

## УЧЁТ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПОТРЕБЛЯЕМОГО АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ТОКА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ

А.А. Грибанов, Т.Е. Бондаренко, В.И. Сташко

Асинхронный электропривод, получивший широкое распространение на различных промышленных и сельскохозяйственных предприятиях, в настоящее время мало изучен на предмет организации его оптимального взаимодействия с окружающими условиями, носящими зачастую самый разнообразный характер. Понять в каждом конкретном случае как внешние факторы влияют на асинхронный двигатель, количественно оценить это влияние, значило бы достаточно много. Удалось бы добиться значительного повышения срока службы среднестатистического двигателя, приблизить число часов наработки к номинальному расчетному и даже, не исключено, значительно превысить его. Это привело бы к снижению спроса на ремонтную услугу. Поскольку многие из внешних параметров (например, параметры микроклимата) заданы изначально и в процессе эксплуатации изменяются мало, «регулировать» срок службы электродвигателя можно лишь частично путем варьирования значений отдельных параметров. В этом случае знание зависимостей срока службы электродвигателя от ряда факторов, а также наличие математического описания этих зависимостей позволило бы с определённой точностью спрогнозировать приблизительное время отказа для каждого конкретного двигателя. Это немаловажно, поскольку на современных промышленных предприятиях парк электродвигателей значителен, а многие из них используются для привода ответственных механизмов. Оценка технического состояния абсолютно всех эксплуатируемых электродвигателей с помощью современных средств диагностики и с полным соблюдением установленных сроков её выполнения затруднительна.

При этом можно выявить следующее противоречие, на решение которого направлена данная работа: необходимость диагностики очевидна, но также очевидна невозможность тотальной диагностики. Можно выделить два пути разрешения данного проти-

воречия. Первый путь – техническое совершенствование средств диагностики: снижение стоимости процедуры диагностики, сокращение затрачиваемого времени, минимизация промежуточных сопровождающих процедуру диагностики работ, например, монтажно-коммутационных. Второй путь – организация подхода к выбору объектов диагностики на основе соответствующих научных знаний о процессах энтропии электрических машин. Решению противоречия именно по второму пути, то есть оптимизации применения средств диагностики асинхронных электродвигателей, посвящена данная работа.

Поскольку диагностические приборы можно разделить на две большие группы – стационарные и переносные, – то постановку вышеупомянутой задачи оптимизации применения диагностирующих средств можно конкретизировать следующими образом: определить какие приборы необходимы для данного предприятия – стационарные или переносные – и если необходимы и те, и другие, то в какой пропорции.

Так как предполагается создание математической модели, описывающей влияние на электродвигатель различных факторов окружающей среды и режимов его работы, то для практического применения данной модели необходимо иметь числовые значения входных параметров, получить которые можно лишь проведя определённый комплекс измерений. В этой связи напрашиваются следующие вопросы. Во-первых, не будут ли приборы, необходимые для измерений, дорогими? Во-вторых, не будет ли этот комплекс измерений по своей методике достаточно трудоёмким, то есть более трудоёмким, чем операция диагностики двигателя? В этом случае имеет ли смысл проводить какие-то измерения, потом, применяя созданную модель, провести расчёт и подводить итог, когда к такому же заключению можно прийти, непосредственно диагностируя двигатель? Поэтому методика оптимизации должна быть ориентирована не на один двигатель, а на их

группу. При этом результаты, полученные опытным путем для одного двигателя, можно обобщить для всей группы. То, что такой путь возможен, можно убедиться, если обратить внимание на следующий факт. Как правило, на промышленных предприятиях и в сельском хозяйстве двигатели, установленные в одном цехе или одном производственном помещении, находятся в равных условиях: одинаковые температура воздуха, влажность, наличие в воздухе пыли или взвешенных частиц, а также содержание агрессивных газов постоянно по всему объему рассматриваемого помещения [1-3]. Разрабатывая данную методику, необходимо задаваться такими исходными (измеряемыми) данными, для получения которых можно использовать недорогие измерительные приборы. Кроме того, они должны быть достаточно информативными, то есть иметь значительное число математических связей с другими параметрами (не измеряемыми), а также универсальными, то есть измеряемыми для любого двигателя независимо от его типоразмера и специфики исполнения. Например, любой режим работы асинхронного двигателя (АД) (длительный, кратковременный, повторно-кратковременный) можно количественно оценить, измерив зависимость тока от времени –  $I(t)$ . Приборы, участвующие в таком измерении (амперметры) недорогие и распространенные. По потребляемому току можно вычислить значения многих параметров, таких как потери мощности, развиваемая механическая мощность, координаты механической характеристики, скольжение по известным из теории электромеханики зависимостям. Далее можно прийти к оценке теплового режима работы.

Трудноизмеряемые, но интенсивно влияющие на срок службы электродвигателя параметры (например, вибрация) могут быть оценены на основании опытных замеров для типовых производственных механизмов по бальной системе [4]. Естественно, в таком случае необходимо иметь набор данных о типовых промышленных механизмах, приводимых во вращение АД. Такой набор должен быть достаточно полным, чтобы любой специфический механизм или установка на основе анализа его работы мог быть дифференцирован как относящийся к определенной типовой группе механизмов.

Специалистами в области электрического привода давно произведено выделение из всего многообразия приводимых во вращение электродвигателями механизмов некоторых общих черт, наиболее характерных для

большой области электроприводов. Например, в МЭИ была осуществлена методическая переработка курса «Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов», в результате которой были выделены типовые электроприводы общепромышленных механизмов, классифицированные по общим признакам режима работы, характеру нагрузок, способу управления и т.п. Это было сделано в семидесятые годы прошлого века [5]. На этой основе удалось развить общие вопросы электропривода и автоматизации общепромышленных механизмов, устранить повторения и свести рассмотрение частных схем к ограниченному числу отобранных примеров, широко иллюстрирующих как основные общие вопросы, так и влияние частных особенностей конкретных машин.

По характеру технологического процесса общепромышленные механизмы можно разделить на две большие группы: механизмы циклического (прерывного) действия, рабочий процесс которых состоит из повторяющихся однотипных циклов, и механизмы непрерывного действия, значения параметров технологического процесса которых мало изменяются во времени. Характер технологического процесса оказывает основное влияние на режимы работы электропривода и определяет главные требования, предъявляемые к нему в отношении мощности и перегрузочной способности, динамических качеств, необходимости и точности регулирования координат электромеханической системы, уровня автоматизации и т.п. На этой основе изучения электропривода и автоматизации общепромышленных механизмов удаётся систематизировать и обобщить, объединив различные по назначению конструкции, машины и установки в группы, однотипные по режимам работы, нагрузкам электропривода и по уровню автоматизации технологического процесса [5].

Из изложенного следует, что двигатели одной группы испытывают воздействие, в общем-то, одинаковых эксплуатационных факторов. Сроки службы двух абсолютно одинаковых двигателей (типоразмер, мощность, синхронная частота, год изготовления, завод-изготовитель одинаковы) должны быть при этом близкими по значению в этих условиях. Различие в сроках можно объяснить неизбежными технологическими погрешностями, допущенными при изготовлении этих двигателей. Абсолютная идентичность изготовления недостижима. Уровень неидентичности определяется в значительной мере

## УЧЁТ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПОТРЕБЛЯЕМОГО АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ТОКА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ

уровнем проведения контрольно-измерительных, испытательных и диагностических работ на предприятиях-изготовителях электротехнической продукции и, в частности, электродвигателей.

Рассмотрим влияние технологических механизмов на надёжность электродвигателей.

Общим для установок циклического действия является режим работы, при котором технологический процесс состоит из ряда повторяющихся однотипных циклов, каждый из которых представляет собой законченную операцию загрузки рабочего органа, перемещения его из исходной точки в пункт назначения и разгрузки.

Рассматривая влияние механизмов циклического действия на срок службы асинхронного двигателя следует отметить следующие моменты: режим работы электропривода таких механизмов – интенсивный повторно-кратковременный; неустановившиеся режимы работы – пуски, реверсы, торможения – занимают значительный процент времени от времени цикла.

Интенсивное механическое воздействие на обмотку статора оказывают знакопеременные моменты, возникающие в процессе пуска или реверса электрической машины и достигающие значительных кратностей по сравнению с номинальными моментами, как уже отмечалось выше. Если сюда добавить ещё и термическое действие пусковых токов, которые в несколько раз больше номинальных, то можно сказать, что частота пусков электрической машины оказывает определяющее воздействие на срок службы изоляции, поскольку механическая прочность межвитковой изоляции в значительной мере снижается с повышением температуры обмоток [6]. Здесь следует также заметить, что около 80% аварий АД связано с повреждением обмотки статора [6-8]. Эти данные совпадают с [9], где отказы по узлам АД распределяются следующим образом: обмотки – 50-85%; подшипники – 10-40%; прочие узлы и детали – 5-10%. Таким образом, надёжность электрической машины существенно зависит от надёжности её обмоток. Безотказность же обмоток определяется состоянием изоляции. Приведённые данные позволяют утверждать, что надёжность электрической машины есть вопрос надёжности изоляции её обмоток, и прогнозирование срока службы машины сводится к прогнозированию срока службы её изоляции.

Механизмы циклического действия являются группой механизмов, электропривод которых потенциально подвержен быстрому износу изоляции, учитывая все вышеперечисленное. Диагностика изоляции электродвигателей таких механизмов должна носить более полный характер по сравнению с другими видами механизмов. Если при этом учитывать также и производственную ответственность механизмов циклического действия, то в отдельных случаях необходимо применять стационарные автоматические диагностические устройства, которые дороже переносных устройств и применяются для отдельных индивидуальных двигателей [10]. Например, очень ответственный механизм – конвейер. С его остановкой (внеплановой, аварийной и т.п.) останавливается всё производство, поскольку весь технологический процесс представляет собой последовательную цепь операций, из которой нельзя устранить ни одну операцию без разрыва цепи. На практике данная ситуация обычно не носит такого глобального характера из-за наличия складского резерва полуфабрикатов, присутствия параллельно работающего конвейера и т.п., но всё равно последствия остановки конвейера носят ощутимый экономический ущерб. В данном случае имеет смысл увеличивать капитальные затраты на предупреждение неплановой остановки конвейера из-за отказа электродвигателя, то есть приобретать более дорогое, постоянно действующее диагностическое оборудование и установить его на двигатель конвейера, особенно если АД имеет большой габарит (то есть дорог) и конвейер имеет циклическое, прерывистое действие.

Непрерывный режим работы является наиболее благоприятным для электропривода. Обмотка электродвигателя в таком случае практически не подвергается действию пусковых моментов, отсутствует нагрев от пусковых токов. Разрушающие процессы в изоляции происходят медленнее, чем при частых пусках. В связи с этим, АД, работающие в непрерывном режиме (продолжительном – S1), следует реже диагностировать на износ изоляции, чем АД, работающие при частых пусках и реверсах. В данной группе общепромышленных механизмов возможна долгая работа электропривода без ремонта и замены. Несмотря на то, что двигатели в продолжительном режиме работают практически всё время их службы, их изоляция менее подвержена износу, чем изоляция АД,

работающих в повторно-кратковременном режиме (S3).

Многие горные, строительные, транспортные, сельскохозяйственные, землеройные и другие машины испытывают при работе воздействие различных случайных факторов, влияющих на нагрузку, скорость движения, производительность и надёжность механизмов.

Случайные факторы, действующие на рабочие органы машин, являются причиной того, что режим работы электропривода, которым оснащены перечисленные и подобные им механизмы, также является случайным. Момент нагрузки электродвигателей таких машин можно описать детерминированной функцией только с грубым приближением. То же можно сказать о токе нагрузки в силовых цепях. Случайным является характер изменения напряжения на выводах двигателей, особенно при питании от автономной системы. Очевидно, и мощность, и скорость двигателя в этих условиях являются случайными функциями. Нерегулярные изменения скорости и нагрузки приводят к тому, что и коэффициент мощности, и КПД таких машин изменяются случайным образом. Наконец, случайными величинами являются также продолжительность и частота включений подобных механизмов. Поэтому процесс нагружения электроприводов, о которых идёт речь, можно с полной уверенностью назвать случайным [11].

Срок службы изоляции АД, приводящих в движение механизмы, на режим работы которых существенное влияние оказывают случайные факторы – величина трудно прогнозируемая в данном случае. Износ изоляции электродвигателя одного производственного механизма за два одинаковых промежутка времени может быть различным. Применяя некоторый вероятностный критерий влияния случайных факторов на режим работы механизма и, следовательно, режим работы АД, можно с некоторым приближением установить степень интенсивности износа изоляции. Естественно, это может быть применено к конкретному механизму, и чем больше интервал времени, на котором установлен упомянутый выше критерий, тем выше точность. Для всей группы механизмов, подверженных влиянию случайных факторов, идти по этому пути не представляется возможным. Для этого необходима весьма большая по объёму статистическая работа: большое число источников статистической информации и достаточно долгий срок её сбора. Поэтому клас-

сификация данной группы производственных механизмов по степени износа изоляции их двигателей затруднена.

Тем не менее, предварительная оценка состояния изоляции обмоток двигателей может быть сделана на основе некоторых характерных для них свойств, используя которые можно описывать поведение АД в различных ненормальных режимах, имеющих место при значительном влиянии случайных факторов.

Увеличение нагрузки АД приводит к возрастанию потерь и, следовательно, возрастанию температуры обмоток. Механизмы, электроприводы которых часто претерпевают перегрузки, требуют большего внимания с точки зрения необходимости проведения диагностики их изоляции, чем те механизмы, которые не подвержены частым перегрузкам.

Наличие периодической нагрузки является фактором, снижающим срок службы изоляции электродвигателя. Диагностика АД, работающих с пульсацией нагрузки, должна быть более частой, чем двигателей, работающих с постоянной нагрузкой. Особенно это касается механизмов с малым моментом инерции. Для таких механизмов желательно применение двигателя с большим моментом инерции при неизменной мощности, то есть двигателя, имеющего при меньшей длине сердечника больший диаметр ротора, что характерно для многополюсных двигателей.

Малый момент инерции двигателя и приводимого им механизма обуславливает значительную величину пульсации угла, что приводит к значительным пульсациям питающего тока. Возникающее при этом возрастание потерь в меди обуславливает больший перегрев изоляции [12]. Поэтому вышеуказанные агрегаты должны быть изначально «подозрительны» для работников, занимающихся диагностикой состояния АД.

В связи с вышесказанным можно утверждать, что наиболее полно режим работы электродвигателя характеризуется током статора  $I_1$ . По этому параметру легко и удобно вычислить тепловую мощность основной «печи» АД – обмотки статора.

Остается урегулировать следующее противоречие: ток статора  $I_1$  – величина «мгновенная», то есть определяется на промежутке времени  $\Delta t$ , затраченном на измерение  $I_1$ , а срок службы изоляции обмотки статора детерминируется как длительный временной интервал, несопоставимый с  $\Delta t$ . Единственный раз измеренное значение тока

## УЧЁТ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПОТРЕБЛЯЕМОГО АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ТОКА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ

$I_1$  никаким образом не сможет объективно отразить величину ожидаемого срока службы изоляции. В идеале, конечно, можно было бы измерять ток на протяжении всего срока службы изоляции, но это уже был бы не прогноз, а опытное установление срока службы изоляции, потребовавшее бы для выполнения нескольких лет, что совершенно неприемлемо в плане временных затрат, а также затрат экономических (множество моделируемых ситуаций привлекло бы в эксперимент множество двигателей). К тому же целесообразность измерения тока и вообще всей разрабатываемой методики будет аннулирована этим, поскольку срок службы изоляции будет опытно установлен. Поэтому есть смысл проводить измерения и построить график изменения потребляемого двигателем тока на целесообразном промежутке времени, при котором можно в реальные обоснованные сроки получить результат, и его объективность будет достаточно высокой. В данной ситуации благоприятным обстоятельством является то, что обычно на промышленных предприятиях электродвигатели работают в течение смены, цикла, суток и т.д., то есть с периодической повторяемостью. Нет никаких оснований предполагать, что работа АД и его средняя нагрузка в течение одной смены будет отлична от его работы в течение последующей смены. Тогда можно получить график изменения тока в течение одной рабочей смены и на основании этого графика построить аппроксимированный график на любой значительный промежуток времени, например, год или даже на весь нормируемый срок службы двигателя, если предполагается, что в течение нормируемого срока службы двигатель не изменит режима работы.

Решение многих задач, связанных с тепловыми процессами, протекающими в исследуемом объекте, базируется на методе эквивалентных схем замещения [13]. В данном методе просматривается аналогия с законом Ома для электрической цепи. Электрическому сопротивлению эквивалентно тепловое сопротивление и это правомерно, поскольку физически роль сопротивления заключается в содержании величины протекающего процесса – потока или электрического тока.

Однако тепловой процесс подобен электрическому процессу лишь в статическом режиме, когда разность температур, которая эквивалентна разности потенциалов между двумя точками, неизменна и через теплоизоляцию, существующую между этими точками

и характеризуемую определенным тепловым сопротивлением, протекает неизменный по мощности тепловой поток. Изменение разности потенциалов, приложенной к резистору, мгновенно вызывает изменение проходящего через этот резистор тока. Тепловая схема подобным быстроедействием не отличается, и изменение разности температур не приводит к мгновенному изменению теплового потока. Данная инерция тепловой схемы в нестационарном режиме объясняется наличием теплоёмкости. Материалы помимо теплового сопротивления всегда имеют теплоёмкость, отличную от нуля. Поэтому для расчета изменяющихся тепловых режимов, имеющих место в электродвигателе при изменении его нагрузки, тепловые схемы не применяются. Однако и при переменных тепловых режимах физически тепловые сопротивления продолжают оказывать влияние на процессы теплообмена. При этом тепловые сопротивления не изменяют своих значений. Поэтому целесообразно сначала рассчитывать тепловые сопротивления в стационарном тепловом режиме, затем использовать полученные значения для расчетов нестационарных тепловых режимов методами, разработанными для расчетов нестационарных тепловых режимов. Задачей данного расчета является получение значения эквивалентного теплового сопротивления цепи «внутренний объем обмотки статора – внешняя окружающая среда». Это эквивалентное тепловое сопротивление будет использоваться в дальнейшем в методе расчета нестационарного теплового режима двигателя по классической теории нестационарного теплообмена. Параметр, обозначенный как  $A$ , в упомянутом методе является этим эквивалентным сопротивлением. Поэтому можно сказать, что задачей теплового расчета является нахождение величины параметра  $A$  для данного двигателя.

В первую очередь для этого необходимо определить величину превышения температуры обмотки статора над температурой окружающей среды. Она может быть найдена по выражению

$$\Delta v = \Delta v_1 + \Delta v_g, \quad (1)$$

где  $\Delta v_1$  – среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины, °С;

$\Delta v_g$  – превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины, °С.

Параметры  $\Delta v_1$  и  $\Delta v_g$  могут быть определены, соответственно, по выражениям

$$\Delta v_1 = \frac{2l_1(\Delta v_{нов1} + \Delta v_{изл1})}{l_{cp1}} + \frac{2l_{л1}(\Delta v_{изл1} + \Delta v_{нов1})}{l_{cp1}}, \quad (2)$$

$$\Delta v_в = \frac{\sum P'_в}{S_{кор} \alpha_в}, \quad (3)$$

где  $\Delta v_{нов1}$  - превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри машины, которое можно рассчитать как

$$\Delta v_{нов1} = K \frac{P_{э1} + P_{см}}{\pi D_{i1} l_1 \alpha_1}; \quad (4)$$

$\Delta v_{изл1}$  - перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора, определяемый по выражению

$$\Delta v_{изл1} = \frac{P_{э1}}{Z_1 \Pi_{n1} l_1} \left( \frac{b_{изл1}}{\lambda_{эке}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \lambda'_{эке}} \right); \quad (5)$$

$l_1$  - длина сердечника статора, м;

$\Delta v_{изл1}$  - перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей. Может быть найден по формуле

$$\Delta v_{изл1} = \frac{P_{э1}}{2Z_1 \Pi_{л1} l_{л1}} \left( \frac{b_{изл1}}{\lambda_{эке}} + \frac{h_{n1}}{12 \lambda'_{эке}} \right); \quad (6)$$

$\Delta v_{нов1}$  - превышение температуры наружной поверхности изоляции лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри машины. Определяется по формуле

$$\Delta v_{нов1} = K \frac{P_{э1}}{2\pi D_{i1} l_{вв1} \alpha_1}; \quad (7)$$

$l_{л1}$  - длина лобового участка витка, м;

$l_{cp1}$  - средняя длина витка, м;

$\sum P'_в$  - сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя, Вт;

$S_{кор}$  - эквивалентная поверхность охлаждения корпуса, м<sup>2</sup>. В общем случае определяется как

$$S_{кор} = \pi D_{a1} (l_1 + l_{вв1}), \quad (8)$$

а для электродвигателей со степенью защиты IP44 при расчёте учитывают поверхность рёбер станины:

$$S_{кор} = \pi (D_{a1} + 8 \Pi_p) (l_1 + l_{вв1}); \quad (9)$$

$\alpha_в$  - коэффициент подогрева воздуха, Вт/(м<sup>2</sup>·°C), учитывающий теплоотдающую способность поверхности корпуса и интенсивность перемешивания воздуха внутри машины;

$K$  - коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и пазовой части обмотки передаётся через станину непосредственно в окружающую среду;

$P_{э1}$  - потери в пазовой части, определяемые как

$$P_{э1} = P_{э1} \frac{2l_1}{l_в}; \quad (10)$$

$P_{см}$  - потери в стали. Их можно найти по выражению

$$P_{см} = 3I_\mu^2 R_1; \quad (11)$$

$D_{i1}$  - внутренний диаметр сердечника статора, м;

$\alpha_1$  - коэффициент теплоотдачи с поверхности в зависимости от исполнения машины, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);

$\Pi_{n1}$  - расчётный периметр сечения паза, мм;

$Z_1$  - число пазов статора;

$b_{изл1}$  - односторонняя толщина изоляции в пазу, м;

$b_1, b_2, h_{n1}$  - габаритные размеры паза трапецеидальной формы, м;

$\lambda_{эке}$  - средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции, Вт/(м·°C);

$\lambda'_{эке}$  - среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции катушки сыпной обмотки из эмалированных проводников с учётом неплотности прилегания проводников друг к другу;

$b_{изл1}$  - толщина изоляции между лобовыми частями и корпусом, м;

$l_{вв1}$  - вылет лобовых частей обмотки статора, м;

$D_{a1}$  - внешний диаметр сердечника статора, м;

$\Pi_p$  - условный периметр поперечного сечения рёбер корпуса двигателя, м;

$l_в$  - длина витка обмотки статора, м;

$P_{э1}$  - электрические потери в статоре, определяемые по выражению

$$P_{э1} = 3I_\mu^2 R'_1; \quad (12)$$

$I_\mu$  - намагничивающий ток, который можно рассчитать по формуле

$$I_\mu = \frac{U_\phi}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_\mu)^2}}; \quad (13)$$

УЧЁТ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПОТРЕБЛЯЕМОГО АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ТОКА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ

$R_1, X_1$  - дополнительные активное и реактивное сопротивление, определяемые, соответственно, по выражениям

$$R_1 = \frac{R'_1 X'_1}{X_\mu}; \quad (14)$$

$$X_1 = \frac{2X'_1 X_\mu}{X_\mu + \sqrt{X_\mu^2 + 4X'_1 X_\mu}}; \quad (15)$$

$R'_1, X'_1, X_\mu$  - соответственно, активное сопротивление обмотки, индуктивное сопротивление рассеяния обмотки и главное индуктивное сопротивление;

$I_2$  - ток в обмотке ротора, определяемый по выражению

$$I_2 = I_1 - I_\mu; \quad (16)$$

$U_\phi$  - фазное напряжение электродвигателя, В;

$I_1$  - ток статора, А.

Рассчитанное по выражению (1) превышение температуры окружающей среды  $\Delta v$  позволяет определить параметр А, который физически представляет собой поток тепла, идущий от двигателя в окружающую среду при разности температуры двигателя и окружающей среды  $1^\circ\text{C}$ . Следовательно, данный параметр находится как

$$A = \frac{P}{\Delta v}, \quad (17)$$

где  $P$  - мощность потерь, Вт, определяемая по выражению

$$P = 3(I_\mu^2 R_1 + I_2^2 R'_1 + I_2^2 R'_2); \quad (18)$$

$R'_2$  - приведённое к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора.

Постоянная времени нагрева электродвигателя определяется как [14]

$$T_n = \frac{A}{C}, \quad (19)$$

где  $C$  - теплоемкость двигателя, Дж/ $^\circ\text{C}$ .

Разность температур двигателя и окружающей среды называется перегревом [14]:

$$\tau = v - v_x, \quad (20)$$

где  $v$  - температура двигателя,  $^\circ\text{C}$ ;

$v_x$  - температура окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ .

При достижении перегревом установившегося значения, когда температура нагревателя больше не возрастает и приближается на графике к горизонтальной прямой, имеет место установившийся (максимальный) перегрев [14]:

$$\tau_{ycm} = \frac{P}{A}. \quad (21)$$

Зависимость перегрева двигателя от времени определяется формулой [14]

$$\tau = (\tau_{нач} - \tau_{ycm}) \frac{e}{T_n} + \tau_{ycm}, \quad (22)$$

где  $\tau_{нач}$  - начальное значение перегрева,  $^\circ\text{C}$ .

При холодном электродвигателе  $\tau_{нач} = \tau_{о.с.}$

Входящее в формулу (22)  $\tau_{ycm}$  зависит от потерь в двигателе  $P$  (21), которые в свою очередь зависят от тока двигателя (18).

Следовательно  $\tau_{ycm}$  зависит от  $I_1$ :

$$\tau_{ycm} = f(I_1). \quad (23)$$

Перегрев  $\tau$ , согласно формуле (22), зависит от  $\tau_{ycm}$ :

$$\tau = f(\tau_{ycm}). \quad (24)$$

Выстраивая окончательно цепь зависимостей получаем:

$$\tau = f(I_1). \quad (25)$$

Формула (25) показывает, что перегрев (температура двигателя) зависит от тока двигателя. Это означает, что при наличии зависимости тока двигателя от времени  $I_1 = f(t)$  можно аналитическим путем получить зависимость перегрева двигателя от времени:  $\tau = f(t)$ . При переходе от перегрева двигателя  $\tau$  к температуре двигателя (температуре обмотки статора, поскольку отсчет теплового сопротивления вёлся от неё) получим зависимость температуры статора от времени  $v = f(t)$ .

На участке времени  $\Delta t = t_1 - t_0$ , на котором производится регистрация временной зависимости тока двигателя  $I_1 = f(t)$ , средняя температура обмотки статора определяется как

$$v_{cp} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} v(t) dt}{t_1 - t_0}. \quad (26)$$

В начале прошлого века эмпирически было установлено следующее правило, называемое правилом Монтзингера. Это правило гласит, что срок службы изоляции двигателя изменяется в два раза от расчетного срока службы при повышении её температуры на определённое число градусов Цельсия. Для изоляции класса А это будет  $8^\circ\text{C}$ , для изоляции класса В -  $12^\circ\text{C}$ , для изоляции класса F -  $15^\circ\text{C}$  [12].

Математически эта зависимость выражается в виде формулы

$$T = T_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\kappa(v-v_0)} \quad (27)$$

где  $T_0$  – расчётный срок службы изоляции электродвигателей, ч. Для двигателей серии 4А этот срок равен 20000 ч.

$\kappa$  – коэффициент пропорциональности;

$v_1$  – температура изоляции при которой двигатель работает в данный момент, °С;

$v_0$  – номинальная температура работы изоляции двигателя, °С.

Для двигателей серии 4А номинальная температура работы изоляции составляет: 75°С – для класса изоляции В и 105°С – для класса изоляции F [12].

Применим рассчитанную ранее по формуле (26) осредненную по времени температуру  $v_{cp}$  к определению расчетного срока службы изоляции по правилу Монтзингера. В этом случае формула (27) переписывается в виде:

$$T = T_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\kappa(v_{cp}-v_0)} \quad (28)$$

Данная формула позволяет рассчитать срок службы изоляции конкретного электродвигателя, если составлен график изменения тока.

Срок службы изоляции является одним из показателей, которые могут быть использованы в качестве критериев эффективности при оптимизации.

В данной работе целью оптимизации является повышение эффективности диагностики изоляции. При этом параметр оптимизации должен максимально характеризовать взаимосвязь между параметрами процесса диагностики и надёжности электроизоляционной системы.

При организации диагностики изоляции предполагается использование как стационарных, так и переносных приборов. Стационарные устройства более сложны по конструкции и более дороги, чем переносные, но при этом позволяют проводить автоматическую диагностику состояния изоляции двигателя, повышая тем самым вероятность безотказной работы.

Таким образом, в качестве параметра оптимизации будем использовать величину, количественно оценивающую предпочтительность стационарных или переносных приборов с целью достижения максимального экономического эффекта.

Примем:  $C_{дп}$  – стоимость переносного диагностического прибора;  $C_{дс}$  – стоимость стационарного диагностического прибора. Тогда критическое условие, когда равноправны оба варианта, запишется следующим образом:

$$C_{дс} - C_{дп} = \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{Y}{p_n} \quad (29)$$

где  $p_1$  – вероятность безотказной работы электродвигателя за рассматриваемый интервал времени при диагностике этого двигателя переносными приборами;

$p_2$  – вероятность безотказной работы электродвигателя за рассматриваемый интервал времени при диагностике этого двигателя стационарными устройствами;

$Y$  – ущерб от выхода из строя рассматриваемого электродвигателя, руб.;

$p_n$  – вероятность безотказной работы электродвигателя в зависимости от его нагрузки. Определяется как:

$$p_n = \frac{T_{расч} - T_{факт}}{T_{норм} - T_{факт}} \quad (30)$$

где  $T_{расч}$  – расчётный срок службы электродвигателя, определяемый по выражению (28);

$T_{факт}$  – фактический срок службы электродвигателя;

$T_{норм}$  – нормированный заводом-изготовителем срок службы двигателя.

Исследования ряда авторов [15] говорят о том, что предусмотренные системой планово-предупредительных ремонтов и технического обслуживания мероприятия повышения надёжности изоляции электродвигателей в установленные сроки часто не проводятся. В связи с этим в формулу (29) следует ввести коэффициент нерегулярности, понижающий вероятность  $p_1$ :

$$K_{нер} = \frac{K_{факт}}{K_{норм}} \quad (31)$$

где  $K_{факт}$  – фактическое число диагностик двигателя;

$K_{норм}$  – нормированное число диагностик двигателя.

Выражение (29) с учётом введённого коэффициента примет следующий вид:

$$C_{дс} - C_{дп} = K_{нер} \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{Y}{p_n} \quad (32)$$

Выразив из формулы (32)  $p_n$  получим:

$$p_n = \frac{K_{нер} \cdot p_1 \cdot Y}{p_2 (C_{дс} - C_{дп})} \quad (33)$$



## УЧЁТ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПОТРЕБЛЯЕМОГО АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ТОКА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ ИЗОЛЯЦИИ

Проведённый комплекс исследований позволил получить критерии, по которым можно судить о целесообразности использования технических средств, относящихся к одной из выделенных групп. Полученные результаты показывают, что при

$$p_n > \frac{K_{нер} \cdot p_1 \cdot \mathcal{U}}{p_2(C_{дс} - C_{дн})} \quad (34)$$

следует применять переносные приборы диагностики, при

$$p_n < \frac{K_{нер} \cdot p_1 \cdot \mathcal{U}}{p_2(C_{дс} - C_{дн})} \quad (35)$$

следует использовать стационарные устройства диагностики и контроля.

Величина

$$\frac{K_{нер} \cdot p_1 \cdot \mathcal{U}}{p_2(C_{дс} - C_{дн})} \approx 0,9. \quad (36)$$

Приблизительное равенство в последнем выражении стоит из-за некоторой неопределённости параметров  $K_{нер}$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ . Уточнение значений этих параметров является предметом отдельного исследования.

Организация диагностики с использованием полученных критериев позволит своевременно получать информацию о возможности отказа и принять меры для безаварийного вывода электродвигателя из эксплуатации для выполнения восстановительных работ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудкин А.Ф. Микроклимат свиноводческих помещений и пути его улучшения. – Благовещенск: Благовещ. СХИ, 1973. – 28 с.
2. Мотес Э. Микроклимат животноводческих помещений. – М.: Колос, 1976. – 17 с.
3. Селянский В.М. Микроклимат в птичниках. – М.: Колос, 1975.
4. Гутов И.А. Прогнозирование состояния электродвигателей на основе использования многофакторных моделей старения изоляции: Дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. – Барнаул, 1997. – 259 с.: ил.
5. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.: ил.
6. Яманов С.А., Яманова Л.В. Старение, стойкость и надёжность электрической изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
7. Хомутов С.О. Повышение эффективности восстановления и ремонта изоляции электродвигателей в агропромышленном комплексе: Дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 1999.
8. Грибанов А.А. Обоснование параметров технологических процессов пропитки и сушки изоляции асинхронных электродвигателей, используемых в агропромышленном комплексе: Дис. ... канд. техн. наук; Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2001. – 168 с.
9. Белоусова Н.В., Калявин В.П., Мозгалевский А.В. Опыт применения тестового диагностирования обмоток электрических машин. – Л.: ЛДНТП, 1989. – 24 с.: ил.
10. Гольдберг О.Д. и др. Автоматизация контроля параметров и диагностики асинхронных двигателей/ О.Д. Гольдберг, И.М. Абдуллаев, А.Н. Абиев; Под ред. О.Д. Гольдберга. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.: ил.
11. Гайдукевич В.И., Титов В.С. Случайные нагрузки силовых электроприводов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 160 с.: ил.
12. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов/ И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 757 с.: ил.
13. Филиппов И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. – Л.: Энергия, 1974. – 383 с., ил.
14. Москаленко В.В. Электрический привод: Учеб. для электротехн. спец. техн. – М.: Высшая школа, 1991. – 430 с.: ил.
15. Хомутов О.И. Система технических средств и мероприятий повышения эксплуатационной надёжности изоляции электродвигателей, используемых в сельскохозяйственном производстве: Дис. ... док. техн. наук. – Челябинск, 1990. – 450 с.