системой обработки результатов диагностики на базе ПЭВМ.

Обеспечение современными устройствами защиты и диагностики минимального воздействия внешних и внутренних факторов на обмотку электрических машин в процессе эксплуатации, а также требуемого качества восстановления работоспособности АД на стадии технического обслуживания и ремонта позволит получить необходимый уровень надежности узлов электрооборудования и повысить эффективность производства в целом по сельскому хозяйству.

В основе существующих способов обеспечения надежности работы АД во время их эксплуатации лежит система планово-предупредительных ремонтов. Согласно [6], повышение надежности асинхронных двигателей возможно за счет увеличения среднего времени наработки между отказами, а также сокращения времени между профилактическими осмотрами. Этого можно достичь рационализацией объема работ по восстановлению диэлектрических свойств изоляции обмотки путем учета результатов ее диагностики. Поэтому от того, какие методы и технические средства используются для определения технического состояния изоляции, будет зависеть эффективность всего комплекса мероприятий, направленных на обеспечение надежной работы АД.

В отечественной науке огромное влияние на современное развитие методов контроля и диагностики изоляции оказали

такие ученые как А.А. Пястолов, И.Е. Иерусалимов, О.Д. Гольдберг, Э.К. Стрельбицкий, О.П. Муравлев, Ю.П. Похолков, Ю.П. Ильин, А.Е. Немировский, О.И. Хомутов и другие.

На сегодняшний день существует целый ряд методов диагностики электрической изоляции, обеспечивающих различную степень достоверности получаемой информации. Для оценивания технического состояния изоляции эти методы используют различные диагностические параметры.

В общем случае, диагностика изоляции в составе электроизоляционной системы, как техническая процедура, сводится, главным образом, к оценке состояния с использованием специальных физических моделей, средств и методов диагностики наиболее важных с точки зрения надежности ее элементов. Так, например, для того, чтобы точно оценить состояние междувитковой изоляции элемента, имеющего относительно невысокую надежность, необходимо определить значения величин сопротивления междувитковой изоляции R_e и емкости C_e как показателей ее состояния. При этом известно, что параметры R_e и C_e реальной электроизоляционной конструкции являются распределенными и, соответственно, определить их значения путем прямых измерений невозможно.

Таким образом, задача оценки состояния междувитковой изоляции как самого уязвимого элемента изоляционной конструкции делится на две основные части – получение экспериментальным путем необходимого количества информативных параметров и расчет значений искомых величин, адекватно отражающих состояние изоляции, то есть R_e и C_e .

Новым объективным методом диагностики изоляции является метод волновых затухающих колебаний (ВЗК) [2]. Суть метода состоит в том, что на обмотку АД подается сигнал прямоугольной формы определенной величины и отслеживается степень его затухания в обмотке по сравнению амплитуд и периода сигнала на выходе. Чем хуже состояние изоляции, тем сильнее затухает сигнал.

Основным достоинством данного метода является то, что он позволяет производить оценку состояния междувитковой изоляции.

Согласно [7], в формировании ВЗК процесса все элементы обмотки участвуют поразному. Так, индуктивность L и емкость C формируют значения периода T_f , а сопротивление R формирует значения амплитуды A_f . При этом любые возможные

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭТАЛОННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА ИХ ИЗОЛЯЦИИ

изменения свойств изоляции влекут за собой изменение значений параметров C , R обмотки и, следовательно, параметров ВЗК процесса T_f и A_f .

Таким образом, в данном случае используется физическое моделирование процессов старения с использованием косвенных измерений, которые в общем представлении являются более сложным видом измерений, так как полученные путем прямых измерений значения некоторых величин $A_1, A_2, \dots, A_n, T_1, T_2, \dots, T_n$ (диагностических параметров) связаны с искомой величиной известной зависимостью.

Однако опыт использования для целей прогнозирования вышеперечисленных диагностических параметров показал необходимость иметь один обобщенный диагностический параметр, характеризующий состояние всей изоляционной системы, а не группу параметров.

В работе [2] для оценки состояния изоляции по рассматриваемому методу предлагается модифицированный диагностический параметр (МДП). Этот параметр является величиной, обусловленной, во-первых, состоянием изоляции, а во-вторых, величинами конструктивных параметров электрических машин.

Для нахождения оптимальной структуры обобщенного диагностического параметра по методу ВЗК были рассмотрены ряд факторов, воздействующих на затухающий колебательный процесс.

Как известно из курса физики, затухающий колебательный процесс может быть описан следующим выражением:

$$s = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где $A_0 e^{-\delta t}$ – амплитуда затухающих колебаний;

δ – коэффициент затухания;

ω – частота затухающего колебания;

t – время затухания;

φ – фаза колебания.

Выше отмечалось, что основными характеристиками электрического колебательного контура являются R, L, C .

Частота затухающего колебания определяется по следующему выражению:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (2)$$

При этом рассматриваемая частота связана с периодом формулой

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (3)$$

Если $A(t)$ и $A(t + T)$ – амплитуды двух последовательных колебаний соответствующих моментов времени, отличающихся на период, то отношение

$$\frac{A(t)}{A(t + T)} = e^{\delta T} \quad (4)$$

называется декрементом затухания, а его логарифм равен

$$\Theta = \ln \frac{A(t)}{A(t + T)} = \delta T. \quad (5)$$

Из формулы (5) можно выразить коэффициент затухания

$$\delta = \frac{\Theta}{T} = \frac{\ln \frac{A(t)}{A(t + T)}}{T}, \quad (6)$$

который в ряде случаев может быть использован в качестве модифицированного обобщенного диагностического параметра F . Исходя из формул (1) и (3) можно сделать вывод, что данный параметр с увеличением затухания колебания будет увеличиваться. Однако для описания процесса старения изоляции электродвигателя было бы удобно использовать параметр, величина которого бы уменьшалась с течением времени.

В свою очередь, в работе [2] используется обобщенный диагностический параметр D_{us} , определяемый по формуле

$$D_{us} = \frac{A_1}{A_2} \cdot T. \quad (7)$$

Внедрение данных диагностических параметров F и D_{us} в практику предприятий Алтайского края выявило ряд их недостатков. В первую очередь, как было показано выше, значения этих параметров при ухудшении состояния изоляции увеличиваются, что не соответствует требованиям прямой корреляционной зависимости между изменением значений параметра и состоянием объекта контроля. Это обстоятельство усложняет процесс прогнозирования технического состояния изоляции АД. Во-вторых, использование параметров F и D_{us} позволяет получить данные о степени изношенности изоляции, хотя на практике больший интерес представляет оценка остаточного ресурса работы узлов оборудования.

С целью исключения указанных выше недостатков был предложен модифицированный диагностический параметр Π_{us} , представляющий собой время

релаксации затухающих колебаний и записываемый в виде:

$$P_{us} = \frac{T}{\ln \frac{A_1}{A_2}}, \quad (8)$$

где A_1 – амплитуда первого полупериода;
 A_2 – амплитуда второго полупериода.

Следует отметить, что немаловажную роль в достоверности получаемого результата при диагностике играет применяемая методика измерения. Принципиально все методики диагностики, основанные на использовании метода волновых затухающих колебаний, можно разделить на три группы:

текущее значение диагностического параметра сравнивается со значением, полученным во время предыдущего измерения;

текущее значение диагностического параметра сравнивается со значением, соответствующим критическому состоянию объекта, при котором еще сохраняется его работоспособность;

текущее значение диагностического параметра сравнивается со значением, соответствующим эталонному техническому состоянию объекта.

В настоящее время широко используется первая методика диагностирования. Ее достоинством является возможность оценки изменения технического состояния изоляционной системы за заданный промежуток времени, что является важным при определении необходимости проведения работ технического обслуживания. Основными недостатками этой методики являются необходимость ведения документации о состоянии изоляции АД и неопределенность текущего ее состояния.

Однако практическая реализация метода ВЗК будет максимально эффективной только в том случае, если заранее известны значения граничных параметров (ЗГП), то есть значения, соответствующие наивысшей прочности (высокому качеству) изоляции, и значения совершенно противоположные, дальнейшее снижение которых ведет к полной потере свойств изолирующего материала. Другими словами, проблема заключается в том, что с одной стороны существует метод, модель и технические средства диагностики изоляции, позволяющие эффективно, с высокой степенью достоверности, диагностировать обмотки ЭД, а с другой стороны – не установлены необходимые зависимости между значениями основных граничных параметров обмотки,

отражающими состояние изоляции, параметрами ВЗК и параметрами конкретных электроизоляционных систем. Это ограничивает использование метода ВЗК, изложенного в [2], и затрудняет прогнозирование технического состояния изоляции или определения ее остаточного рабочего ресурса.

Решить данную проблему – не только значительно расширить возможности метода моделирования ВЗК, но и, главным образом, создать инструмент, позволяющий получить неограниченный доступ к исследованию процессов, происходящих в изоляции на всем протяжении жизненного цикла.

Подводя итог вышесказанному, следует отметить, что основным препятствием для повсеместного внедрения метода волновых затухающих колебаний является то, что для каждого типа АД, а также двигателей нестандартного исполнения, модернизированных при капитальном ремонте, отсутствуют эталонные значения диагностических параметров, которые для конкретного типа электродвигателя будут индивидуальными. В данном случае, под эталонным понимается состояние электроизоляционной системы (ЭИС) нового АД, выполненного с соблюдением требований ТУ и ГОСТов и не имеющего дефектов.

В последнее время для решения большого круга научных и практических задач диагностики широко используются модели обмотки АД, имеющие вид ее схем замещения. В связи с этим, основными задачами повышения эффективности практического использования методов диагностики изоляции являются не только разработка и внедрение современных, удобных, экономичных и доступных технических средств, но и установление сравнительно простых математических зависимостей между элементами схемы замещения обмотки АД и измеряемыми диагностическими параметрами. Использование данных зависимостей позволяет повысить достоверность диагностики за счет учета значений параметров конструкций АД, эксплуатируемых как на предприятиях промышленности, так и сельского хозяйства. Однако сложность или невозможность непосредственного измерения ряда параметров вышеназванных моделей, а также отсутствие методик их расчета существенно осложняет получение положительного результата.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭТАЛОННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА ИХ ИЗОЛЯЦИИ

Таким образом, проблемная ситуация заключается в противоречии между необходимостью использования для повышения достоверности диагностики электрической изоляции значений ряда параметров схемы замещения обмоток АД и отсутствием способов и технических средств их определения.

В свою очередь, целью выполненных работ является разработка методики и технических средств для определения значений диагностических параметров изоляции АД в зависимости от значений внешних воздействующих факторов и параметров, характеризующих ее конструкцию.

Для достижения положительного результата были решены следующие основные задачи:

- обоснована степень влияния параметров, характеризующих конструкцию обмотки АД, на изменение величины диагностического параметра с учетом внешних воздействующих факторов;
- создана математическая модель волнового затухающего процесса в обмотке при подаче на нее импульса напряжения, позволяющая установить зависимость значений диагностического параметра от значений параметров схемы замещения;
- найдены новые математические зависимости значений элементов схемы замещения обмотки от значений внешних воздействующих факторов и конструктивных параметров двигателя;
- разработана методика определения технического состояния изоляции обмотки АД на основе использования метода волновых затухающих колебаний, возникающих в ходе диагностики;
- обоснована структура системы сбора диагностической информации о техническом состоянии АД;
- разработаны технические средства диагностики изоляции обмоток АД, основанные на измерении значений параметров волновых затухающих колебаний и удовлетворяющие требованиям дешевизны, удобства в эксплуатации и точности измерений.

В рассматриваемом случае, в качестве объекта исследований выступает волновой затухающий колебательный процесс, протекающий в обмотке АД при ее диагностировании. Предмет исследований состоит в получении закономерностей протекания волнового затухающего

колебательного процесса, возникающего в обмотке АД в ходе диагностики, при изменении значений параметров, характеризующих его конструкцию.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы.

Исследование динамики изменения значений элементов схемы замещения обмоток АД в зависимости от изменения параметров конструкции показало, что установление количественных взаимосвязей для ряда параметров конструкции возможно лишь в неявном виде.

Предложенная математическая модель ВЗК в обмотке с учетом конструктивных параметров изоляционной системы АД позволила установить связь между параметрами ВЗК и параметрами схемы замещения.

Диэлектрическая проницаемость ЭИС напрямую зависит от диэлектрических проницаемостей входящих в нее компонентов и их объемного соотношения.

Междувитковая емкость обратно пропорциональна значению коэффициента пористости обмотки и зависит от свойств материала, заполняющего поры.

Кроме того, выполненные теоретические исследования позволили выявить тенденцию увеличения значений МДП с ростом мощности АД. При этом с увеличением числа полюсов АД МДП возрастает. Анализ результатов исследований отрицательного влияния внешних параметров на изменение значений МДП показал, что наибольшее значение имеют концентрации влаги и химически агрессивных веществ в изоляции обмотки.

Практическая ценность результатов работы заключается в использовании полученной математической модели волновых затухающих колебательных процессов при изучении динамики процессов, протекающих в обмотке АД в результате старения изоляции, и проведении прогноза ее технического состояния. Найденные зависимости значений элементов схемы замещения обмотки АД от значений параметров, характеризующих конструкцию двигателя, могут быть использованы при проектировании изоляционных систем электрических машин. Разработанные технические средства диагностики обеспечивают получение объективной информации о состоянии изоляции обмоток АД как в процессе эксплуатации, так и при оценке качества ремонта, и имеют сравнительно низкую стоимость, малые

размеры, а также отличаются удобством и простотой в использовании. Применение устройств периодического контроля изоляции АД позволяет диагностировать обмотки в автоматическом режиме без остановки технологического процесса и предотвращать аварийную ситуацию. Предложенная методика диагностики позволяет упростить процедуру оценки технического состояния изоляции АД и может широко использоваться в реальных условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдберг О.Д. Надежность электрических машин общепромышленного и бытового назначения. – М.: Знание, 1976. – 55 с.
2. Сташко В.И. Диагностика изоляции электродвигателей в сельском хозяйстве на основе использования метода затухающих колебаний в обмотке: Дис... канд. техн. наук. – Барнаул, 1998. – 134 с.
3. Хомутов О.И. Система технических средств и мероприятий по повышению надежности электрооборудования: Учеб. пособие. – Барнаул: Б.и., 1989. – 95 с.
4. Сырых Н.Н. Эксплуатация сельских электроустановок. – М.: Агропромиздат, 1986. – 255 с.
5. Чепурин Г.Е. Основные принципы научно-технического прогресса в АПК Сибири // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1996. – № 3. – С. 6-9.
6. Оськин С.В. Повышение надежности электропривода сельскохозяйственных машин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1996. – № 3. – С. 19.
7. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.