

УДК 621.313.333

**М.М. ФЕДОРОВ** (д-р техн.наук, проф.), **М.В. СПИРИДОНОВА**

Донецкий национальный технический университет

**Е.А. ВАРЕНИК**

УкрНИИВЭ

fedorov@skif.

## **ДИНАМИКА ТЕПЛОВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ**

Methods to analyze and calculate the heat state of the constructive elements of the induction motors are proposed in present paper, motors working in various modes.

Постановка задачи. Тепловое состояние электрических машин является важнейшим фактором, определяющим сроки службы изоляционных материалов их обмоток, а, следовательно, и надёжную эксплуатацию. Величины допустимых температур изоляции обмоток используются в качестве критериев при выборе мощности электродвигателей, защиты от тепловых перегрузок и др. Оценка допустимых тепловых нагрузок обмоток электрических машин осуществляется в основном косвенными методами по величине мощности источника тепла (потерь в элементах конструкции машин) [1]. Однако, подобный подход зачастую не даёт удовлетворительных результатов и возникает необходимость использования температур обмоток электрических машин, работающих в различных режимах работы. В общем случае динамика теплового состояния электрических машин определяется внутренними и внешними факторами. К внутренним факторам, прежде всего, необходимо отнести тип электрической машины, её систему охлаждения и т.д. Внешние факторы – это характер нагрузок, состояние окружающей среды и пр.

В данной работе предлагаются методы анализа и расчёта теплового состояния элементов конструкции асинхронных двигателей (АД), работающих в различных режимах.

Стандартной классификацией по ГОСТ 183-74 предусмотрено восемь номинальных режимов работы электрических машин. Продолжительный режим S1 характеризуется следующими процессами. В исходном состоянии электрическая машина неподвижна. Ток и напряжение в обмотках равны нулю. Температура  $\tau_i$  узлов тепловой схемы машины равна температуре окружающей среды  $\tau_0$ . В момент времени  $t_0$  происходит включение электрической машины. Её работа характеризуется постоянством нагрузки при неизменной частоте вращения, что означает постоянство тока и напряжения в обмотках, а, следовательно, всех видов потерь  $P_i$  и суммарных потерь  $P$  при неизменных условиях охлаждения. Температура узлов электрической машины возрастает. Часть тепловой энергии, выделяющейся в активных частях машины, накапливается в элементах её конструкции, другая часть отводится в окружающую среду. Через определённое время, называемое временем теплового переходного процесса  $t_{пт}$ , процесс накопления тепловой энергии в узлах электрической машины заканчивается. Тепловое состояние машины характеризуется неизменными во времени температурой  $\tau_{i\text{уст}}$  любых её точек и тепловыми потоками. Количество тепла, выделенное в активных частях машины, равно количеству тепла, отводимого в окружающую среду.

Значения установившейся температуры определяются коэффициентом нагрузки  $\beta$  электрической машины. Наиболее чувствительными к температуре являются элементы конструкции обмоток. В номинальном режиме при  $\beta_{ном}$  температура  $\tau_{уст}$  наиболее нагретого элемента конструкции обмоток не должна превышать допустимую  $\tau_{доп}$  для соответствующего класса нагревостойкости изоляции обмоток. Обычно у асинхронных двигателей (АД) в режиме S1 наибольшая установившаяся температура имеет место в лобовых частях обмотки статора.

После отключения машины имеет процесс остывания, при котором тепловая энергия, запасенная в узлах, отводится в окружающую среду. Особенности кривых охлаждения определяются значениями установившейся температуры и её градиентами, а также режимом работы системы охлаждения (например, в АД с самовентиляцией в отключённом состоянии отсутствует обдув элементов конструкции).

Кратковременный режим S2 означает работу электрической машины с неизменной номинальной нагрузкой длительностью 10,30, 60 или 90 минут (если в стандартах или технических условиях не установлена иная). Далее следует продолжительная пауза, за которую температура активных частей должна снизиться практически до первоначального уровня  $\tau_0$ . В этом режиме температура в элементах конструкции машин постоянно изменяется во времени. Имеет место два переходных процесса: нагрев (под нагрузкой) и остывание (при неподвижной электрической машине).

В процессе нагрева при S2, также как и при S1, значения напряжения и тока в обмотках неизменны и интенсивность источников тепловой энергии постоянна. Количество теплоты, выделенной в активных частях машины, равно сумме отводимой и аккумулированной тепловой энергии в элементах конструкции. При этом максимальная температура  $\tau_{imax}$  обмоток не должна превышать максимально допустимую для соответствующего класса нагревостойкости изоляции. Из этого следует, что при меньшей длительности включения  $t_p$  нагрузка электрической машины может быть выше, а тепловой переходный процесс протекает более интенсивно и имеют место более высокие градиенты температуры.

Количество аккумулированной в элементах конструкции электрической машины тепловой энергии определяется их температурой  $\tau_i$ , теплоёмкостью  $C_i$ , и будет изменяться в зависимости от интенсивности тепловых процессов при нагреве. Если предположить, что независимо от длительности включения максимальная температура наиболее нагретого элемента конструкции  $\tau_{max}$  одинакова, то это означает равенство запасённой тепловой энергии в данном узле. Однако вследствие различия перепада температуры между отдельными частями машины в зависимости от активности тепловых процессов, в остальных частях электрической машины количество аккумулированной тепловой энергии будет меньше при большей интенсивности тепловых переходных процессов.

При остывании тепловая энергия, запасённая в элементах конструкции электрической машины, отводится в окружающую среду. Интенсивность процессов охлаждения, при прочих равных условиях, будет большей при более высоких градиентах температуры. Другими словами, более интенсивному процессу нагрева соответствует более интенсивный процесс охлаждения.

Режимы работы от S3 до S5 характеризуются многократным периодическим повторением нагрузок. При этом в электрической машине имеет место квазиустановившееся состояние, когда в течение цикла  $t_u$  температура произвольно выбранной точки изменяется по определённому закону  $\tau_i(t_i)$  периодически повторяющимся в последующих циклах. Количественными характеристиками такого состояния являются: максимальная  $\tau_{max}$ , минимальная  $\tau_{min}$  и средняя  $\tau_{cp}$  температура в цикле, а также наибольшая скорость изменения температуры при нагреве и охлаждении, частота повторения циклов и т.п. Интерес представляет температурное состояние элементов конструкции обмоток. В номинальном режиме максимальная температура  $\tau_{max}$  наиболее нагретого узла обмоток не должна превышать допустимую  $\tau_{дон}$  для соответствующего класса нагревостойкости изоляционных материалов обмоток [2].

Характер тепловых процессов цикла определяется разновидностями режимов работы. В повторно-кратковременном режиме S3 имеет место два типа переходных процессов: нагрев при практически постоянных частоте вращения, токе и напряжении обмоток и охлаждение при неподвижном роторе. В квазиустановившемся состоянии при нагреве происходит возрастание температур  $\tau_{iIII}(t)$  узлов электрической машины от минимальной  $\tau_{imin}$  до максимальной  $\tau_{imax}$ . При этом часть тепловой энергии, выделяемой в активных частях машины, идёт на увеличение аккумулированной тепловой энергии, а другая отводится в окружающую среду. При охлаждении в интервале  $t_p \dots t_u$  температура узлов  $\tau_{i\alpha\alpha}(t)$  уменьшается от  $\tau_{imax}$  до  $\tau_{imin}$ , а запасённая тепловая энергия отводится в окружающую среду.

Стандартом ГОСТ 183-74 предусмотрены разновидности повторно-кратковременных режимов, в которых тепловые процессы имеют свои особенности. В режиме работы с частыми пусками S4 добавляется участок с повышенными потерями при пуске  $p_{nc}$  в начале цикла, который характеризуется более интенсивной скоростью нарастания температуры. В режиме с электрическим торможением S5 добавляется ещё один участок с повышенными потерями при торможении  $p_{mp}$ .

Принимая во внимание, что режимы S4 и S5 характеризуются большей частотой включения, чем режим S3, а в режиме пуска и торможения значения  $t_{nc}$  и  $t_{mp}$  зачастую соизмеримы со временем рабочего участка, то возможен случай уменьшения температуры узлов машины (или части узлов) на рабочем участке. Кроме того, принимая во внимание, что теплоотвод от элементов конструкции ротора в период пауз затруднён, возможно перераспределение температуры. Так в АД, работающих в повторно-кратковременных режимах, наиболее нагретыми частями могут быть не лобовые части обмотки статора, а элементы конструкции обмотки ротора.

В перемежающихся режимах потери ни в какой момент времени не принимают нулевого значения. Условия теплообмена одинаковы в течение всего цикла и для машин с самовентиляцией, имеющих постоянную частоту вращения. В режиме S6 на участке с пониженной нагрузкой происходит процесс уменьшения температуры, а при повышенной нагрузке температура возрастает. Скорость изменения температуры меньше, чем в режиме S3.

Участки с повышенной скоростью изменения температуры имеют место в перемежающемся режиме работы с частыми пусками и реверсами S7, при котором наблюдаются повышенные потери при пуске и реверсе.

В режиме S8 предусматривается работа электрической машины с различной частотой вращения. Он может состоять из непрерывно чередующихся циклов, каждый из которых имеет несколько рабочих периодов с различной нагрузкой и частотой вращения, при которых возможны изменения режима работы системы охлаждения.

В общем случае цикл повторно-кратковременных режимов может быть более сложным, иметь несколько пусков, пауз, рабочих участков с разными уровнями нагрузки и частоты вращения и т.д. Однако физика этих тепловых процессов будет соответствовать ранее рассмотренным стандартным режимам.

Оценка динамики теплового состояния электрической машины может осуществляться различными методами. Распространение получили методы с использованием эквивалентных тепловых схем (ЭТС), основанные на контроле средней температуры отдельных элементов конструкции машины. ЭТС представляет собой схему, состоящую из узлов и ветвей с тепловыми сопротивлениями. Узлы представляют собой элементы конструкции машины (тела), в которых формируется средняя температура; они связаны между собой ветвями, имитирующими реальные пути передачи тепловых потоков. При наличии в элементах конструкции потерь к соответствующему узлу подключается ветвь с источником теплоты. К узлам подключаются ветви с теплоёмкостью  $C_i$ , позволяющие учитывать процессы аккумуляции тепловой энергии в соответствующих элементах.

Методология составления ЭТС и её расчёт для различных типов машин в основном одинакова. Геометрия ЭТС определяется системой теплоотвода, а её пассивные параметры (тепловые проводимости и теплоёмкости) - особенностями элементов конструкции, их геометрическими размерами, используемыми материалами и т.п. На рисунке 1 в качестве примера приведена ЭТС двигателя с фазным ротором типа МТН-312-6, состоящая из следующих восьми тел: 1 – пазовая часть обмотки статора; 2 – пазовая часть обмотки ротора; 3 – сердечник статора; 4 – сердечник ротора; 5 – лобовая часть обмотки статора; 6 – лобовая часть обмотки ротора; 7 – внутренний воздух; 8 – станина.

Между ЭТС и разветвлёнными электрическими цепями имеет место формальная аналогия, что позволяет применить для расчета тепловых переходных процессов хорошо разработанные методы расчёта электрических цепей. Система дифференциальных уравнений, описывающих динамику теплового состояния, может быть составлена с помощью метода узловых потенциалов (температур), основанного на использовании законов Ома и первого закона Кирхгофа. Для первого узла ЭТС дифференциальное уравнение имеет вид [3]:

$$C_1 \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta_1 \cdot \lambda_{11} - \theta_3 \cdot \lambda_{13} - \theta_5 \cdot \lambda_{15} = P_{10} \cdot \beta_i^2 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_1),$$

где  $\theta_i$  – превышение температуры над окружающей средой в первом узле;

$C_i$  – теплоёмкость первого узла;

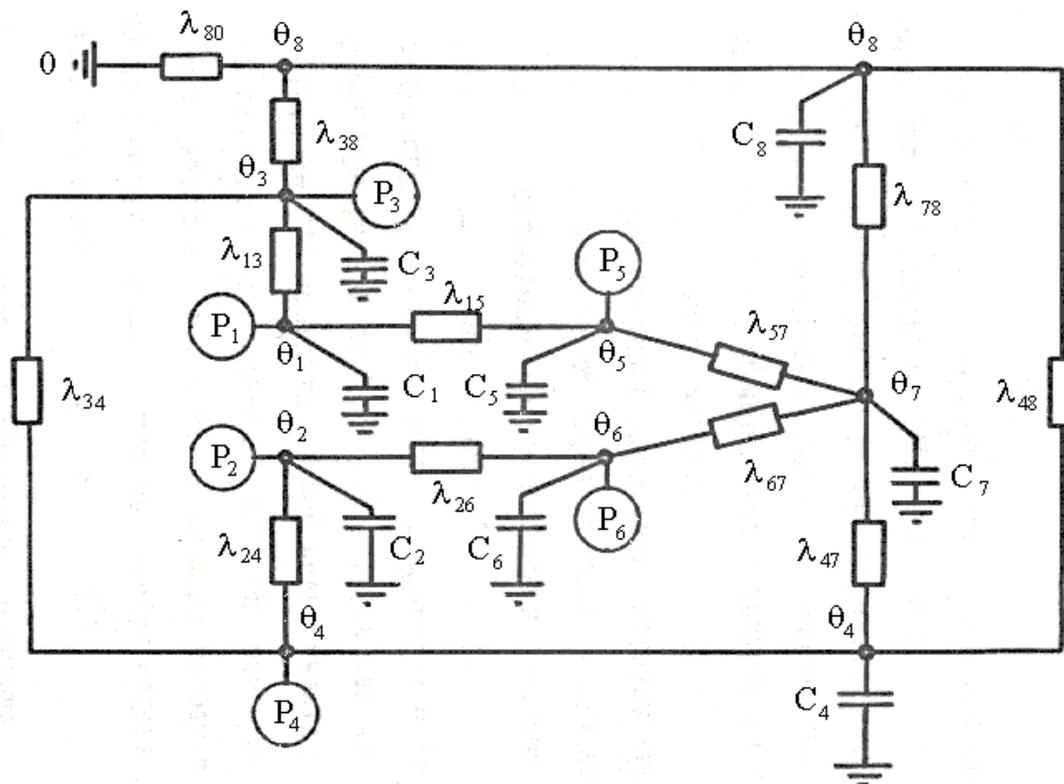


Рисунок 1 – Эквивалентная тепловая схема замещения асинхронного двигателя с фазным ротором типа МТН-312-6

$\theta_3$  и  $\theta_5$  – соответственно температура третьего и пятого тел ЭТС;

$\lambda_{11} = \lambda_{13} + \lambda_{15}$  – сумма тепловых проводимостей ветвей, подключённых к первому узлу;

$P_i = P_{i0} \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_i)$  – потери в первом узле.

Подобные уравнения составляются для каждого узла ЭТС [3]. В результате получаем систему дифференциальных уравнений, которая в матричной форме имеет вид

$$\frac{d\theta}{dt} \cdot C + \lambda \cdot \theta = P, \quad (1)$$

где  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$  – матрица-столбец (вектор) температуры узлов;

$\lambda = (\lambda_{ij})$  – квадратная матрица тепловой проводимости размерностью  $(n \times n)$ ;

$C$  – диагональная матрица теплоёмкости размерностью  $(n \times n)$ ;

$P = (P_1, \dots, P_n)$  – матрица-столбец (вектор) мощности источников тепла.

Рассмотрим основные особенности формирования матриц уравнения (1). Элементы матрицы тепловых проводимостей  $\lambda_{ij}$  практически постоянны при неизменных условиях теплоотвода. Это означает, что для машин с принудительной вентиляцией значения  $\lambda_{ij}$  практически постоянны в любом режиме работы. Для машин с самовентиляцией некоторые элементы матрицы  $\lambda$  зависят от процессов теплоотдачи ( $\lambda_{57}, \lambda_{67}, \lambda_{80}$  в ЭТС двигателя типа МТН-316-6), а, следовательно, от частоты вращения  $\omega$ . Прежде всего, следует выделить  $\lambda_{ij_{не}}$  при практически постоянной частоте вращения и  $\lambda_{ij_{ох}}$  при неподвижном роторе. В режиме работы S8 необходимо знать зависимость теплопроводностей  $\lambda_{ij}(\omega)$  от частоты вращения  $\omega$ . Принимая во внимание значительную инерционность тепловых процессов, значения  $\lambda_{ij}$  при пуске, торможении и реверсировании можно принять равными  $(\lambda_{ij_{не}} + \lambda_{ij_{ох}})/2$ . Матрица  $\lambda$  имеет два типа тепловой проводимости. Первый тип вида  $\lambda_{ii}$  – сумма проводимости ветвей, подсоединённых к  $i$ -му узлу ЭТС, имеет знак плюс. Второй тип  $\lambda_{ij}$  – сумма проводимостей ветвей, соединяющих  $i$ -ый и  $j$ -ый узлы ЭТС, имеет знак минус.

Элементы  $P_i$  матрицы-столбца в общем случае равны

$$P_i = P_{i_{пер}} + P_{i_{пост}} + P_{i_{доб}},$$

где  $P_{i_{пер}}$  – переменные потери в  $i$ -ом узле;

$P_{i_{пост}}$  – постоянные потери;

$P_{i_{доб}}$  – добавочные потери.

Постоянные потери состоят, как правило, из потерь в стали и механических потерь, причём последние включают в схему ЭТС в тех случаях, когда выделяют подшипниковый узел или т.п. Принимая во внимание, что потери в стали находятся в квадратичной зависимости от индукции и частоты  $f$ , а в режимах, близких к номинальному, имеем  $U \approx E$ , то при колебаниях напряжения сети потери в стали можно представить как

$$P_{пост} = P_{н_{пост}} \cdot \left(\frac{U}{U_n}\right)^2.$$

В режиме работы S8 при регулировании частоты вращения изменением частоты напряжения статора  $f_1$  величины потерь в стали следует определять с помощью специальных методов.

Переменные потери зависят от квадрата коэффициента нагрузки  $\beta_1^2$  в обмотках и от температуры узла

$$P_{i_{пер}} = \beta_1^2 \cdot P_{i0_{пер}} \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_i),$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления;

$$\beta_1 \text{ – кратность тока в обмотках, } \beta_1 = \frac{I}{I_n};$$

$P_{i0_{пер}} = m \cdot I_H^2 \cdot r_{i0}$  – электрические потери элементов конструкции обмоток при номинальном токе и сопротивлении  $r_{i0}$ , приведенном к температуре окружающей среды.

При учёте зависимости сопротивления обмоток от температуры необходимо ввести соответствующие изменения в элементы типа  $\lambda_{ii}$  матрицы проводимости. Их уточнённое значение  $\lambda'_{ii}$  равно

$$\lambda'_{ii} = \beta_1^2 \cdot P_{i0} \cdot \alpha.$$

Для практических расчётов можно пренебречь функциональной зависимостью сопротивления обмоток  $r_i$  от температуры, однако его значение необходимо привести к температуре, равной допустимой для соответствующего класса нагревостойкости изоляции. При больших значениях  $\beta_I$  (например, для короткозамкнутых АД при пуске)  $\lambda'_{ii}$  может стать отрицательной. В этом случае следует применять численные методы решения системы дифференциальных уравнений (1) и на каждом шаге уточнять значения переменных потерь в обмотках.

Добавочные потери в зависимости от их природы могут находиться в функциональной зависимости от тока  $I$ . Потери, обусловленные зубцовыми гармониками, принято считать пропорциональными  $\beta_I^2$ . В АД их зачастую разделяют поровну между узлами сердечников статора и ротора

$$P_{\text{доб}} = \beta_I^2 \cdot P_{\text{доб}_n} ,$$

где  $P_{\text{доб}_n}$  - добавочные потери в  $i$ -ом узле при номинальном токе.

Принимая во внимание вышеизложенное, порядок расчёта тепловых переходных процессов может быть следующий. На первом этапе необходимо определить параметры ЭТС для всех возможных режимов работы. Далее следует диаграмму нагрузки разбить на временные интервалы с постоянными условиями теплоотвода и мощностью источника тепла. Расчёты проводить поочерёдно на каждом интервале с учётом изменившихся параметров ЭТС и начальных значений температуры узлов. При расчёте можно использовать численные методы. При необходимости более глубокого исследования, можно использовать методы решения дифференциальных уравнений с целью получения аналитических выражений  $\theta_i(f)$  в узлах электрической машины на каждом интервале [3].

#### **Вывод.**

При расчёте и анализе динамики теплового состояния элементов конструкции АД в различных режимах работы рационально использовать систему дифференциальных уравнений, построенную на основе ЭТС. При этом необходимо учитывать все возможные внешние и внутренние факторы. Последнее означает, что время работы следует разбивать на интервалы, характеризующиеся одинаковыми условиями теплоотвода и мощностью источников тепла.

#### **Список литературы**

1. Справочник по электрическим машинам / под ред. Копылова И.П. – М.: Энергоатомиздат, 1989. - Т 1,2.
2. Счастливый Г.Г. Нагревание закрытых асинхронных электродвигателей. / Г.Г. Счастливый – К.: Наукова думка, 1966. - 196 с.
3. Фёдоров М.М. Тепловые переходные процессы в узлах асинхронного двигателя при различных коэффициентах нагрузки / М. М. Федоров // Сб. тр. ДонГТУ. Сер. электротехника и энергетика. – Донецк - 1998. - Вып. 2. - С. 159-165.

Надійшла до редколегії 14.05.2009

Рецензент: Є.Б.Ковальов

**М.М. ФЕДОРОВ, М.В. СПИРИДОНОВА**  
Донецкий национальный технический университет  
**Е.А. ВАРЕНИК**  
УкрНИИВЭ

**М.М. ФЕДОРОВ, М.В. СПИРИДОНОВА**  
Донецкий национальный технический университет  
**Е.А. ВАРЕНИК**  
УкрНДІВЕ

**Динамика тепловых переходных процессов в элементах конструкции асинхронных двигателей в различных режимах работы.** В данной статье предлагаются методы анализа и расчёта теплового состояния элементов конструкции асинхронных двигателей (АД), работающих в различных режимах.  
*Динамика, тепловой переходный процесс, элемент, конструкция, асинхронный двигатель, режим работы*

**Динаміка теплових перехідних процесів в елементах конструкції асинхронних двигунів в різних режимах роботи.** В даній статті пропонуються методи аналізу і розрахунку теплового стану елементів конструкції асинхронних двигунів (АД), які працюють в різних режимах.  
*Динаміка, тепловий перехідний процес, елемент, конструкція, асинхронний двигун, режим роботи.*