

ПАРАМЕТРЫ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РАБОТЫ

О.И. Хомутов, С.О. Хомутов, В.И. Сташко, А.А. Грибанов

Совершенствование методов проектирования электрических машин для привода технологических механизмов с заданным режимом работы является одним из важнейших направлений развития электромеханики. Тепловой расчёт, как способ проверки корректности проекта, позволяет оптимизировать ряд параметров, характеризующих конструкцию, и определить рабочую температуру обмотки, изоляция которой наиболее подвержена разрушению из-за перегрева.

Во время эксплуатации нередко имеет место отклонение значений рабочих параметров от регламентируемых. Вследствие этого и наблюдается повышенный износ изоляции электрических машин, и срок их службы сокращается. Всё вышесказанное имеет непосредственное отношение к асинхронным электродвигателям (АД), являющимся основным средством преобразования электрической энергии в механическую.

Специалистами в области электрического привода давно проведён анализ, позволивший выделить из всего многообразия приводимых во вращение электродвигателями механизмов некоторые общие черты, наиболее характерные для большой области электроприводов. Например, в МЭИ была осуществлена методическая переработка курса «Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов», в результате которой 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 [1]. 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 [1].

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 значительную часть 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. Если к этому 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 [2]. Здесь следует также заметить, что около 80% аварий АД связано с повреждением обмотки статора [2-4]. Эти данные совпадают с [5], 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.

Непрерывный режим работы является наиболее благоприятным для электропривода. Обмотка электродвигателя в таком случае практически не подвергается действию пусковых моментов, отсутствуют нагрев от пусковых токов. Разрушающие процессы в изоляции происходят медленнее, чем при частых пусках. 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 коэф-

фициент мощности, и КПД таких машин изменяются случайно. 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 [6].

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, использование данного критерия не представляется возможным. Для этого необходима весьма большая по объёму статистическая работа: большое число источников статистической информации и достаточно долгий срок её сбора. Поэтому классификация 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. 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 [7].

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.

ПАРАМЕТРЫ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РАБОТЫ

Остается урегулировать следующее противоречие: ток статора I_1 – величина «мгновенная», то есть определяется на промежутке времени Δt , затраченном на измерение I_1 , а срок службы изоляции обмотки статора определяется как длительный временной интервал, несопоставимый с Δt . Единственный раз измеренное значение тока I_1 никоим 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 [8]. 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 характеризующую 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 Δv_1 - среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины, °С;

Δv_6 - превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины, °С.

Параметры Δv_1 и Δv_6 могут быть определены, соответственно, по выражениям

$$\Delta v_1 = \frac{2l_1(\Delta v_{нов1} + \Delta v_{изП1})}{l_{cp1}} + \frac{2l_{л1}(\Delta v_{изл1} + \Delta v_{новл1})}{l_{cp1}}, \quad (2)$$

$$\Delta v_6 = \frac{\sum P'_6}{S_{кор} \alpha_6}, \quad (3)$$

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

$$\Delta v_{нов1} = K \frac{P_{эн1} + P_{cm}}{\pi D_{i1} l_1 \alpha_1}; \quad (4)$$

$\Delta v_{изП1}$ - перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора, определяемый по выражению

$$\Delta v_{изП1} = \frac{P_{эн1}}{Z_1 \Pi_{n1} l_1} \left(\frac{b_{изл1}}{\lambda_{эКВ}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \lambda'_{эКВ}} \right); \quad (5)$$

l_1 - длина сердечника статора, м;

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

$$\Delta v_{изл1} = \frac{P_{эн1}}{2Z_1 \Pi_{л1} l_{л1}} \left(\frac{b_{изл1}}{\lambda_{эКВ}} + \frac{h_{n1}}{12 \lambda'_{эКВ}} \right); \quad (6)$$

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

$$\Delta v_{нов1} = K \frac{P_{эн1}}{2\pi D_{i1} l_{выл1} \alpha_1}; \quad (7)$$

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

l_{cp1} - средняя длина витка, м;

$\sum P'_6$ - сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя, Вт;

$S_{кор}$ - эквивалентная поверхность охлаждения корпуса, м². В общем случае определяется как

$$S_{кор} = \pi D_{a1} (l_1 + l_{выл1}), \quad (8)$$

а для электродвигателей со степенью

защиты IP44 при расчёте учитывают поверхность рёбер станины:

$$S_{кор} = \pi (D_{a1} + 8\Pi_p) (l_1 + l_{выл1}); \quad (9)$$

α_6 - коэффициент подогрева воздуха, Вт/(м²·°С), 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;

$P_{эн1}$ - потери в пазовой части, определяемые как

$$P_{эн1} = P_{э1} \frac{2l_1}{l_6}; \quad (10)$$

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

$$P_{cm} = 3I_\mu^2 R_1; \quad (11)$$

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

α_1 - коэффициент теплоотдачи с поверхности в зависимости от исполнения машины, Вт/(м²·°С);

Π_{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;

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

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

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

$l_{выл1}$ - вылет лобовых частей обмотки статора, м;

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

Π_p - условный периметр поперечного сечения рёбер корпуса двигателя, м;

l_6 - длина витка обмотки статора, м;

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

$$P_{э1} = 3I_2^2 R_1'; \quad (12)$$

ПАРАМЕТРЫ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РАБОТЫ

I_μ - намагничивающий ток, который можно рассчитать по формуле

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

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_μ - 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_ϕ - фазное напряжение электродвигателя, В;

I_1 - ток статора, А.

Рассчитанное по выражению (1) превышение температуры окружающей среды Δv позволяет определить параметр A , который физически представляет собой поток тепла, идущий от двигателя в окружающую среду при разности температуры двигателя и окружающей среды 1°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 [9]

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

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

Разность температур двигателя и окружающей среды называется перегревом [9]:

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

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 [9]:

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

Зависимость перегрева двигателя от времени определяется формулой [9]

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

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

При холодном электродвигателе $\tau_{нач} = \tau_{o.c.}$

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

Следовательно τ_{ycm} зависит от I_1 :

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

Перегрев τ , согласно формуле (22), зависит от τ_{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 τ 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 прави-

ло 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 8⁰С, для изоляции класса В – 12⁰С, для изоляции класса F – 15⁰С [7].

Математически эта зависимость выражается в виде формулы

$$T = T_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\kappa(\nu - \nu_0)} \quad (27)$$

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

κ – коэффициент пропорциональности;

ν_1 - температура изоляции при которой двигатель работает в данный момент, ⁰С;

ν_0 - номинальная температура работы изоляции двигателя, ⁰С.

Для двигателей серии 4А номинальная температура работы изоляции составляет: 75⁰С – для класса изоляции В и 105⁰С – для класса изоляции F [7].

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

$$T = T_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\kappa(\nu_{ср} - \nu_0)} \quad (28)$$

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

Вероятность безотказной работы электродвигателя в зависимости от его нагрузки определяется как:

$$P_n = \frac{T_{расч} - T_{факт}}{T_{норм} - T_{факт}}, \quad (29)$$

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.

Использование выражений (27) – (29) позволяет на основе данных о возможных перегревах электродвигателя оценить остаточный срок службы его обмотки и вероятность безотказной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. – М.: Энергия, 1980.-360 с., ил.
2. Яманов С.А., Яманова Л.В. Старение, стойкость и надёжность электрической изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
3. Хомутов С.О. Повышение эффективности восстановления и ремонта изоляции электродвигателей в агропромышленном комплексе: Дис ... канд. техн. наук. – Барнаул, 1999.
4. Грибанов А.А. Обоснование параметров технологических процессов пропитки и сушки изоляции асинхронных электродвигателей, используемых в агропромышленном комплексе: Дисс. ... канд. техн. наук; Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2001. – 168 с.
5. Белоусова Н.В., Калявин В.П., Мозгалевский А.В. Опыт применения тестового диагностирования обмоток электрических машин. – Л.: ЛДНТП, 1989. – 24 с., ил.
6. Гайдукевич В.И. Титов В.С. Случайные нагрузки силовых электроприводов.- М.: Энергоатомиздат, 1983. - 160 с., ил.
7. 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.
8. Филипов И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. - Л.: «Энергия», 1974. - 383 с., ил.
9. Москаленко В.В. Электрический привод: Учеб. для электротехн. спец. техн. – М.: Высшая школа, 1991. – 430 с., ил.