

На правах рукописи



ФЕДОРОВА КСЕНИЯ ГЕОРГИЕВНА

**ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХМАССОВОЙ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ
ОРГАНИЗАЦИИ ЗАЩИТЫ В ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОМ
АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре автоматизированного электропривода федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель: **Козаченко Владимир Филиппович**
доктор технических наук, профессор кафедры
автоматизированного электропривода ФГБОУ
ВО «НИУ «МЭИ»

Официальные оппоненты: **Онищенко Георгий Борисович**
доктор технических наук, профессор кафедры
«Электротехника» ФГБОУ ВО «Московский
политехнический университет»

Метельков Владимир Павлович
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электропривод и автоматизация промышлен-
ных установок» ФГАОУ ВО «Уральский феде-
ральный университет имени первого президен-
та России Б.Н. Ельцина»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет имени Г.И. Носова»

Защита диссертации состоится «15» июня 2018 года в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.157.02 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13, корпус М, ауд. М 606.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Ученый Совет ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» и на сайте www.mpei.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.02
кандидат технических наук, доцент

Цырук С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Сегодня большая часть вводимых в эксплуатацию электроприводов с асинхронным электроприводом являются частотно-регулируемыми. Основными проблемами для этого современного электропривода является выбор мощности в процессе проектирования и его тепловая защита в процессе работы.

Современные преобразователи частоты отечественных и зарубежных фирм имеют встроенную время-токовую защиту, обеспечивающую отключение двигателя в случае его перегрева в результате перегрузки или неправильной настройки законов частотного регулирования. В известных (описанных в литературе) отечественных решениях тепловая модель сводится к апериодическому звену, на вход которого подается квадратичное значение тока, нормированное относительно номинального значения. Аperiодическое звено может менять постоянную времени в зависимости от выходной частоты, чтобы правильно отражать изменение теплоотдачи, связанное с изменением частоты вращения самовентилируемого двигателя. В зарубежных преобразователях частоты известных фирм применяются алгоритмы косвенной оценки нагрева двигателей, однако описание моделей отсутствует в открытой литературе, так как является «ноу-хау» компаний.

Данная проблема также не может быть решена стандартными методами, такими как применением времятоковых реле. Поэтому в современные электродвигатели в качестве опций встраивают термосопротивления или биметаллические тепловые реле. При этом программная защита все равно необходима большинству электроприводов, где единственным способом защиты является программная оценка теплового состояния электродвигателя, которая реализуется непосредственно в системе управления преобразователя частоты.

Учет тепловых потерь, нагрева частей электродвигателя можно выполнять по электрической модели электродвигателя и его тепловой модели при известном законе регулирования, токах фаз и скорости вращения (возможен и вариант решения без датчика скорости), что позволит оценить тепловое состояние электродвигателя в процессе эксплуатации с целью защиты от перегрева. Развитие вычислительных возможностей микроконтроллеров систем управления позволяет применить методы численного интегрирования для просчета электрических и тепловых моделей в реальном времени.

Таким образом, развитие теории защиты частотно-регулируемого асинхронного электропривода от перегрева средствами системы управления преобразователя частоты с использованием численных методов является актуальной задачей и позволяет сформулировать цель диссертационной работы.

Цель диссертационной работы — развитие теории контроля тепловых режимов работы общепромышленных частотно-регулируемых электроприводов с асинхронными электродвигателями средствами системы управления преобразователя частоты в процессе эксплуатации.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Выбор тепловой модели асинхронного электродвигателя, пригодной для использования применительно к частотно-регулируемому электроприводу.
2. Разработка методики экспериментального определения параметров тепловой модели.
3. Разработка методики оценки теплового состояния частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя, подходящего для тепловой защиты электродвигателя средствами системы управления преобразователя частоты.
4. Проверка адекватности разработанной тепловой модели и методов оценки теплового состояния.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались: теория электропривода, теоретические основы электротехники, теория обобщенной электромеханической машины, численные методы для моделирования процессов с использованием языка высокого уровня Си.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждена результатами экспериментальных исследований на физических объектах с использованием оборудования лаборатории «Энергосберегающий электропривод» учебного центра «МОЭК – МЭИ» и оборудования лаборатории электропривода учебно-консультационного центра «АББ – МЭИ», применением широко апробированных программных пакетов и использованием наиболее проверенных для решаемых задач математических моделей и сопоставлением результатов моделирования и экспериментальных исследований.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- определено, что для организации программной защиты частотно-регулируемого электропривода подходит двух- или трехмассовая тепловая модель асинхронного электродвигателя;
- разработана методика экспериментального определения параметров тепловой модели асинхронного электродвигателя, построенная на измерении температуры железа статора или температуры лобовой части обмотки;
- экспериментально установлены границы применимости двух- и трехмассовой тепловой модели асинхронного электродвигателя;
- разработана методика оценки теплового состояния асинхронного электродвигателя в составе частотно-регулируемого электропривода, применяемая для тепловой защиты электродвигателя средствами системы управления преобразователя частоты, отличающаяся большей точностью по сравнению с известными методиками.

Основной практический результат диссертации состоит в следующем:

- разработан способ экспериментального определения параметров тепловой модели асинхронного двигателя, описаны порядок проведения экспериментов и требования к оборудованию;
- разработанная методика оценки теплового состояния электродвигателя позволяет производить численное моделирование тепловых процессов при заданном способе регулирования, текущих параметрах работы электропривода и нагрузках для защиты электродвигателя от перегрева средствами преобразователя частоты;
- разработанная методика оценки теплового состояния электродвигателя применима для интеграции в программное обеспечение преобразователей частоты для организации тепловой защиты асинхронного электродвигателя без использования датчика температуры;
- экспериментально подтверждена возможность применения двухмассовой тепловой модели на высоких скоростях вращения и дана рекомендация по применению более сложной трехмассовой модели на низких скоростях.

На защиту выносятся следующие положения:

- двухмассовая тепловая модель асинхронного электродвигателя с переменными коэффициентами теплопередачи и учетом потерь в подшипниках, применяемая для частотно-регулируемого электропривода;

- методика экспериментального определения параметров двухмассовой тепловой модели асинхронного электродвигателя с переменными коэффициентами теплопередачи и учетом потерь в подшипниках;
- экспериментально определенные диапазоны применения двух- и трехмассовых тепловых моделей для оценки теплового состояния электродвигателя;
- методика оценки теплового состояния электродвигателя в системе частотного регулирования при отработке заданной тахограммы и нагрузочной диаграммы для организации алгоритма защиты электродвигателя.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на заседаниях кафедры автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ», докладывались на VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (Иваново, ИГЭУ, 2012 г.), на 17-ой и 19-ой международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, НИУ «МЭИ»), на 51-ой Международной Университетской конференции UPEC-2016 (г. Коимбра, Португалия) и на 17-ой Международной конференции по мехатронике Mechatronika (г. Прага, Чехия).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 2 — в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, 3 — в изданиях, включенных в базу Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, 3 приложений и библиографического списка. Количество страниц — 147, иллюстраций — 56, число наименований использованной литературы — 58.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы и задачи исследования.

В первой главе представлен обзор литературы и кратко описаны основные виды тепловых моделей асинхронных электродвигателей.

В качестве основных моделей рассмотрены одномассовая, двухмассовая и многомассовая. Отмечено, что одномассовая модель не дает точного представления о температуре роторной цепи асинхронного двигателя, которая должна контролироваться в условиях частотного регулирования асинхронного электро-

привода при изменении потока электрической машины. Среди двухмассовых моделей выбрана модель с разделением на массу статора и массу ротора. Она выбрана в качестве базовой модели для проведения исследований (рис. 1).

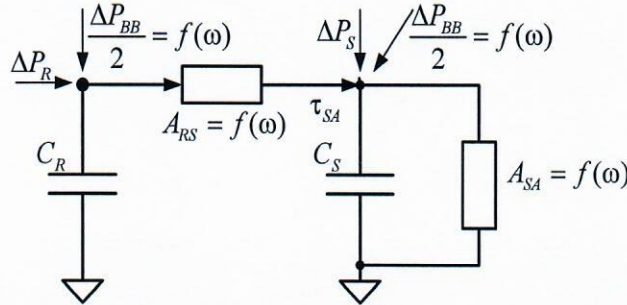


Рис. 1. Двухмассовая модель асинхронного электродвигателя

Уравнения двухмассовой модели:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\tau_S}{dt} &= \frac{1}{C_S} \left(\Delta P_S + \frac{\Delta P_{BB}}{2} + A_{SR}(\tau_R - \tau_S) - A_{SA}\tau_S \right); \\ \frac{d\tau_R}{dt} &= \frac{1}{C_R} \left(\Delta P_R + \frac{\Delta P_{BB}}{2} - A_{SR}(\tau_R - \tau_S) \right), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где τ_S — перегрев статора, τ_R — перегрев ротора, C_S — теплоемкость статора, C_R — теплоемкость ротора, ΔP_S — потери в статорной цепи, ΔP_R — потери в роторной цепи, ΔP_{BB} — потери в подшипниках, A_{SR} — тепловое сопротивление перехода «статор — ротор», A_{SA} — тепловое сопротивление перехода «статор — окружающая среда».

Многомассовые модели признаны неудовлетворяющими поставленной цели и задачам, так как определение их параметров должно сопровождаться точным знанием геометрии, конструкции и материалов, примененных в машине. Кроме того, многомассовые модели нельзя рассчитывать в реальном времени, что ограничивает их применение в качестве моделей для организации тепловой защиты в системах управления преобразователей частоты.

Во второй главе рассмотрена методика экспериментального определения параметров двухмассовой модели.

Принято, что в качестве измерителя температуры применяется термопара, имеющая точечный контакт с железом статора. Так как статор не прогревается равномерно, то необходимо определить базовую точку, относительно которой будет измеряться температура эквивалентной статорной массы. Для номиналь-

ного режима работы двигателя необходимо определить перегрев этой точки и дать оценку температуры эквивалентной роторной массы для номинального режима. Тогда оценку всех других режимов работы можно также производить по этой точке, где расчетная температура точки будет сравниваться с пороговой температурой номинального режима, а расчетная температура ротора с расчетной температурой для номинального режима.

Для измерения температуры роторной цепи можно было бы применить бесконтактный датчик с радиоканалом, однако в продаже подобных изделий найдено не было, а разработка такого датчика представляет определенную техническую сложность и выходит за рамки данной работы. Применение тепловизора для непосредственного измерения температуры ротора требовало существенных доработок конструкции имеющегося лабораторного оборудования. Поэтому было принято решение ограничиться расчетным значением температуры роторной цепи.

Двухмассовая тепловая модель, несмотря на свою относительную простоту, требует проведение большого числа опытов для экспериментального определения её параметров.

Потери в подшипниках относительно маленькие, поэтому лучше всего производить их измерение с использованием теплоизоляционной рубашки, которая позволяет повысить чувствительность. Вентилятор должен быть снят, чтобы теплоотдача не изменялась с изменением скорости вращения. Первый опыт необходим для определения коэффициента теплоотдачи двигателя, помещенного в теплоизоляционную рубашку. На статор неподвижного двигателя подводится постоянное напряжение. По окончании процесса нагрева фиксируется перегрев и передаваемая в двигатель мощность. Разделив подводимую мощность на перегрев относительно окружающей среды, получим теплопроводность статора в окружающую среду с теплоизоляционной рубашкой:

$$A_{SAshielded} = \frac{\Delta P}{\tau}. \quad (2)$$

С помощью нагрузочной машины выводим охлажденный и выключенный двигатель на некоторую скорость вращения. Все потери в двигателе определяются механическими потерями (в основном в подшипниках и аэродинамическими), которые на разных скоростях будут определяться по формуле:

$$\Delta P_{BB}(\omega) = A_{SAshielded} \tau. \quad (3)$$

Снимая установившийся перегрев для разных скоростей вращения, можно получить зависимость потерь в функции скорости.

Определение коэффициента теплоотдачи статора в окружающую среду производится с вентилятором и со снятой теплоизоляционной рубашкой. Коэффициент теплоотдачи статора в окружающую среду зависит от скорости вращения двигателя, так как вентилятор на валу двигателя будет также менять свою скорость. Таким образом, опыт следует проводить при различных скоростях вращения. Сложность проведения опыта состоит в том, что необходимо точно знать величину потерь в двигателе для определения коэффициента.

Потери в АД могут возникать в статоре и в роторе. Кроме того, в результате предыдущих исследований были определены потери в подшипниках в зависимости от скорости вращения. Если создать такие условия, чтобы потери в роторной цепи равнялись нулю, то есть случай идеального холостого хода, тогда потери в статоре могут быть вычислены путем перемножения питающего напряжения на ток.

Потери в роторе равны нулю, если электрическая скорость вращения двигателя совпадает со скоростью вращения поля, а амплитуда напряжения неизменна или меняется медленно. Вращение электродвигателя должно осуществляться от другой машины, а преобразователь частоты следует подключить к двигателю через синусный фильтр (СФ), чтобы можно было измерять мощность, подводимую к двигателю независимым прибором (цифровой измеритель мощности и цифровой компьютерный осциллограф, подключенный к датчикам тока и напряжения). Структура системы управления для проведения опыта была реализована в соответствии с функциональной схемой, представленной на рис. 2.

Задавая определенную мощность и дожидаясь установившегося режима работы на некоторой скорости вращения двигателя, приводимого в движение от нагрузочной машины, можно произвести снятие кривой коэффициента теплоотдачи статора в окружающую среду $A_{sa}(\omega)$, которая рассчитывается по формуле:

$$A_{sa} = \frac{\Delta P_{зад}}{\tau_{уст}}. \quad (4)$$

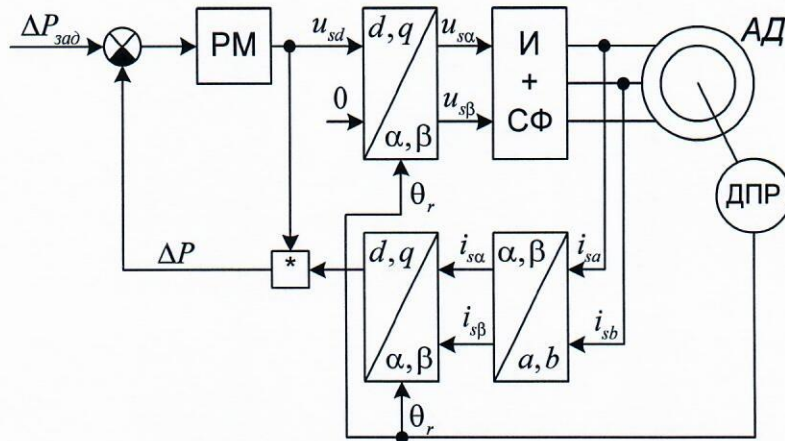


Рис. 2. Система управления ПЧ, обеспечивающая околонулевые потери в роторной цепи

Для определения теплостойкостей статора и ротора и коэффициента теплоотдачи между статором и ротором можно применить метод наименьших квадратов. Для определения параметров модели необходимо осуществить перебор значений параметров C_S , C_R , A_{SR} во всем разумном диапазоне с некоторым шагом. Для перебора всех возможных значений и подбора параметров была написана программа на языке Си. В процессе перебора по уравнениям (1) производится моделирование поведения системы, и данные модели сравниваются с данными, полученными в результате опыта нагрева. Интеграл квадрата ошибки позволяет судить о достоверности текущих параметров тепловой модели и вычисляется по формуле:

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} (\tau_i - \hat{\tau}_i)^2, \quad (5)$$

где N – количество измерений температуры статора двигателя за время опыта T , τ_i – измеренная температура статора двигателя в момент времени $i \frac{T}{N+1}$, $\hat{\tau}_i$ – оценка температуры статора по модели.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований по определению параметров тепловой модели.

Первые эксперименты были проведены на двигателе А90L6, мощностью 1,5 кВт в лаборатории «Энергосберегающий электропривод» учебного центра «МОЭК – МЭИ». На рис. 3 представлена фотография внешнего вида лабораторного стенда и размещения термопары.

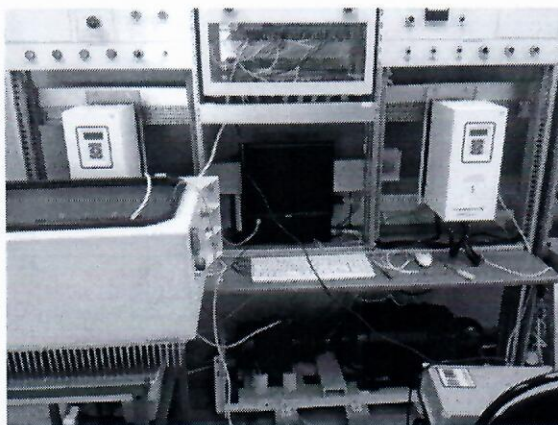


Рис. 3. Лабораторная установка для экспериментального определения параметров тепловой модели

Для опыта по определению потерь в подшипниках получен график, представленный на рис. 4.

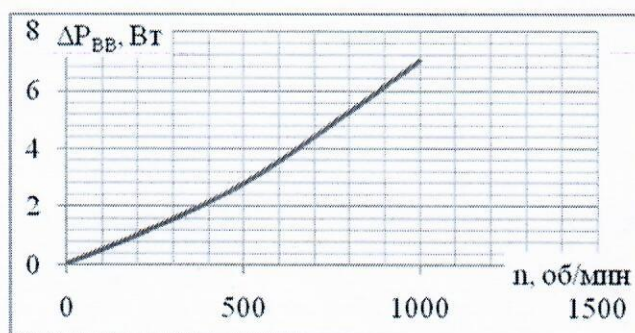


Рис. 4. Кривая потерь в подшипниках для разных скоростей вращения

Были сняты кривые нагрева электродвигателя на разных скоростях. На рис. 5 представлены результаты определения параметров для двух- и одномассовых моделей двигателя, которые показывают преимущества использования двухмассовой модели.

Графики показывают переходные процессы нагрева двигателя для наименьшего квадратичного отклонения от измеренных данных. В первом случае были определены следующие параметры двухмассовой модели:

$$\left. \begin{aligned} C_S &= 4826 \text{ Дж/К}; \\ C_R &= 4735 \text{ Дж/К}; \\ A_{RS} &= 5,25 \text{ Вт/К}; \\ A_{SA} &= 2,7 \text{ Вт/К}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

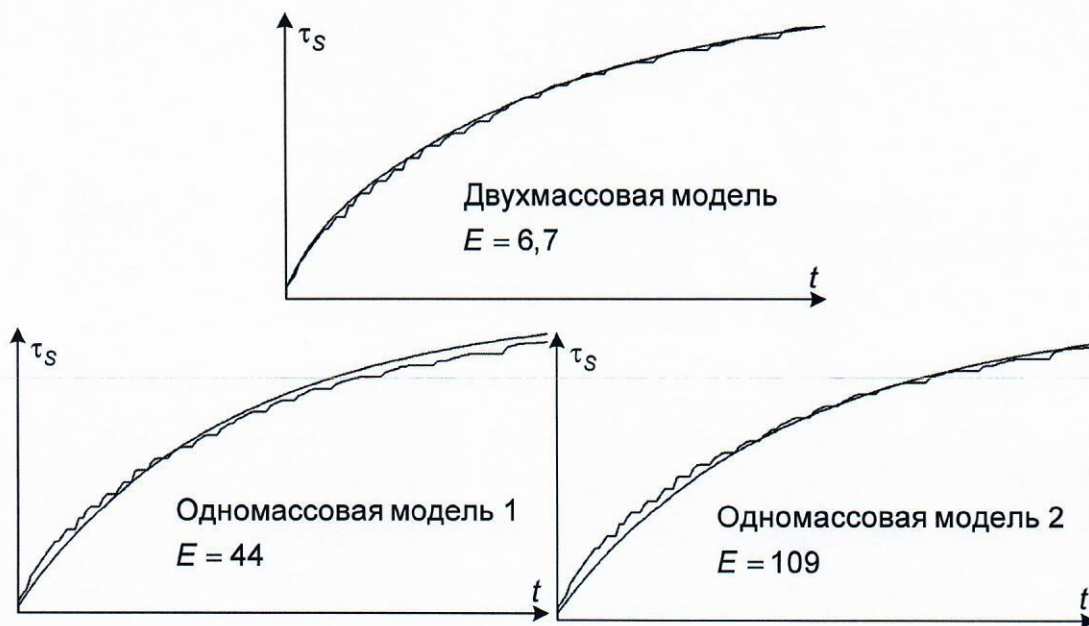


Рис.5. Результаты определения параметров двухмассовой и одномассовой тепловых моделей

В четвертой главе была произведена проверка методики для случая применения датчика температуры, расположенного в лобовой части обмотки статора.

С появлением на кафедре АЭП лаборатории учебно-консультационного центра «АББ – МЭИ» появилась возможность использовать для проведения опытов встроенные в электродвигатель термосопротивления типа РТ100, размещенные в лобовых частях обмотки статора. Исследуемый асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет три пары полюсов и мощность 5,5 кВт. На стенде имеется датчик момента, преобразователь сигнала термосопротивления, квадратурный датчик положения для точного определения скорости вращения двигателя, анализатор сети (цифровой ваттметр), датчики тока и напряжения. Все датчики подключены к цифровому компьютерному осциллографу L-791 фирмы L-Card.

Для проведения опытов была собрана схема, представленная на рис. 6. Исследуемый двигатель работает на холостом ходу и питается от напряжения регулируемой амплитуды и частоты. Мощность, подводимая к статору, вычисляется по показаниям цифрового ваттметра и проверяется по показаниям цифрового осциллографа. Принято, что мощность, выделяемая в роторной цепи, значительно меньше мощности, выделяемой в статорной цепи. Это подтверждается показаниями скорости, вычисляемой преобразователем частоты по сигналам инкрементального датчика положения ротора, который указывает на

практическое отсутствие скольжения. В качестве генератора регулируемого напряжения регулируемой частоты используется асинхронный двигатель с фазным ротором, приводимый во вращение короткозамкнутым асинхронным двигателем, питаемым от преобразователя частоты. Изменяя скорость вращения приводного двигателя, производится изменение частоты напряжения генератора. Регулирование амплитуды напряжения генератора осуществляется путем изменения значения постоянного тока в роторной цепи, которая в свою очередь питается от генератора постоянного тока. Генератор приводится во вращение частотно-регулируемым электроприводом с синхронным электродвигателем с постоянными магнитами, а выходной ток регулируется изменением возбуждения от тиристорного выпрямителя. Такая сложная схема позволяет получить достаточно качественную форму питающего напряжения для исследуемого двигателя. Внешний вид лабораторной установки представлен на рис. 7.

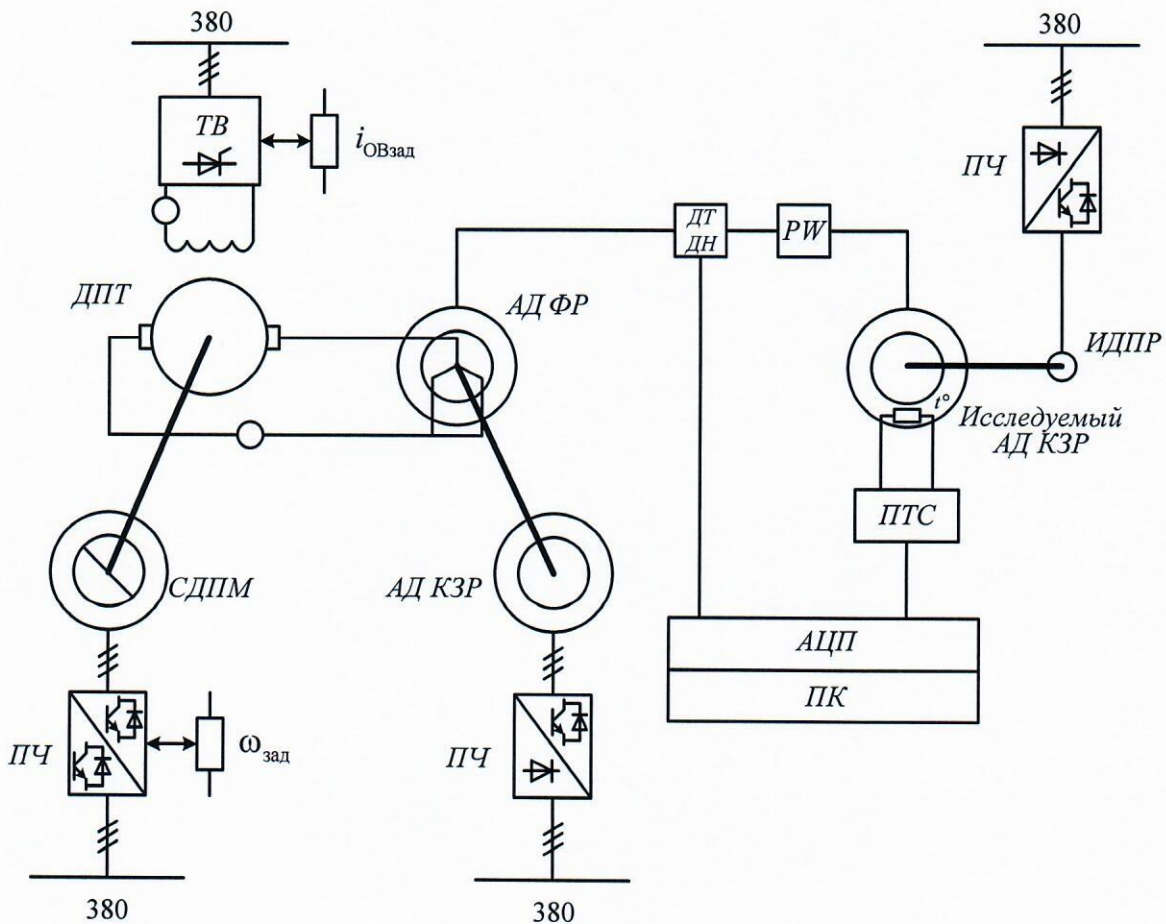


Рис. 6. Схема проведения опыта на холостом ходу



Рис. 7. Лабораторная установка для определения параметров тепловой модели электродвигателя с датчиком в лобовой части обмотки

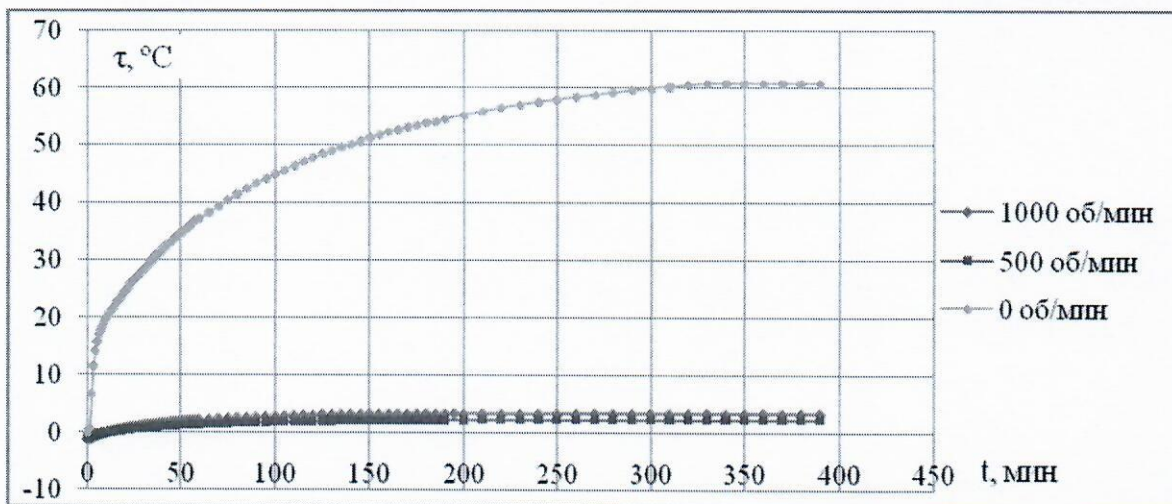


Рис. 8. Графики перегрева от времени на частотах 0, 500 и 1000 об/мин

В результате экспериментов были получены графики изменения температуры во времени для частот вращения 0, 250, 500, 750 и 1000 об/мин, которые с учетом изменения температуры окружающей среды были пересчитаны в перегрев. Мощность потерь в статорной цепи для каждого опыта получалась разной и фиксировалась в каждой точке графика. На рис. 8 представлены графики перегрева во времени для трех характерных скоростей 0, 500 и 1000 об/мин.

График при остановленном двигателе имеет характерный быстрый рост перегрева лобовой части статорной обмотки. Для этого режима двухмассовая модель с разделением на статорную и роторную массу не применима. Теплоемкость нагреваемых лобовых частей была оценена как приблизительно 1/30 теплоемкости всего двигателя. Можно предположить, что при малых или нулевых скоростях вращения лопасти ротора не перемешивают воздух внутри машины и

не охлаждают лобовые части обмоток статора. С ростом частоты вращения до 500 об/мин и выше опытные данные соответствуют поведению принятой ранее двухмассовой модели (см. табл. 1).

Таблица 1. Параметры двухмассовой тепловой модели

$n, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	$C_S, \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	$C_R, \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	$A_{SA}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	$A_{RS}, \frac{\text{Вт}}{\text{К}}$
500	24800	23600	11,3	9,7
750	24800	23600	15,0	15,5
1000	24800	23600	16,5	25,5

Для определения потерь на гистерезис и вихревые токи, которые не учитываются уравнениями обобщенной электрической машины, были произведены эксперименты на разных частотах вращения при различных нагрузках. В результате получена поверхность потерь исследуемого двигателя, которая сведена в таблицу 2.

Таблица 2. Потери на гистерезис и вихревые токи

$n, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	$M, \text{Нм}$	Потери, Вт			
		0	15	30	44,3
1000		361	501	641	790
750		278	414	525	615
500		200	275	366	455

Если на малых скоростях вращения лобовая часть становится отдельной массой, то необходимо проверить поведение алюминиевой беличьей клетки в процессе нагревания, чтобы установить, можно ли считать ротор единой эквивалентной массой. Для этого был произведен опыт нагружения двигателя, питающегося от сети частотой 50 Гц постоянным моментом. Перегрев ротора вычислялся по изменению скорости вращения ротора, которая будет изменяться при нагреве алюминиевой клетки. Теплоемкость беличьей клетки значительно меньше теплоемкости железа ротора и вала. Это означает, что если нагрев в результате выделения тепла в алюминии будет происходить как в двухмассовой схеме, то график изменения скорости будет иметь две постоянные времени. На рис. 9 представлен график изменения скорости во времени, из которого следует, что для данного эксперимента ротор можно считать единой тепловой массой.

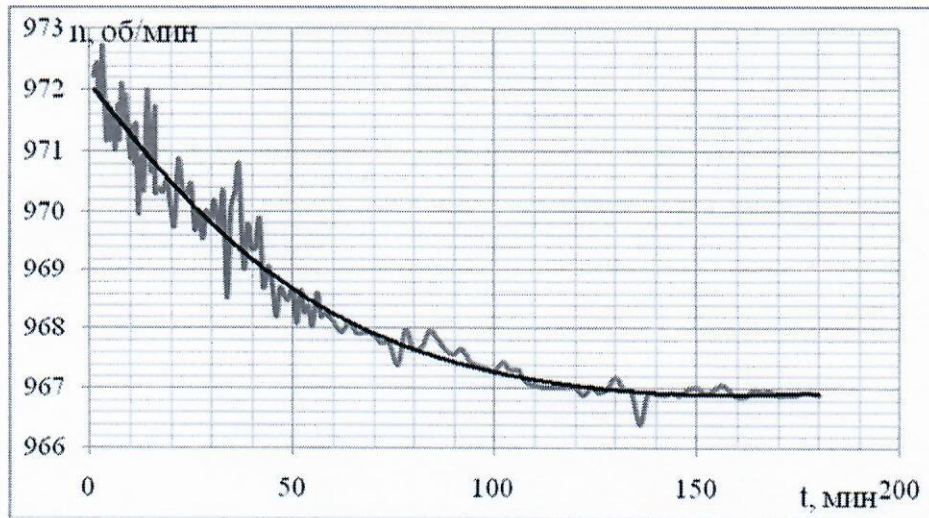


Рис. 9. График изменения скорости в результате нагрева ротора

Для частот ниже 500 об/мин можно рекомендовать использовать трехмассовую тепловую модель, однако для определения параметров этой модели оказывается недостаточно измерения температуры в одной точке, так как достаточно хорошее совпадение модели с экспериментальными данными от одного датчика температуры можно получить в широком диапазоне изменения параметров модели.

В пятой главе представлена методика оценки теплового состояния асинхронного электродвигателя с использованием аппарата обобщенной электромеханической машины и двухмассовой тепловой модели.

Параметры схемы замещения асинхронного двигателя считаем известными, так как их определение не входит в задачи данной работы. Они могут быть определены экспериментально различными методами, а в данной работе была использована функция автоматического определения параметров, встроенная в преобразователь частоты ACS880 фирмы ABB. По измеренным токам и заданным напряжениям с помощью уравнений электромагнитных процессов статорной цепи асинхронного двигателя

$$\left. \begin{aligned} u_{sx} &= i_{sx} R_s + \frac{d\psi_{sx}}{dt} - \omega_0 \psi_{sy}; \\ u_{sy} &= i_{sy} R_s + \frac{d\psi_{sy}}{dt} + \omega_0 \psi_{sx}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

пренебрегая переходными процессами, вычисляется потокосцепление статора:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{sy} &= -\frac{u_{sx} - i_{sx}R_s}{\omega_0}; \\ \psi_{sx} &= \frac{u_{sy} - i_{sy}R_s}{\omega_0}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Затем, по уравнениям потокосцеплений

$$\left. \begin{aligned} \psi_{sx} &= L_s i_{sx} + L_m i_{rx}; \\ \psi_{sy} &= L_s i_{sy} + L_m i_{ry}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

вычисляются токи роторной цепи:

$$\left. \begin{aligned} i_{rx} &= \frac{\psi_{sx} - L_s i_{sx}}{L_m}; \\ i_{ry} &= \frac{\psi_{sy} - L_s i_{sy}}{L_m}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Это позволяет по измеренным токам статора и вычисленным токам ротора и известным активным сопротивлениям статорной и роторной цепей получить оценку мгновенных тепловых потерь в массах статора:

$$\Delta P_s = \frac{3}{2} (i_{sx}^2 R_s + i_{sy}^2 R_s) + \Delta P_{iron}, \quad (11)$$

где ΔP_{iron} — потери на гистерезис и вихревые токи, и потери в роторе

$$\Delta P_r = \frac{3}{2} (i_{rx}^2 R_r + i_{ry}^2 R_r). \quad (12)$$

Потери в стали для роторной цепи не учитываются из-за малой частоты токов ротора.

Затем по уравнениям двухмассовой тепловой модели асинхронного двигателя рассчитываются перегрев двигателя, в зависимости от которого корректируются значения сопротивлений в уравнениях электромеханической машины и расчета потерь.

Далее в пятой главе представлена программная реализация алгоритма расчета теплового состояния электродвигателя в составе скалярной системы управления. Также в пятой главе представлены результаты проверки методики оценки теплового состояния при отработке заданной тахограммы и нагрузочной диаграммы работы электропривода.

На ПЧ «Универс» со свободно-конфигурируемой системой управления была собрана схема, выделяющая активную и реактивную составляющую тока статора. ПЧ питает исследуемый асинхронный двигатель. В качестве нагрузки используется двигатель с фазным ротором, включенный в режим динамического торможения с регулированием момента сопротивления изменением тока статорной обмотки с помощью тиристорного выпрямителя.

Для заданной тахограммы и нагрузочной диаграммы экспериментально получен график изменения температуры лобовой части статорной обмотки, представленный на рис. 10.

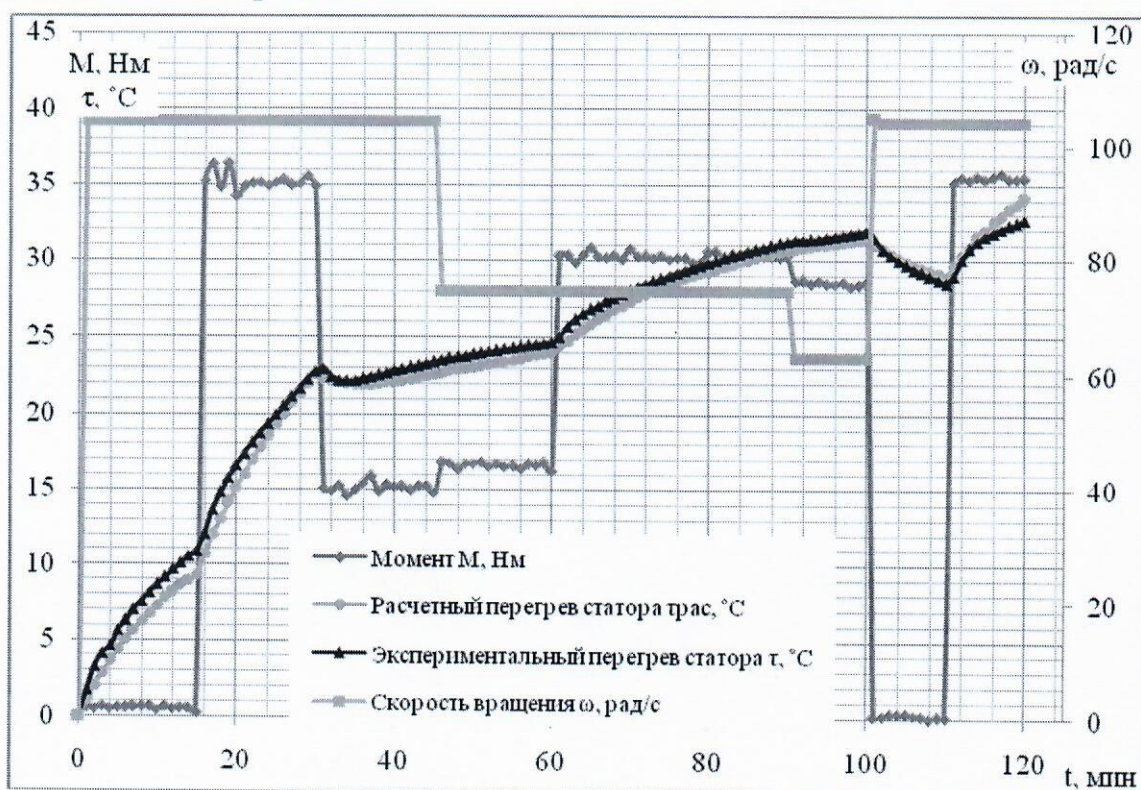


Рис. 10. Тахограмма и нагрузочная диаграмма работы электропривода и экспериментальные и модельные значения перегревов лобовой части обмотки статора

Для методики расчета теплового состояния электродвигателя по измеренным токам и напряжениям получен график перегрева. Аналогично проведен расчет работы электропривода в разомкнутой системе скалярного управления при заданных управляющих и возмущающих воздействиях с вычислением температуры лобовой части статорной обмотки.

Представленные графики показывают адекватность разработанной методики и применимость двухмассовой модели для оценки теплового состояния асинхронного частотно-регулируемого электродвигателя.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана методика экспериментального определения параметров двухмассовой тепловой модели асинхронного электродвигателя с переменными коэффициентами теплопередачи и учетом потерь в подшипниках.

2. Экспериментально получены параметры двухмассовой тепловой модели и показано преимущество двухмассовой модели в точности воспроизведения поведения объекта.

3. Для электродвигателя с датчиком температуры, встроенным в лобовую часть обмотки статора, определен диапазон скоростей электропривода, когда двухмассовая модель адекватно описывает поведение объекта.

4. Показано, что для низких скоростей вращения желательно применение трехмассовой модели с выделением отдельной массы лобовых частей обмотки для исключения ее перегрева из-за малой постоянной времени. Экспериментально подтверждено, что ротор, состоящий из алюминиевой беличьей клетки и стали можно считать одномассовым элементом в составе двигателя.

5. Разработана и экспериментально проверена методика оценки теплового состояния электродвигателя в системе частотного регулирования при обработке заданной тахограммы и нагрузочной диаграммы для организации алгоритма защиты электродвигателя, который может быть встроен в систему управления преобразователя частоты. Разработанная тепловая модель внедрена в системы управления преобразователей частоты «Универсал» и «АРДН-3».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Speed estimation algorithm with specified bandwidth for incremental position encoder, A Anuchin, A Dianov, D Shpak, V Astakhova, K Fedorova, 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2016 (ME), pp 1-6

2. Insulation fault detection and localisation in electric and hybrid electric vehicles, Alecksey Anuchin, George Belyakov, Ksenya Fedorova, Yuriy Vagapov, 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2016), pp 1-3 (DOI: 10.1109/UPEC.2016.8114066)

3. A Two-mass Thermal Model of Induction Motor, A.S. Anuchin, K.G. Fedorova, Russian Electrical Engineering, 2014, Vol. 85, Issue 2, pp. 83-86 (DOI: 10.3103/S1068371214020035) (Анучин А.С., Федорова К.Г. Двухмассо-

вая тепловая модель асинхронного двигателя, Электротехника, Знак, Москва, 2014, №2, С. 21-25)

4. Анучин А.С., Федорова К.Г. Использование двухмассовой тепловой модели для выбора асинхронного двигателя, Вестник ИГЭУ, №3, 2013 г., Иваново, С. 47-50

5. Анучин А.С., Федорова К.Г. Двухмассовая тепловая модель для энергоэффективного выбора асинхронного двигателя, Тез.докл. VII Международная (XVIII Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу, Иваново, 02 – 04 октября 2012 г. С. 179-182

6. Федорова К.Г., Структура тепловой модели асинхронного двигателя, применимая для численных методов, Тез.докл. XIX международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». –М.: Издательский дом МЭИ. 2013. –С. 278.

7. Федорова К.Г., Компьютерная поддержка выбора асинхронного электропривода общепромышленного назначения, Тез.докл. XVII международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». –М.: Издательский дом МЭИ. 2011. –С. 175-176.