

Таким образом, представленные модели дают большие возможности для проведения различных исследований взаимосвязанных электроприводов непрерывных прокатных станов, в том числе – станов с многовалковыми калибрами.

Список литературы

1. Способ регулирования размеров проката на непрерывном сорто-проволочном стане. Шохин В.В. и др. Авторское свидетельство на изобретение №555928.

2. Устройство регулирования размеров готового проката на непрерывном сорто-проволочном стане. Шохин В.В. и др. Авторское свидетельство на изобретение №555929

3. Устройство регулирования натяжения полосы в межклетевых промежутках непрерывного прокатного стана. Шохин В.В. и др. Авторское свидетельство на изобретение №1519806

4. Пермякова О.В., Радионов А.А., Шохин В.В. Влияние системы стабилизации момента прокатного двигателя на отклонения размеров профиля // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 3, ч. 3. – Тула: издательство ТулГУ. – 2010. – С. 119-121.

5. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : учебник для высш. учеб.заведений / Г.Г.Соколовский. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 272 с.

6. Морозов Д.П. К теории электромеханических процессов станов холодной прокатки. // «Вестник электропромышленности». – 1944. – №3. – С. 16-19.

7. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. – М.: «Металлургия», 1975. – 336 с.

УДК 621.313.333

ОБЗОР ТЕПЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.В. Макаров, М.В. Вечеркин, А.С. Завьялов

*ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия, г. Магнитогорск
makarov@mgn.ru, vecherkin@inbox.ru*

Аннотация

В статье предложен обзор тепловых моделей асинхронных двигателей от одномассовой, до четырехмассовой. Показаны возможности пакета Matlab для анализа тепловых моделей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, тепловая модель.

OVERVIEW OF THERMAL MODELS FOR ASYNCHRONOUS MACHINES

A.V. Makarov, M.V. Vecherkin, A.S. Zavjalov

Nosov Magnitogorsk State Technical University

Russia, Magnitogorsk

makarov@mgn.ru, max_vecherkin@mail.ru

Abstract

This article offers an overview of thermal models for asynchronous motors from single-mass, to four-mass. Also there shown capabilities of Matlab for analysis of thermal models.

Key words: asynchronous motor, thermal model.

Как известно, при проектировании электроприводов производственных механизмов ключевую роль играет правильный выбор двигателя. От этого будут напрямую зависеть не только экономичность, надежность, производительность установки, но и состояние внешних питающих электрических сетей. Соответственно, существует необходимость в проведении соответствующих расчетов, учитывающих определенные условия работы. Одним из возможных способов является тепловой расчет, который позволяет определить и оптимизировать ряд параметров связанных с тепловыделением и теплоотведением.

В целом, около 10-15% потребляемой электрической энергии из сети так или иначе преобразуется в тепло, создавая превышение температуры обмоток двигателя над окружающей средой [8]. Введение теплового расчета позволяет определить рабочую температуру отдельных частей двигателя для конкретного режима работы. Если первоначально двигатель работает при температурах ниже допустимой, что, конечно же, не является благоприятным условием, то при неверной эксплуатации нередко имеет место перегрев обмоток двигателя, паек на роторе, износ и долговечность которых сильно зависит от температуры. Сами дефекты, связанные с износом изоляции делятся на усталостные и тепловые. К тепловым дефектам относят спекание, обугливание и тепловое старение. Тепловое старение происходит вследствие использования двигателя в недопустимом диапазоне температур [3].

Соответственно при перегреве изоляции на ней образуются микротрещины, ее диэлектрические свойства становятся хуже. Хорошим примером является тот факт, что при перегреве изоляции обмоток класса А (максимальная допустимая температура изоляции 105°C) на 8°C срок ее службы сокращается в 2 раза [1]. Далее, если в эти микротрещины попадет грязь или влага то может произойти электрический пробой, который обуглит изоляцию, что в свою очередь, сделает дальнейшую эксплуатацию данного двигателя неприемлемой.

Также важно, чтобы тепловая модель учитывала режим работы электродвигателя, так как отклонение основного режима работы от номинального неизбежно будет вести к его перегреву. Если электродвигатель предназначен для повторно-кратковременного режима работы (например, в крановых установках), то увеличение продолжительности против номинальной или же увеличение частоты включений ведет к его неизбежному нагреванию [9]. Введение динамической тепловой модели, для данного режима работы (S4), которая учитывала бы тепловыделение при пуске и остановке двигателя, могло бы сыграть важную роль при проектировании.

При рассмотрении процессов нагревания и охлаждения двигатель должен рассматриваться как более сложное тело, так как тепловые параметры его отдельных частей неодинаковы – каждый узел и элемент двигателя имеют свою температуру и свои условия теплопередачи.

Одномассовая тепловая модель

В решении проблем связанных с распределением тепла в двигателе помогает введение его тепловой модели. С ее помощью можно увидеть влияние режима работы на нагрев двигателя. Тепловая модель представляет собой схему замещения, источниками тепла в которой являются потери (джоулево тепло, потери на трение, вибрации двигателя: все виды энергии в конечном итоге переходят в тепло) в узлах электродвигателя. Тепловые модели имеют разные степени детализации. Наиболее простой представляется одномассовая модель, в которой двигатель представляется единым телом [2]. В такой модели не учитывается разнородность температур между корпусом и его отдельными частями, однако опорной точкой для измерения температур является часть двигателя, которая наиболее подвержена перегреву, таковой является любая из обмоток статора. Одномассовую тепловую модель можно описать следующим дифференциальным уравнением:

$$\Delta P = A\tau + \frac{\Delta\tau}{\Delta t} C,$$

где ΔP – мощность тепловых потерь, выделяющихся в электродвига-

теле; A – коэффициент теплоотдачи, Дж/(сек °С); τ – превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды; Δt – изменение температуры двигателя за время Δt ; C – теплоемкость двигателя Дж/°С.

Двухмассовая тепловая модель

Одномассовая модель, в большинстве случаев, непригодна при частотном регулировании. Там основной проблемой становится неконтролируемый перегрев роторной цепи при изменении намагниченности машины на разных скоростях вращения. Следует учитывать ухудшение теплоотдачи между статором и ротором из-за пониженной скорости вращения частотно-регулируемого двигателя (роторные лопадки на низких скоростях вращения хуже перемешивают воздух и охлаждаются лобовые части обмоток статора). Кроме того, на пониженной скорости ухудшается теплоотдача в окружающую среду [4].

В этом случае целесообразно ввести двухмассовую модель. Ее структурная схема представлена на рис. 1. В ней представлен самовентилируемый двигатель, который изменяет свою теплоотдачу со статором в зависимости от скорости вращения. Также теплообмен между статором и ротором имеет разную эффективность на разных скоростях вращения из-за того, что он в основном определяется теплопередачей через воздух зазора. При высокой скорости вращения интенсивность теплообмена возрастает с увеличением скорости перемешивания воздуха. Таким образом, описываемая модель имеет две неоднородные массы – статора и ротора. Потери возникают в статоре ΔP_s и роторе ΔP_r . Кроме электрических потерь в двигателе, есть механические потери в подшипниках, которые в рамках данной модели будут разделены пополам и подведены к статору и ротору. Также здесь принято допущение, что ротор отдает энергию только на статор через зазор и имеет крайне низкую теплоотдачу вовне, минуя статор [4].

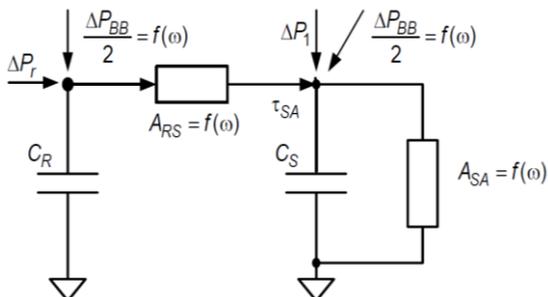


Рис. 1. Двухмассовая тепловая модель асинхронного двигателя

Между собой статор и ротор обмениваются энергией через теплопроводность $A_{sr}(\omega)$, являющуюся зависимостью от скорости вращения, а статор связан с окружающей средой теплопроводностью $A_{sa}(\omega)$, также зависящей от скорости. Структурная схема тепловой модели представлена на рис. 2 [4].

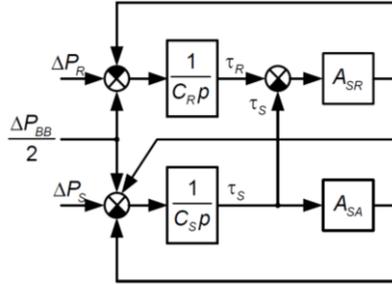


Рис.2. Структурная схема двухмассовой тепловой модели

Трехмассовая тепловая модель

В качестве примера трехмассовой тепловой модели, можно рассмотреть модель Р.Т. Шрейнера (рис. 3). В этой модели помимо статорных и роторных обмоток также особую роль играет магнитопровод стали статора. Однако, необходимо принять допущение, что каждый активный элемент рассматривается как однородное тело с бесконечно большой внутренней теплопроводностью.

В дифференциальном виде модель нагревания для трехфазного асинхронного двигателя имеет следующий вид [5]:

$$C_1 \frac{d\vartheta_1}{dt} = -A_1\tau_1 + A_{1,2}\tau_2 + A_{1,3}\tau_3 + Q_1;$$

$$C_2 \frac{d\vartheta_2}{dt} = -A_2\tau_2 + A_{2,1}\tau_1 + A_{2,3}\tau_3 + Q_2;$$

$$C_3 \frac{d\vartheta_3}{dt} = -A_3\tau_3 + A_{3,1}\tau_1 + A_{3,2}\tau_2 + Q_3,$$

где $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$ – температура нагрева активных звеньев; Q_1, Q_2, Q_3 – мощность теплового потока.

Очевидно, что наличие и рассмотрение в модели дополнительных составляющих, связанных с теплообменом в двигателе, делает модель более точной и более пригодной при проведении основательных конструкторских расчетов.

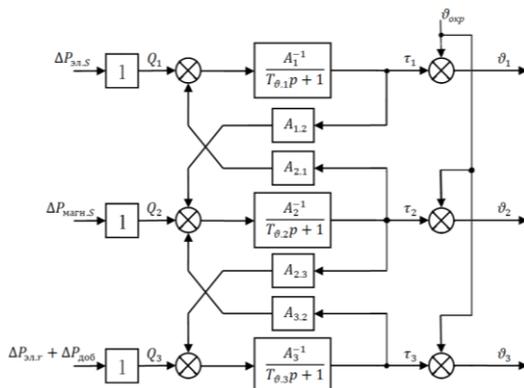


Рис. 3. Развернутая структурная схема трехмассовой модели двигателя

Однако главным минусом является необходимость в информации о многочисленных коэффициентах, фигурирующих в матрицах теплоемкостей и тепловых проводимостей, поэтому при выборе двигателя по мощности на практике зачастую используют более упрощенные модели.

Четырехмассовая тепловая модель

В отличие от трехмассовой, в четырехмассовой модели теплообмен в двигателе рассматривается еще более подробно (рис. 4, [6]). В данной модели принимается, что в фазах двигателя протекает симметричный ток, процесс нагревания каждой из масс происходит равномерно во всем объеме. Процесс нагревания заканчивается, когда все тепло, выделяющееся в двигателе, отдается в окружающую среду.

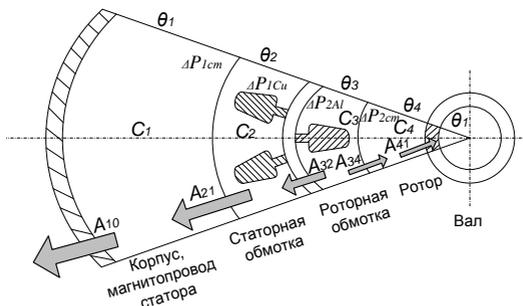


Рис. 4. Распределение тепла в четырехмассовой модели

Модель может быть описана с помощью системы дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\Theta_1}{dt} &= (\Delta P_{1C} + \Delta P_{MEX} - A_{10}(\Theta_1 - \Theta_0) + \\
 &+ A_{21}(\Theta_2 - \Theta_1) + A_{41}(\Theta_4 - \Theta_1)) / C_1; \\
 \frac{d\Theta_2}{dt} &= (\Delta P_{1Cu} - A_{21}(\Theta_2 - \Theta_1) + A_{32}(\Theta_3 - \Theta_2)) / C_2; \\
 \frac{d\Theta_3}{dt} &= (\Delta P_{2Al} - A_{32}(\Theta_3 - \Theta_2) - A_{34}(\Theta_3 - \Theta_4)) / C_3; \\
 \frac{d\Theta_{41}}{dt} &= (\Delta P_{2C} + \Delta P_o + A_{34}(\Theta_3 - \Theta_4) - A_{41}(\Theta_4 - \Theta_1)) / C_4
 \end{aligned} \right\}$$

Анализ тепловой модели в пакете Matlab

Большие возможности для исследования тепловых моделей предоставляет пакет Matlab. В нем возможно не только смоделировать двигатель для приводной системы, но также и подобрать силовую преобразовательную часть, подходящую для конкретных условий пуска. Это является одной из наиболее важных задач при проектировании, так как от правильного выбора пускового устройства будет зависеть ресурс и надежность работы двигателя. К примеру, при затяжном пуске двигателя, в нем возникают дополнительные тепловые потери. Эти потери не должны приводить к локальному перегреву статорных обмоток (меди). Особенно это касается высоковольтных двигателей. Если на обмотках приложены большие напряжения, то соответственно к их изоляции предъявляются и большие требования, так как вероятность пробоя диэлектрического слоя при их тепловом старении и ссыхании становится гораздо выше. На рис. 5 приведена структурная схема модели для определения температуры меди статора.

Блок «Switch» служит для выбора одного из режимов «S1», «S2» или «S3». Он управляется источником постоянного воздействия «Rezhim». Блок «Poteri» представляет собой подсистему, рассчитывающую потери в двигателе в зависимости от нагрузки. Блоки «Tm(0)» и «Tst(0)» служат для задания начальных температур меди и стали. Блок «Tv» задает значение температуры окружающего воздуха. В блоки передаточных функций «Cu», «Fe», «Cu(0)», «Fe(0)» и «Air» входят коэффициенты дифференциальных уравнений, отражающие вклад каждой задаваемой величины в нагрев обмотки. С выхода передаточных функций сигналы поступают на сумматор «Sum1». На выходе «Sum1» формируется значение температуры меди, которое поступает на вирту-

альный осциллограф «Score», регистрирующий прибор «Display» и элемент сравнения «RELE». Блоки «Kriticheskaja temperatura» и «RELE» моделируют работу теплового реле. Блок «Kriticheskaja temperatura» задает предельное значение температуры обмотки статора. Значение температуры обмотки поступает на элемент сравнения и сравнивается с предельным значением, устанавливаемым ГОСТ 183–74 в соответствии с классом изоляции. Так, например, для изоляции класса В предельное значение температуры обмотки $\theta_M=120^0$ С, для изоляции класса F – $\theta_M=140^0$ С, для изоляции класса H – $\theta_M=165^0$ С. Если значение температуры обмотки больше предельного, то на выходе элемента сравнения появляется сигнал, который отображается на индикаторе.

Таким образом, схема, составленная в пакете Matlab и представленная на рис. 5, служит для определения температуры меди статора. Это лишь небольшая демонстрация возможностей программы, так как при необходимости можно будет также сформулировать схемы для определения температуры любой другой исследуемой части двигателя. Также, важно отметить, что здесь блоки «S1», «S2» и «S3» моделируют различные режимы работы двигателя. Это может стать особо полезным инструментом при моделировании механизмов имеющих повторно кратковременный характер работы. При постоянном пуске асинхронного двигателя каждый раз в нем будут возникать большие пусковые токи, которые впоследствии могут сильно влиять на нагрев. С помощью такой модели это влияние можно исследовать и подвергнуть дальнейшей интерпретации.

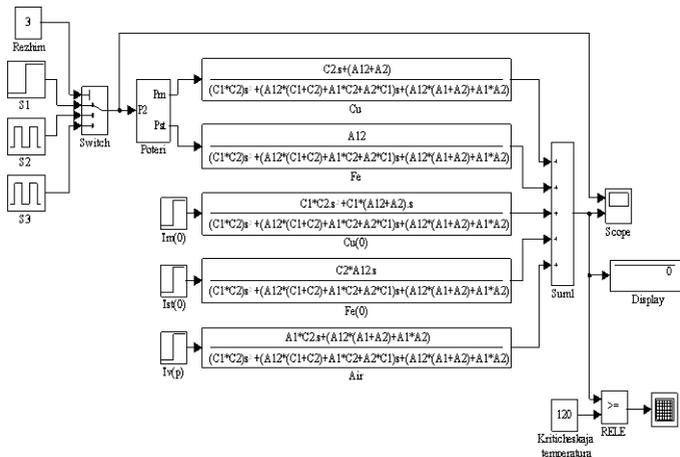


Рис. 5. Структурная схема модели для определения температуры меди статора

Выбор тепловой модели должен осуществляться на основе всестороннего анализа условий эксплуатации асинхронного двигателя. В современных условиях имеется необходимость развития тепловых моделей для анализа работы асинхронных электроприводов с частотным управлением. Дело в том, что при использовании частотного регулирования в нагреве двигателя существенное влияние оказывают высшие токовые гармоники. Постоянная составляющая момента асинхронного двигателя при питании его от преобразователя частоты, определяется в основном моментом, создаваемым взаимодействием первых гармоник токов статора и ротора [10]. Высшие гармоники не протекают по контуру намагничивания но, достигая достаточно больших значений, могут играть существенную роль в процессе нагрева обмоток статора. Если не принимать этот фактор во внимание, то двигатель может работать в неблагоприятном тепловом режиме.

Список литературы

1. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. - под ред. А. А. Виноградова.- Госэнергоатомиздат, 1963.- 289 с.
2. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. Идентификация параметров и проверка адекватности тепловой модели асинхронного двигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии. - *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Випуск 1/2012 (17)- 87 с.
3. Воробьев Н.П., Воробьева С.Н., Суханкин Г.В., Герцен Н.Т. Методы и приборы диагностирования изоляции асинхронных двигателей /// *Ползуновский Вестник*. – 2011– №2/2 - 267с.
4. Анучин А.С., Федорова К.Г. Двухмассовая тепловая модель для энергоэффективного выбора асинхронного двигателя // *Труды VII Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012*. – Иваново, ГОУ ВПО ИГЭУ, 2012.
5. Шрейнер Р.Т., Костылев А.В., Кривовяз В.К., Шилин С.И. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления: учебное пособие.- Екатеринбург: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008.- 14 с.
6. Моисеев В.О., Омельченко Е.Я., Тележкин О.А. Исследование четырехмассовой термодинамической математической модели асинхронного двигателя. - ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова.
7. <http://bestreferat.ru/archives/64/bestref-190064.zip>.
8. Мусин А.М. Аварийные режимы асинхронных двигателей и способы их защиты. – под ред. Л. М. Рунова.- Колосс, 1979.- 18с.

9. Деро А.Р., Большам Я.М., Зевакин А.И., Каминский Е.А. Неполадки в работе асинхронного двигателя. - Энергия, 1976- 48с.

10. Поздеев А.Д. Процессы в частотнорегулируемых частотных приводах. - Чебоксары: издательство Чуваш. ин-та.- 27с., 35с.

УДК:62-83:621.7.068

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМОТОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

Е.Я.Омельченко, В.О.Моисеев

*ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова», Россия, г. Магнитогорск
momentum2@yandex.ru, ickar@mail.ru*

Аннотация

С общих позиций закона сохранения энергии проанализированы процессы преобразования мощности в многодвигательных электроприводах перемotoчных устройств. Рассмотрено 4 типа электроприводов с разными кинематическими схемами. Выведены уравнения баланса мощностей. Определены зависимости потребляемой активной мощности с учетом рекуперации энергии. Даны рекомендации по применимости рассматриваемых электроприводов с учетом энергоэффективности и капитальных затрат.

Ключевые слова: перемotoчное устройство, диаграмма мощностей.

ENERGY THEORY OF ELECTRIC DRIVES OF MULTIMOTOR REWINDER MILLS

E.Y.Omelchenko, V.O. Moiseev

*Nosov Magnitogorsk State Technical University
Russia, Magnitogorsk
momentum2@yandex.ru, ickar@mail.ru*

Abstract

The results of the analysis of energy transformation based on the general principle of conservation of energy of the electric drives of multimotor rewinders are presented. Four types of electric drives with various kinematic diagrams are described. The power balance equations are derived. The dependences of watt consumption are described. The recommendations with the watt consumption and capital costs according to commercial applicability are given.