

РАСЧЕТ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Пеньков О. В., Мнухин В. А.

Донецкий государственный технический университет

R504A@FCITA.DN.UA

This paper concerns of optimal controlled converter drives with asynchronous motor. Three different criteria are taken in to consideration minimum winding temperature. Optimum control is realized by changing of the main drive flux in to function of speed and torque, influenced on temperatures. Optimum-control-oriented transient temperature model is presented. Thermal calculations are realized by method of equivalent thermal network. The equivalent high-order thermal model is determined analytically then verified experimentally.

Увеличение электромагнитных нагрузок значительно расширяет диапазон рабочих температур электрических машин при эксплуатационных режимах. Это объясняется ужесточением технико-экономических ограничений к требованиям пониженной материалоемкости. Предельное использование электрических машин по нагреву характеризуется комплексом показателей, связанных с техническими и экономическими аспектами их функционирования.

Существующие разнообразные типы электрических машин имеют общую структуру элементов, состоящую из обмоточного провода, электротехнической стали, изоляционных материалов. Следовательно, с точки зрения теплопередачи электрическая машина представляет собой сложную систему разнородных элементов с распределенными источниками теплоты в отдельных зонах. Надежная работа существующих и создаваемых машин в значительной степени обуславливается тщательностью анализа тепловых процессов.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором находят все более широкое применение в частотно-управляемых приводах. С точки зрения надежности, практический интерес представляет определение теплового состояния различных конструктивных частей двигателя в различных режимах работы в том числе и в пусковых режимах, отличающихся повышенными потерями мощности в обмотках.

Полное температурное поле электрической машины является трехмерным и в общем виде представляет весьма сложную задачу даже для численных методов решения. Вопросам тепловых исследований посвящены многие работы [1-6], в которых использованы как метод тепловых эквивалентных схем, так и аналитические решения для одно- и двумерных полей. Анализ тепловых связей и тепловых потоков, проводимых с использованием метода тепловых эквивалентных схем, служит основой для определения граничных условий в математических моделях расчета температурных полей обмоток [2].

В [3] получено решение тепловой задачи установившегося нагрева статора, обмотка которого представлена одним слоем как в пазовой, так и в лобовой части. Температурное поле в магнитопроводе описано по радиусу. Неравномерность охлаждения лобовой части по вылету аппроксимирована параболой. Аналитическое решение стационарной задачи найдено с использованием уравнения баланса тепловой энергии, интегрально описывающего обмен тепловыми потоками между тремя элементами статора. Однако такое решение не позволяет учитывать изменение условий охлаждения. Применение метода сеток для исследования тепловых полей в поперечных сечениях машин переменного тока описано в [2], где при расчетах используется метод простой итерации.

Задача контроля теплового состояния двигателя базируется на расчете процессов теплопередачи в узлах и элементах машины на основе описания стационарных и нестационарных тепловых полей с возможно более полным учетом геометрических форм, элементов, условий теплообмена между различными конструктивными частями. Попытка создать модель с учетом всевозможных факторов приведет к математической модели, исследовать которую какими-либо методами невозможно. Необходимо, чтобы разрабатываемые модели были доступны исследованию.

Основным принципом, положенным в основу исследования и расчета нагрева управляемых асинхронных двигателей, является физический подход к изучению процессов теплопередачи, установление количественных зависимостей, определяющих эти процессы. Известно, что нагрев асинхронного двигателя определяется следующими факторами: распределением потерь в машине, процессами теплопередачи, теплопроводностью в различных частях двигателя, внешней теплоотдачей посредством конвекции и излучения.

В настоящее время разработано большое многообразие конструкций асинхронных двигателей, отличающихся как исполнением отдельных элементов, так и системой охлаждения, определяющих тепловое состояние двигателя. Подробный анализ процессов теплопередачи показывает, что общая картина тепловых процессов может быть описана весьма сходными соотношениями, определяющими взаимный нагрев отдельных частей. Это создает важные предпосылки для разработки общей методологии расчета и анализа тепловых процессов в асинхронных двигателях различного исполнения.

При рассмотрении законов частотного управления не учитывается ухудшение теплоотдачи двигателя со снижением его частоты вращения. Предполагается, что двигатель имеет независимую от его частоты вращения

вентиляцию. Согласно [6] в большинстве случаев применяются самовентилируемые асинхронные двигатели, у которых со снижением частоты вращения заметно ухудшается теплоотдача.

Из теоретических основ частотного управления асинхронными двигателями следует, что изменяя величину отношения U_s/f_s с учетом системы ограничений можно перераспределять тепловые потери в двигателе. Поэтому необходимо найти закон регулирования напряжения. Данный закон должен обеспечивать максимальное значение допустимого по нагреву момента при заданной зависимости теплоотдачи от частоты вращения. Примем в качестве критерия оптимальности температуру двигателя Θ . Система ограничений имеет вид:

$$\begin{cases} 0 \leq U_s \leq U_{S\text{MAX}}; & 0 \leq f_s \leq f_{S\text{MAX}}; \\ 0 \leq S \leq S_{\text{MAX}}; & M \leq M_{S\text{MAX}} \end{cases} \quad (1)$$

В системе (1) приняты следующие обозначения: U_s и f_s - напряжение и частота, подводимые к обмотке статора асинхронного двигателя; M и S - электромагнитный момент и скольжение асинхронного двигателя.

Необходимо регулировать амплитуду и частоту питающего обмотки статора напряжения, чтобы получить минимальную разницу между температурой Θ_a (температура окружающей среды) и установившейся температурой определенного узла в двигателе. В асинхронном двигателе наиболее подвержена перегреву изоляция лобовых частей обмотки. Исходя из данного рассуждения, принимаем в качестве критерия управления минимальное значение приращения ($\Theta_{Cu1} - \Theta_a$), где Θ_{Cu1} - температура лобовых частей обмотки.

Исходя из анализа тепловых схем асинхронного двигателя, следует, что получить выражение, связывающее отношение U_s/f_s с различными факторами, изменяющими тепловое состояние лобовых частей обмотки, весьма сложно. Полученные при этом выражения из-за своей громоздкости мало пригодны для технической реализации. С целью получения аналитического выражения, позволяющего регулировать температуру лобовых частей обмотки приняты упрощающие допущения, которые обеспечивают необходимую точность моделирования процесса нагревания. Сущность допущений заключается в том, что из рассмотрения исключены тепловые сопротивления большой величины и замене нескольких тепловых емкостей одной соответствующей величины. На рис. 1 приведена схема, принятая в качестве базовой тепловой модели.

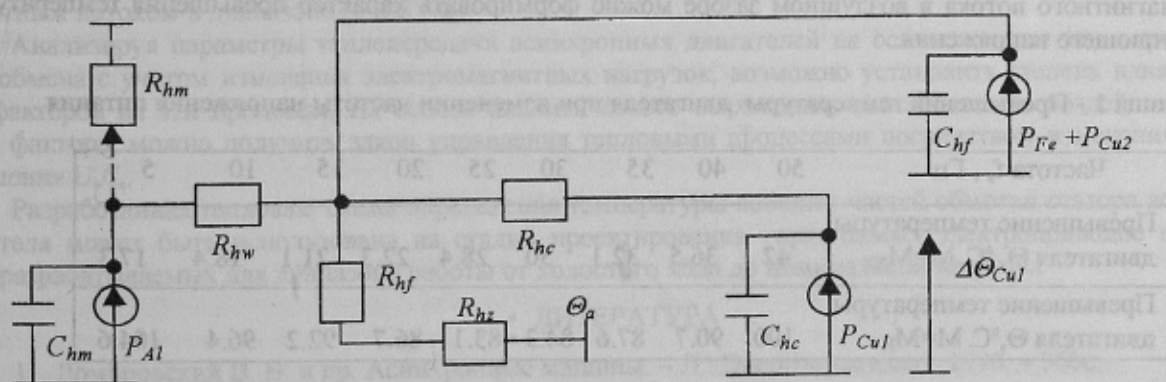


Рисунок 1 - Упрощенная тепловая модель асинхронного двигателя

На рис. 1 приняты следующие обозначения: $Cu1$ - лобовые части обмотки статора асинхронного двигателя, Fe - магнитопровод и корпус статора, $Cu2$ - пазовая часть обмотки статора асинхронного двигателя. Величины R_{hz} , R_{hc} , R_{hf} моделируют тепловые сопротивления между соответствующими узлами тепловой модели асинхронного двигателя.

На основании приведенной на рис. 1 упрощенной тепловой модели получено аналитическое выражение, описывающее процесс нагревания лобовых частей обмотки статора в установившемся режиме работы. Данное соотношение имеет вид:

$$\Theta_{Cu1} = \Theta(P_j, R_{th}(j), \Theta_a) = \Theta_a + P_{Cu1} R_{hc} + (P_{Fe} + P_{Cu} + k_a P_{Al})(R_{hz} + R_{hf}), \quad (2)$$

где P_{Fe} - потери в железе статора (основные и добавочные), P_{Cu} - потери в обмотке статора, P_{Al} - потери в роторе (основные и добавочные), k_a - коэффициент воздушного зазора. Пульсационные потери отнесены к потерям от вихревых токов, а все поверхностные - к потерям от гистерезиса в стали статора.

Коэффициент k_a показывает, какая часть тепловой энергии, выделяемой в роторе, достигает статора двигателя через воздушный зазор. Его величина зависит от скорости прохождения воздуха в зазоре машины, т.е. от частоты вращения ротора. На основе сравнения результатов математического моделирования и экспериментальных исследований теплового состояния двигателя серии 4А было получено уравнение, позволяющее вычислять значение коэффициента k_a в функции частоты вращения ω . Данная зависимость описывается уравнением:

$$k_a(\omega) = A + D \omega / \omega_H, \quad (3)$$

где A и D – коэффициенты аппроксимации, ω_H – номинальная частота вращения асинхронного двигателя.

Оставшаяся часть тепловой энергии отводится от ротора через вал и подшипники ($R_{\text{лм}}$) и не оказывает влияния на значение температуры Θ_{Cu1} . Приняты дополнительно следующие допущения: потери в лобовых частях P_{Cu1} равны половине потерь в обмотке статора P_{Cu} , механические потери не влияют на значение Θ_{Cu1} . Потери в меди ΔP_{Cu} и потери в железе ΔP_{Fe} на основании схемы замещения, приведенной в [1], описываются следующими соотношениями:

$$\Delta P_{\text{Cu}} = I_r^2 R_\mu + I_r^2 R_r, \quad (4)$$

$$\Delta P_{\text{Fe}} = \Psi_\mu^2 f_s (k_h + k_w f_s),$$

где k_h , k_w – коэффициенты гистерезисных и вихревых потерь, R_μ – активное сопротивление магнитопровода асинхронного двигателя, I_r – ток ротора, R_r – сопротивление ротора, Ψ_μ – потокосцепление от результирующего магнитного потока в воздушном зазоре машины, I_μ – намагничивающий ток.

В таблице 1 представлены экспериментальные данные превышения температуры асинхронного двигателя от частоты приложенного к обмоткам статора напряжения. При регулировании вращения асинхронного двигателя путем изменения частоты питающего напряжения потери в железе уменьшаются. Электрические потери в небольшом диапазоне частот (35-20) Гц остаются постоянными, а при частотах близких к (1-15) Гц наблюдается резкое увеличение теплового сопротивления двигателя и электрических потерь. Как следствие, происходит быстрое увеличение превышения температуры машины. Согласно (4) выбором соответствующего значения магнитного потока в воздушном зазоре можно формировать характер превышения температуры от частоты питающего напряжения.

Таблица 1 - Превышения температуры двигателя при изменении частоты напряжения питания

Частота f_s , Гц	50	40	35	30	25	20	15	10	5
Превышение температуры двигателя Θ , °C, $M=M_{\text{XX}}$	42	36.5	32.1	30	28.4	22.3	21.1	18.4	17.3
Превышение температуры двигателя Θ , °C, $M=M_H$	100	90.7	87.6	84.3	83.1	86.7	92.2	96.4	104.6

Подставив соотношения (4) в уравнение (2), с учетом k_a получим аналитическое выражение, связывающее параметры тепловой модели и электромагнитные параметры двигателя:

$$\Theta_{\text{Cu1}} = \Theta_a + P_{\text{Cu1}} R_{\text{hc}} + (\Psi_\mu^2 f_s (k_h + k_w f_s) + I_r^2 R_\mu + I_r^2 R_r + k_a(\omega) P_{\text{Al}}) (R_{\text{hz}} + R_{\text{hf}}) \quad (5)$$

Выражая ток I_r через электромагнитные параметры двигателя и про дифференцировав уравнение (5) по аргументу Ψ_μ , получим закон регулирования магнитного потока асинхронного двигателя.

$$\Psi_\mu \approx \sqrt{kM} \quad (6)$$

Из анализа уравнений (2) и (4) следует, что из-за непостоянства параметров тепловой модели, электромагнитных параметров машины и сложной природы добавочных потерь оптимальное соотношение U_s/f_s , обеспечивающее минимальный нагрев лобовых частей обмотки статора, может быть получено только расчетным путем.

Достоверность представленной выше упрощенной тепловой модели была проверена путем сопоставления результатов расчета превышения температуры лобовых частей обмотки статора с данными тепловых испытаний. Расчет производился для различных значений коэффициента k_a . В соответствии с уравнением (6) рассчитана зависимость изменения магнитного потока в зазоре асинхронного двигателя $(U_s/f_s)^{\text{opt}} = f(M)$. Расчетные и экспериментальные данные представлены в таблице 2 и таблице 3.

Таблица 2 – Изменение температуры лобовых частей обмотки статора

M/M _H	0	0.12	0.25	0.4	0.5	0.6	0.75	1.0
$\Delta\Theta_{Cu1}$ Экспериментальное	5.44	18.53	28.74	40.0	50.1	59.47	67.34	80.15
$\Delta\Theta_{Cu1}$ Расчетное, $k_a = 0.7$	5.47	18.68	28.87	40.2	50.1	61.11	70.5	83.15
$\Delta\Theta_{Cu1}$ Расчетное, $k_a = 0.8$	8.2	20.25	33.72	52.11	57.24	68.48	75.48	88.9

Таблица 3 – Расчетное значение зависимости $(U_s/f_s)^{opt} = f(M)$

M/M _H	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
$(U_s/f_s)^{opt}$	0.32	0.4	0.55	0.64	0.78	0.84	0.9	1.05	1.18

Из анализа приведенных в таблицах 2 и 3 данных следует, что поддержание оптимального отношения U_s/f_s позволяет снижать температуру лобовых частей обмотки статора. Данные, полученные на основе упрощенной тепловой схемы, являются достоверными в области соблюдения условий эквивалентности тепловой модели и реальной картины распределения температур. Согласно представленным в таблице 3 данным при нагрузках выше номинальных требуется завышение напряжения преобразователя частоты, составляющего $1.18U_H$ при номинальном моменте нагрузки. Значение магнитного потока двигателя с увеличением нагрузки не изменяется пропорционально увеличению соотношения U_s/f_s . Предельное значение момента нагрузки, при котором еще возможно управление в соответствии с закон регулирования (6), ограничивается условиями насыщения. Наличие насыщения магнитной цепи двигателя затрудняет получение аналитической зависимости для предельного момента нагрузки. Рекомендуемый режим работы асинхронного двигателя - с пониженным магнитным потоком в диапазоне $(0-0.8)M_H$.

Анализируя параметры теплопередачи асинхронных двигателей на основе теории теплопроводности и теплообмена с учетом изменения электромагнитных нагрузок, возможно установить степень влияния различных факторов на эти процессы. На основе аналитического выражения, описывающего воздействие того или иного фактора, можно получить закон управления тепловыми процессами посредством изменения величины отношения U_s/f_s .

Разработанная тепловая схема определения температуры лобовых частей обмотки статора асинхронного двигателя может быть использована на стадии проектирования управляемых электроприводов переменного тока, разрабатываемых для диапазона работы от холостого хода до номинальной нагрузки

ЛИТЕРАТУРА

1. Домбровский В. В. и др. Асинхронные машины. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 360с.
2. Власов Г. В. и др. Взрывозащищенный тиристорный электропривод переменного тока. – М.: Энергия, 1977. – 160 с
3. Счастливый Г. Г. Нагревание закрытых асинхронных электродвигателей. –К.: Наукова думка, 1966. – 195 с.
4. Федоров М. М. Тепловые переходные процессы в узлах асинхронного двигателя при различных коэффициентах нагрузки. –Д.: труды ДонГТУ, Вып. 2, 1998. –159 – 165 с.
5. Сипайлов Г. А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. – М. ВШ, 1989. – 236 с.
6. Радин В. И., Брускин А. Э. Электрические машины. Асинхронные двигатели. - М.: ВШ, 1988 – 328 с.