

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

С.О. Хомутов, Е.В. Кобозев, П.И. Семичевский

Внезапный выход электродвигателя из строя ведет к нарушению взаимосвязанных технологических циклов, полной или частичной остановке производственного оборудования и механизмов. В результате наносимый предприятию ущерб связан не только и не столько с заменой или ремонтом вышедших из строя электродвигателей, сколько с браком и недо-выпуском продукции. В данной работе рассмотрена возможность повышения эффективности восстановления изоляции электрических двигателей на основе использования логической зависимости, позволяющей дать количественную оценку влияния каждого из факторов, воздействующих на электродвигатель в процессе ремонта, на показатель наработки до отказа.

A sudden withdrawal of the electric motor leads to a violation of interconnected technological cycles, total or partial shutdown of the production equipment and machinery. As a result of damage caused to the enterprise is linked not only to replace or repair worn-out electric motors, but with spoilage and products release reduction. In this article authors consider the possibility of increasing the electric motors isolation recovery efficiency based on the logical subject, which allows to quantify the impact of each of the factors affecting the electric motor in the process of renovation, the rate of refusal to the works.

Все возрастающая потребность в электрооборудовании не может быть полностью удовлетворена без организации его ремонта на техническом уровне и в масштабах, обеспечивающих высокое качество и экономичность ремонтных работ.

Одним из наиболее действенных средств поддержания оборудования в должном техническом состоянии и продления его жизни является, как известно, своевременный и качественный ремонт. Объем и сложность ремонтируемого электрооборудования непрерывно растет, в связи с чем возникает необходимость в постоянном совершенствовании технологии и сокращении сроков ремонта, привлечении к работам по ремонту электрооборудования наиболее квалифицированных рабочих.

В настоящее время электропривод занимает ведущее положение практически во всех промышленных и многих транспортных механизмах. Согласно статистике, электроприводом оснащены примерно 85 % всех двигательных и силовых механизмов (насосы, компрессоры, вентиляторы, станки, разнообразные технологические машины, бытовая техника и др.).

Асинхронные двигатели (АД) стали изданием массового применения, и на сегодня они потребляют около 75 % вырабатываемой во всем мире электроэнергии. Это обуслав-

ливает большое значение качества, надежности и энергетических характеристик асинхронных электродвигателей.

АД общего назначения мощностью от 0,1 до 100 кВт на напряжение до 1000 В – наиболее широко применяемые в промышленности электрические машины. Они составляют по количеству 90 %, а по мощности, примерно, 60 % от общего парка. Такое положение эти машины завоевали благодаря своей способности автоматически изменять момент вращения на валу, высокому КПД, относительной технологической простоте и низкой стоимости по сравнению с другими видами электродвигателей.

Электрические двигатели участвуют во многих сложных и ответственных технологических процессах и операциях. Отказ в их работе может повлечь за собой огромные убытки предприятия из-за простоя технологического оборудования, а также несет угрозу безопасности жизни людей. Такие убытки могут во много раз превышать стоимость самого электродвигателя, вышедшего из строя.

Специфические и тяжелые условия эксплуатации приводят к снижению надежности и долговечности электродвигателей.

Окружающая среда промышленно-производственных помещений может значительно отличаться от нормированной для нормальной работы электродвигателей. При-

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

существование в вентилируемом электродвигателем воздухе агрессивных сред, паров кислот и щелочей, токопроводящей и нетокопроводящей пыли, а также других механических включений ведут к преждевременному износу, а то и к выходу из строя как витковой, так и корпусной изоляции, что приводит электродвигатель в негодность.

Технико-экономическое совершенство и эксплуатационная надежность работы электрических машин в значительной степени зависят от изоляции. Если учесть то, что стоимость изоляции составляет около половины стоимости всех материалов машины, а изоляция за время службы заменяется (порой несколько раз), в то время как активные материалы машины используются многократно, становится понятным то большое внимание, которое уделяется специальным вопросам, связанным с конструированием, изготовлением, а особенно эксплуатацией и диагностикой состояния изоляции электрических машин.

В общем случае средний срок службы АД составляет 20000 часов (около 5 лет) и колеблется в зависимости от области применения. По России, в среднем, в течение года подвергается капитальному ремонту около 20 % установленных АД.

Асинхронные двигатели нередко работают в весьма тяжелых условиях при неудовлетворительном обслуживании или совершенно без какого-либо ухода. 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.

Статистика обнаруживает резкие колебания в уровне аварийности и сроке службы двигателей в различных отраслях промышленности. Среднегодовой выход двигателей в капитальный ремонт составлял: в строительстве – 54 %, в горнодобывающей промышленности – 29 %, в промышленности строительных материалов – 25 %, в пищевой промышленности – 24 %. В то же время в химической промышленности, где условия работы двигателей так же достаточно неблагоприятны, средний выход в капитальный ремонт в год составил лишь 9 %, в черной металлургии – 13 %. На некоторых шахтах Кузбасса электродвигатели служат, в среднем, всего 6-7

мес. В условиях химической промышленности средний технический ресурс двигателей серии ВАО до первого капитального ремонта составляет 60-80 тыс. ч, в то время как на угольных шахтах только 5-6 тыс. ч, а для отдельных приводных механизмов даже около 2 тыс. ч.

Распределение повреждений по отдельным узлам асинхронных двигателей изменяется в зависимости от условий их применения, однако наибольшее число повреждений приходится на обмотку статора. В среднем, из-за повреждений обмоток двигателей происходит 85-95 % отказов, 3-8 % отказов происходит вследствие повреждений подшипников.

По характеру повреждений обмоток отказы асинхронных двигателей единой серии распределяются следующим образом: межвитковые замыкания – 93 %, повреждения междуфазовой изоляции – 5 %, пазовой изоляции – 2 %. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев причиной отказов является повреждение межвитковой изоляции, типичное для выпных обмоток. Повреждения междуфазовой и пазовой изоляции обычно возникают как следствие межвитковых замыканий и представляют развитие последних.

Для асинхронных двигателей общепромышленного применения изменение интенсивности отказов в функции времени имеет довольно типичный характер, обнаруживая отчетливые периоды приработки, нормальной эксплуатации и износа. Правильная форма кривой интенсивности отказов обусловлена тем, что преобладающей причиной отказов являются межвитковые замыкания в обмотке статора и, таким образом, в большинстве случаев отказы однотипны по своему происхождению [1].

После 3-5 тыс. ч работы АД наступает период их нормальной эксплуатации; интенсивность отказов в течение этого времени колеблется около некоторой средней величины порядка $(0,5 \pm 1)10^{-5} \text{ ч}^{-1}$. В период нормальной эксплуатации отказы являются следствием периодического возрастания нагрузок, вызванного различными условиями, внешними по отношению к машине. Сюда относятся: коммутационные перенапряжения, перегрузки по току, чрезмерное возрастание по разным причинам нагрузочного момента и т.п.

Длительность периода нормальной эксплуатации зависит от условий работы двигателей. При умеренных нагрузках и правильной эксплуатации продолжительность этого

периода измеряется многими годами. Из-за неполного использования вследствие систематической недогрузки большинства асинхронных двигателей общепромышленного применения после 30 - 35 тыс. ч работы, т.е. 7-9 лет эксплуатации, отказы из-за теплового старения изоляции еще не возникают.

Условия применения асинхронных двигателей весьма разнообразны. Поэтому существуют различные исполнения и модификации двигателей для удовлетворения специфических требований, связанных с особенностями нагрузок, окружающей среды и режимов работы. Так, двигатели с повышенным скольжением $S_n = 8 \div 14 \%$ предназначаются для привода механизмов с большими маховыми массами и неравномерным графиком нагрузки, а также механизмов с большой частотой пусков и реверсов. Увеличенное активное сопротивление ротора этих двигателей позволяет уменьшить их нагрев при переходных процессах.

Двигатели с повышенным пусковым моментом $M_n / M_n = 1,7 \div 2$ служат для приводов механизмов с тяжелыми условиями пуска, но относительно стабильной нагрузкой. Двигатели пониженного использования предназначены для установки на предприятиях, где из-за условий круглосуточной работы особое значение приобретают высокие энергетические показатели. Существующие исполнения и модификации, как правило, позволяют выбрать наиболее подходящий для конкретных условий работы двигатель. Кроме того, ГОСТ 17494-72 предусматривает 17 различных исполнений электрических машин по степеням защиты.

Надежная работа двигателей может быть гарантирована лишь при условии правильного их выбора и применения.

До 30 % отказов двигателей серии А за первую тысячу часов работы было вызвано неправильным использованием двигателей по условиям окружающей среды. В среднем для всех типов двигателей около 7,5 % отказов вызывается неправильным выбором двигателей по мощности.

Для определения характера и причин отказов электродвигателей за последние годы проводилось систематическое изучение материалов эксплуатации значительного количества асинхронных двигателей в различных отраслях народного хозяйства.

В настоящее время условия эксплуатации АД в промышленности в большинстве случаев неудовлетворительны. Большие колебания температуры, высокая влажность,

агрессивные газы и пыль, масло являются основными факторами, совместное воздействие которых в значительной степени влияет на надежность электродвигателей.

Также типичным для электродвигателей является частая недогрузка либо перегрузка по мощности или недоиспользование по нагреву. Основная причина этого – неоправданное завышение (занижение) мощности электродвигателя на стадии проектирования, специфика эксплуатации и пр.

Обобщая полученные данные о повреждениях изоляции, можно назвать наиболее характерные из них: короткое замыкание на корпус, пробой, короткие витковые замыкания, пробой и обугливание изоляции, обрыв обмотки статора.

Наиболее частое сочетание встречающихся видов повреждений – это пробой и обугливание изоляции с витковым коротким замыканием и повреждением провода. Такое сочетание видов повреждений имеют 51,2 % из всех вышедших из строя и обследованных электродвигателей. Обугливание изоляции в сочетании с пробоем наблюдается у 10,2 % двигателей, а обугливание изоляции в сочетании с витковым коротким замыканием и пробоем – у 13,1 %. В «чистом» виде пробой изоляции имеет место у 4,8 %, обугливание изоляции – у 13,5 %, витковое короткое замыкание – у 4,3 % электродвигателей. Лишь 29 % электродвигателей имели механические повреждения без повреждения обмотки. Кроме этого, по данным некоторых исследований, пробой на корпус наблюдался у 16 %, а сгорание обмоток – у 46 % электродвигателей.

Все это говорит о том, насколько высокими должны быть требования к технологии ремонта электродвигателей с учетом того, что сам процесс ремонта в настоящее время является длительным и несовершенным в большинстве случаев.

Электрические машины обладают рядом особенностей, не позволяющих непосредственно применить при исследовании их надежности методы, достаточно полно разработанные для устройств радиоэлектроники и автоматики. Такими особенностями являются: принципиальная невозможность резервирования элементов, большая сложность отдельных узлов (например, обмотки), схемная несложность, даже по сравнению с простейшими радиоэлектронными устройствами, большой срок службы, неопределенность окружающих условий и номинальных режимов

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

работы, особенно для электродвигателей общего применения.

Для решения проблем надежности необходим контроль во время эксплуатации, выявление и анализ причин выхода из строя. Для чего необходимы средства и методы контроля и диагностирования за техническим состоянием.

Во время эксплуатации изоляция электрооборудования, в том числе и электрических машин, подвергается различным воздействиям, под влиянием которых происходит старение изоляции, т.е. необратимое ухудшение ее свойств. Для изоляции электрических двигателей характерным является образование местных дефектов (например, трещин), т.е. существенное ухудшение ее электрических свойств на отдельных небольших участках.

Воздействия, вызывающие повреждения изоляционных материалов, подразделяются на следующие группы: электрические, тепловые, механические и окружающей среды. Во время работы оборудования его изоляция испытывает эти воздействия одновременно, при этом возможно взаимодействие, т.е. одновременно приложенные воздействия могут вызывать старение изоляции с иной скоростью, нежели приложенные поочередно.

Каждый из перечисленных ранее видов воздействия может оказаться в определенных условиях основным, определяющим процесс старения изоляции или ее части, в этом случае данному виду воздействия будет соответствовать определенный характер старения изоляции и вызываемые этим старением дефекты.

Тепловое старение изоляции является следствием постепенного химического изменения входящих в ее состав органических веществ. Неорганические компоненты изоляции при рабочих температурах практически не претерпевают каких-либо химических изменений, т.е. не старятся. В терморезистивной изоляции старится связующее – терморезистивный компаунд, он становится более хрупким (при этом темнеет) и от этого ухудшаются механические свойства изоляции в целом.

В микалентной компаундированной изоляции старятся бумажная подложка, лаки и компаунд. При этом подложка становится хрупкой, постепенно происходит ее химическое и механическое разрушение и в результате она может практически совсем исчезнуть, особенно в таких напряженных местах как выход из паза. Масляный лак, входящий в состав микаленты и битумный компаунд, ко-

торым она пропитывается при компаундировке, при старении становятся из вязких также хрупкими, частично улетучиваются, при механических воздействиях крошатся.

В результате этого ослабляется связь как между слоями микаленты, так и между листками слюды в слое, изоляция легко расслаивается.

При длительном нагреве микалентной изоляции параллельно с химическими процессами идет также процесс так называемого «распухания», имеющий в своей основе механические явления. С повышением температуры резко ухудшаются механические свойства лака и компаунда, вследствие чего листки слюды, согнутые на углах сечения стержня, имеют возможность несколько распрямиться, тем самым увеличить радиус закругления изоляции на углах стержня. При этом в меньшей степени распрямляются внутренние слои, испытывающие давление внешних слоев, в большей степени – внешние слои, сдерживаемые лишь вязкостью связующего и покровной лентой. В результате описанного процесса сечение изолированного стержня принимает бочкообразную форму, между слоями изоляции, по-разному изогнутыми, появляются или увеличиваются воздушные прослойки, появляется или увеличивается зазор между внутренним слоем изоляции и поверхностью проводников стержня.

Распухание особенно сильно проявляется в местах, где ему ничто не препятствует, в лобовых частях (включая место выхода из паза); в пазовой части оно в значительной степени ограничено размерами паза и происходит лишь на величину начального зазора между стержнем и стенкой паза.

Возможны другие условия теплового старения изоляции – сравнительно кратковременное действие температур, существенно превышающих допустимые рабочие температуры. Такие условия возникают, как правило, при местных перегревах: замыкание ряда элементарных проводников в пазовой части стержня с быстрым ростом температуры в месте замыкания, излом проводника со случайным контактом в месте излома.

В терморезистивной изоляции последствия местных перегревов по внешним признакам мало отличаются от последствий теплового старения, за исключением обугливания изоляции, которое наступает при температурах порядка сотен градусов.

У микалентной компаундированной изоляции при местных перегревах, кроме при-

знаков общего теплового старения, выраженного в большей или меньшей степени, и вытекания черного лака из головок (с обычным термопластичным заполнением) появляются некоторые специфические признаки.

К ним относится, в первую очередь, вытекание лака и компаунда (часто с образованием затвердевших наплывов) в лобовых частях в случае перегрева всего стержня или его лобовой части. Кроме того, в этом случае может измениться форма сечения стержня: из прямоугольного он становится овальным из-за значительного распухания, ускоренного газообразованием внутри изоляции.

При местном перегреве стержня в пазовой части наиболее характерным из общих признаков старения является наличие участка с резко повышенной хрупкостью связующего.

При действии высоких температур связующее выгорает, и могут появиться следы дегидратации слюды: листки (пластинки) слюды белеют, становятся непрозрачными, особенно с краев, легко рассыпаются на мелкие чешуйки.

По современным воззрениям пробой изоляции электрических машин при длительном действии напряжения имеет ионизационный характер, т.е. обусловлен постепенным разрушением изоляции частичными разрядами, происходящими в имеющихся в толще изоляции и под электродами газовых включениях.

В завершающей стадии такой пробой развивается сравнительно быстро и сопровождается, вероятно, электрическим пробоем некоторых неповрежденных прослоек изоляции. Но ему предшествует длительная стадия так называемого электрического старения - процесс постепенного разрастания газовых включений, формирования участков пути пробоя и т.п.

Электрическое старение термореактивной изоляции является следствием постепенного разрушения ее межслоевыми разрядами, начинающимися из мест расположения случайных дефектов (складки, трещины, расслоения и т.п.) в прилегающих к плетеному стержню слоях изоляции.

Разряды происходят в толще изоляции вдоль ее слоев по поверхностям раздела ее структурных элементов и приводят к повреждению следующего слоя изоляции в наиболее слабой его точке в зоне действия разрядов. С места повреждения, как с острия, возникают межслоевые разряды уже под поврежденным слоем, далее процесс повторяется

в каждом последующем слое; происходит непрерывная эрозия слоев в зоне первоначального дефекта с постепенным увеличением глубины повреждения.

Старение пленок происходит только в условиях непосредственного действия разрядов на пленку и при наличии достаточного доступа кислорода в зону разрядов.

Если эти условия выполнены, то при длительной выдержке напряжения через некоторое время из-за электрического старения происходит пробой пленки и время до пробоя тем меньше, чем выше приложенное напряжение.

Изоляция должна выполняться так, чтобы при фазном напряжении действие электрического старения, вызванное частичными разрядами в ее толще, практически не влияло на ее срок службы. Этому условию удовлетворяли все виды слюдосодержащей изоляции, выпускавшейся отечественными заводами: гильзовая, микалентная компаундированная и термореактивная.

У обмоток, работавших в воздушной среде, в некоторых случаях наблюдались следы ионизационного старения во внутренних слоях изоляции близ углов сечения стержня, где при отсутствии специальных мер имела концентрация напряженности поля.

Основными факторами действия на изоляцию электрических машин окружающей среды являются: действие окружающего изоляцию газа (например, воздуха); действие влаги, содержащейся в воздухе, газе или попадающей на изоляцию в виде жидкости (например, попадание влаги извне при действии устройств пожаротушения, при небрежном хранении статора и т.п.). Кроме того, возможно абразивное действие пыли, содержащейся в воздухе.

Действие окружающего изоляцию газа сказывается в основном на процессах теплового и электрического старения изоляции.

Действие на изоляцию крупных металлических частиц и предметов, попавших в двигатель извне или выпавших из различных его узлов, с некоторым допущением также может быть отнесено к действию окружающей среды.

Увлажнение изоляции при работе машины возможно лишь при попадании воды на обмотку. Увлажнение изоляции от действия влажного воздуха возможно только тогда, когда машина не работает (во время транспортировки, монтажа, длительного ремонта и т.п.). При этом разные части изоляции увлаж-

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

няются по-разному в зависимости от материала, из которого они сделаны.

Современная терморезистивная изоляция всех видов, не имеющая дефектов, практически не подвержена объемному увлажнению; в ней при правильном ее изготовлении мало пор, проникая в которые влага могла бы снизить ее электрическую прочность (как это происходит, например, в бумаге и картоне), а терморезистивные компаунды мало гигроскопичны и процесс их увлажнения идет весьма медленно.

Значительно более интенсивно идет процесс поверхностного увлажнения, однако такое увлажнение легко устраняется подсушкой изоляции на воздухе даже без нагрева.

Только при наличии дефектов увлажнение может существенно сказаться на пробивном напряжении изоляции. Такими дефектами могут быть трещины, образовавшиеся при укладке стержней и подгонке головок из-за неправильной формы лобовых частей или нарушения технологии укладки. Другим дефектом может явиться недостаточная пропитка изоляции и плетеного стержня терморезистивным компаундом.

Непрерывная компаундированная изоляция, не имеющая дефектов, практически также не подвержена объемному увлажнению ни под действием обычной влаги воздуха, ни при кратковременном смачивании водой: пропитка компаундом хотя бы внешних слоев изоляции делает ее мало гигроскопичной. У такой изоляции (как и терморезистивной) возможно главным образом поверхностное увлажнение. Некоторое проникновение влаги в толщу изоляции возможно в основном вдоль слоев слюды (с концов стержня, если они не изолированы). Заметным такое увлажнение становится лишь после многомесячной выдержки изоляции в воздухе с влажностью, близкой к 100 %.

Механическим воздействиям изоляция подвергается как во время изготовления и ремонта, так и во время эксплуатации его (особенно при несоответствии системы крепления обмотки возникающим в ней усилиям).

Механические воздействия приводят к возникновению в изоляции деформаций растяжения, сжатия, изгиба, смятия, кручения, а также к трению поверхности стержней о прилегающие к ним детали. При неблагоприятных обстоятельствах это приводит к появлению дефектов изоляции в виде трещин, складок, расслоения ее и местного уменьшения толщины.

Уровень механических воздействий с ростом мощности двигателей непрерывно возрастает и увеличивается опасность механического повреждения изоляции в случае малейших конструктивных или технологических недоработок, упущений при монтаже, ремонтах и т.п., несмотря на то что терморезистивная изоляция существенно прочнее mica-калентной. В связи с этим механические повреждения изоляции являются наиболее характерной причиной дефектов, выявляемых в машинах, находящихся в эксплуатации.

Термомеханические воздействия возникают при тепловых циклах (нагревании и охлаждении обмотки) в основном вследствие разницы в температурах и коэффициентах линейного расширения меди, активной стали и изоляции, а также наличия значительного трения между поверхностью стержня и стенками паза. Вследствие указанных причин при изменении тока в обмотке и соответствующем изменении температуры токоведущей части стержня и длины последней (расширении или сжатии) в изоляции возникают напряжения растяжения или сжатия, усугубляемые тем, что перемещения стержня в пазу происходят с усилием.

При терморезистивной изоляции и уплотнении стержня в пазу боковыми пружинящими прокладками смещения меди и изоляции относительно стали сердечника практически одинаковы, т.е. изоляция не смещается относительно токоведущего стержня, а образует с ним комплекс с некоторым общим коэффициентом линейного расширения.

Термомеханические напряжения при большом числе циклов нагрева и охлаждения существенно влияют на состояние терморезистивной изоляции и при сочетании неблагоприятных условий, в частности при недостаточно совершенной системе ее, могут привести к пробое.

Анализ всех известных способов поддержания эксплуатационной надежности изоляции АД, основными из которых являются ее капитальный ремонт, техническое обслуживание, периодическая диагностика, обеспечение надежной защитой, показывает, что основными мероприятиями, способствующими созданию базового ресурса работы изоляционной системы, являются ее пропитка и сушка специальными диэлектрическими составами.

В основе существующих технологий проведения восстановительных работ лежит опыт их рационализации, результатом которого в настоящее время является следующая

последовательность технологических операций: деструкция связующего и удаление обмотки, операции обмоточно-изолировочных работ, предварительный нагрев и сушка изоляции обмотки, заполнение обмоток специальными диэлектрическими составами, сушка и, при необходимости, полимеризация [2].

Обмоточно-изолировочные работы являются важнейшими при ремонте. Это обусловлено тем, что правильный выбор значений конструктивных параметров обмотки обеспечивает нормируемые значения рабочих и энергетических характеристик электродвигателя, а качественное выполнение работ способствует отсутствию дефектов в эмалевом покрытии проводников. В практике эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве известны случаи, когда после полной или частичной перемотки АД не подвергались операциям пропитки и сушки. При этом ЭД сохраняли работоспособное состояние в течение некоторого времени. Однако вследствие воздействия агрессивных факторов эмалевое покрытие проводов сравнительно быстро повреждалось, и электродвигатель выходил из строя. Таким образом, эксплуатационная надежность изоляции обмотки после обмоточно-изолировочных работ низка.

В практике электромашиностроения для повышения надежности изоляционных конструкций низковольтных электродвигателей используется пропитка и сушка их обмоток.

Сушка перед пропиткой необходима для удаления влаги из пор изоляции, препятствующей проникновению лака в тело обмотки. Сушку перед пропиткой требуется выполнять еще и потому, что при пропитке лаки и компаунды быстрее и глубже проникают вглубь нагретых обмоток вследствие разрежения воздуха в капиллярах, которое возникает при нагревании обмоток. Следует также отметить, что чем выше температура, тем быстрее происходит удаление влаги из обмоток.

Сушка до пропитки может осуществляться с использованием следующих методов: конвекционного, токового, терморadiационного, индукционного, электроосмоса, вакуумного, скоростного электротермовакuumного.

По конвекционному методу сушку обмоток статоров, роторов и якорей электрических машин производят в специальных печах при 105 – 200 °С подогретым воздухом. При этом необходимо ограничивать максимальную температуру сушки, которая зависит от кон-

струкции и класса нагревостойкости изоляции, но обычно не превышает 200 °С.

При индукционном способе сушки для нагрева изделий используют явление магнитной индукции. Изделия помещают в специальный индуктор, питаемый токами высокой частоты или токами промышленной частоты. Конфигурация индуктора соответствует форме и размерам изделий. Под воздействием переменного магнитного поля в изделии наводятся индукционные токи, которые его нагревают.

Терморadiационный способ сушки заключается в нагреве изделий инфракрасными лучами. Генераторами лучей служат специальные электрические лампы, представляющие собой несколько видоизмененные обычные лампы накаливания, а также трубчатые электронагревательные элементы и специальные металлические панели, нагретые до температуры 300 – 450 °С, излучающие инфракрасные лучи. В первую очередь под воздействием инфракрасных лучей нагреваются металлические части, и за счет этого начинается интенсивное удаление влаги из пор обмотки, вследствие чего данный способ сушки является более эффективным, чем конвекционный.

При токовом способе сушки через обмотку ротора, статора или якоря пропускается электрический ток, который служит причиной нагрева изделий. При этом к статору подводится трехфазный ток такого напряжения, чтобы в обмотке статора получить ток, равный $(0,5 - 0,7)I_{ном}$. Большой ток недопустим, так как из-за отсутствия вентиляции может произойти перегрев обмотки.

Сушка по методу электроосмоса заключается в приложении постоянного напряжения между проводниками обмоток и корпусом машины. Положительный полюс источника постоянного напряжения подключается к проводникам обмоток, а отрицательный - к корпусу, а последовательно с источником постоянного напряжения включают источник пульсирующего напряжения. Процесс сушки осуществляют путем чередования циклов, каждый первый из которых проводят при частоте 1000 – 1500 Гц в течение 40 – 60 минут, а второй – 20 – 50 Гц в течение 10 – 60 с.

Сушка по вакуумному методу (технология АВБ) заключается в вакуумировании обмоток статора в течении 20 – 40 с. При этом давление внутри автоклава, в который помещена обрабатываемая обмотка, меньше, чем в обмотке. За счет созданного вакуумного

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

удара (быстро созданной разности давлений) впитанная обмоткой влага выходит наружу.

Скоростной электротермовакuumный метод отличается от предыдущего только тем, что время создания вакуума в нем имеет гораздо меньшие значения за счет применения быстродействующих задвижек, и достигается большая глубина вакуума.

Основным недостатком конвекционного, индукционного, терморadiационного, токового методов является длительное протекание процесса сушки вследствие чего возрастают энергозатраты, а, следовательно, и финансовые затраты. Использование электроосмотического метода нежелательно вследствие, во-первых, длительного протекания процесса сушки, а, во-вторых, отсутствии нагрева изделия перед пропиткой, как одного из условий интенсификации последней. При сушке после пропитки этот метод не может использоваться вообще. Недостатками вакуумного и скоростного электротермовакuumного метода является необходимость использования специального оборудования и значительные затраты на создание наиболее эффективных режимов сушки.

В настоящее время на ремонтных предприятиях, обслуживающих предприятия агропромышленного комплекса и промышленности, распространение получили технологии пропитки и сушки изоляции, обеспечивающие различные уровни ее качества. Одним из путей повышения эффективности использования существующих технологий ремонта изоляции АД является обоснование параметров технологического процесса ее пропитки и сушки на основе их оптимизации. Единственным, но существенным недостатком данного метода является его дороговизна, поэтому оптимизация данного метода по экономическим критериям является актуальной задачей.

В процессе проведения технологических операций ремонта электродвигателей изменяются некоторые величины, которые мы будем называть частными показателями качества. Каждый из частных показателей качества является характеристикой успешности выполняемых операций технологического процесса.

Основной интерес представляет технический аспект использования тех или иных показателей качества.

В настоящее время для диагностики изоляции электродвигателей распространение получили тестовые средства диагностики и контроля, работающие по принципу посы-

ки специального сигнала с последующей его обработкой, а также различные электрические приборы. К диагностирующим приборам, обеспечивающим минимальные затраты при осуществлении процесса оценки состояния изоляции, относятся ручные автоматические приборы и устройства периодического контроля.

К техническим средствам диагностики и контроля обмоток электродвигателей относятся электромеханические, цифровые и электронные омметры, измерительные мосты, специальные устройства для измерения добротности и емкости. Наибольшее распространение в последнее время получили аналоговые электромеханические и электронные цифровые приборы. Иногда для измерения емкости применяются измерительные мосты.

Все показатели качества можно разделить на электрические и неэлектрические величины. К электрическим величинам отнесем сопротивление витковое и корпусное, корпусная емкость и т.п. К неэлектрическим величинам отнесем глубину проникновения лака в обмотку, лакопоглощение, влагоудаление, коэффициент пропитки и т.п.

Результаты исследований, позволяют использовать для оценки каждого этапа технологического процесса следующие показатели. Качество выполнения обмоточно-изолирующих работ может быть оценено следующими величинами: сопротивлением изоляции относительно корпуса R_K и межвитковым сопротивлением $R_{\text{в}}$. Этапы сушки до пропитки и сушки после пропитки сходны по протекающим физическим процессам. Поэтому для них будут характерны одни и те же критерии качества: R_K , $R_{\text{в}}$, величина влагоудаления A_w , коэффициент пропитки K_n . Качество пропитки может быть оценено следующими частными показателями качества: глубиной проникновения лака h , лакопоглощением w , коэффициентом пропитки K_n .

Как статистика, так и теория информации имеет дело с разнообразием элементов некоторой совокупности, но их подход к задачам совершенно различен. Статистика рассматривает разнообразие как зло и 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 разнооб-

разия. Разнообразие свойственно каждому природному явлению [3].

На основе информационного анализа удастся получить следующие результаты:

- построить оптимальную «классификацию» явлений и параметров для данных исследований (величина шага ранга, количество рангов и т.д.);

- выявить область значений параметра, где явление устойчиво (инвариантно);

- определить меру зависимости явления от каждого состояния параметра, от параметра в целом и от совокупности состояний параметров;

- исключить параметры, связанные с явлением косвенно, в основном в результате взаимной связи с некоторым третьим явлением;

- на основании выявленных связей создается возможность для научной постановки опытов по изучению данного явления.

Информационный анализ является лишь первым шагом в обработке материала. Но установление формы логической зависимости явления от рассматриваемого набора параметров разрешается с применением функций многозначной логики [4].

Анализ существующих методов диагностики состояния изоляции обмоток АД позволил предложить для использования в роли обобщающего показателя качества изоляции обобщенный диагностический параметр (ОДП) Ψ . Эта величина может быть получена при использовании метода волновых затухающих колебаний в обмотке, разработанном в результате исследований по диагностике и прогнозированию состояния электродвигателей в процессе эксплуатации. Данный диагностический параметр наиболее полно характеризует протекающий в обмотке электродвигателя затухающий колебательный процесс при подаче на нее импульса прямоугольной формы. Эта характеристика может использоваться для оценки состояния изоляции на всех этапах технологического процесса ремонта, а также во время эксплуатации электродвигателя. Она является универсальной и заменяет группу частных показателей качества.

Диагностический параметр Ψ отражает интенсивность затухания волновых колебаний в обмотке электрической машины. Он является величиной косвенного измерения, то есть получается путем математической обработки результатов прямых измерений. Вышеуказанная диагностическая аппаратура измеряет такие величины как амплитуда пер-

вого полупериода, амплитуда второго полупериода, период колебаний T (мкс).

В результате логического анализа была получена следующая зависимость для ОДП

$$\Psi = K_{Г.В.} \vee (K_{TC} \vee K_{Tnp} \vee K_{tn}) \otimes K_{В.У.} \otimes K_{tc},$$

где K – эффективность канала связи: $K_{Г.В.} = 0,262$ – глубина вакуума; $K_{TC} = 0,171$ – время сушки; $K_{Tnp} = 0,167$ – время пропитки; $K_{tn} = 0,163$ – температура пропитки; $K_{В.У.} = 0,103$ – количество вакуумных ударов; $K_{tc} = 0,033$ – 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, а 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 из параметра в скобках на ОДП.

Метод сплошного перебора вариантов наиболее прост по реализации процедур сравнения. В случае решения задач с ограничениями он заключается в последовательном отборе вариантов, удовлетворяющих поставленным условиям. Первоначально рассчитываются значения срока службы и единого экономического критерия, которые характеризуют эффективность использования каждой технологии восстановления изоляции применительно к заданным условиям эксплуатации.

В случае выбора стратегии минимизации единого экономического критерия при ограничении срока службы и времени ремонта производится последовательный отбор вариантов по условиям ограничения времени ремонта и ограничения минимального срока службы. Из оставшихся выбирается вариант с минимальным значением единого экономического критерия.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

В случае выбора стратегии максимизации срока службы при ограничении значений единого экономического критерия и времени ремонта производится последовательный отбор вариантов по условиям ограничения единого экономического критерия и ограничения времени ремонта. Из оставшихся выбирается вариант с максимальным значением срока службы.

В случае выбора стратегии минимизации времени ремонта при ограничении срока службы и единого экономического критерия 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.

В итоге полученная модель позволяет определить количественную оценку влияния каждого из факторов на показатель качества ремонта, степень совместного влияния на выходной параметр. Также ИЛА позволил оценить неучтенные факторы, что сделало логическую зависимость еще более достоверной. Кроме того, были рассчитаны рациональные режимы скоростной вакуумной пропитки и сушки электродвигателей, исходя из

минимума затрат. Составлены таблицы выбора оптимальных режимов пропитки и сушки обмоток АД. Это позволяет говорить об оптимизации ремонта изоляции АД методом перебора данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гук, Ю. Б. Анализ надежности электро-энергетических установок [Текст] / Ю. Б. Гук. – Л.: Энерго-атомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 224 с.: ил.
2. Хомутов, С. О. Повышение эффективности восстановления и ремонта изоляции электродвигателей в агропромышленном комплексе : Дис. ... канд. техн. наук / Хомутов Станислав Олегович. – Барнаул, 1999.-260 с.
3. Пузаченко, Ю. Г. Возможности применения информационно - логического анализа при изучении почвы, на примере ее влажности [Текст] / 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.
4. Лбов, Г. С. Логические решающие функции и вопросы статистической устойчивости решения [Текст] / Г. С. Лбов. – М.: Наука, 1999. – 212 с.