

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

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»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., профессор В.Ф. Козаченко

Москва, 2018

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Обзор существующих тепловых моделей для частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя	11
1.1 Одномассовая тепловая модель	11
1.2 Тепловая схема замещения (многомассовая тепловая модель)	13
1.3 Двухмассовая тепловая модель	18
1.4 Описание предложенной тепловой двухмассовой модели асинхронного двигателя	23
Результаты и выводы	26
Глава 2. Методы экспериментального определения параметров двухмассовой тепловой модели	28
2.1 Экспериментальное определение потерь в подшипниках	28
2.2 Определение коэффициента теплоотдачи статора в окружающую среду	30
2.3 Определение теплоемкостей статора и ротора и коэффициента теплоотдачи между статором и ротором	34
Результаты и выводы	40
Глава 3. Экспериментальные исследования по определению параметров тепловой модели	41
3.1 Описание экспериментальной установки	41
3.2 Калибровка теплоизоляционной рубашки для определения потерь в подшипниках	47
3.3 Снятие зависимости потерь в подшипниках двигателя от скорости вращения	49
3.4 Определение параметров тепловой модели	51
Результаты и выводы	58
Глава 4. Тепловые эксперименты для электропривода с датчиком температуры в лобовой части обмотки статора	59

4.1 Описание экспериментальной установки	59
4.2 Результаты тепловых экспериментов	66
4.3 Определение потерь на гистерезис и вихревые токи	77
4.4 Определение числа масс роторной цепи	88
Результаты и выводы	91
Глава 5. Методика оценки теплового состояния электропривода с асинхронным электродвигателем в процессе работы для защиты по нагреву.....	93
5.1 Методика оценки теплового состояния электропривода с асинхронным электродвигателем	96
5.2 Программная реализация алгоритма расчета теплового состояния электродвигателя в составе электропривода со скалярной системой управления	100
5.3 Проверка адекватности методики	103
Результаты и выводы	107
Заключение.....	108
Библиографический список.....	110
Приложение А.....	116
Приложение Б.....	119
Приложение В.....	146

Введение

На сегодняшний день асинхронные электроприводы потребляют около 60% всей электроэнергии [1]. Эксплуатация электроприводов в России и Европе осуществляется с разной степенью нагруженности. Коэффициент использования в Европе принимается равным $0,6 \div 0,7$, а в России он равен $0,3 \div 0,4$. Это ведет к увеличению потерь и, следовательно, к снижению КПД [1-3].

Сегодня большая часть вводимых в эксплуатацию электроприводов с асинхронным электродвигателем являются частотно-регулируемыми [4]. Основными проблемами в плане надежности для этого современного электропривода является выбор мощности в процессе проектирования и его тепловая защита в процессе работы [1, 2].

Современные преобразователи частоты отечественных и зарубежных фирм имеют встроенную времятоковую защиту, обеспечивающую отключение двигателя в случае его перегрева в результате перегрузки или неправильной настройки законов частотного регулирования. В известных (описанных в литературе) отечественных решениях [1, 5-10] тепловая модель сводится к апериодическому звену, на вход которого подается квадратичное значение тока, нормированное относительно номинального значения. Апериодическое звено может менять постоянную времени в зависимости от выходной частоты, чтобы правильно отражать изменение теплоотдачи, которая связана с изменением частоты вращения самовентилируемого двигателя. В зарубежных преобразователях частоты известных фирм применяются решения, которые по внешним признакам оперируют более точной моделью, однако описание моделей отсутствует в открытой литературе, так как является «ноу-хау» компаний.

Известные методы косвенной проверки двигателя по нагреву при выборе его мощности, такие как метод эквивалентного тока или момента [1], сильно устарели и не подходят для частотно-регулируемого асинхронного электропривода. Это связано с непостоянством потока электродвигателя и теплового сопротивления от электродвигателя к окружающей среде вследствие изменения скорости вращения и эффективности работы самовентиляции.

Данная проблема не может быть решена стандартными методами, такими как применение времятоковых реле. Поэтому в современные электродвигатели в качестве опций встраивают термосопротивления или биметаллические тепловые реле [10]. Альтернативой аппаратным защитам является программная оценка теплового состояния электродвигателя, которая встраивается непосредственно в систему управления преобразователя частоты, входящего в состав комплектного электропривода.

Учет тепловых потерь, нагрева частей электродвигателя можно выполнять по электрической модели электропривода и тепловой модели электродвигателя 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 его защиты от перегрева. Развитие вычислительных возможностей микроконтроллеров систем управления электроприводов 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 электродвигателей в составе общепромышленного частотно-регулируемого электропривода 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, подходящей для тепловой защиты асинхронного 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 учебно-консультационного центра «АББ – МЭИ». А также 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 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, применяемая для тепловой защиты средствами системы управления электропривода, отличающаяся большей точностью от известных существующих методик.

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 проводить численное моделирование тепловых процессов при заданном способе регулирования и текущих параметрах работы электропривода для защиты от перегрева средствами системы управления преобразователя частоты;
- разработанная методика оценки теплового состояния электродвигателя применима для интеграции в программное обеспечение преобразователей частоты для организации тепловой защиты без использования датчика температуры;
- экспериментально подтверждена возможность применения двухмассовой тепловой модели на высоких скоростях вращения и необходимость применения более сложной трехмассовой модели на низких скоростях.

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 UPES-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, библиографического списка и 3 приложений. Количество страниц — 147, иллюстраций — 56, число наименований использованной литературы — 58.

В *первой главе* представлен обзор литературы и кратко описаны основные виды существующих тепловых моделей асинхронных электродвигателей:

- одномассовая;
- многомассовая;
- двухмассовая.

Указаны их достоинства и недостатки. Предложена и обоснована оптимизированная тепловая модель асинхронного электродвигателя, пригодная для численного моделирования тепловых процессов при работе двигателя в составе частотно-регулируемого электропривода.

Во *второй главе* рассмотрена методика экспериментального определения параметров двухмассовой модели.

Предложены и описаны методики экспериментального определения следующих параметров асинхронного электродвигателя:

- коэффициента теплоотдачи статора в окружающую среду с теплоизоляционной рубашкой и потерь в подшипниках в зависимости от скорости вращения двигателя;
- коэффициента теплоотдачи статора в окружающую среду в зависимости от скорости вращения двигателя;
- теплоемкостей статора и ротора и коэффициента теплоотдачи между статором и ротором методом наименьших квадратов.

Представлена схема питания асинхронного электродвигателя от преобразователя частоты, при которой потери в роторе близки к нулю.

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

Дано описание экспериментальной установки для проведения тепловых испытаний на базе лаборатории «Энергосберегающий электропривод» кафедры АЭП. Представлены кривые нагрева электродвигателя на разных скоростях, график изменения потерь в подшипниках, а также результаты определения параметров для двух- и одномассовых моделей двигателя, которые показывают преимущества использования двухмассовой модели.

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

Дано описание экспериментальной установки для проведения тепловых испытаний на базе лаборатории электропривода учебно-консультационного центра «АББ – МЭИ». Представлены графики изменения температуры лобовой части обмотки исследуемого двигателя во времени для частот вращения 0, 250, 500, 750 и 1000 об/мин, которые с учетом изменения температуры окружающей среды были пересчитаны в перегрев. Описаны методики определения потерь на гистерезис и вихревые токи и определения числа тепловых масс роторной цепи.

В *пятой главе* представлена методика оценки теплового состояния частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя с использованием аппарата обобщенной электромеханической машины и двухмассовой тепловой модели. Представлена программная реализация алгоритма расчета теплового состояния электродвигателя в составе скалярной системы управления электропривода.

Также в пятой главе представлены результаты проверки методики оценки теплового состояния при обработке заданной тахограммы и нагрузочной диаграммы работы электропривода. Приведены экспериментальные данные изменения температуры лобовой части статорной обмотки. Для представленной методики расчета теплового состояния электродвигателя по измеренным токам и напряжениям проведен расчет работы электропривода в разомкнутой системе скалярного управления при заданных управляющих и возмущающих воздействиях с вычислением температуры статорной обмотки. Проведено сопоставление экспериментальных и расчетных данных. Проведено сравнение результатов

экспериментов и нового метода с применяемым в настоящее время в системах управления преобразователей частоты серии «Универсал» и «Универс», которое показало преимущество разработанной методики по сравнению с применяемыми.

В заключении обобщены основные результаты работы.

Глава 1. Обзор существующих тепловых моделей для частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя

На сегодняшний день в изученной литературе описаны как простые тепловые модели асинхронных электрических двигателей, которые дают только примерное представление о нагреве двигателя, так и очень сложные, где необходимо знать специфические параметры, которые зачастую известны только заводам-изготовителям.

При частотном регулировании электродвигатель, как правило, эксплуатируется при переменных потоке, теплоотдаче и соотношениях потерь в статорной и роторной цепях. Вместе с тем, наиболее критичной к нагреву частью асинхронного электродвигателя является изоляция обмотки статора [11]. По данным [12] доля отказов по причине повреждения обмоток для асинхронных электродвигателей мощностью более 5 кВт составляет 85–95%.

1.1 Одномассовая тепловая модель

В основу простейшей тепловой модели положено уравнение теплового баланса [1, 13]. При построении данной модели делаются следующие допущения – электродвигатель представляется как однородная масса с равномерно распределенными источниками тепла, с бесконечной внутренней теплопроводностью, с теплоотдачей, пропорциональной разности температуры двигателя и окружающей среды.

Уравнение теплового баланса для данной тепловой модели представлено следующим образом [1]:

$$\Delta P dt = A \tau dt + C d\tau, \quad (1.1)$$

где ΔP – мощность потерь,

A – коэффициент теплоотдачи,

C – теплоемкость,

$\tau = \theta_{\text{дв}} - \theta_{\text{oc}}$ – разность температуры двигателя и окружающей среды.

Разделив (1.1) на $A d\tau$, получим

$$\tau + T_T \frac{d\tau}{dt} = \tau_{\text{кон}}, \quad (1.2)$$

где $T_T = C / A$ – тепловая постоянная нагрева,

$\tau_{\text{кон}} = \Delta P / A$ – установившееся значение перегрева.

Полученное выражение соответствует инерционному звену. При постоянных потерях в двигателе и постоянной теплоотдаче во внешнюю среду превышение температуры изменяется по экспоненциальному закону (рисунок 1.1):

$$\tau = (\tau_{\text{нач}} - \tau_{\text{кон}}) e^{-t/T_T} + \tau_{\text{кон}}, \quad (1.3)$$

где $\tau_{\text{нач}}$ – перегрев в начальный момент времени.

Данным уравнениям соответствует структурная схема динамической тепловой модели, приведенная на рисунке 1.2. Тепловая модель представляется в виде аperiodического звена, на вход которого подается мощность потерь, и на выходе которого — перегрев.

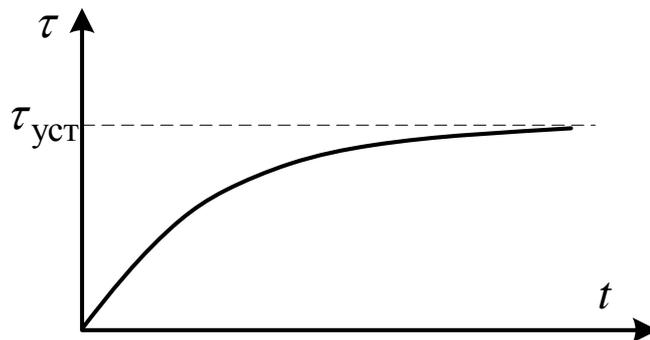


Рис. 1.1 – Изменение перегрева для одномассовой тепловой модели

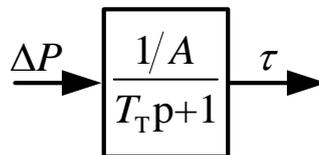


Рис. 1.2 – Структурная схема динамической тепловой модели

В классических косвенных методах проверки электродвигателя по нагреву (метод средних потерь и метод эквивалентных величин) используется именно данная тепловая модель электродвигателя.

К достоинствам одномассовой модели можно отнести ее простоту и надежность оценки теплового состояния двигателя при его работе с постоянной мощностью (потери в двигателе ΔP и тепловой поток в двигателе постоянны) и неизменной температурой окружающей среды. Параметры такой модели можно косвенно рассчитать из паспортных данных электрического двигателя.

Одномассовая модель обладает следующими недостатками:

- модель рассчитана на неизменное соотношение потерь в статоре и роторе;
- очень грубые допущения, применяемые для составления одномассовой модели, могут стать причиной ошибки в расчетах оценки теплового состояния;
- модель плохо применима для большинства частотно-регулируемых применений, где регулирование скорости осуществляется в широком диапазоне с нелинейной настройкой кривой напряжения в функции частоты;

1.2 Тепловая схема замещения (многомассовая тепловая модель)

В самом общем случае электрический двигатель представляет собой совокупность элементов (обмотки, магнитопровод и механические узлы), каждый из которых имеет свой источник тепла, имеют различную теплоемкость, с различной теплоотдачей и нагреваются до различных температур [14].

При построении такой тепловой модели необходимо соблюдать допущения, применяемые и для одномассовой тепловой модели: каждый выбранный элемент электродвигателя является однородным телом с равномерно распределенными источниками тепла и с бесконечной внутренней теплопроводностью. Вся тепловая система машины заменяется эквивалентной электрической системой. Создание ее основано на аналогии тепловых потоков и электрических токов, тепловых и электрических сопротивлений.

$$Q = \Delta\tau / R_T, \quad (1.4)$$

$$I = \Delta U / R_{\Sigma}, \quad (1.5)$$

где Q – тепловой поток, эквивалентный току I ;

$\Delta\tau$ – перепад температур, эквивалентный ΔU – разности потенциалов;

R_T – тепловое сопротивление, эквивалентное электрическому сопротивлению R_{Σ} .

Делается замена всех участков двигателя (однородных в тепловом отношении) эквивалентными тепловыми сопротивлениями [15] и для них записывается система уравнений теплового баланса. Данный способ чаще всего используется в проектировании.

Примеры таких схем замещения представлены на рисунках 1.3 и 1.4. В первом случае [16] статор разбивают на три однородных в тепловом отношении тела, являющихся источниками тепла:

- пазовая и лобовая части обмотки с потерями в них P_L, P_{Π} ;
- стальной сердечник с потерями P_C .

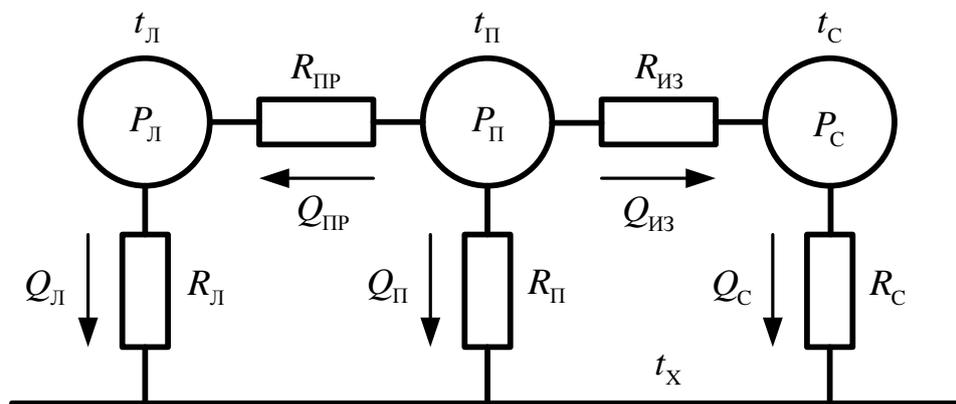


Рис. 1.3 – Схема замещения статора для трех источников тепла

На рисунке 1.3 показаны средние температуры источников тепла (пазовой части обмотки t_{Π} , лобовых частей t_L и сердечника статора t_C), тепловые сопротивления (лобовых частей обмотки R_L , пазовой части R_{Π} и сердечника R_C , между пазовой и лобовой частями обмотки $R_{\Pi P}$, между пазовой частью обмотки и сердечником $R_{\Pi C}$), тепловые потоки в двигателе (Q_L , $Q_{\Pi P}$, Q_{Π} , $Q_{\Pi C}$, Q_C) и температура окружающей среды t_x .

Во втором случае [17] асинхронный двигатель рассматривается как система из следующих тепловых однородных тел: ротор, воздушный зазор, статор, корпус и внутренняя охлаждающая среда, внешняя охлаждающая среда.

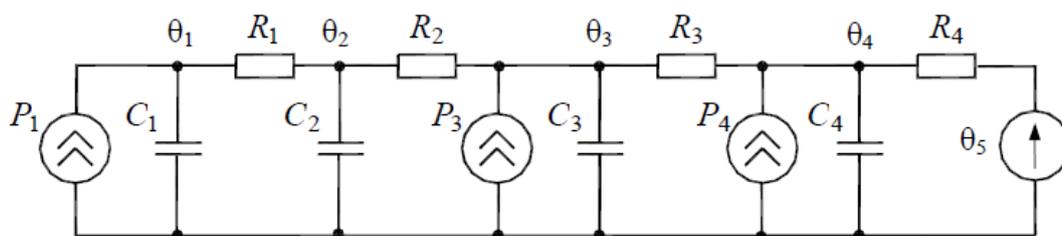


Рис. 1.4 – Тепловая схема замещения асинхронного двигателя для четырех элементов

На рисунке 1.4 приняты следующие обозначения: $\theta_1 - \theta_5$ – температуры соответствующих однородных тел, $R_1 - R_4$ – тепловые сопротивления соответствующих однородных тел, $C_1 - C_4$ – теплоемкости соответствующих однородных тел, а P_1 – потери активной мощности в роторе, P_3 – в статоре, P_4 – в корпусе.

Например, в [18] представлена тепловая схема замещения асинхронного двигателя, содержащая пять активных элементов: корпус двигателя, ротор, пазовую часть обмотки статора, сталь статора и лобовую часть обмотки статора. Авторы предлагают использовать данную тепловую модель для релейной защиты от перегрузки асинхронного двигателя. Для каждого элемента составляется уравнение теплового баланса, учитывающее тепловые свойства каждого элемента. Решив систему таких уравнений, получают значения температур выбранных элементов машины.

На рисунке 1.5 изображена в общем виде такая эквивалентная тепловая схема асинхронного двигателя с привязкой параметров к основным элементам машины.

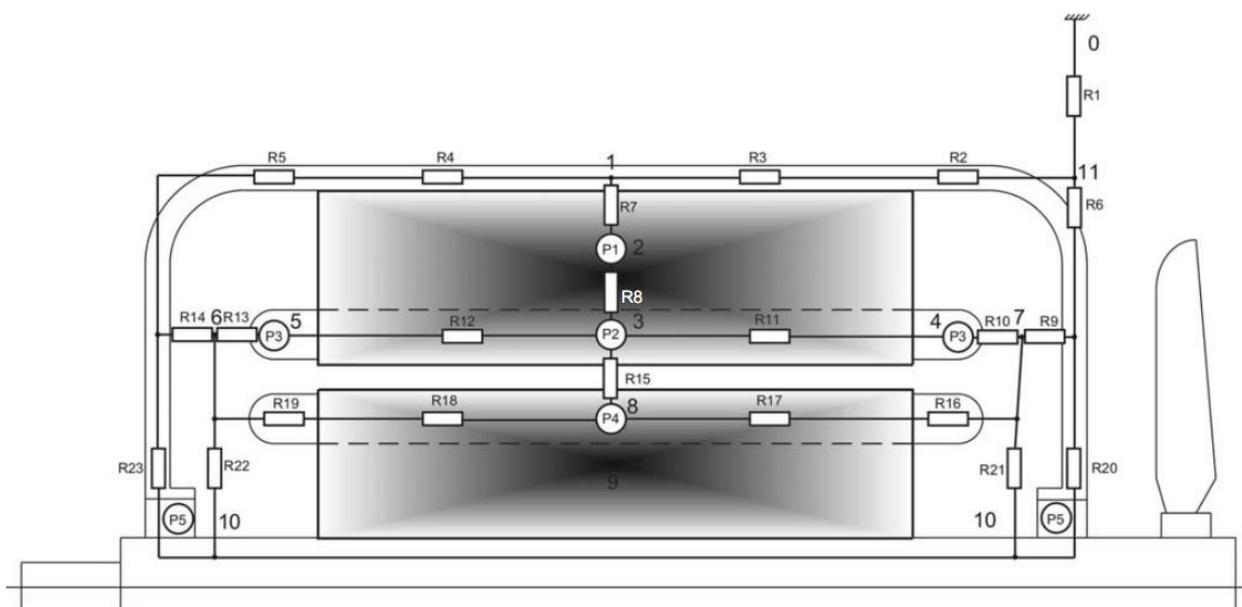


Рис. 1.5 – Эквивалентная тепловая схема асинхронного двигателя

Для подтверждения точности расчета температуры с помощью многомассовой модели в статье представлены полученная в ходе эксперимента кривая нагрева обмотки статора и кривые нагрева обмоток для одноступенчатой и пятимассовой тепловой модели в повторно-кратковременном режиме работы (рисунок 1.6).

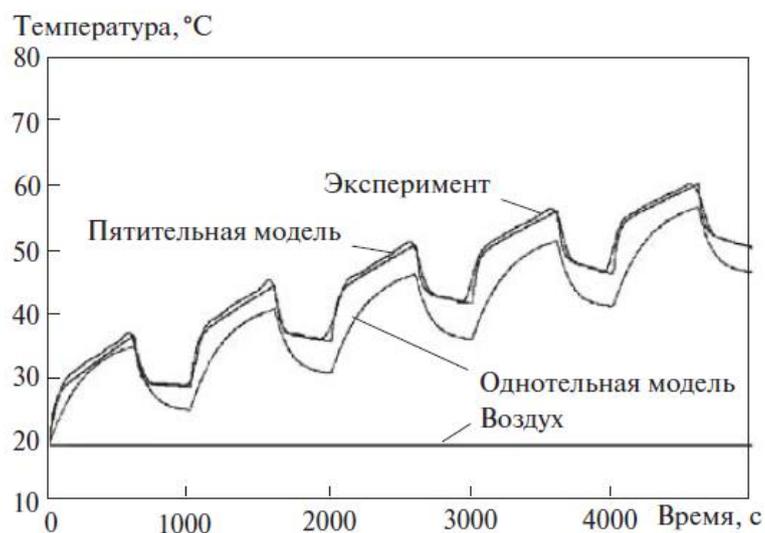


Рис. 1.6 – Кривая нагрева обмотки статора АД и расчётные кривые для повторно-кратковременного режима работы

В [19] для частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя рассматриваются нестационарные тепловые состояния, которые возможны при

работе двигателя в режимах S2 – S8. Тепловой процесс описывается системой обыкновенных линейных дифференциальных уравнений первого порядка, количество которых зависит от количества тел, на которые разбивается асинхронный электродвигатель. Для решения данных уравнений необходимо знать (или экспериментально найти) следующие параметры: теплоемкость каждого выбранного узла (через удельную теплоемкость материала, из которого сделан узел, и его массу), тепловые проводимости выбранного узла и от каждого соседнего узла к выбранному, мощность тепловыделения в выбранном узле. В работе представлена схема разбиения двигателя на шестнадцать элементов (рисунок 1.7).

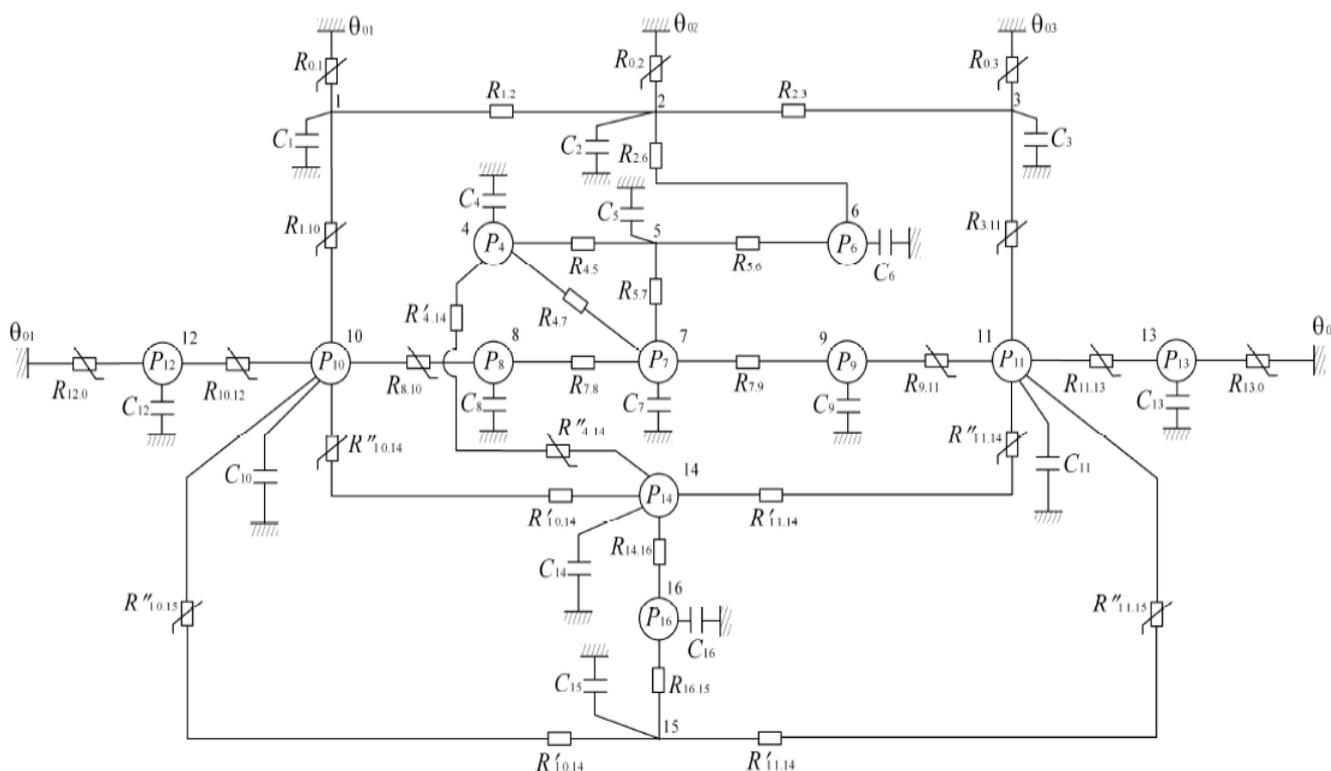


Рис. 1.7 – Динамическая эквивалентная тепловая схема частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя

Достоинством многомассовой модели является точное прогнозирование температуры в любой точке электродвигателя и возможность учитывать взаимное влияние всех элементов машины на тепловое состояние.

Недостатки такой модели следующие:

– для расчета состояния модели необходимо знать специфические параметры электродвигателей и полные данные по используемым материалам (массы меди, стали и прочее), которые обычно известны только заводам-изготовителям;

– необходимо с высокой точностью измерять температуру в различных точках двигателя с помощью внедренных датчиков температуры;

– при большом числе компонентов очень сложно установить параметры такой модели экспериментальным или расчетным путем в режиме реального времени;

– решение системы уравнений теплового баланса для каждого элемента схемы асинхронного двигателя – сложная задача и занимает достаточно большое время.

1.3 Двухмассовая тепловая модель

Расчетная практика и экспериментальные исследования показывают, что удовлетворительные модели нагрева электрических машин для предварительного выбора электродвигателя и проверки их по тепловому режиму можно получить, приняв некоторые упрощения, не искажающие физическую картину процессов нагрева [20].

Для этого случая двигатель представляется совокупностью двух однородных элементов с бесконечно большой внутренней теплопроводностью. Это позволяет существенно упростить расчеты. Может показаться, что упрощение расчетов ухудшает точность оценки температур и в конечном итоге защиты электродвигателя, однако это так, только при условии, что все параметры более сложной системы уравнений описания теплового состояния машины известны. Упрощение позволяет прийти к такому числу параметров, определить значения которых становится возможным за минимальное разумное число экспериментов и/или расчетов. В литературе предлагаются следующие способы разделения на массы.

1.3.1 Сталь статора и ротора, обмотки статора и ротора

В [21] предлагается разделять электрическую машину на две массы, одна из которых представляет обмотки двигателя с теплоемкостью C_1 , а другая – сталь корпуса и магнитопроводов машины с теплоемкостью C_2 . Принимается, что в любой момент времени температура в пределах каждой из масс одинаковая, то есть теплопроводность меди и стали бесконечна. Разность температур между этими двумя массами определяется наличием теплового сопротивления изоляции между медью и сталью.

Структурная схема для данного разделения на массы представлена на рисунке 1.8.

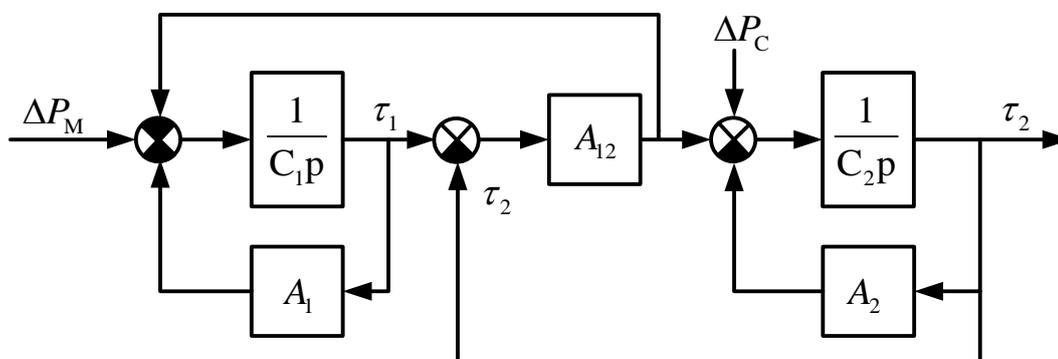


Рис. 1.8 – Структурная схема двухступенчатой тепловой модели двигателя

На рисунке 1.8 приняты следующие обозначения: ΔP_M – потери в меди, ΔP_C – потери в стали, C_1 – теплоемкость первой массы, C_2 – теплоемкость второй массы, τ_1, τ_2 – перегревы первой и второй масс соответственно, A_1 – коэффициент теплоотдачи первой массы, A_2 – коэффициент теплоотдачи второй массы, A_{12} – коэффициент теплопередачи между медью и сталью.

Для такого разделения записывается система из двух уравнений, описывающих тепловое состояние модели. Решением для такой системы являются уравнения для перегрева первой и второй масс. Варьируя соотношения входящих в полученные уравнения параметров, можно провести анализ установившихся тепловых режимов для двигателей с разными типами систем охлаждения и при различных соотношениях потерь, вызывающих нагрев масс.

Примеры графиков температуры модели для различных ее параметров показаны на рисунке 1.9.

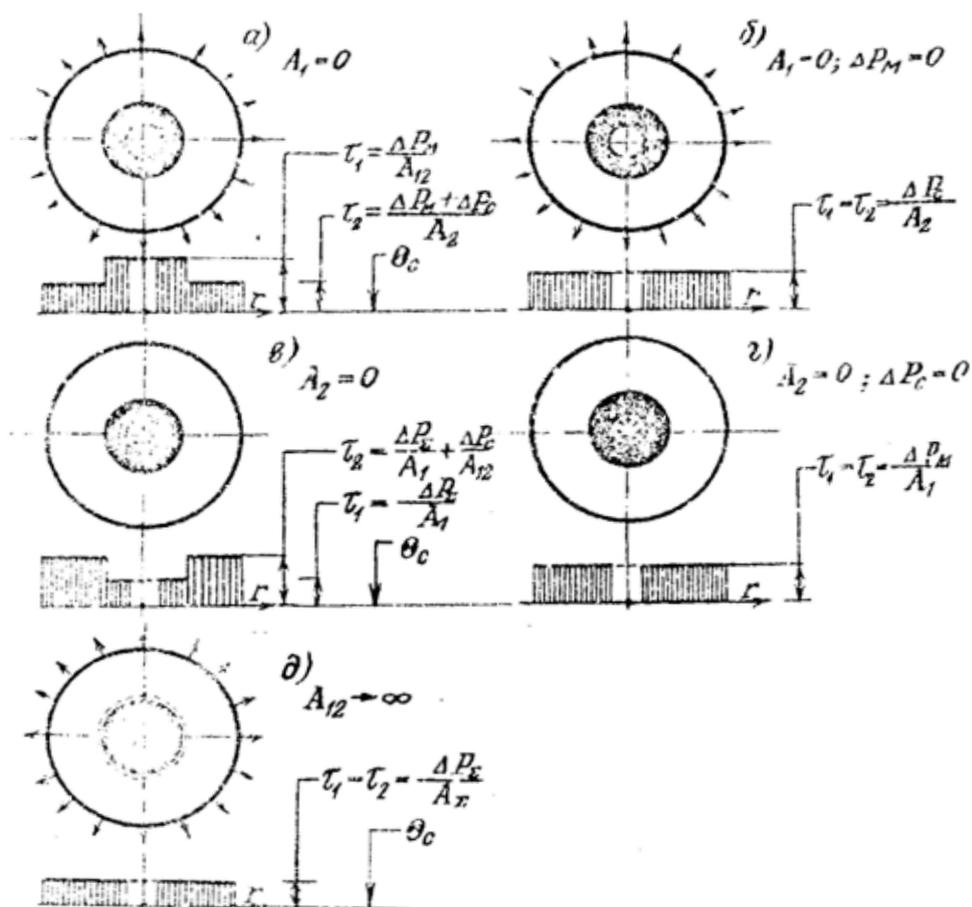


Рис. 1.9 – Примеры графиков температуры модели

1.3.2 Обмотки и сталь статора, обмотки и сталь ротора

В [22] предлагается модель с разделением на массу статора и ротора, которая является более подходящей для частотно-регулируемого привода.

В отличие от одномассовой тепловой модели данная модель включает в себя потери ротора и теплообмен между ротором и статором.

Такая тепловая модель использует сопротивления ротора в качестве показателя температуры ротора и, следовательно, тепловых условий работы двигателя, а также коррелирует температуру обмотки статора с температурой ротора путем моделирования их отношения с тепловым сопротивлением в воздушном зазоре. Она способна отслеживать температуры обмотки статора во

время работы, перегрузок, и, следовательно, обеспечивает адекватную защиту от перегрева.

Тепловая модель с сосредоточенными тепловыми емкостями и резисторами первой и второй масс, предназначенная для защиты горячей точки обмотки статора от перегрева во время работы в условиях перегрузки представлена на рисунке 1.10.

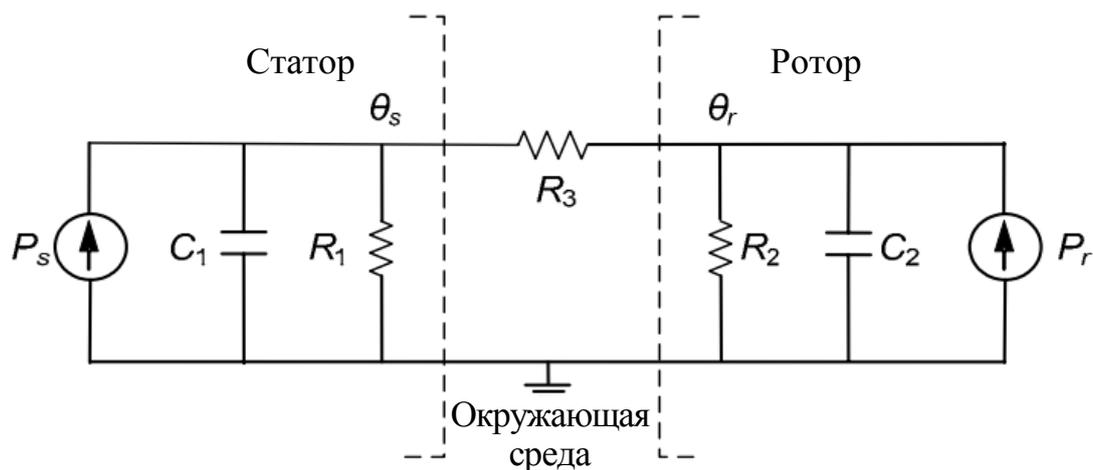


Рис. 1.10 – Тепловая модель асинхронного двигателя с сосредоточенными тепловыми емкостями и резисторами:

P_s – потери в статоре, P_r – потери в роторе; θ_s – перегрев статора относительно окружающей среды, θ_r – перегрев ротора относительно окружающей среды, C_1 – тепловая емкость статора, C_2 – тепловая емкость ротора, R_1 – тепловое сопротивление статора, R_2 – тепловое сопротивление ротора, R_3 – тепловое сопротивление, связанное с теплопередачей от ротора к статору через воздушный зазор.

Структурная схема для данного разделения на массы представлена на рисунке 1.11.

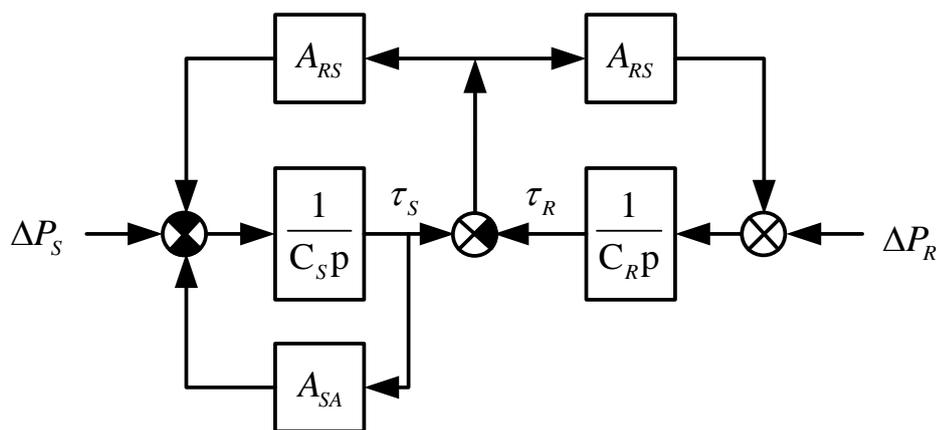


Рис. 1.11 – Структурная схема тепловой модели

На рисунке 1.11 приняты следующие обозначения: ΔP_S – потери в статоре, ΔP_R – потери в роторе, C_S – теплоемкость статора, C_R – теплоемкость ротора, τ_S, τ_R – перегревы статора и ротора соответственно, A_{SA} – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду, A_{RS} – коэффициент теплопередачи между статором и ротором.

Разные авторы придерживаются разных конечных моделей, так в [23] показана модель, где одной из масс является железо статора, а другой медь. Данная модель ориентирована на вентилируемые двигатели с постоянной скоростью вращения.

1.3.3 Обмотки статора, остальные элементы конструкции

В [24, 25] авторы используют модель, где одной из масс является обмотка статора (узел 1), а второй – остальные элементы конструкции машины (узел 2), так как с точки зрения надежности и ресурса асинхронного двигателя, наиболее значима оценка температуры обмотки статора. Схема содержит источники тепла ΔP_1 и ΔP_2 , теплоемкости узлов C_1 (для обмотки статора) и C_2 (для всех остальных частей машины) и тепловые проводимости λ_{10} и λ_{20} (от узлов 1 и 2 в окружающую среду), а также λ_{12} (между узлами 1 и 2). Процессы в такой двухмассовой термодинамической схеме описываются дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned}
 C_1 \frac{d\tau_1}{dt} + \lambda_{11}\tau_1 - \lambda_{12}\tau_2 &= \Delta P_1, \\
 C_2 \frac{d\tau_2}{dt} + \lambda_{22}\tau_2 - \lambda_{12}\tau_1 &= \Delta P_2,
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

где $\lambda_{11} = \lambda_{10} + \lambda_{12}$ и $\lambda_{22} = \lambda_{20} + \lambda_{12}$; τ_1 и τ_2 – превышения температур узлов 1 и 2 над температурой охлаждающей среды. Системе уравнений (1.6) соответствует структурная схема, показанная на рисунке 1.12.

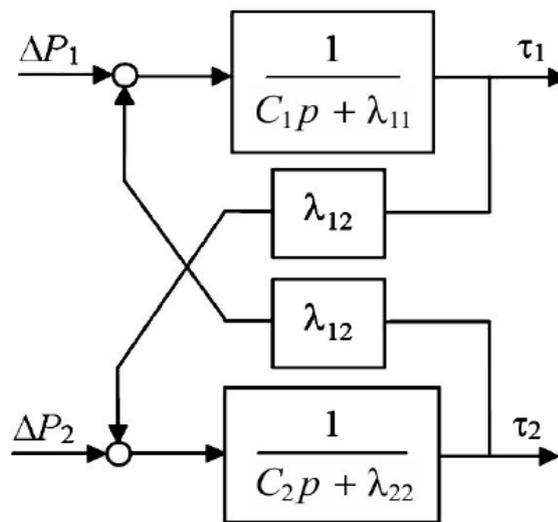


Рис. 1.12 – Структурная схема двухмассовой термодинамической модели АД

Достоинствами двухмассовой модели является то, что она подходит для уточненного анализа теплового состояния асинхронных электродвигателей, а относительную сложность расчета модели можно решить с помощью современных вычислительных средств.

Проведенный анализ существующих моделей показал, что двухмассовая модель наиболее удовлетворяет необходимым требованиям, и на ее базе была разработана уточненная тепловая модель, описанная ниже.

1.4 Описание предложенной тепловой двухмассовой модели асинхронного двигателя

Таким образом, среди двухмассовых моделей выбрана модель с разделением на массу статора и массу ротора, которая является более подходящей для

частотно-регулируемого привода [26]. С небольшими модификациями, связанными с адаптацией под переменную скорость вращения, данная модель представлена на рисунке 1.13. Она выбрана в качестве базовой модели для проведения исследований.

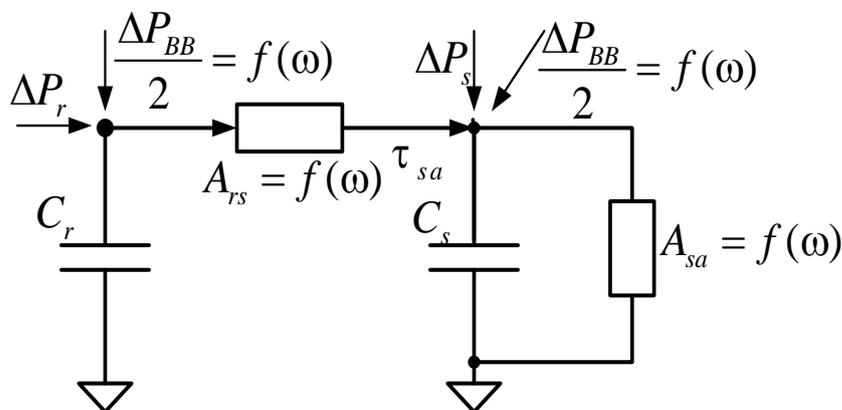


Рис. 1.13 – Двухмассовая модель асинхронного электродвигателя

Уравнения для данной двухмассовой модели:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\tau_s}{dt} &= \frac{1}{C_s} \left(\Delta P_s + \frac{\Delta P_{BB}}{2} + A_{sr}(\tau_r - \tau_s) - A_{sa}\tau_s \right); \\ \frac{d\tau_r}{dt} &= \frac{1}{C_r} \left(\Delta P_r + \frac{\Delta P_{BB}}{2} - A_{sr}(\tau_r - \tau_s) \right), \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

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».

По сравнению с обычной двухмассовой моделью, представленной в [22], параметры тепловой проводимости между статором и ротором и между статором и окружающей средой являются величинами переменными, в зависимости от скорости вращения. Действительно, самовентилируемый электродвигатель изменяет свою теплоотдачу со статора [1] 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 лопатками, расположенными на роторе. Поток воздуха, формируемый лопатками, также определяет интенсивность охлаждения лобовых частей обмотки статора.

Итак, приведенная модель имеет две однородные массы статора и ротора. Потери возникают в статоре ΔP_s и роторе ΔP_r . Кроме электрических потерь в двигателе есть механические потери в подшипниках ΔP_{BB} , которые в рамках данной модели будут разделены пополам и подведены к статору и ротору. Примем допущение, что ротор отдает энергию только на статор через зазор и имеет крайне низкую теплоотдачу вовне, минуя статор [22]. Статор и ротор обмениваются между собой теплом через теплопроводность $A_{sr}(\omega)$, которая зависит от скорости вращения, а статор связан с окружающей средой теплопроводностью $A_{sa}(\omega)$, также зависящей от скорости. Структурная схема тепловой модели представлена на рисунке 1.14.

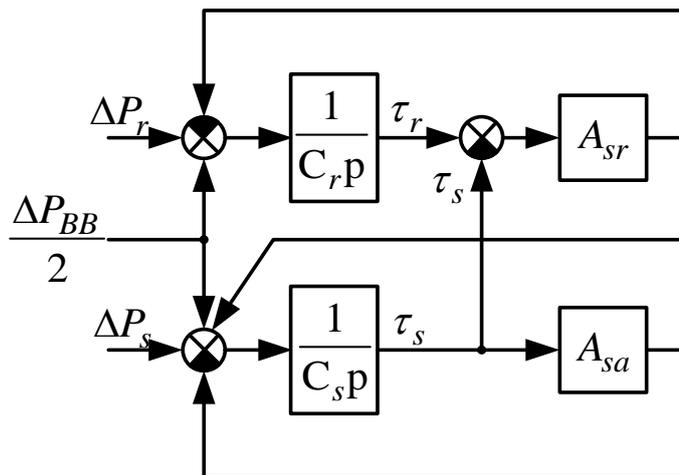


Рис. 1.14 – Структурная схема предложенной двухмассовой тепловой модели АД

Результаты и выводы:

Проведенный анализ существующей литературы показал, что на сегодняшний день одномассовая тепловая модель, использовавшаяся в классических методах проверки электродвигателя, мало применима, так как рассчитана на неизменное соотношение потерь в статоре и роторе, что не выполняется в современном частотно-регулируемом электроприводе. Одной из проблем для частотно-регулируемого электропривода становится неконтролируемый перегрев роторной цепи при изменении намагниченности электрической машины на разных скоростях вращения.

Кроме того, следует учитывать ухудшение теплоотдачи между статором и ротором из-за пониженной скорости вращения частотно-регулируемого электродвигателя, роторные лопасти на низких скоростях вращения хуже перемешивают воздух и охлаждают лобовые части обмоток статора, на пониженной скорости ухудшается теплоотдача в окружающую среду. Поэтому одномассовая модель непригодна для качественного контроля за тепловым состоянием электродвигателя для частотно-регулируемого электропривода.

В отечественной и иностранной литературе приводятся исследования многомассовых тепловых моделей [17-19, 27-30], где разделяют медь статора,

лобовые части обмоток, сами обмотки и т.д. вплоть до представления электрической машины методом конечных элементов. 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.

В общем случае в литературе показывается многомассовая модель с малым числом масс, а затем она упрощается до двухмассовой. Разные авторы придерживаются разных конечных моделей [21-25, 31, 32]. Упрощенная двухмассовая модель наиболее подходит для определения теплового состояния электрической машины из-за простоты не только ее обсчета, но и из-за простоты определения самих параметров модели, путем проведения относительно несложных экспериментов и/или расчетов.

Выбранная оптимизированная двухмассовая тепловая модель асинхронного электродвигателя пригодна для численного моделирования тепловых процессов при частотном управлении. Данная модель учитывает процесс отдельного нагрева ротора и статора, что позволяет строить защиту не только статорных, но и роторных цепей.

Глава 2. Методы экспериментального определения параметров двухмассовой тепловой модели

Одной из поставленных задач является определение параметров двухмассовой тепловой модели. Например, в [32] предложены методики расчета параметров такой тепловой модели, но в большинстве случаев необходимо знать довольно специфические параметры, такие как плотность тока, длина и площадь сечения проводников и так далее.

В данной главе рассматривается методика экспериментального определения параметров предложенной двухмассовой тепловой модели. Данная тепловая модель асинхронного электродвигателя является достаточно полной и в то же время простой, однако и для нее необходимо проведение большого числа опытов, чтобы вычислить её параметры [26, 33-36]. Для упрощения задачи разделим опыты и выделим параметры по очереди.

Статор и ротор в модели представлены равномерно нагретыми телами. Это грубое допущение, но если установить датчик температуры в конкретную точку статора и определить ее температуру в номинальном режиме работы электродвигателя, то эта точка может являться опорной для оценки перегрева всей модели. Тогда появляется номинальный перегрев статора, снятый экспериментально, и номинальный перегрев ротора, вычисленный по модели. Любое превышение температуры модели при проверке двигателя выше этих параметров по модели будет означать, что двигатель перегрет выше допустимого уровня.

2.1 Экспериментальное определение потерь в подшипниках

Для нахождения потерь в подшипниках было предложено снять с электродвигателя вентилятор и поместить двигатель в специально изготовленную рубашку из теплоизоляционного материала, чтобы ухудшить коэффициент теплоотдачи и сделать его независимым от скорости вращения. Валом двигатель соединяется с нагрузочной машиной, которая в этом опыте будет играть роль приводного двигателя. Схематичное изображение данной установки представлено

на рисунке 2.1. Наличие рубашки позволяет уменьшить коэффициент теплоотдачи и повысить чувствительность данного метода измерения потерь, так как при стандартном значении теплоотдачи изменение температуры от потерь в подшипниках будет слишком мало. Рубашка должна отделять исследуемый двигатель от нагрузочной машины, чтобы ее нагрев не вносил погрешность в экспериментальные данные.

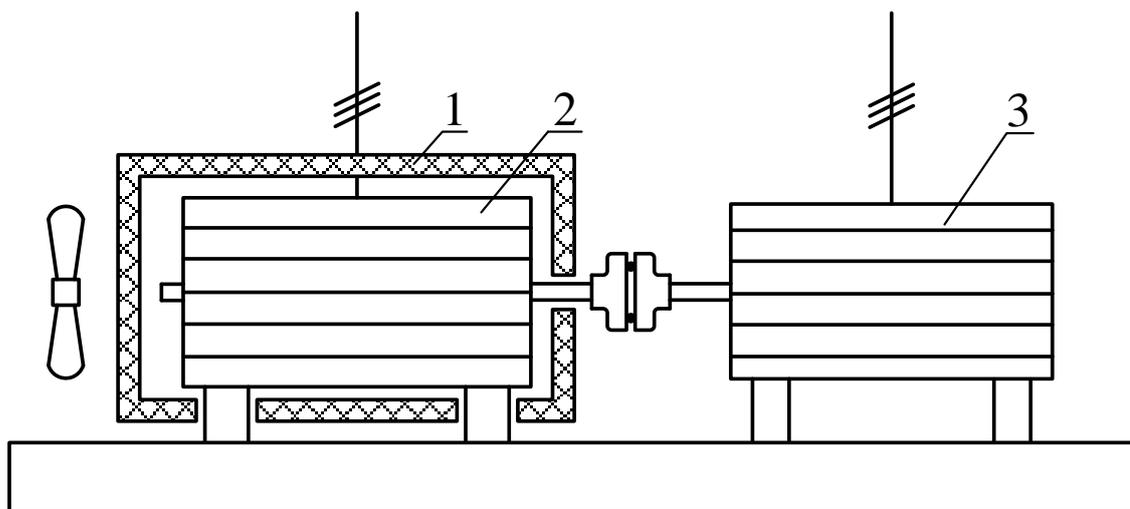


Рис. 2.1 – Схематичный внешний вид испытательной установки:
1 – теплоизоляционная рубашка, 2 – исследуемый двигатель,
3 – нагрузочная машина.

Сначала необходимо провести калибровку теплоизоляционной рубашки и измерить её тепловое сопротивление от электродвигателя в окружающую среду. Для этого к двигателю подводится мощность от внешнего источника питания постоянного тока, подключенного к статору. Двигатель при этом не вращается. С помощью измерителя температуры, выполненного из термопары и мультиметра, фиксируется процесс нагрева двигателя и установившаяся температура. Термопара должна быть расположена так, чтобы фиксировать температуру статора. Расположение термопары должно определять температуру статора, как одной массы, то есть максимально близкой к средней. Как будет показано далее, основная термопара была помещена в высверленное сквозное отверстие на глубине начала железа ярма статора.

Разделив подводимую к испытуемому электродвигателю мощность ΔP на его зафиксированный перегрев τ относительно окружающей среды, получим теплопроводность статора в окружающую среду через теплоизоляционную рубашку:

$$A_{SAshielded} = \frac{\Delta P}{\tau}. \quad (2.1)$$

Затем, после охлаждения двигателя, проводится эксперимент при выключенном двигателе. С помощью нагрузочной машины выводим двигатель на некоторую скорость вращения и снова ожидаем выхода на установившуюся температуру. Все потери в двигателе определяются механическими потерями (в основном в подшипниках и аэродинамическими), которые на разных скоростях будут определяться по формуле:

$$\Delta P_{BB}(\omega) = A_{SAshielded} \tau, \quad (2.2)$$

где ΔP_{BB} — потери в подшипниках.

Снимая установившийся перегрев во всём диапазоне рабочих скоростей вращения, получим зависимость потерь в функции скорости.

2.2 Определение коэффициента теплоотдачи статора в окружающую среду

Определение коэффициента теплоотдачи статора в окружающую среду производится на той же лабораторной установке уже 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. 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 возникают в статоре и в роторе, а также в подшипниках в зависимости от скорости вращения, методика нахождения которых описана выше.

В общем случае потери могут быть вычислены путем перемножения подводимого напряжения на ток за вычетом полезной мощности на валу. Выделить потери ротора можно, воспользовавшись датчиком скорости и момента. Они будут равны произведению момента на разность скорости холостого хода и скорости вращения, но данный способ требует использования дорогостоящего оборудования. Поэтому более целесообразно будет исключить потери в роторной цепи.

Если поставить опыт идеального холостого хода (электрическая скорость вращения двигателя совпадает со скоростью вращения поля, а амплитуда напряжения неизменна или меняется медленно), тогда потери в роторе равны нулю, а потери в статоре вычисляются перемножением питающего напряжения на ток. То есть питать статор двигателя необходимо с частотой, равной частоте вращения вала (с учетом числа пар полюсов) от нагрузочной машины. При этом в статоре возникают как омические потери, так и потери в стали по пути основного магнитного потока.

Для организации такой схемы питания асинхронного электродвигателя от преобразователя частоты было предложено использовать систему управления, построенную по функциональной схеме, представленной на рисунке 2.2.

Система управления имеет на входе задание потерь в статорной цепи. Задание, за вычетом реальных потерь, задает ток по оси d . Система работает в осях d, q . Регулятор тока РТ по оси d задает соответствующее напряжение по этой оси для создания данного тока. По оси q задается нулевое напряжение, соответственно, мощность подводится в системе только по оси d , а по оси q она равна нулю, так как напряжение тоже нулевое. Задания напряжений в осях d, q переводятся в оси α, β , а потом реализуются инвертором И. Система координат d, q вращается со скоростью ротора, поэтому скольжение в системе в статике равно нулю. Измеренные токи преобразуются из a, b, c в α, β , а затем в d, q . Ток по оси d — активный, по оси q — реактивный. Путем перемножения тока по оси

d на напряжение по оси d получается мощность потерь в статоре, которая и заводится в качестве обратной связи на регулятор мощности РМ.

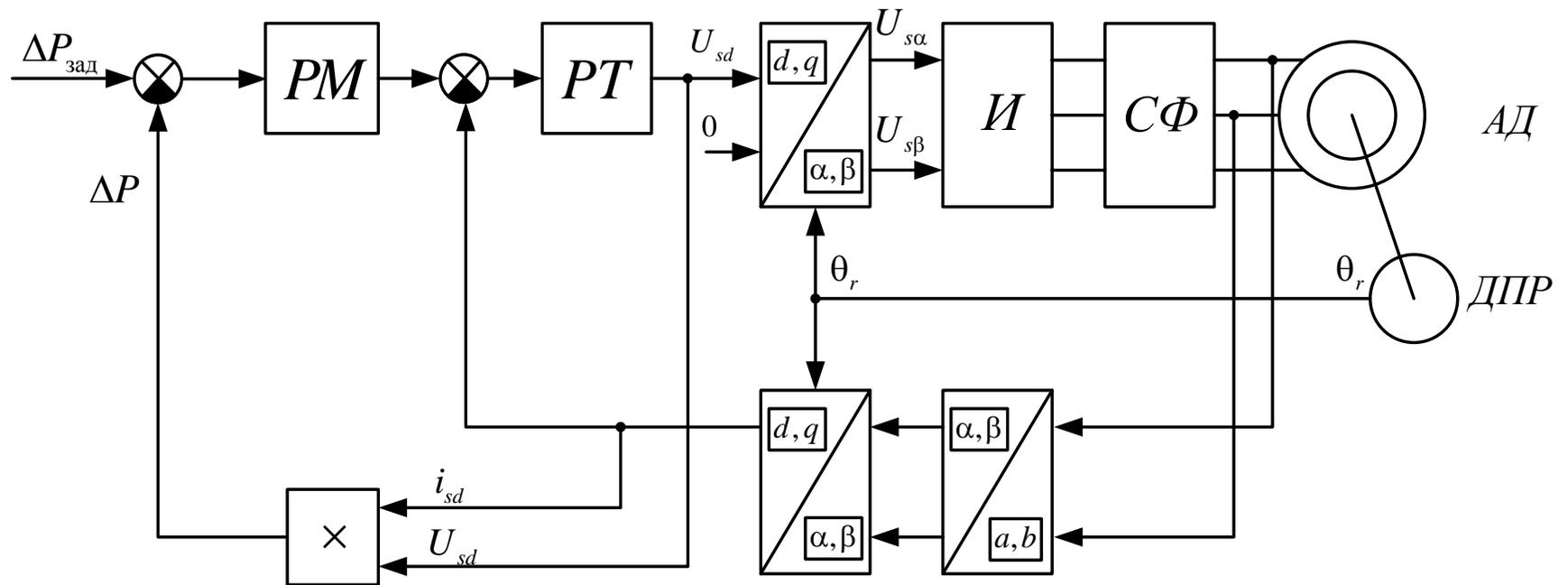


Рис. 2.2 – Функциональная схема системы управления, обеспечивающей около нулевые потери в роторной цепи

Из-за особенностей конструкции частотного преобразователя его выходное напряжение и ток имеют искаженную, несинусоидальную форму с большим количеством гармонических составляющих. Для исключения высших гармоник в процессе работы на выходе преобразователя частоты применяют синусный фильтр. За счет этого обеспечивается более эффективное сглаживание и подавление высоких частот и синусоидальная форма фазных напряжений и токов двигателя, что позволяет правильно измерять напряжение, питающее асинхронный двигатель.

Двигатель приводится во вращение от нагрузочной машины, которая работает в режиме задания скорости. 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:

$$A_{sa} = \frac{\Delta P_{\text{зад}}}{\tau_{\text{уст}}}. \quad (2.3)$$

2.3 Определение теплоемкостей статора и ротора и коэффициента теплоотдачи между статором и ротором

Для определения теплоемкостей 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 тепловой модели 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:

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} (\tau_i - \hat{\tau}_i)^2, \quad (2.4)$$

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.

На рисунке 2.3 представлен отрывок подпрограммы (основная часть текста программы приведена в Приложении 1), с помощью которой реализуется определение параметров тепловой модели.

```

while (Form1->cs<Form1->data.csMax)
{
    Form1->cr=Form1->data.crMin;
    c=0;
    while (Form1->cr<Form1->data.crMax)
    {
        Form1->ars=Form1->data.arsMin;
        a=0;
        while (Form1->ars<Form1->data.arsMax)
        {
            Form1->integ2[a][c][s]=0;
            Form1->cri[a][c][s]=Form1->cr;
            Form1->arsi[a][c][s]=Form1->ars;
            Form1->csi[a][c][s]=Form1->cs;
            Form1->ts=0;
            Form1->tr=0;
            for (int i=0; i<131; i++)
            {
                //double integr=Form1->integ2[a][c][s];
                if (MASSES!=1)
                {
                    Form1->integ2[a][c][s]+=(Form1->ts-Form1->tsm[i])*(Form1->ts-Form1->tsm[i]);
                    Form1->dts=(Form1->dp-Form1->ts*Form1->asa-(Form1->ts-Form1->tr)*Form1->ars)/Form1->cs;
                    Form1->ts=Form1->ts+Form1->dts*Form1->h;
                    Form1->dtr=(Form1->ts-Form1->tr)*Form1->ars/Form1->cr;
                    Form1->tr=Form1->tr+Form1->dtr*Form1->h;
                }
                else
                {
                    Form1->integ2[a][c][s]+=(Form1->ts-Form1->tsm[i])*(Form1->ts-Form1->tsm[i]);
                    Form1->dts=(Form1->dp-Form1->ts*Form1->asa)/Form1->cs;
                    Form1->ts=Form1->ts+Form1->dts*Form1->h;
                }
            }
            Form1->ars+=arsStep;
            a++;
        }
        Form1->cr+=crStep;
        c++;
    }
    Form1->cs+=csStep;
    s++;
}

```

Рис. 2.3 – Пример программного кода

Исходной информацией для программы являются следующие данные:

- диапазон изменения искомых величин;
- число разбиений – шаг интегрирования;
- опытные данные о процессе нагрева электродвигателя – кривая нагрева двигателя.

На начальном этапе в программе создается кубический массив возможных значений всех искомых величин в зависимости от их указанных минимального и максимального значений и шага разбиения.

Далее для каждого возможного значения параметров происходит поэтапный расчет следующих величин: температур ротора и статора, приращений этих температур, а также интеграла квадрата ошибки.

В программе используется два варианта расчета указанных выше величин – по одномассовой и по двухмассовой тепловым моделям.

Если используется одномассовая тепловая модель, то определяется температура двигателя и ее приращение:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\tau_m}{dt} &= (\Delta P - \tau_m A_{ma}) / C_m; \\ \tau_m &= \tau_m + \frac{d\tau_m}{dt} \cdot h, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где τ_m — перегрев двигателя,

A_{ma} — теплоотдача «двигатель – окружающая среда»,

C_m — теплоемкость двигателя,

h — шаг интегрирования.

Если используется двухмассовая тепловая модель, то определяется температура статора и ротора, и их приращение:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\tau_s}{dt} &= \frac{1}{C_s} (\Delta P + A_{sr}(\tau_r - \tau_s) - A_{sa}\tau_s); \\ \frac{d\tau_r}{dt} &= \frac{1}{C_r} (A_{sr}(\tau_s - \tau_r)); \\ \tau_s &= \tau_s + \frac{d\tau_s}{dt} \cdot h; \\ \tau_r &= \tau_r + \frac{d\tau_r}{dt} \cdot h. \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

где τ_s — перегрев статора,

τ_r — перегрев ротора,

A_{sa} — теплоотдача «статор – окружающая среда»,

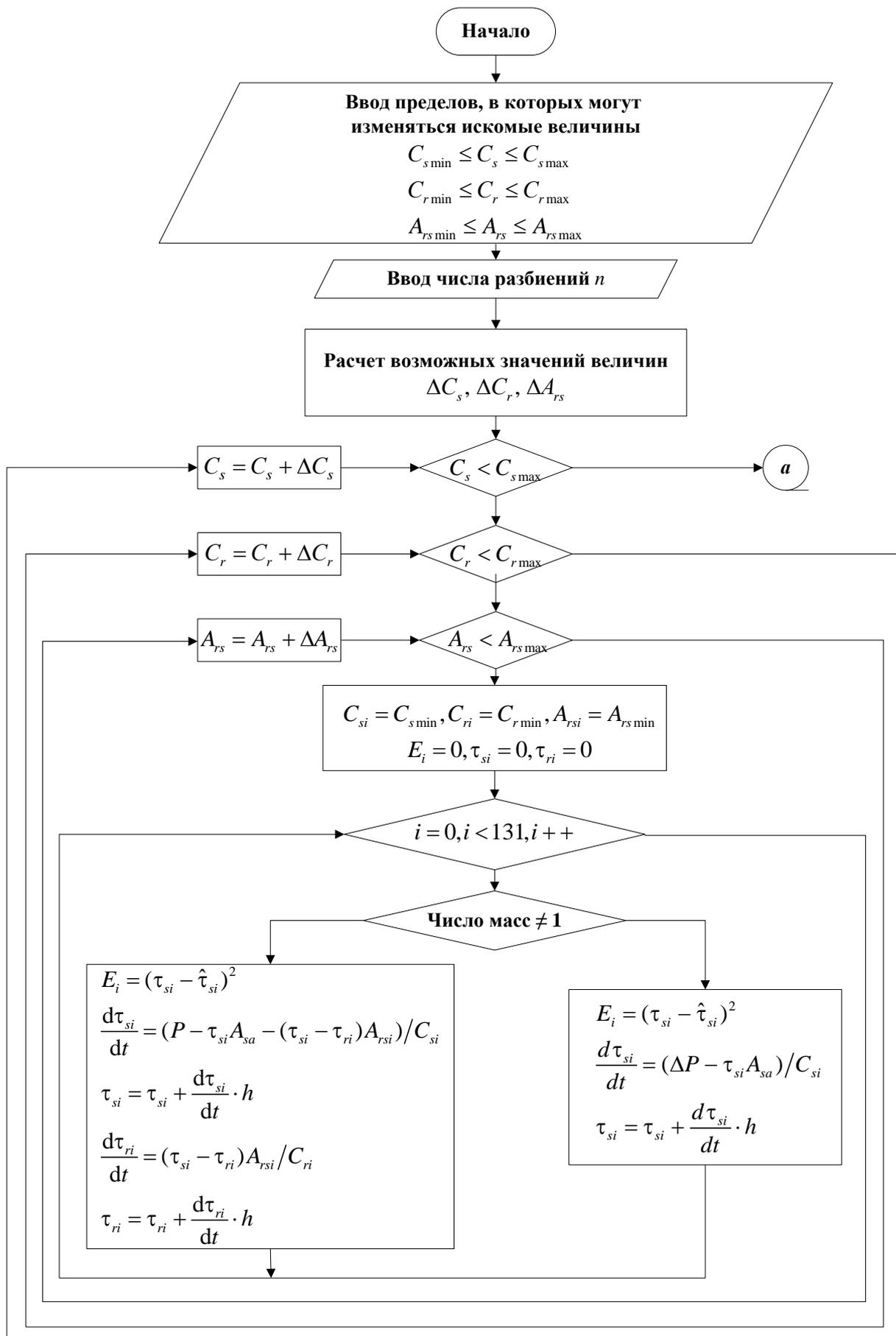
A_{sr} — теплоотдача «статор – ротор»,

C_s — теплоемкость статора,

C_r — теплоемкость ротора.

Затем находится минимальное значение интеграла ошибки и для найденного значения моделируется расчетный график изменения температуры электродвигателя и указываются подобранные параметры тепловой модели C_s , C_r , A_{sr} . Также на график выводится экспериментальная зависимость перегрева для исследуемого электродвигателя.

Общая блок-схема написанной программы представлена на рисунке 2.4.



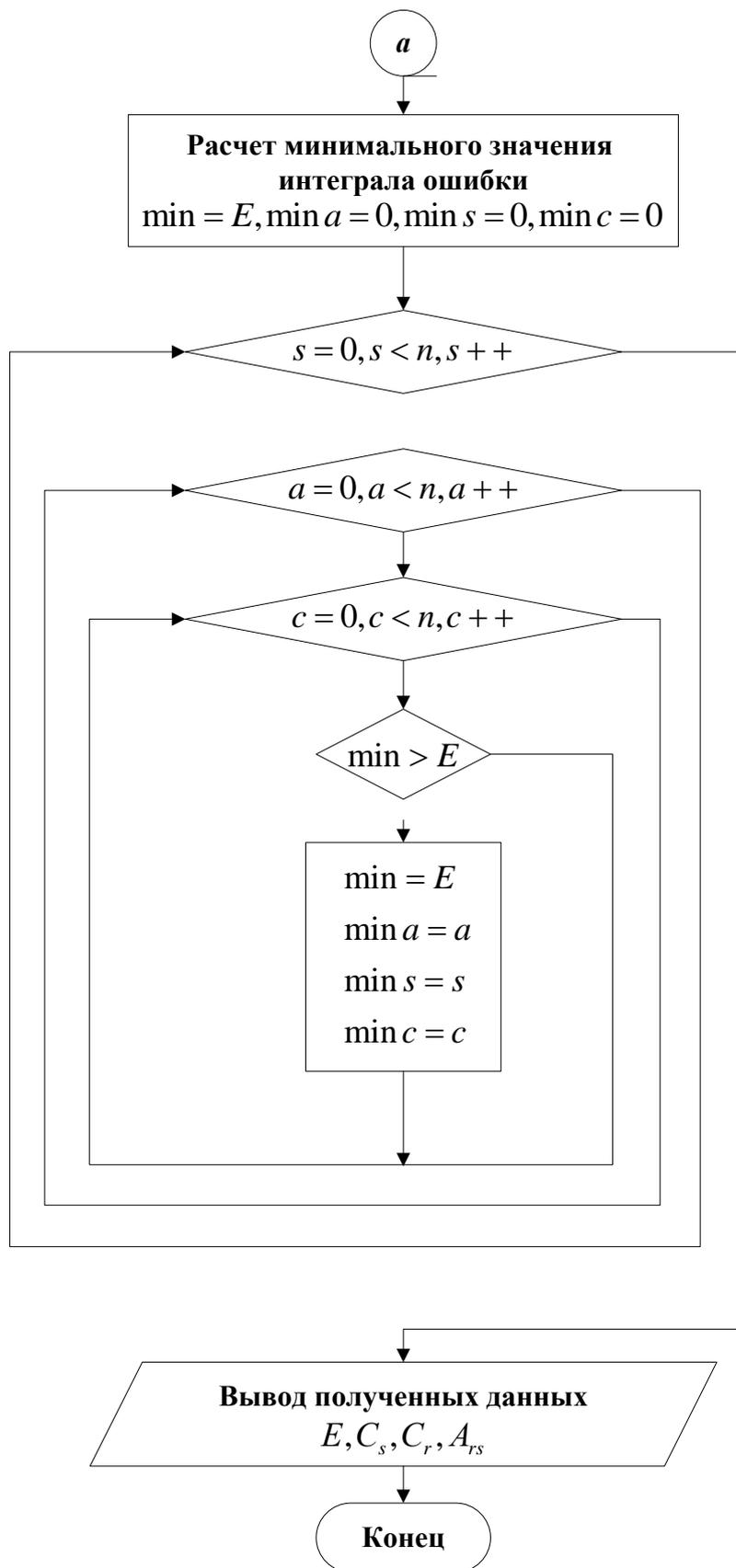


Рис. 2.4 – Блок-схема программы нахождения параметров

Результаты и выводы:

Предложена методика экспериментального определения параметров двухмассовой тепловой модели. Часть параметров определяется прямыми или косвенными методами, часть определяется с помощью метода наименьших квадратов. Методика позволяет определять параметры на всех скоростях вращения двигателя, так как многие из них являются переменными в функции скорости.

Для определения параметров тепловой модели для различных типоразмеров асинхронных электродвигателей в данном случае может быть применена экстраполяция данных между двигателями разной мощности. Например, если проведены опыты над машинами 1,1, 18 и 315 кВт в рамках одной серии для одной синхронной частоты вращения, то для остальных двигателей данные могут быть экстраполированы или же найдены с помощью теории подобия [37].

Глава 3. Экспериментальные исследования по определению параметров тепловой модели

В ходе выполнения работы проводились тепловые эксперименты с целью нахождения параметров предложенной двухмассовой тепловой модели по методике, описанной во второй главе.

3.1 Описание экспериментальной установки

Для проведения тепловых испытаний двигателей была собрана экспериментальная установка на одном из стендов лаборатории “Энергосберегающий электропривод” кафедры АЭП (схема на рисунке 3.1).

В состав данного испытательного стенда входит:

- испытуемый асинхронный двигатель А90L6 [38] (АД) мощностью 1,5 кВт и номинальной частотой вращения 920 об/мин;
- двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ) ПБСТ-43 [39] мощностью 1,9 кВт и номинальной частотой вращения 1000 об/мин, предназначенный для создания нагрузки для испытуемого двигателя;
- преобразователь частоты и преобразователь напряжения для питания исследуемого и нагрузочного двигателей (ПЧ и ПН, соответственно), построенные на транзисторных силовых интеллектуальных модулях фирмы Mitsubishi 5-ого поколения [40];
- цифровой мультиметр МУ64 [41] с двумя термопарами, предназначенный для регистрации изменения температуры исследуемого асинхронного электродвигателя;
- измерительная система на базе персонального компьютера [40];
- Инкрементальный датчик положения ротора ЛИР-158А-1-Н-003000-05-ПИ-7-1,5-Р-DB9 с разрешением 3000 меток на оборот [42].

Питание испытуемого электродвигателя АД от преобразователя частоты ПЧ позволяет осуществлять испытание в двух режимах: питание напрямую от сети и питание от преобразователя частоты. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения ДПТ, питаемый от преобразователя напряжения ПН, необходим для

создания нагрузочного момента для исследуемого асинхронного двигателя. Для измерения температуры применен цифровой мультиметр. Для получения углового положения ротора АД используется инкрементальный датчик положения ротора ДПР.

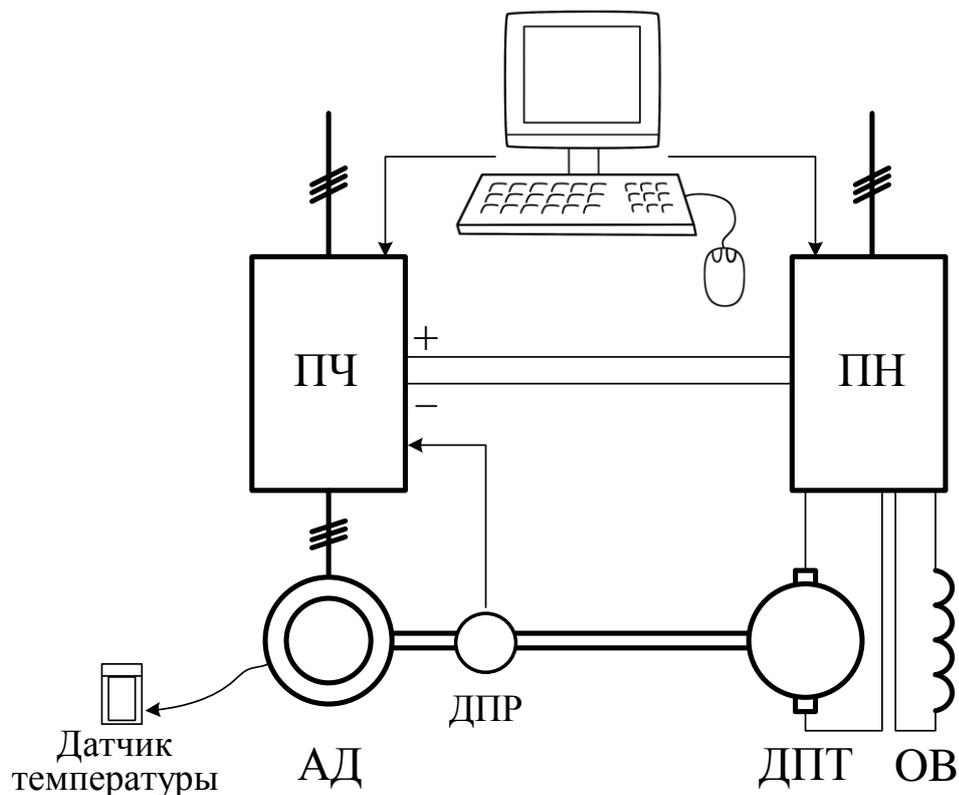


Рис. 3.1 – Схема экспериментальной установки

На рисунке 3.2 представлен внешний вид испытательного стенда, собранного на базе учебной лаборатории.



Рис. 3.2 – Внешний вид испытательного стенда
43

Плата АЦП измерительной системы работает совместно с программой PowerGraph [40, 43], что позволяет осциллографировать процессы изменения скорости, токов, напряжений и внутренних переменных силовых преобразователей во времени. Таким образом, установка позволяет снимать временные зависимости тока, перегрева двигателя, и далее аналитически получать необходимые зависимости. Так же есть возможность регистрировать тепловые зависимости для любого задаваемого вида нагрузки путем задания сигнала, подаваемого на ЦАП преобразователя, формирующего задание на момент нагрузочной машины.

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. При довольно большой стоимости тепловизора его точность сильно зависит от коэффициента отражения измеряемой поверхности [44]. Для проведения экспериментов потребовалась бы калибровка, а самое главное, доработка щитов с целью прорезания окна для измерения температуры ротора. В результате принято решение ограничиться расчетным значением температуры роторной цепи.

Принято, что в качестве измерителя температуры применяется термопара, имеющая точечный контакт с железом статора, так как технически очень сложно установить датчик измерения температуры непосредственно на ротор, а статор не прогревается равномерно, то необходимо определить базовую точку, относительно которой будет измеряться температура эквивалентной статорной массы. Для номинального 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.

Температура двигателя в любой необходимой точке измеряется с помощью цифрового мультиметра с комплектом термопар с возможностью измерения температуры в диапазоне от -20°C до 1000°C с разрешением 1°C .

Для измерения температуры в боковой части корпуса испытуемого двигателя было просверлено тонкое несквозное отверстие, в которое вставлялась термопара. Для измерения температуры лобовой части был снят подшипниковый щит, в корпусе просверлено сквозное отверстие, продета термопара и закреплена непосредственно на обмотке статора.

На рисунках 3.3 и 3.4 показано расположение термопары в корпусе исследуемого двигателя.

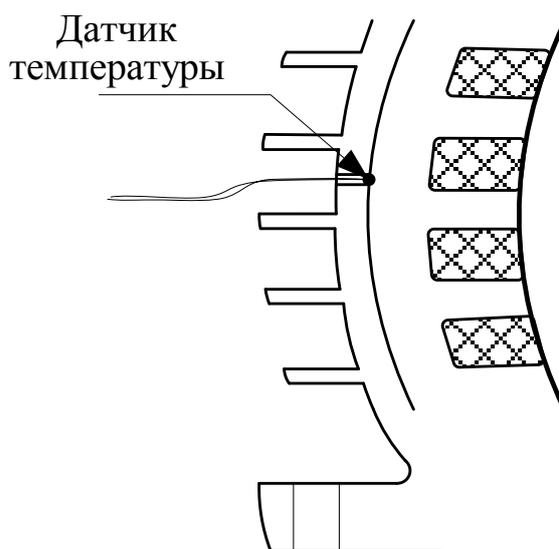


Рис.3.3 – Расположение термопары в корпусе двигателя



Рис.3.4 – Расположение термопары в корпусе двигателя

3.2 Калибровка теплоизоляционной рубашки для определения потерь в подшипниках

Для проведения опыта определения коэффициента теплоотдачи статора с электродвигателя была снята крыльчатка вентилятора (чтобы теплоотдача не изменялась в зависимости от изменения скорости вращения), а сам он был помещен в теплоизоляционную рубашку, внешний вид которой представлен на рисунке 3.5, что позволило повысить чувствительность измерений. Схема проводимого опыта представлена на рисунке 3.6.



Рис. 3.5 – Внешний вид теплоизоляционной рубашки

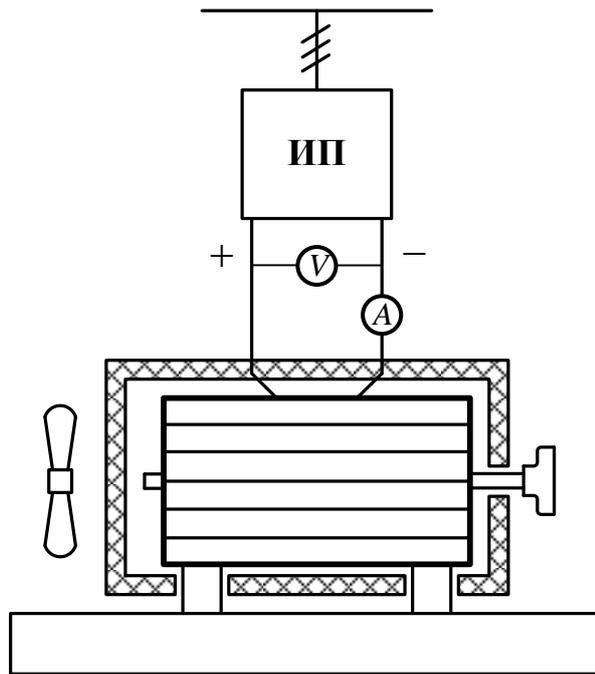


Рис. 3.6 – Схема проведения опыта для определения коэффициента теплоотдачи статора $A_{sa\ shielded}$

Двигатель питался от источника постоянного напряжения *ИП* и фиксировался перегрев двигателя, а также подводимая к двигателю мощность. Затем находилась теплоотдача статора по формуле (2.1). В процессе проведения эксперимента по показаниям термопар контролировалась температура двигателя и регулировалась подводимая к статору мощность. В процессе эксперимента приблизительно за 5 часов был достигнут установившийся режим с точкой 24 В, 3 А или 72 Вт при перегреве 50 К.

По полученным из опыта данным было определено, что для исследуемого двигателя коэффициент теплоотдачи статора при применении теплоизоляционной рубашки равен:

$$A_{sa\ shielded} = \frac{UI}{\tau} = \frac{24 \cdot 3}{50} = 1,45 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}. \quad (3.1)$$

Данный параметр позволяет в дальнейшем найти зависимость потерь в подшипниках от скорости вращения двигателя.

3.3 Снятие зависимости потерь в подшипниках двигателя от скорости вращения

Опыт для определения потерь в подшипниках выполнялся следующим образом: отключенный от питания исследуемый двигатель *ИД* в "рубашке" раскручивался от нагрузочной машины *НМ*, питаемой от преобразователя напряжения *ПН*, и фиксировался перегрев испытываемого электродвигателя. Схема проводимого опыта представлена на рисунке 3.7.

Все потери в двигателе определяются механическими потерями (в основном в подшипниках), которые на разных скоростях определялись по формуле (2.2). Путем снятия установившегося перегрева для разных частот вращения, была получена зависимость потерь в функции скорости. Полученные графики перегрева представлен на рисунке 3.8. Экспериментальные данные по нагреву при нахождении потерь в подшипниках для разных частот вращения сведены в таблицу 3.1.

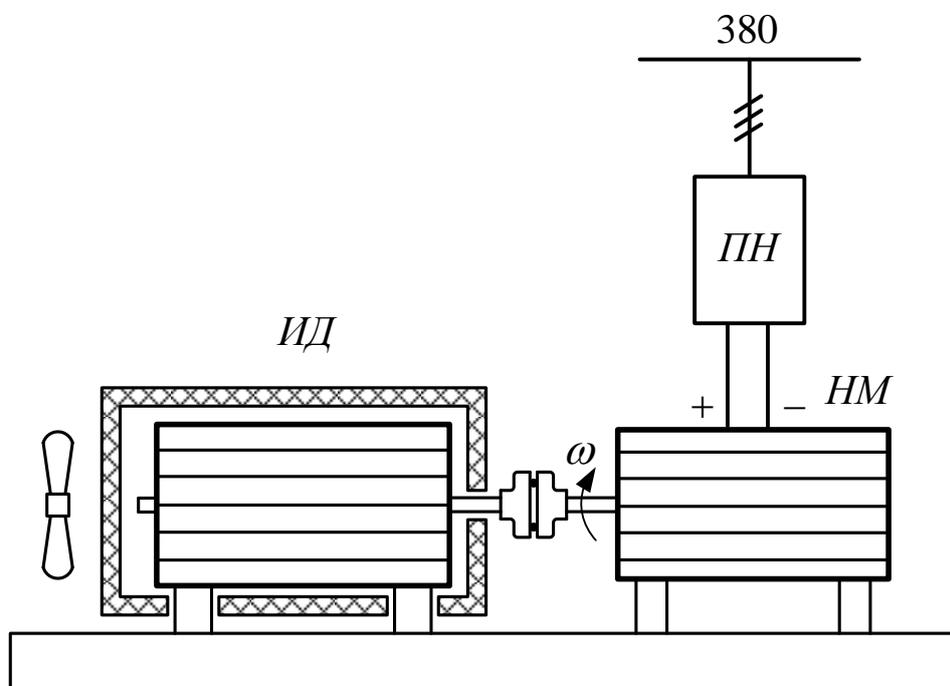


Рис. 3.7 – Схема опыта по нахождению потерь в подшипниках

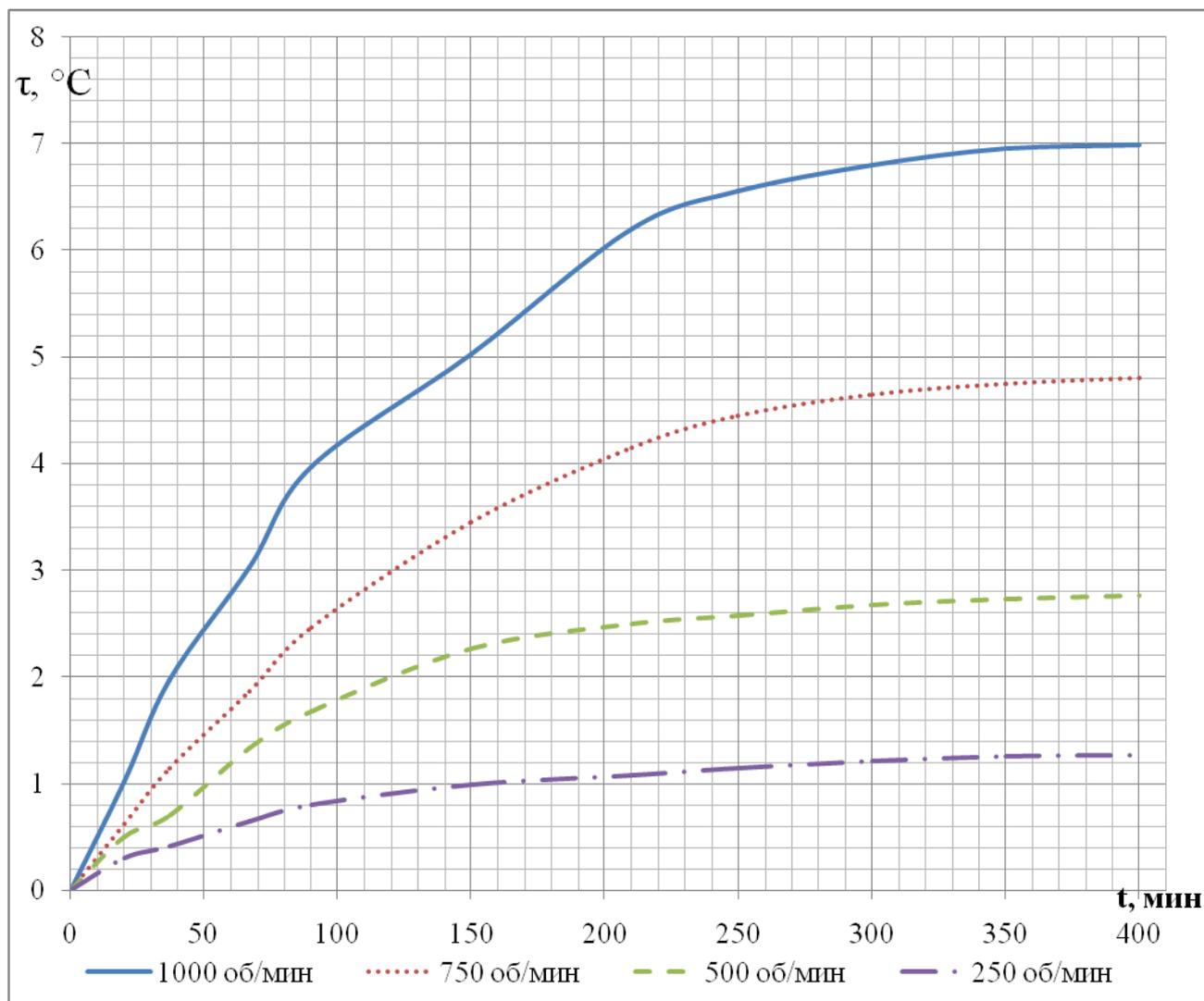


Рис. 3.8 – Кривые перегрева исследуемого двигателя для различных частот вращения

Таблица 3.1 Данные по нагреву электродвигателя для различных частот вращения

Время t , мин	Перегрев τ , °C			
	для 1000 об/мин	для 750 об/мин	для 500 об/мин	для 250 об/мин
0	0	0	0	0
20	1,02	0,62	0,50	0,30
37	1,98	1,15	0,70	0,41
67	3,03	1,87	1,33	0,65
90	3,97	2,46	1,68	0,80
150	5,03	3,45	2,27	0,99
210	6,20	4,15	2,50	1,08
300	6,80	4,65	2,68	1,21
400	6,99	4,8	2,76	1,27

Полученный график зависимости потерь в подшипниках от частоты вращения двигателя, представлен на рисунке 3.9.

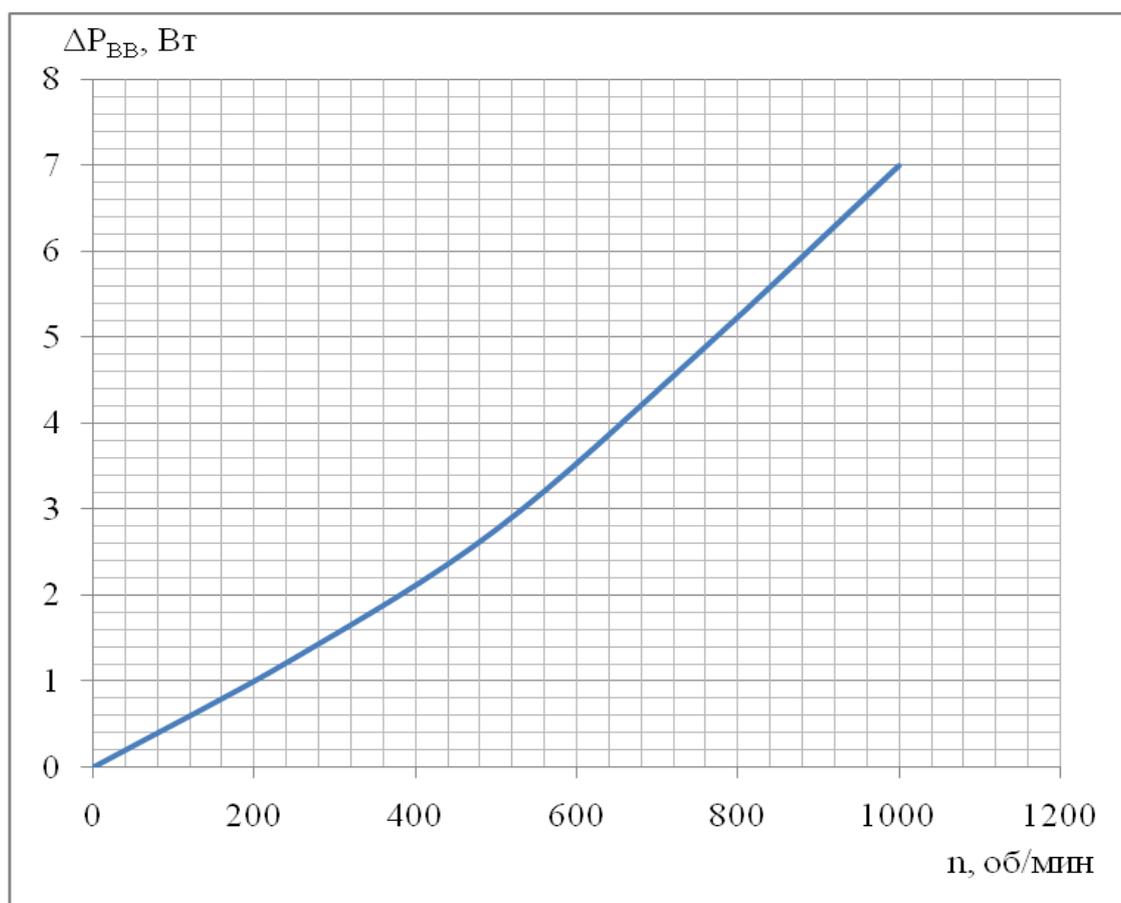


Рис. 3.9 – Кривая потерь в подшипниках для разных частот вращения исследуемого двигателя

На основе проведенных экспериментов можно сделать выводы о том, что потери в подшипниках более чем в 20 раз меньше всех остальных потерь. И в дальнейших расчетах ими будем пренебрегать.

3.4 Определение параметров тепловой модели

Опыт для определения коэффициента теплоотдачи статора в окружающую среду производится с вентилятором и со снятой теплоизоляционной рубашкой. Вращение исследуемого электродвигателя осуществлялось от нагрузочной машины, в качестве которой использовался двигатель постоянного тока *ДПТ*, питаемый от преобразователя напряжения *ПН*, а преобразователь частоты *ПЧ* был подключен к двигателю через синусный фильтр *СФ*, чтобы можно было измерять

мощность, подводимую к двигателю, независимым прибором. Необходимо точно знать величину потерь в двигателе для определения коэффициента теплоотдачи статора. Для обеспечения отсутствия потерь в роторе в преобразователе частоты ПЧ, питающем испытуемый двигатель, использовалась система управления, построенная по функциональной схеме, представленной на рисунке 2.7.

Схема данной установки представлена на рисунке 3.10.

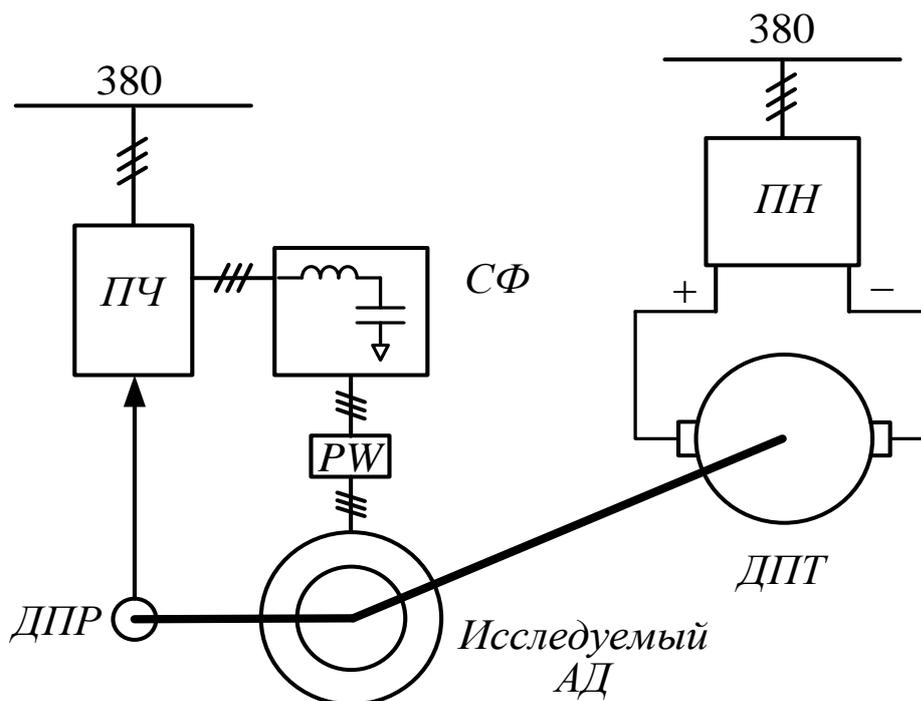


Рис. 3.10 – Схема опыта для определения коэффициента теплоотдачи статора:

PW – ваттметр; *ДПР* – датчик положения ротора.

Внешний вид используемого синусного фильтра и испытательного стенда с ним представлен на рисунках 3.11 и 3.12 соответственно.



Рис. 3.11 – Синусный фильтр



Рис. 3.12 – Испытательный стенд с синусным фильтром

В ходе эксперимента были зафиксированы кривые нагрева испытуемого асинхронного электродвигателя для разных скоростей вращения. Данные экспериментов приведены в таблице П1 в Приложении Б.

Тепловые эксперименты проводились при следующих условиях:

- для частоты вращения 500 об/мин
 - температура окружающей среды — 18,5 °С
 - подводимая мощность 70 Вт (расчетная по показаниям датчиков системы управления и поддерживаемая системой управления)
 - ток по осям d и q — +0,8 и -2,4 А соответственно (среднее значение)
 - напряжение по осям d и q — +88 и 0 В соответственно (среднее значение)
- для остановленного электропривода
 - температура окружающей среды — 21 °С
 - подводимая мощность 71 Вт
 - ток 3,3 А (среднее значение)
 - напряжение 22 В (среднее значение)

Примеры графиков перегрева для частоты вращения 500 об/мин и для стоячего испытуемого двигателя представлены на рисунках 3.13 и 3.14 соответственно.

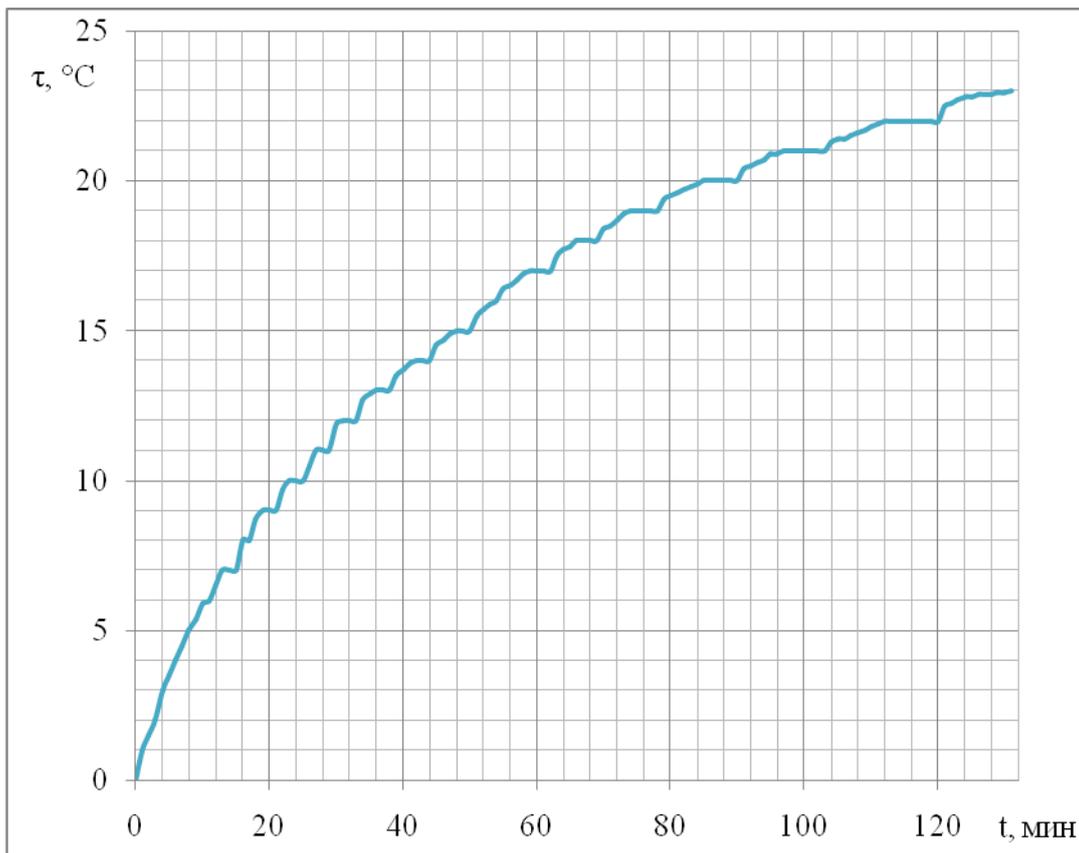


Рис. 3.13 – График перегрева двигателя для частоты вращения 500 об/мин

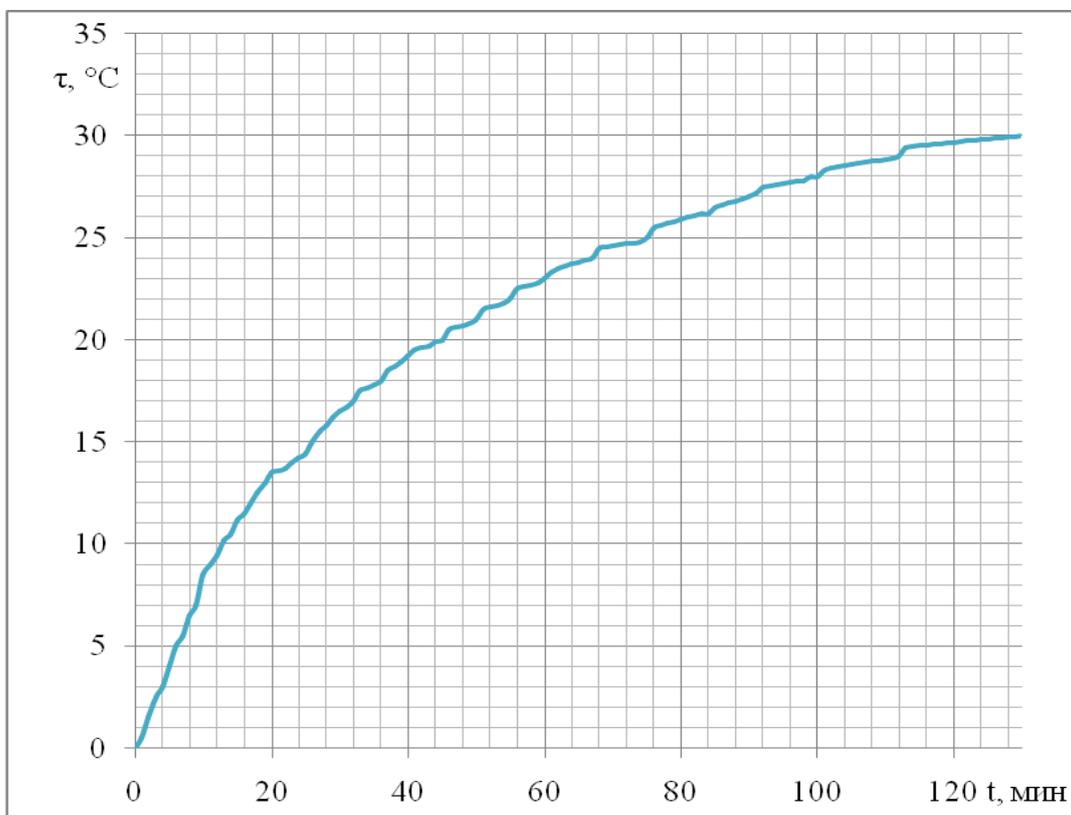


Рис. 3.14 – График перегрева двигателя для частоты вращения 0 об/мин

На рисунке 3.15 представлены полученные с помощью программы, описанной в главе 2, результаты определения параметров для двух - и одномассовых тепловых моделей асинхронного электродвигателя. По построенным графикам перегрева электродвигателя и вычисленному интегралу квадрата ошибки E (2.4) можно судить о преимуществе использования двухмассовой модели.

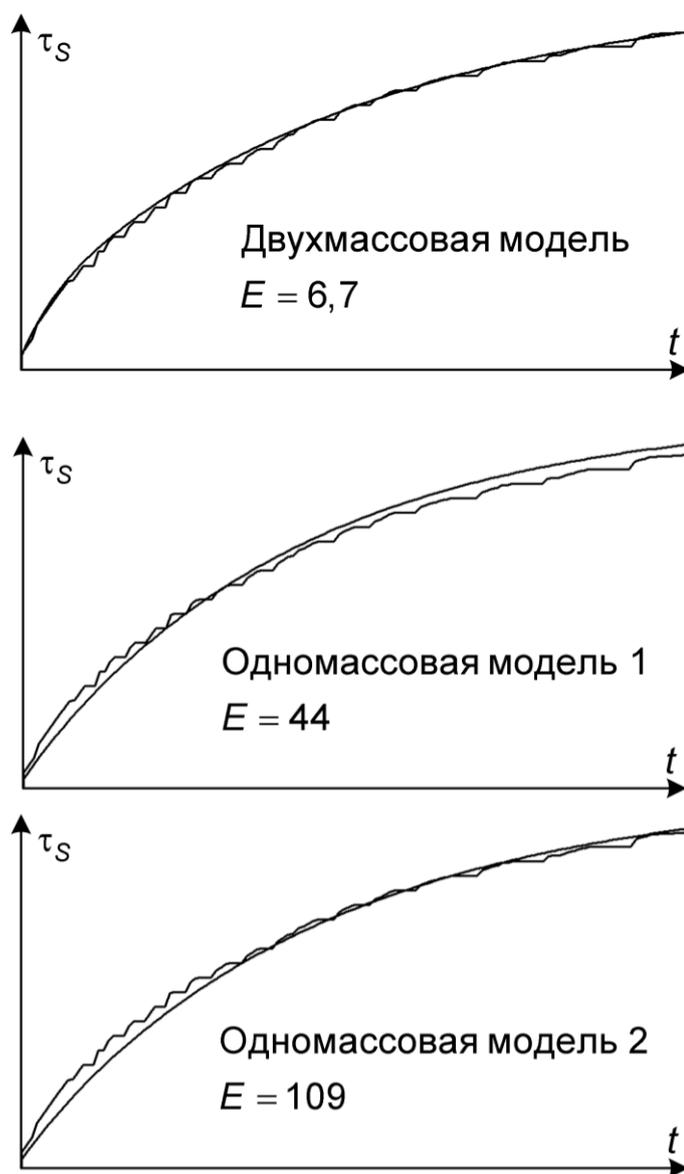


Рис. 3.15 – Результаты определения параметров двухмассовой и одномассовой тепловых моделей

Графики показывают переходные процессы нагрева двигателя для наименьшего квадратичного отклонения от измеренных данных. С помощью программы (п. 2.3) были определены следующие параметры двухмассовой модели для скорости 500 об/мин:

$$\left. \begin{aligned} C_s &= 4826 \text{ Дж/К}; \\ C_r &= 4735 \text{ Дж/К}; \\ A_{rs} &= 5,25 \text{ Вт/К}; \\ A_{sa} &= 2,7 \text{ Вт/К}. \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Эти параметры в дальнейшем используются в методике оценки теплового состояния.

Результаты и выводы:

В данной главе представлены результаты экспериментальных исследований по определению параметров предложенной двухмассовой тепловой модели асинхронного электродвигателя. Эксперименты проводились на оборудовании учебных лабораторий кафедры АЭП.

В ходе экспериментов было выявлено, что потери в подшипниках в зависимости от частоты вращения электродвигателя малы по сравнению со всеми остальными, и ими можно пренебречь в дальнейших расчетах.

В главе приведено описание экспериментального стенда и результаты экспериментов по нагреву асинхронных двигателей, а также получены численные значения остальных параметров двухмассовой тепловой модели.

В зависимости от скорости вращения происходит изменение, как коэффициента теплоотдачи статором в окружающую среду, так и изменение теплоотдачи между статором и ротором, что требует определения кривых теплоотдачи в функции скорости рассмотренными методами.

Глава 4. Тепловые эксперименты для электропривода с датчиком температуры в лобовой части обмотки статора

С открытием 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. Для проведения тепловых испытаний была собрана экспериментальная установка на стендах данной лаборатории.

4.1 Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка собиралась на базе оборудования учебного центра «АББ – МЭИ». В состав лабораторных стендов входят:

- исследуемый асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором МЗАА132МС [45] мощностью 5,5 кВт с номинальной частотой вращения 1000 об/мин;
- двигатель постоянного тока независимого возбуждения CD2007P-2 [46] мощностью 7,5 кВт;
- фазный асинхронный двигатель MTF 112-6 [47] мощностью 5 кВт с номинальной частотой вращения 930 об/мин;
- синхронный двигатель с постоянными магнитами BSM100C-6250 [48] с номинальной частотой вращения 2400 об/мин и номинальным моментом 30 Нм;
- преобразователи для питания электродвигателей: преобразователь частоты ACS800-11-0016-3 [49] для асинхронных двигателей, преобразователь частоты ACS880 [50], тиристорный преобразователь DCS800 [51] для двигателя постоянного тока;
- сильфонные муфты ВКЕ для сопряжения валов двигателей с датчиком момента;
- квадратурный датчик положения для точного определения скорости вращения двигателя;

- анализатор сети (цифровой ваттметр), датчики тока и напряжения;
- тахогенератор PTG50XP и датчики момента DBRK на 100 и 200 Нм, установленные между двигателями;
- встроенная термopapa PT100 в лобовой части обмотки статора электродвигателя;
- преобразователь сигнала термосопротивления;
- все датчики подключены к цифровому компьютерному осциллографу L-791 фирмы L-Card.

В используемых лабораторных стендах плата АЦП измерительной системы так же, как и в лаборатории работает совместно с программой PowerGraph [43]. На рисунке 4.1 представлены временные зависимости тока, напряжения, момента и перегрева двигателя, которые позволяет снимать данная лабораторная установка.

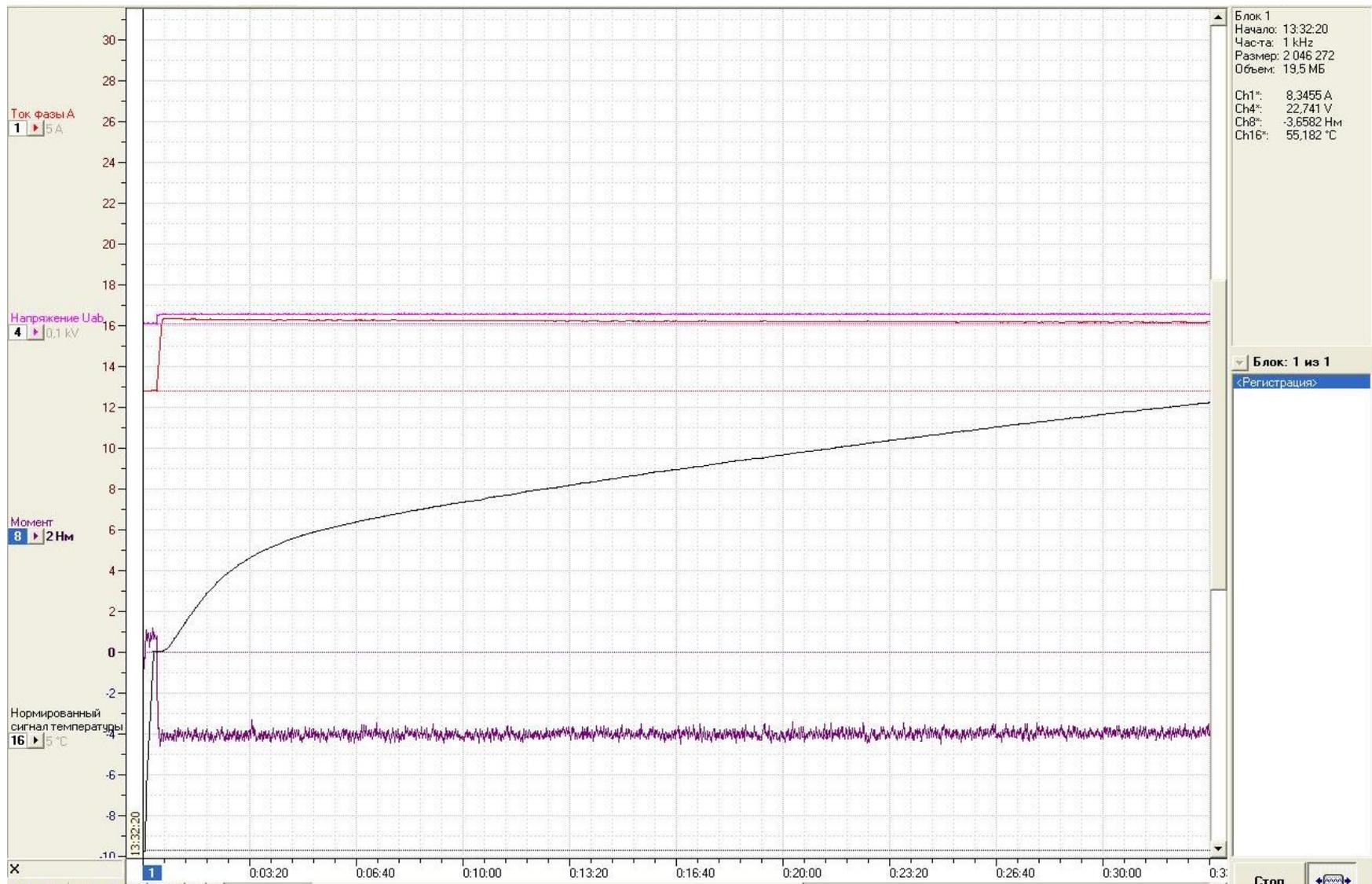


Рис. 4.1 – Пример работы программы PowerGraph испытательного стенда

Задача экспериментальной установки – обеспечить питание двигателя на холостом ходу с целью определения зависимости температуры от времени при известных потерях в статоре электрической машины. Холостой ход выбран для того, чтобы исключить потери в роторной цепи и не разделять подводимую энергию на потери в статоре и роторе. Так как для данной машины скольжение на холостом ходу очень мало, то испытуемый двигатель не подкручивается нагрузочной машиной. Это, в том числе, позволяет провести оценку потерь в стали двигателя. Для этого испытуемый асинхронный двигатель запитывается от регулируемого источника переменного тока, в качестве которого может использоваться асинхронный двигатель с фазным ротором (*АДФР*). Для вращения *АДФР* используется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором второго лабораторного стенда, питающийся от преобразователя частоты ACS880. Для возбуждения роторной цепи *АДФР* использовался тиристорный выпрямитель (*ТВ*) DCS800.

Собранная схема и внешний вид стенда представлены на рисунках 4.2 и 4.3.

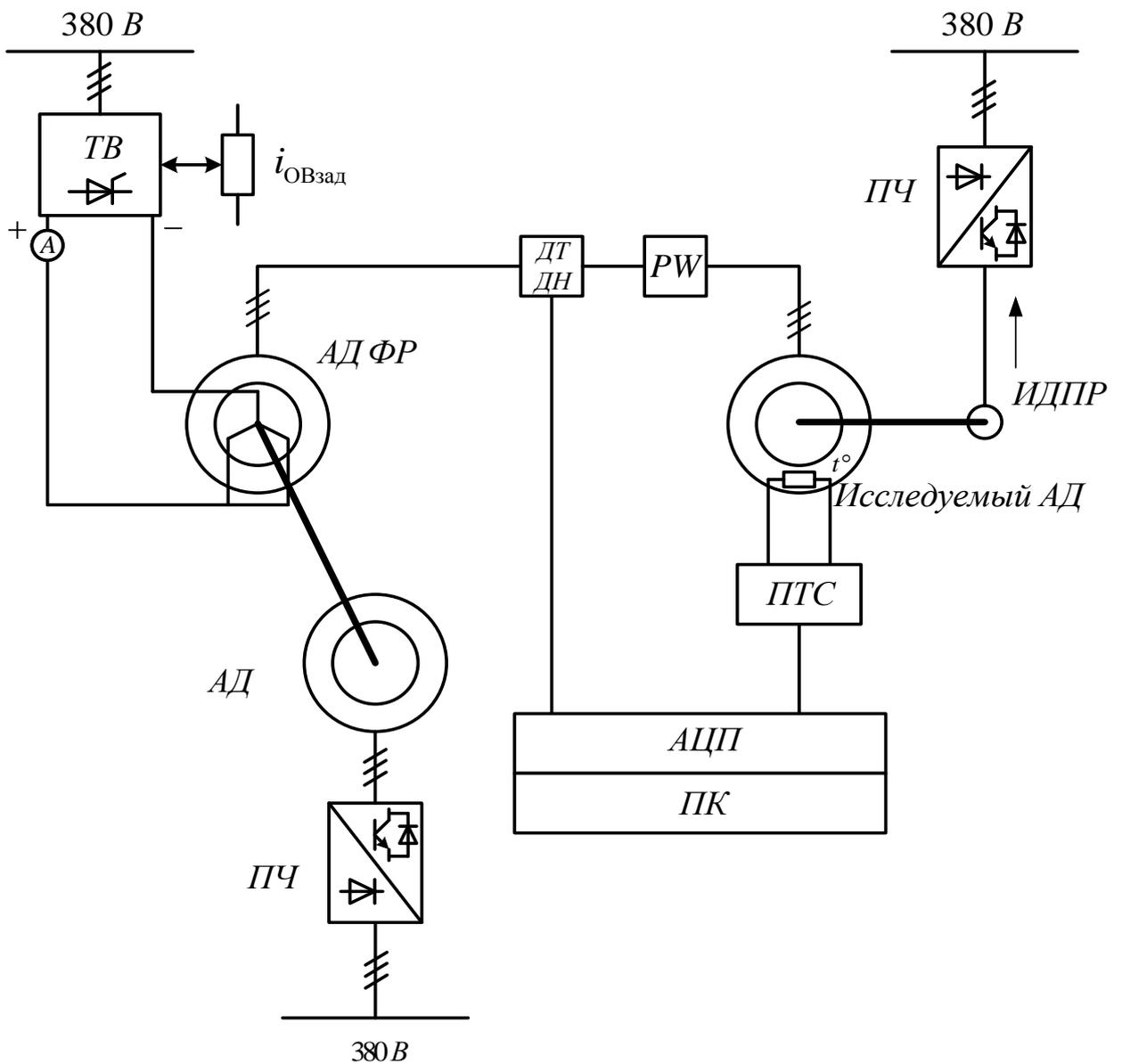


Рис. 4.2 – Схема испытательного стенда:

ПТС – преобразователь сигнала термосопротивления, *ИДПР* – датчик положения ротора, *АЦП* – аналого-цифровой преобразователь, *ПК* – персональный компьютер, *ДТ* – датчик тока, *ДН* – датчик напряжения, *РВ* – цифровой ваттметр, *А* – амперметр

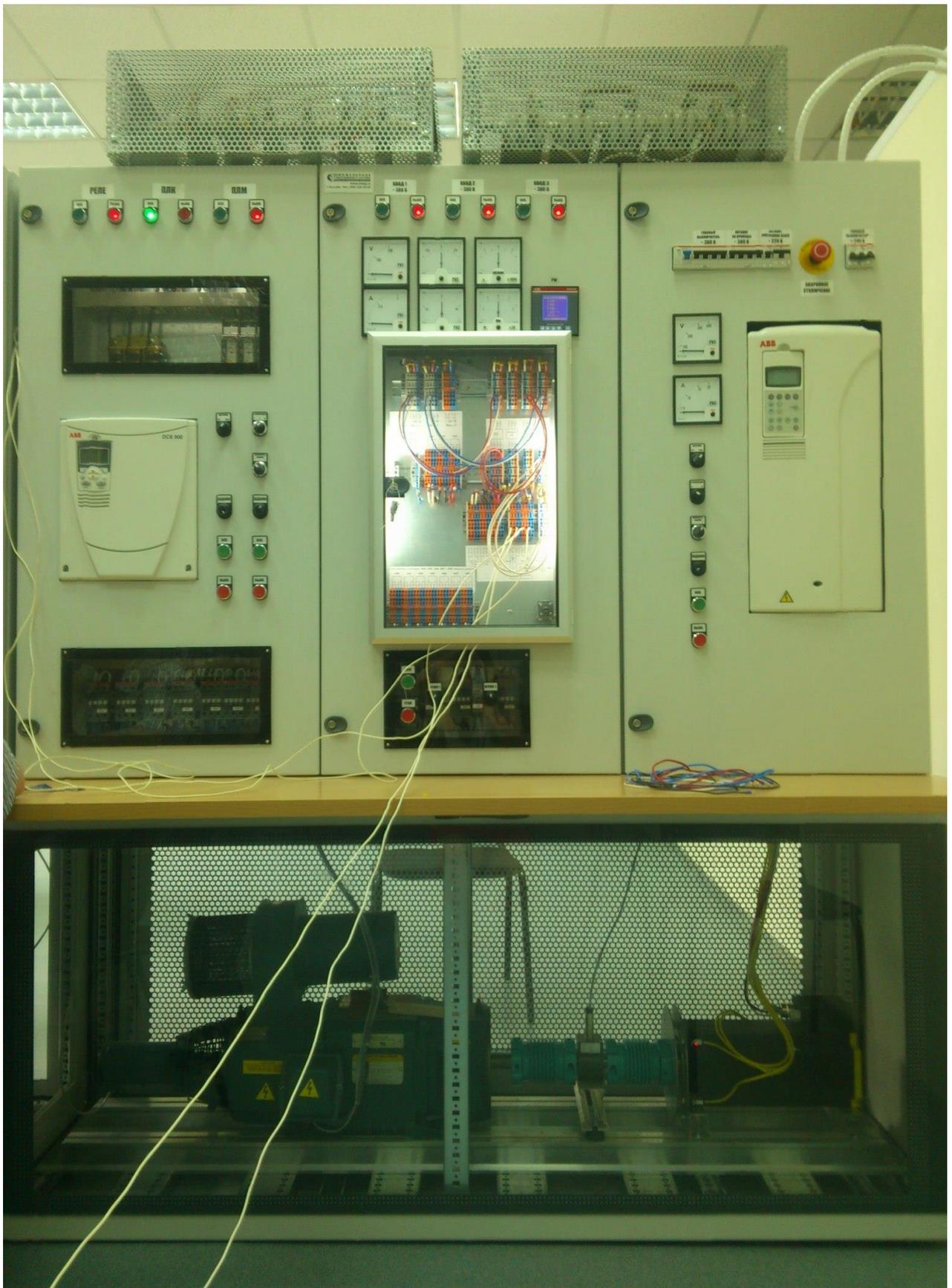


Рис. 4.3 – Внешний вид испытательного стенда

Получаемая при такой схеме форма питающего напряжения содержала высшие гармоники от пульсаций тока возбуждения АДФР, так как постоянная времени фазных обмоток АДФР незначительная по сравнению с пульсацией напряжения выпрямителя 300 Гц. Для устранения данного недостатка были внесены изменения в экспериментальную схему: теперь тиристорный возбудитель питает обмотку возбуждения генератора постоянного тока, раскручиваемого от синхронного двигателя с постоянными магнитами. В свою очередь генератор постоянного тока возбуждает роторную цепь АДФР. Это позволило сгладить форму тока и напряжения генератора постоянного тока, питающего обмотки ротора асинхронного двигателя с фазным ротором.

Для проведения опытов была собрана схема, представленная на рисунке 4.4. Исследуемый асинхронный двигатель (*АД*) отсоединен от нагрузочного АДФР, чтобы снизить долю механических потерь. Он работает на холостом ходу и питается напряжением регулируемой амплитуды и частоты. Мощность, подводимая к статору, вычисляется по показаниям цифрового ваттметра (*PW*) и проверяется по показаниям цифрового осциллографа, принимающего сигналы с датчиков тока (*ДТ*) и напряжения (*ДН*). 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 (*ИДПП*), который указывает на практическое отсутствие скольжения. В качестве генератора регулируемого напряжения регулируемой частоты используется асинхронный двигатель с фазным ротором (*АДФР*), приводимый во вращение короткозамкнутым асинхронным двигателем (*АД*), питаемым от преобразователя частоты (*ПЧ*). 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 двигателя постоянного тока (*ДПТ*), работающего в генераторном режиме. Генератор приводится во вращение частотно-регулируемым электроприводом с синхронным

электродвигателем с постоянными магнитами (СДПМ), а выходной ток регулируется изменением возбуждения от тиристорного выпрямителя (ТВ). Такая сложная схема позволяет получить достаточно качественную форму питающего напряжения для исследуемого двигателя. Внешний вид испытательной установки представлен на рисунке 4.5.

4.2 Результаты тепловых экспериментов

В результате экспериментов были получены кривые 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 рисунках 4.6 – 4.10 представлены построенные в программе Excel графики перегрева испытуемого асинхронного электродвигателя во времени для всех измеренных скоростей.

Так как эксперименты занимали длительное время, то параллельно с измерением температуры двигателя проводилось измерение температуры окружающей среды. Видно, что утром (в начале эксперимента), температура всегда немного ниже, чем вечером (в конце эксперимента).

Мощность при проведении опыта не стабилизировалась. Во-первых, в системе не было возможности получить обратную связь, так как измеритель мощности обеспечивал только визуальное отображение информации. Во-вторых, ручная стабилизация сопровождалась неточностями установки мощности и продолжительными процессами с перерегулированиями, что вносило лишнюю погрешность в эксперимент. В-третьих, программа, используемая при определении параметров тепловой модели, позволяла проводить моделирование процессов и поиск параметров при изменении подводимой мощности.

Таким образом, система работала в разомкнутом режиме и сохраняла соотношение питающего напряжения к частоте в всём диапазоне исследуемых скоростей.

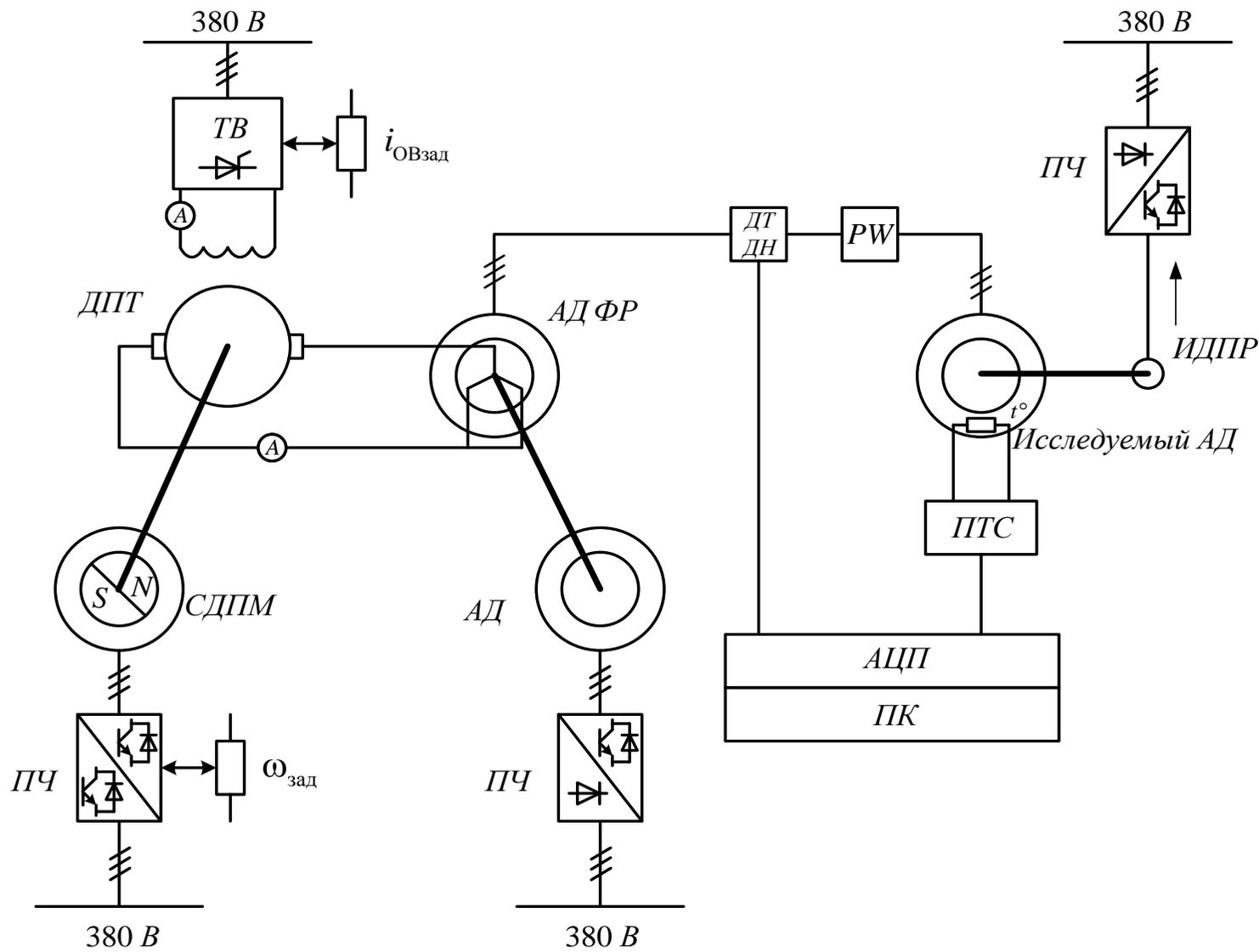


Рис. 4.4 – Схема скорректированной испытательной установки



Рис. 4.5 – Испытательная установка для определения параметров тепловой модели электродвигателя с датчиком в лобовой части обмотки

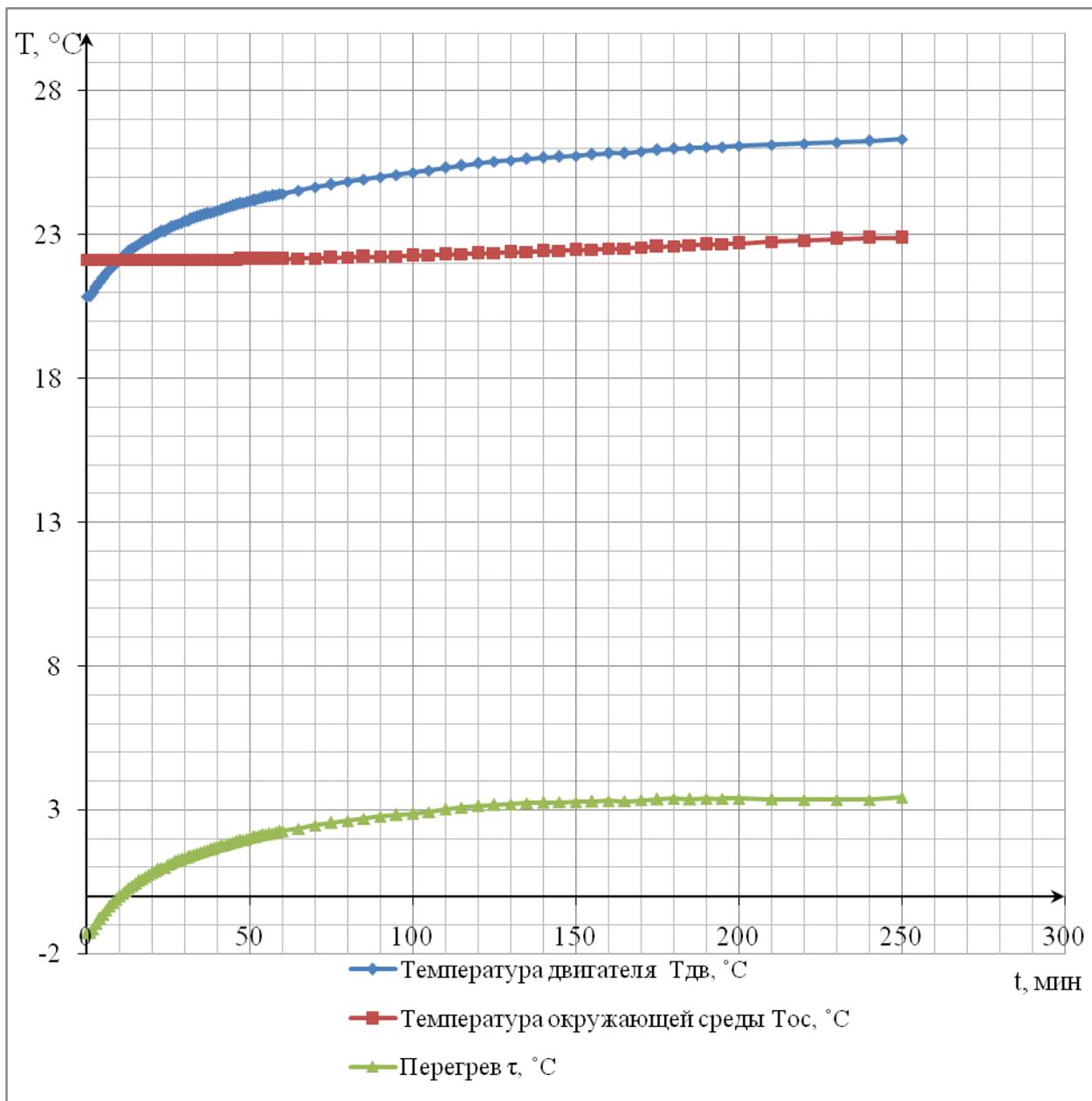


Рис. 4.6 – График перегрева двигателя для частоты вращения 1000об/мин

Тепловые эксперименты для частоты вращения 1000 об/мин проводились при следующих условиях:

- начальная температура окружающей среды — 22,12°С
- подводимая мощность — около 90 Вт (см. таблицу П2 в Приложении Б).

Экспериментальные данные о процессе нагрева сведены в таблицу П2 Приложения Б.

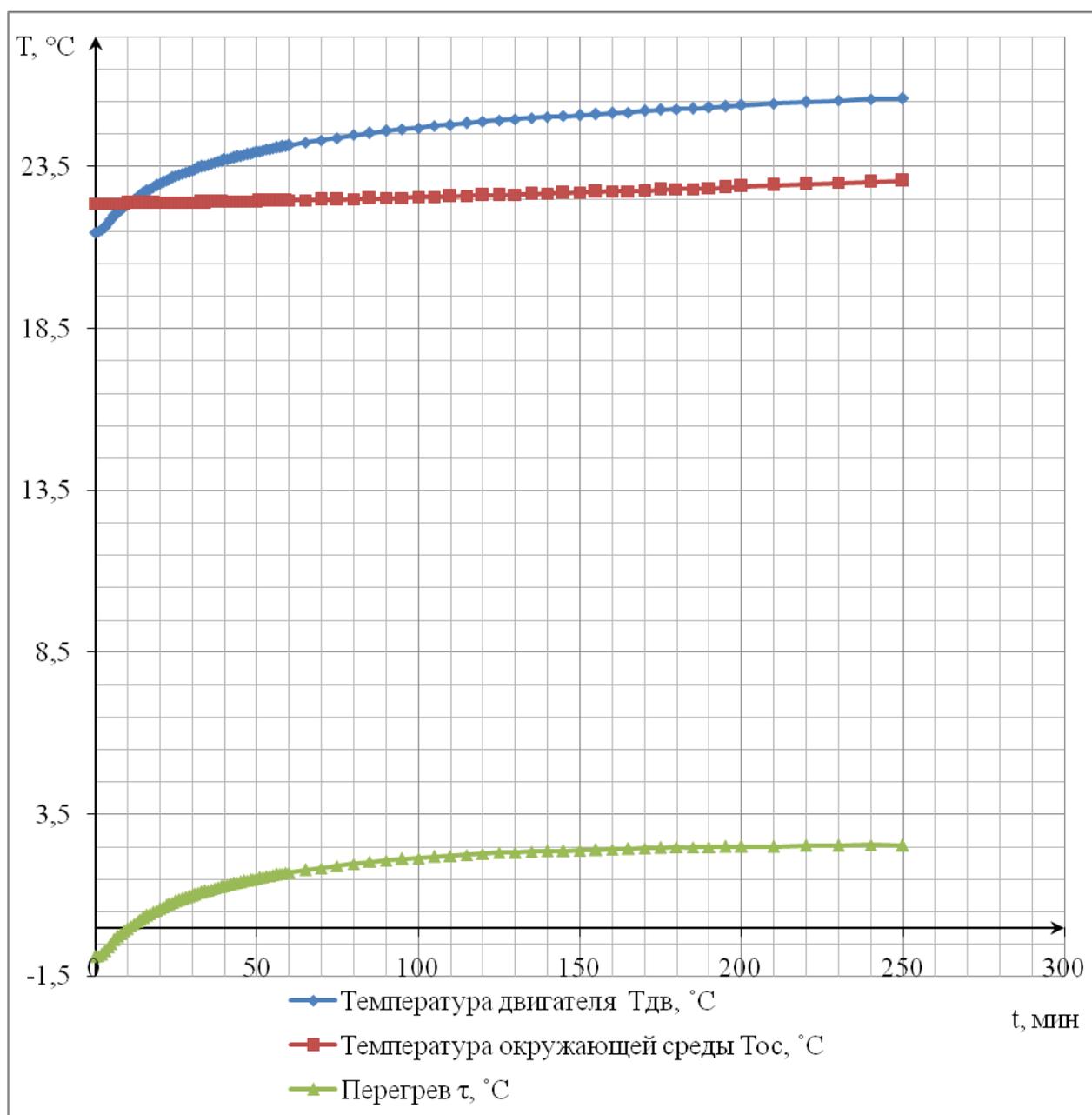


Рис. 4.7 – График перегрева двигателя для частоты вращения 750 об/мин

Тепловые эксперименты для частоты вращения 750 об/мин проводились при следующих условиях:

- начальная температура окружающей среды — 22,36 °C
- подводимая мощность — около 60 Вт

Экспериментальные данные о процессе нагрева сведены в таблицу ПЗ Приложения Б.

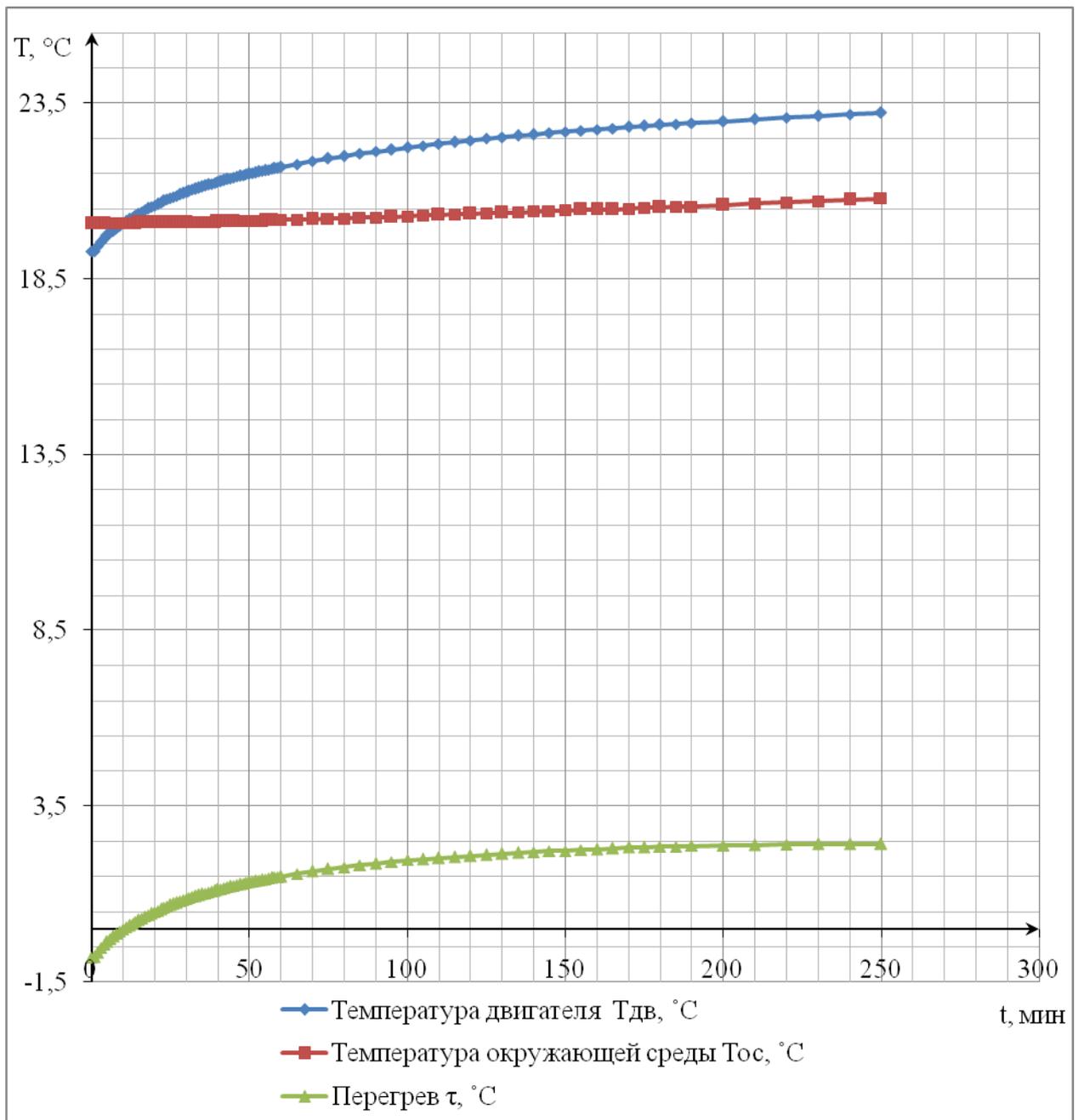


Рис. 4.8 – График перегрева двигателя для частоты вращения 500 об/мин

Тепловые эксперименты для частоты вращения 500 об/мин проводились при следующих условиях:

- начальная температура окружающей среды — 20,08 °C
- подводимая мощность — около 43 Вт

Экспериментальные данные о процессе нагрева сведены в таблицу П4 Приложения Б.

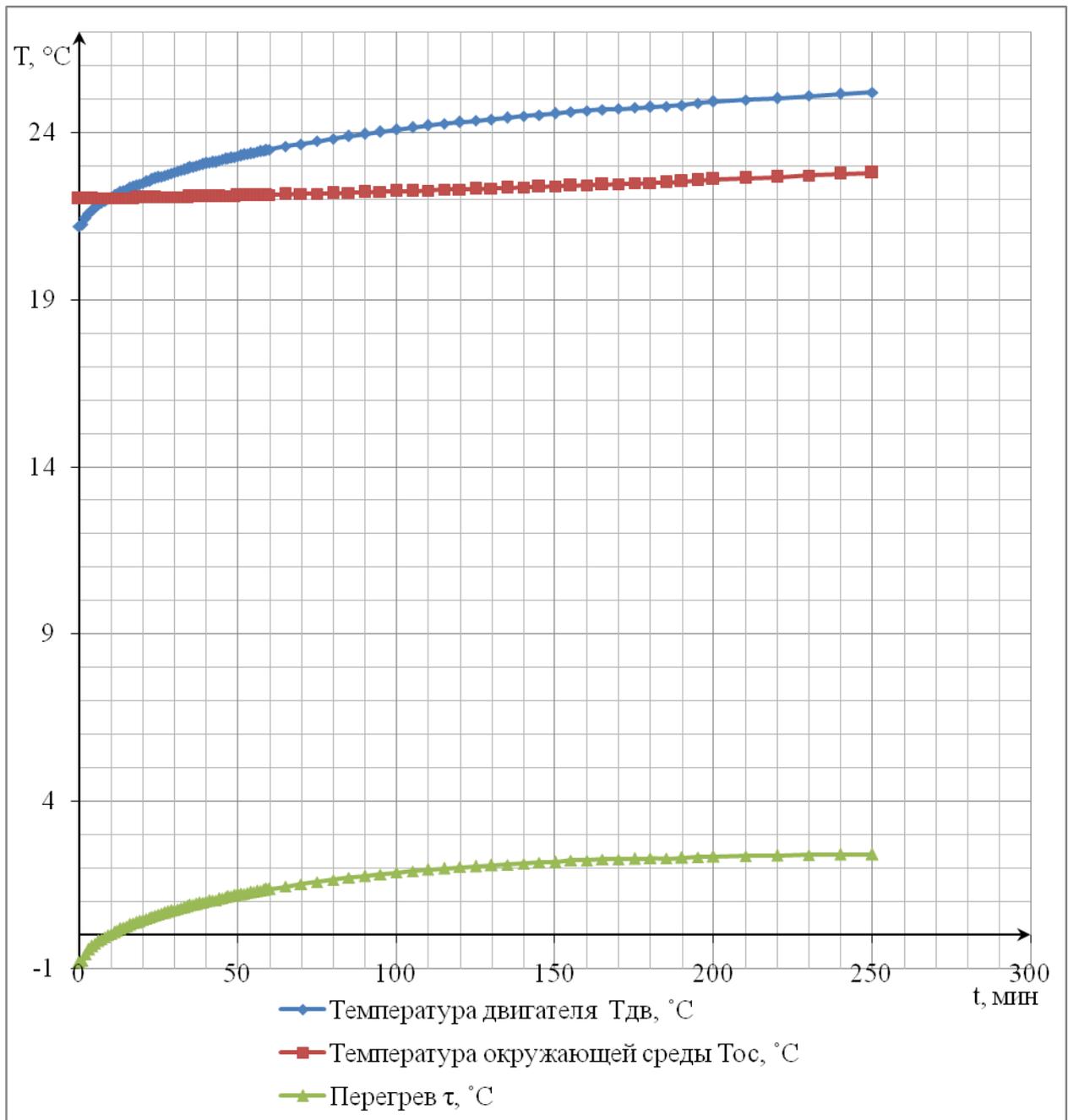


Рис. 4.9 – График перегрева двигателя для частоты вращения 250 об/мин

Тепловые эксперименты для частоты вращения 250 об/мин проводились при следующих условиях:

- начальная температура окружающей среды — 22,01 °C
- подводимая мощность — около 33 Вт

Экспериментальные данные о процессе нагрева сведены в таблицу П5 Приложения Б.

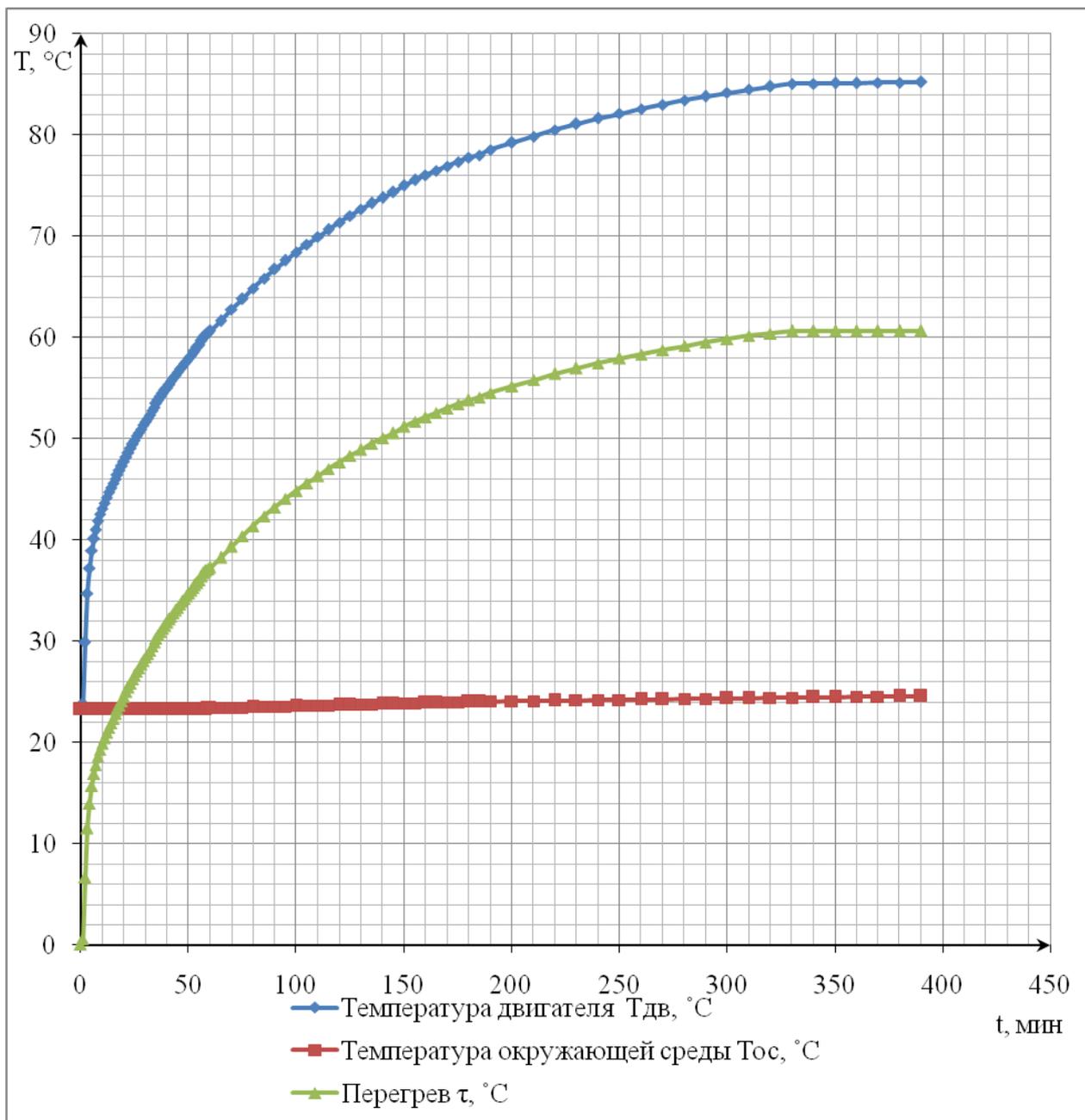


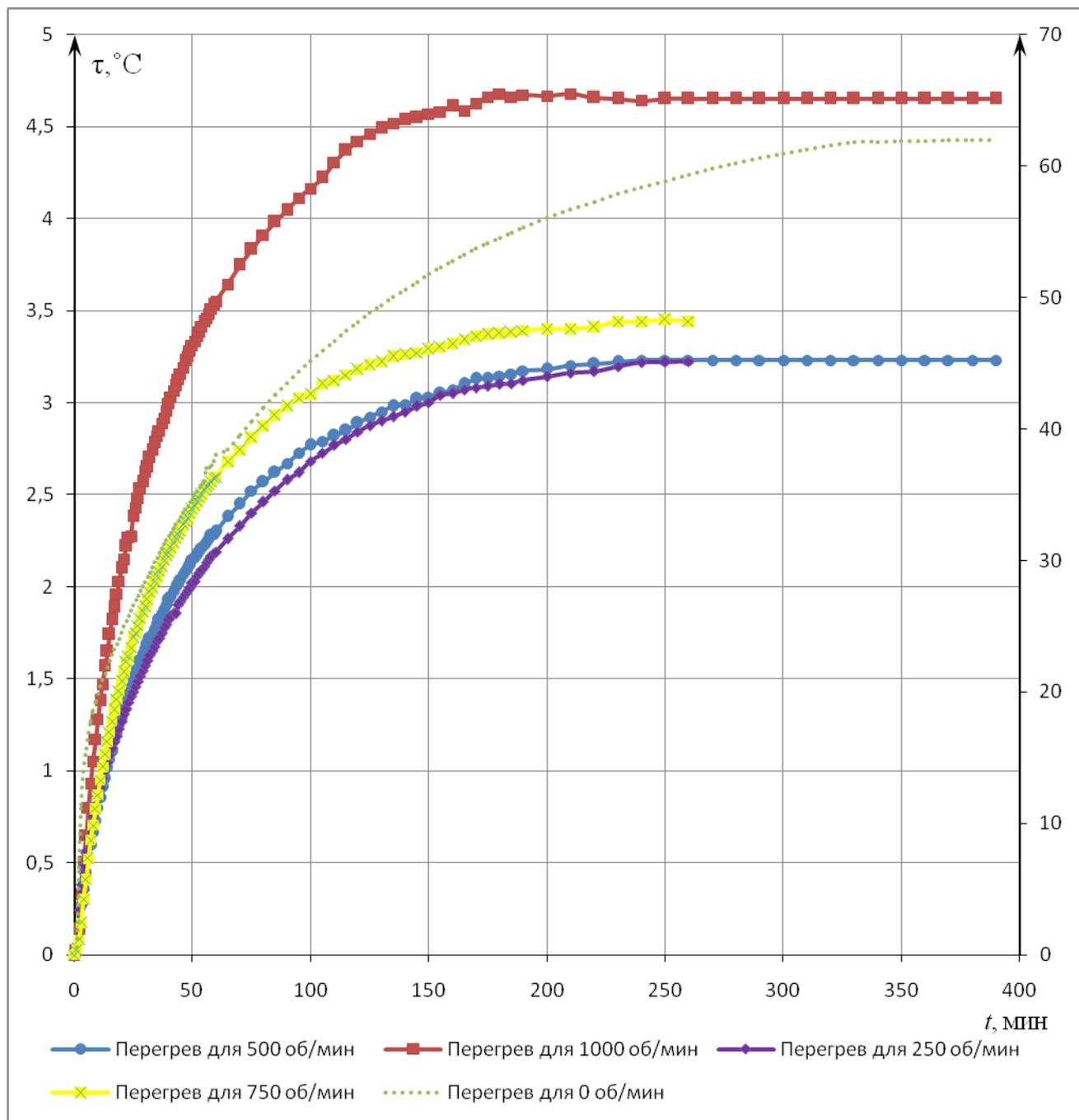
Рис. 4.10 – График перегрева двигателя для скорости частоты 0 об/мин

Тепловые эксперименты для частоты вращения 0 об/мин проводились при следующих условиях:

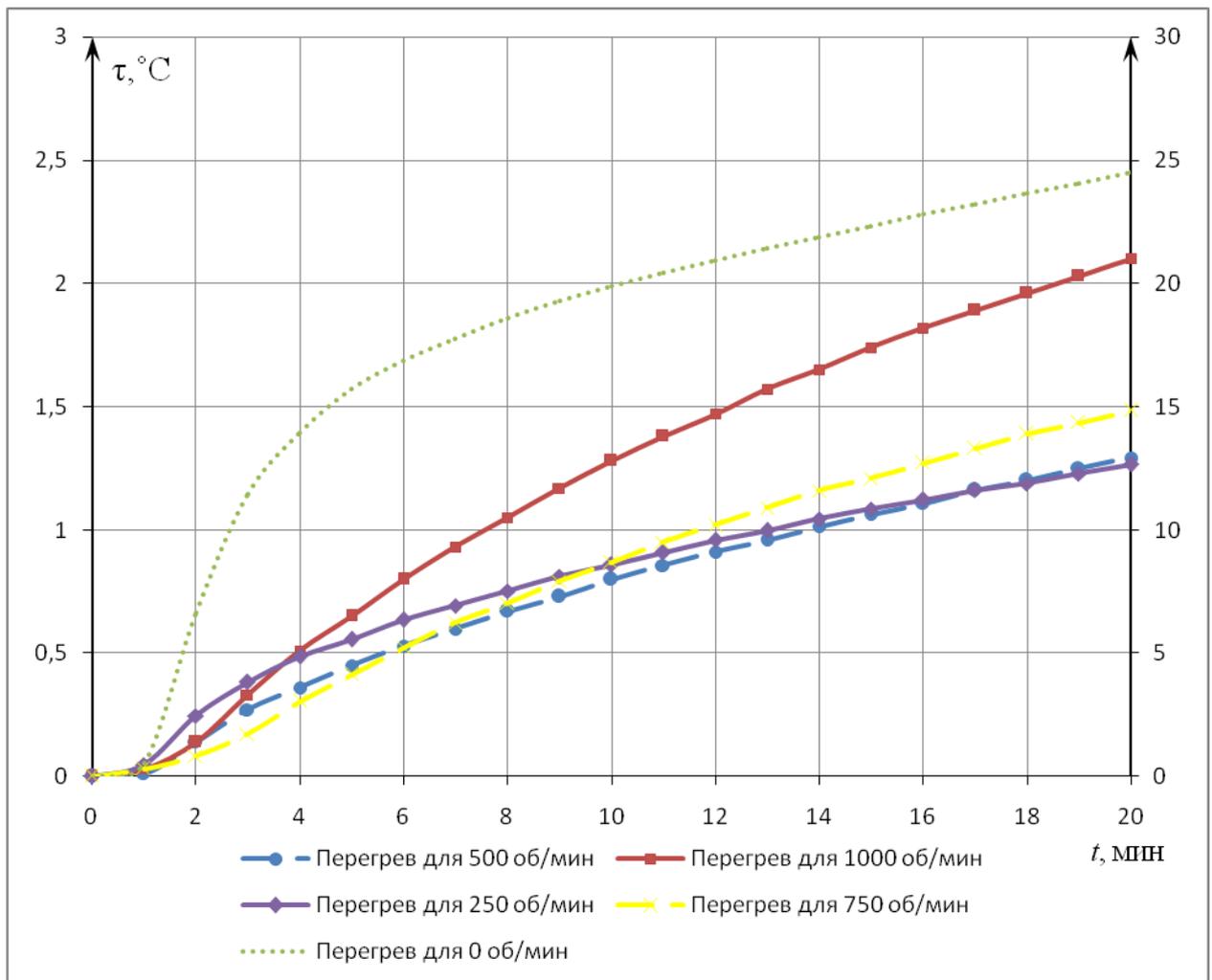
- температура окружающей среды — 23,23 °C
- подводимая мощность — около 200 Вт

Экспериментальные данные о процессе нагрева сведены в таблицу П6 Приложения Б.

На рисунке 4.11 для большей наглядности представлены совмещенные графики изменения перегрева исследуемого двигателя во времени для частот вращения 0, 250, 500, 750 и 1000 об/мин.



а)



б)

Рис. 4.11 – Совмещенные графики изменения перегрева
 а) все время эксперимента по нагреву; б) начало нагрева.

График перегрева для остановленного двигателя построен по правой оси.

По характеристикам при частотах вращения 0 и 250 об/мин виден резкий рост температуры в начале, что говорит о прекращении перемешивания воздуха лопатками вентилятора, и что масса меди лобовой части обмотки статора выделяется в отдельную третью массу.

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 приблизительно как 1/30 от теплоемкости всего двигателя. Очевидно, что при малых или нулевых

скоростях вращения лопатки 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.

В таблицу 4.1 сведены подобранные с помощью описанной в главе 2 программы параметры тепловой модели для двигателя 5,5 кВт и частот вращения выше 500 об/мин.

Таблица 4.1 – 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

На рисунке 4.12 показаны графики изменения температуры двигателя, полученные экспериментально и результаты моделирования с параметрами двухмассовой тепловой модели из таблицы 4.1. Красными линиями приведены результаты эксперимента. Синими линиями — моделированные графики перегрева.

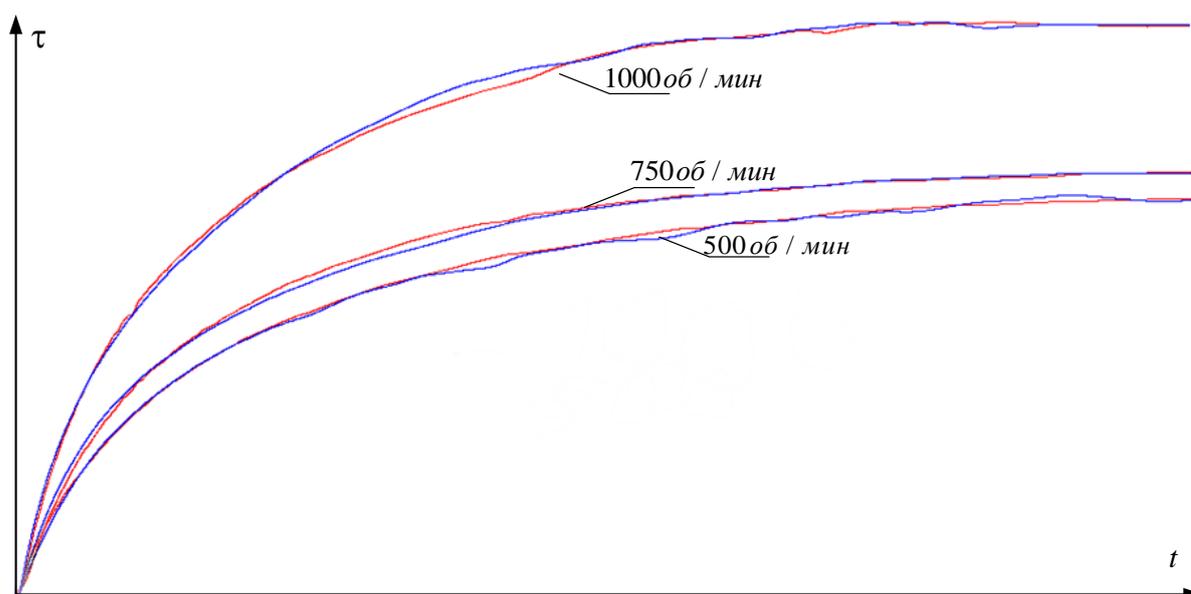


Рис. 4.12 – Графики экспериментального и модельного перегрева электродвигателя для скоростей вращения 500, 750 и 1000 об/мин

4.3 Определение потерь на гистерезис и вихревые токи

В литературе предлагается несколько вариантов учета потерь на гистерезис и вихревые токи. Рассматриваются варианты с включением эквивалентного сопротивления в цепь намагничивания, однако данные варианты жестко привязаны к частоте. Кроме того, потери при такой модели не будут зависеть от нагрузки, однако эксперименты [52] показывают, что эти потери зависят, как от скорости вращения, так и от момента на валу. Данные потери назовем потерями в железе — то есть все неомические потери. Поэтому в рамках работы были проделаны эксперименты для определения данных потерь при различных скоростях и моментах нагрузки.

В экспериментальной установке исследуемый асинхронный двигатель *АД* с короткозамкнутым ротором питается от преобразователя частоты *ПЧ*, с помощью которого задается и контролируется скорость вращения двигателя. Мощность, подводимая к испытываемому электродвигателю, вычисляется по показаниям цифрового ваттметра (*PW*). Все необходимые параметры регистрируются с помощью преобразователя частоты, а также цифрового осциллографа.

Нагружение испытываемого двигателя осуществляется с помощью асинхронного двигателя с фазным ротором *АДФР*, включенного в режим динамического торможения. Необходимый постоянный момент на валу исследуемого двигателя обеспечивается путем изменения тока статорной цепи *АДФР*, питаемой от тиристорного выпрямителя *ТВ*.

Схема эксперимента для определения потерь на гистерезис и вихревые токи представлена на рисунке 4.13.

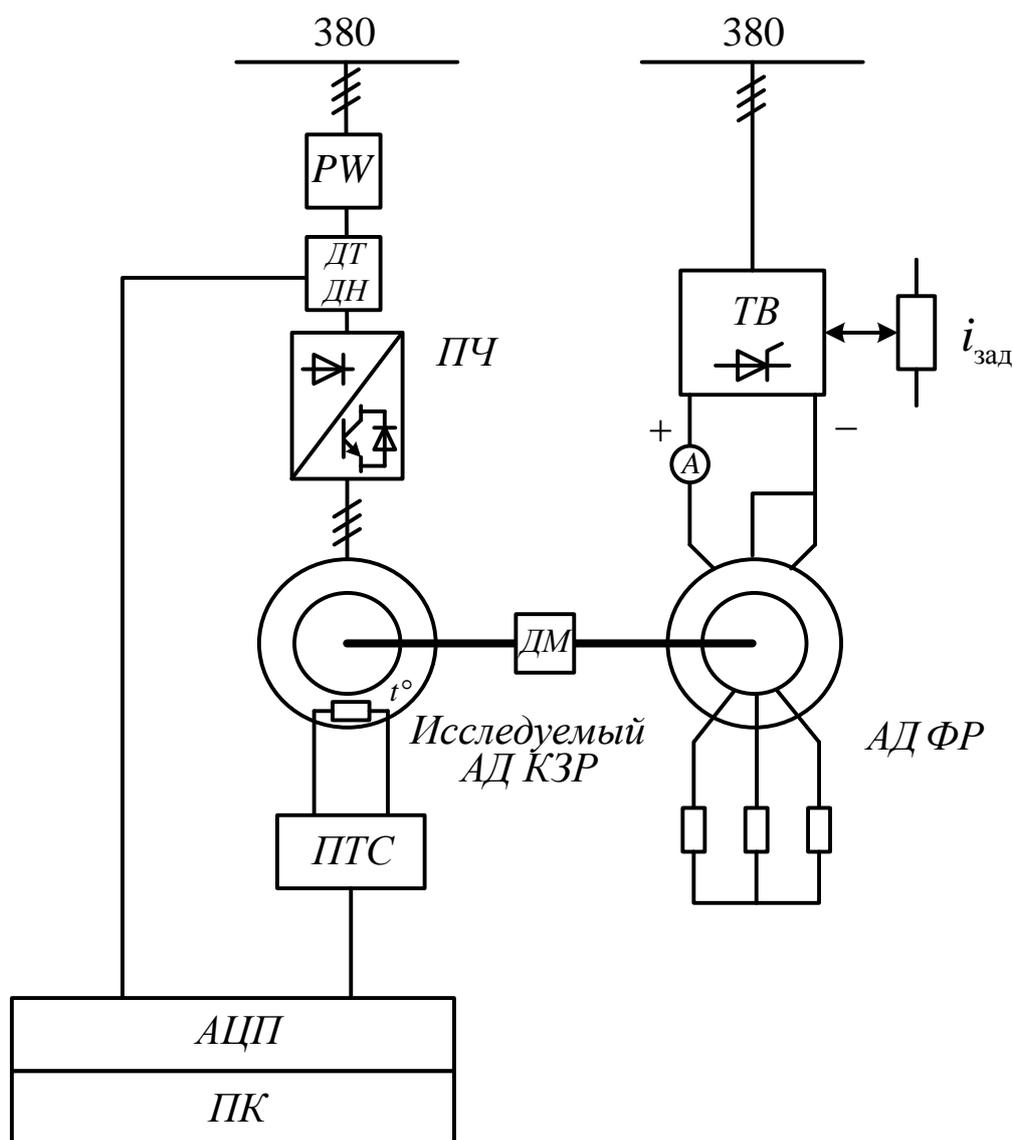


Рис. 4.13 – Схема эксперимента для определения потерь на гистерезис и вихревые токи

В ходе эксперимента для различных комбинаций скоростей вращения и моментов нагружения регистрировались следующие параметры испытуемого двигателя: подводимая мощность, частота вращения, ток и напряжение статора, момент нагрузки, температура электродвигателя, а также температура окружающей среды.

Данные экспериментов сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Экспериментальные данные по определению потерь на гистерезис и вихревые токи

Время t, мин	Температура двигателя T, °C	Подводимая мощность P, Вт	Момент нагрузки M, Нм	Ток статора I, А	Напряжение статора U, В	Частота вращения n, об/мин	Температура окр. среды T _{ос} , °C
Для частоты вращения поля 1000 об/мин и момента нагрузки 45Нм							
0	19,73	0	0	0	0	0	19,10
1	21,41	5860	44,62	12,29	380	980,10	19,23
2	24,85	5890	44,49	12,33	380	982,10	19,37
3	27,45	5730	44,53	12,32	380	979,46	19,50
4	29,44	5870	44,55	12,33	380	979,26	19,54
5	31,08	5790	44,57	12,28	380	980,28	19,59
6	32,52	5830	44,29	12,21	380	979,11	19,63
7	33,82	5780	44,32	12,22	380	978,71	19,67
8	35,04	5780	44,23	12,30	380	978,72	19,72
9	36,19	5860	44,45	12,25	380	977,99	19,76
10	37,30	5840	44,21	12,29	380	979,15	19,80
11	38,36	5850	44,34	12,23	380	979,97	19,85
12	39,38	5810	44,21	12,28	380	978,8	19,90
13	40,37	5880	44,17	12,27	380	978,74	19,95
14	41,32	5800	44,25	12,26	380	978,54	20,00
15	42,25	5850	44,51	12,22	380	978,33	20,01
16	43,14	5830	44,43	12,24	380	977,98	20,02
17	44,00	5790	44,10	12,20	380	978,30	20,03
18	44,84	5830	44,29	12,25	380	977,99	20,04
19	45,65	5820	44,39	12,23	380	977,40	20,11
20	46,46	5810	44,28	12,21	380	976,36	20,17
21	46,86	552,7	0,0	7,63	380	1000,63	20,24
22	45,86	537,2	0,0	7,63	380	999,30	20,30
23	44,76	533,7	0,0	7,65	380	999,46	20,37
24	44,23	571,9	0,0	7,64	380	999,76	20,44
25	43,98	550,9	0,0	7,65	380	1000,76	20,5
26	43,89	538,1	0,0	7,64	380	999,85	20,5
27	43,88	545,4	0,0	7,65	380	999,77	20,5
28	43,90	550,1	0,0	7,64	380	999,47	20,5
29	43,94	546,7	0,0	7,65	380	999,82	20,5
30	43,99	550,4	0,0	7,64	380	999,74	20,5
31	44,04	564,7	0,0	7,65	380	999,89	20,5
32	44,12	532,7	0,0	7,65	380	999,98	20,5
33	44,17	548,6	0,0	7,65	380	999,05	20,5
34	44,22	536,4	0,0	7,65	380	999,28	20,5
35	44,25	544,6	0,0	7,66	380	999,71	20,5
36	44,29	547,6	0,0	7,65	380	999,53	20,5
37	44,33	545,1	0,0	7,65	380	999,73	20,5
38	44,37	558,1	0,0	7,65	380	999,53	20,5

Время t, мин	Температура двигателя T, °C	Подводимая мощность P, Вт	Момент нагрузки M, Нм	Ток статора I, А	Напряжение статора U, В	Частота вращения n, об/мин	Температура окр. среды T _{ос} , °C
39	44,41	551,4	0,0	7,67	380	999,35	20,5
40	44,44	537,4	0,0	7,64	380	999,8	20,5
Для частоты вращения поля 1000 об/мин и момента нагрузки 30 Нм							
0	20,20	0	0	0	0	0	19,50
1	21,25	4020	29,77	10,13	380	988,73	19,55
2	23,63	4080	29,68	10,15	380	987,07	19,60
3	25,50	4030	29,76	10,03	380	987,40	19,65
4	26,96	4030	29,85	10,03	380	987,50	19,70
5	28,17	4050	29,80	10,09	380	988,60	19,74
6	29,25	4050	29,70	10,09	380	986,63	19,79
7	30,23	4020	29,90	10,21	380	985,98	19,83
8	31,13	4010	29,60	10,07	380	986,67	19,87
9	31,99	4020	29,74	10,16	380	986,88	19,91
10	32,81	4010	29,70	10,09	380	985,69	19,96
11	33,59	4050	29,71	10,06	380	986,79	20,01
12	34,33	4010	29,57	10,09	380	986,59	20,05
13	35,05	4030	29,57	10,07	380	986,75	20,08
14	35,75	4050	29,76	10,07	380	985,71	20,12
15	36,43	4110	29,91	10,03	380	986,06	20,15
16	37,07	4030	29,53	10,06	380	986,89	20,19
17	37,69	4040	29,62	10,06	380	986,91	20,22
18	38,30	4070	29,62	10,04	380	986,77	20,26
19	38,88	4070	29,74	10,03	380	985,22	20,30
20	39,79	4090	29,72	10,05	380	985,22	20,33
21	39,62	575,3	0,0	7,69	380	999,77	20,37
22	39,25	536,9	0,0	7,68	380	999,97	20,40
23	39,12	546,9	0,0	7,68	380	1000,59	20,44
24	39,14	534,9	0,0	7,70	380	1000,18	20,47
25	39,25	551,2	0,0	7,68	380	998,99	20,50
26	39,39	555,3	0,0	7,69	380	999,90	20,51
27	39,55	557,1	0,0	7,68	380	1000,87	20,51
28	39,70	550,1	0,0	7,68	380	1000,43	20,51
29	39,87	555,3	0,0	7,69	380	999,46	20,51
30	40,03	556,2	0,0	7,68	380	999,27	20,52
31	40,18	546,7	0,0	7,69	380	999,64	20,52
32	40,33	545,7	0,0	7,69	380	998,62	20,52
33	40,48	533,5	0,0	7,69	380	999,52	20,52
34	40,62	554,1	0,0	7,68	380	999,50	20,52
35	40,76	554,5	0,0	7,67	380	999,76	20,52
36	40,89	557,1	0,0	7,68	380	999,53	20,53
37	41,02	559,3	0,0	7,68	380	999,48	20,53
38	41,14	548,8	0,0	7,69	380	999,63	20,53
39	41,27	555,2	0,0	7,68	380	1000,87	20,53

Время t, мин	Температура двигателя T, °C	Подводимая мощность P, Вт	Момент нагрузки M, Нм	Ток статора I, А	Напряжение статора U, В	Частота вращения n, об/мин	Температура окр. среды T _{ос} , °C
40	41,41	542,3	0,0	7,68	380	999,46	20,53
Для частоты вращения поля 1000 об/мин и момента нагрузки 15Нм							
0	20,42	0	0	0	0	0	19,40
1	21,37	2370	15,69	8,57	380	993,33	19,43
2	23,09	2380	15,72	8,54	380	992,95	19,46
3	24,49	2360	15,62	8,57	380	994,26	19,48
4	25,58	2340	15,64	8,52	380	993,17	19,51
5	26,35	2380	15,72	8,55	380	992,93	19,54
6	27,42	2420	15,63	8,51	380	992,44	19,57
7	28,67	2360	15,63	8,58	380	993,02	19,59
8	28,90	2390	15,64	8,51	380	992,10	19,62
9	29,56	2370	15,66	8,53	380	992,42	19,65
10	30,23	2360	15,64	8,51	380	993,06	19,68
11	30,85	2330	15,60	8,52	380	992,93	19,70
12	31,42	2340	15,64	8,50	380	993,49	19,73
13	31,99	2350	15,54	8,53	380	992,55	19,76
14	32,53	2350	15,51	8,50	380	993,50	19,79
15	33,07	2370	15,59	8,51	380	993,13	19,81
16	33,57	2390	15,60	8,50	380	993,19	19,84
17	34,04	2360	15,66	8,50	380	992,50	19,87
18	34,50	2390	15,56	8,51	380	993,08	19,90
19	34,95	2260	15,51	8,50	380	992,69	19,92
20	35,38	2370	15,59	8,49	380	992,79	19,95
21	35,64	546,0	0,0	7,73	380	999,43	19,98
22	35,76	549,2	0,0	7,72	380	999,63	20,01
23	35,95	548,7	0,0	7,73	380	999,74	20,03
24	36,18	539,4	0,0	7,73	380	1000,24	20,06
25	36,42	539,1	0,0	7,71	380	1000,37	20,09
26	36,67	559,3	0,0	7,71	380	1000,62	20,12
27	36,93	550,6	0,0	7,72	380	1000,15	20,14
28	37,18	545,5	0,0	7,71	380	999,99	20,17
29	37,42	556,6	0,0	7,70	380	999,60	20,20
30	37,66	553,2	0,0	7,70	380	1000,08	20,23
31	37,89	554,3	0,0	7,71	380	999,98	20,25
32	38,11	560,8	0,0	7,71	380	1000,77	20,28
33	38,33	551,4	0,0	7,70	380	999,88	20,31
34	38,53	551,3	0,0	7,71	380	999,87	20,34
35	38,73	543,2	0,0	7,71	380	999,20	20,36
36	38,93	535,2	0,0	7,70	380	1000,25	20,39
37	39,12	543,9	0,0	7,70	380	999,88	20,42
38	39,305	542,9	0,0	7,71	380	999,82	20,45
39	39,49	550,3	0,0	7,69	380	999,18	20,47
40	39,66	562,3	0,0	7,70	380	998,84	20,50

Время t, мин	Температура двигателя T, °C	Подводимая мощность P, Вт	Момент нагрузки M, Нм	Ток статора I, А	Напряжение статора U, В	Частота вращения n, об/мин	Температура окр. среды T _{ос} , °C
Для частоты вращения поля 750 об/мин и момента нагрузки 45Нм							
0	18,65	0	0	0	0	0	18,50
1	20,405	4330	42,47	12,05	286	731,56	18,53
2	23,63	4360	42,55	12,04	285	731,76	18,56
3	25,999	4310	42,37	12,02	286	732,72	18,59
4	27,803	4286	42,14	12,03	286	730,36	18,62
5	29,28	4320	42,41	12,02	286	731,85	18,66
6	30,55	4340	42,24	12,01	286	731,65	18,69
7	31,698	4304	42,27	11,97	285	730,62	18,72
8	32,79	4260	42,24	12,00	286	730,22	18,75
9	33,81	4277	42,31	11,97	286	730,85	18,78
10	34,785	4283	42,16	12,04	285	730,76	18,81
11	35,74	4360	42,27	11,96	285	731,02	18,84
12	36,65	4319	42,15	11,91	285	730,24	18,87
13	37,54	4322	41,97	11,96	285	730,71	18,90
14	38,399	4305	42,28	11,94	285	730,22	18,93
15	39,23	4287	42,12	11,94	285	730,29	18,97
16	40,05	4285	42,23	11,91	285	730,17	19,00
17	40,82	4311	41,94	11,90	285	729,98	19,03
18	41,58	4281	41,91	11,96	285	729,36	19,06
19	42,34	4298	42,04	11,91	285	729,65	19,09
20	43,10	4316	42,07	11,91	285	729,85	19,10
21	42,795	471,2	0	7,66	285	750,94	19,16
22	41,66	470,8	0	7,67	285	750,50	19,21
23	41,04	472,6	0	7,68	285	749,57	19,27
24	40,78	453,7	0	7,66	285	750,03	19,33
25	40,698	478,1	0	7,65	285	750,81	19,39
26	40,71	471,5	0	7,66	285	750,52	19,44
27	40,76	480,5	0	7,67	285	750,89	19,50
28	40,835	445,1	0	7,67	285	750,23	19,52
29	40,92	474,7	0	7,68	285	750,05	19,53
30	41,01	456,0	0	7,66	285	749,87	19,55
31	41,10	448,1	0	7,66	285	749,98	19,56
32	41,19	456,2	0	7,67	285	749,43	19,58
33	41,27	472,2	0	7,67	285	750,73	19,59
34	41,36	454,7	0	7,67	285	750,29	19,61
35	41,44	461,5	0	7,68	285	749,09	19,62
36	41,52	470,6	0	7,67	285	749,35	19,64
37	41,59	465,3	0	7,67	285	750,26	19,65
38	41,67	452,9	0	7,67	285	750,22	19,67
39	41,73	462,5	0	7,66	285	750,42	19,68
40	41,805	451,6	0	7,66	285	750,93	19,70
Для частоты вращения поля 750 об/мин и момента нагрузки 30 Нм							

Время t, мин	Температура двигателя T, °C	Подводимая мощность P, Вт	Момент нагрузки M, Нм	Ток статора I, А	Напряжение статора U, В	Частота вращения n, об/мин	Температура окр. среды T _{ос} , °C
0	19,75	0	0	0	0	0	20,00
1	20,91	3160	29,87	10,11	285	737,27	20,01
2	23,26	3180	29,75	10,12	285	738,49	20,02
3	25,05	3160	29,76	10,10	286	737,01	20,03
4	26,41	3090	29,68	10,11	285	737,31	20,04
5	27,54	3120	29,63	10,08	285	737,23	20,05
6	28,53	3110	29,64	10,09	286	736,75	20,05
7	29,42	3160	29,89	10,07	286	736,68	20,06
8	30,25	3180	29,68	10,07	285	737,26	20,07
9	31,05	3160	29,70	10,08	286	736,87	20,08
10	31,8	3220	29,55	10,07	285	736,59	20,09
11	32,53	3140	29,67	10,05	285	736,35	20,10
12	33,23	3170	29,71	10,01	285	737,44	20,11
13	33,9	3150	29,74	10,05	285	736,45	20,12
14	34,55	3110	29,64	10,07	285	736,45	20,13
15	35,18	3150	29,63	10,04	285	736,91	20,14
16	35,8	3110	29,57	10,07	285	736,80	20,15
17	36,39	3140	29,50	10,04	286	736,46	20,15
18	36,97	3170	29,81	10,03	285	736,91	20,16
19	37,52	3130	29,63	10,02	285	736,08	20,17
20	38,28	3140	29,62	10,04	286	736,43	20,18
21	38,17	478,5	0	7,70	285	750,03	20,19
22	37,76	466,0	0	7,70	285	750,41	20,20
23	37,61	466,5	0	7,70	285	750,48	20,26
24	37,62	456,0	0	7,70	285	750,38	20,32
25	37,72	451,6	0	7,71	286	750,55	20,38
26	37,87	472,6	0	7,71	285	750,66	20,44
27	38,04	473,7	0	7,70	285	750,24	20,50
28	38,2	470,3	0	7,70	285	750,42	20,50
29	38,38	468,1	0	7,69	285	750,46	20,50
30	38,56	473,6	0	7,70	285	750,90	20,50
31	38,73	475,6	0	7,69	285	749,99	20,51
32	38,88	468,3	0	7,69	285	750,03	20,51
33	39,04	474,8	0	7,70	285	750,26	20,51
34	39,21	456,8	0	7,69	285	750,58	20,51
35	39,36	469,8	0	7,69	285	749,88	20,51
36	39,5	472,8	0	7,69	285	749,77	20,51
37	39,64	454,3	0	7,69	285	750,10	20,52
38	39,77	457,8	0	7,69	285	750,48	20,52
39	39,91	467,0	0	7,69	285	749,87	20,52
40	40,07	437,2	0	7,69	285	750,63	20,52
Для частоты вращения поля 750 об/мин и момента нагрузки 15Нм							
0	19,75	0	0	0	0	0	20,00

Время t, мин	Температура двигателя T, °C	Подводимая мощность P, Вт	Момент нагрузки M, Нм	Ток статора I, А	Напряжение статора U, В	Частота вращения n, об/мин	Температура окр. среды T _{ос} , °C
1	20,91	3160	29,87	10,11	285	737,27	20,01
2	23,26	3180	29,75	10,12	285	738,49	20,02
3	25,05	3160	29,76	10,10	286	737,01	20,03
4	26,41	3090	29,68	10,11	285	737,31	20,04
5	27,54	3120	29,63	10,08	285	737,23	20,05
6	28,53	3110	29,64	10,09	286	736,75	20,05
7	29,42	3160	29,89	10,07	286	736,68	20,06
8	30,25	3180	29,68	10,07	285	737,26	20,07
9	31,05	3160	29,70	10,08	286	736,87	20,08
10	31,80	3220	29,55	10,07	285	736,59	20,09
11	32,53	3140	29,67	10,05	285	736,35	20,10
12	33,23	3170	29,71	10,01	285	737,44	20,11
13	33,90	3150	29,74	10,05	285	736,45	20,12
14	34,55	3110	29,64	10,07	285	736,45	20,13
15	35,18	3150	29,63	10,04	285	736,91	20,14
16	35,80	3110	29,57	10,07	285	736,80	20,15
17	36,39	3140	29,50	10,04	286	736,46	20,15
18	36,97	3170	29,81	10,03	285	736,91	20,16
19	37,52	3130	29,63	10,02	285	736,08	20,17
20	38,28	3140	29,62	10,04	286	736,43	20,18
21	38,17	478,5	0	7,70	285	750,03	20,19
22	37,76	466,0	0	7,70	285	750,41	20,20
23	37,61	466,5	0	7,70	285	750,48	20,26
24	37,62	456,0	0	7,70	285	750,38	20,32
25	37,72	451,6	0	7,71	286	750,55	20,38
26	37,87	472,6	0	7,71	285	750,66	20,44
27	38,04	473,7	0	7,70	285	750,24	20,50
28	38,20	470,3	0	7,70	285	750,42	20,50
29	38,38	468,1	0	7,69	285	750,46	20,51
30	38,56	473,6	0	7,70	285	750,90	20,51
31	38,73	475,6	0	7,69	285	749,99	20,51
32	38,88	468,3	0	7,69	285	750,03	20,52
33	39,04	474,8	0	7,70	285	750,26	20,52
34	39,21	456,8	0	7,69	285	750,58	20,52
35	39,36	469,8	0	7,69	285	749,88	20,52
36	39,50	472,8	0	7,69	285	749,77	20,53
37	39,64	454,3	0	7,69	285	750,10	20,53
38	39,77	457,8	0	7,69	285	750,48	20,53
39	39,91	467,0	0	7,69	285	749,87	20,54
40	40,07	437,2	0	7,69	285	750,63	20,54
Для частоты вращения поля 500 об/мин и момента нагрузки 30 Нм							
0	19,75	0	0	0	0	0	20,00
1	20,91	3160	29,87	10,11	285	737,27	20,01

Время t, мин	Температура двигателя T, °C	Подводимая мощность P, Вт	Момент нагрузки M, Нм	Ток статора I, А	Напряжение статора U, В	Частота вращения n, об/мин	Температура окр. среды T _{ос} , °C
2	23,26	3180	29,75	10,12	285	738,49	20,02
3	25,05	3160	29,76	10,10	286	737,01	20,03
4	26,41	3090	29,68	10,11	285	737,31	20,04
5	27,54	3120	29,63	10,08	285	737,23	20,05
6	28,53	3110	29,64	10,09	286	736,75	20,05
7	29,42	3160	29,89	10,07	286	736,68	20,06
8	30,25	3180	29,68	10,07	285	737,26	20,07
9	31,05	3160	29,70	10,08	286	736,87	20,08
10	31,80	3220	29,55	10,07	285	736,59	20,09
11	32,53	3140	29,67	10,05	285	736,35	20,10
12	33,23	3170	29,71	10,01	285	737,44	20,11
13	33,90	3150	29,74	10,05	285	736,45	20,12
14	34,55	3110	29,64	10,07	285	736,45	20,13
15	35,18	3150	29,63	10,04	285	736,91	20,14
16	35,80	3110	29,57	10,07	285	736,80	20,15
17	36,39	3140	29,50	10,04	286	736,46	20,15
18	36,97	3170	29,81	10,03	285	736,91	20,16
19	37,52	3130	29,63	10,02	285	736,08	20,17
20	38,28	3140	29,62	10,04	286	736,43	20,18
21	38,17	478,5	0	7,70	285	750,03	20,19
22	37,76	466,	0	7,70	285	750,41	20,20
23	37,61	466,5	0	7,70	285	750,48	20,26
24	37,62	456,0	0	7,70	285	750,38	20,32
25	37,72	451,6	0	7,71	286	750,55	20,38
26	37,87	472,6	0	7,71	285	750,66	20,44
27	38,04	473,7	0	7,70	285	750,24	20,50
28	38,20	470,3	0	7,70	285	750,42	20,50
29	38,38	468,1	0	7,69	285	750,46	20,51
30	38,56	473,6	0	7,70	285	750,90	20,51
31	38,73	475,6	0	7,69	285	749,99	20,52
32	38,88	468,3	0	7,69	285	750,03	20,52
33	39,04	474,8	0	7,70	285	750,26	20,52
34	39,21	456,8	0	7,69	285	750,58	20,53
35	39,36	469,8	0	7,69	285	749,88	20,53
36	39,50	472,8	0	7,69	285	749,77	20,53
37	39,64	454,3	0	7,69	285	750,10	20,54
38	39,77	457,8	0	7,69	285	750,48	20,54
39	39,91	467,0	0	7,69	285	749,87	20,55
40	40,07	437,2	0	7,69	285	750,63	20,55
Для частоты вращения поля 500 об/мин и момента нагрузки 15Нм							
0	19,75	0	0	0	0	0	20,00
1	20,91	3160	29,87	10,11	285	737,27	20,01
2	23,26	3180	29,75	10,12	285	738,49	20,02

Время t, мин	Температура двигателя T, °C	Подводимая мощность P, Вт	Момент нагрузки M, Нм	Ток статора I, А	Напряжение статора U, В	Частота вращения n, об/мин	Температура окр. среды T _{ос} , °C
3	25,05	3160	29,76	10,10	286	737,01	20,03
4	26,41	3090	29,68	10,11	285	737,31	20,04
5	27,54	3120	29,63	10,08	285	737,23	20,05
6	28,53	3110	29,64	10,09	286	736,75	20,05
7	29,42	3160	29,89	10,07	286	736,68	20,06
8	30,25	3180	29,68	10,07	285	737,26	20,07
9	31,05	3160	29,70	10,08	286	736,87	20,08
10	31,80	3220	29,55	10,07	285	736,59	20,09
11	32,53	3140	29,67	10,05	285	736,35	20,10
12	33,23	3170	29,71	10,01	285	737,44	20,11
13	33,90	3150	29,74	10,05	285	736,45	20,12
14	34,55	3110	29,64	10,07	285	736,45	20,13
15	35,18	3150	29,63	10,04	285	736,91	20,14
16	35,80	3110	29,57	10,07	285	736,80	20,15
17	36,39	3140	29,50	10,04	286	736,46	20,15
18	36,97	3170	29,81	10,03	285	736,91	20,16
19	37,52	3130	29,63	10,02	285	736,08	20,17
20	38,28	3140	29,62	10,04	286	736,43	20,18
21	38,17	478,5	0	7,70	285	750,03	20,19
22	37,76	466,0	0	7,70	285	750,41	20,20
23	37,61	466,5	0	7,70	285	750,48	20,26
24	37,62	456,0	0	7,70	285	750,38	20,32
25	37,72	451,6	0	7,71	286	750,55	20,38
26	37,87	472,6	0	7,71	285	750,66	20,44
27	38,04	473,7	0	7,70	285	750,24	20,50
28	38,20	470,3	0	7,70	285	750,42	20,51
29	38,38	468,1	0	7,69	285	750,46	20,52
30	38,56	473,6	0	7,70	285	750,90	20,52
31	38,73	475,6	0	7,69	285	749,99	20,53
32	38,88	468,3	0	7,69	285	750,03	20,54
33	39,04	474,8	0	7,70	285	750,26	20,55
34	39,21	456,8	0	7,69	285	750,58	20,55
35	39,36	469,8	0	7,69	285	749,88	20,56
36	39,50	472,8	0	7,69	285	749,77	20,57
37	39,64	454,3	0	7,69	285	750,10	20,58
38	39,77	457,8	0	7,69	285	750,48	20,58
39	39,91	467,0	0	7,69	285	749,87	20,59
40	40,07	437,2	0	7,69	285	750,63	20,60

Суммарные потери $\Delta P_{\text{сум}}$ находятся по формуле:

$$\Delta P_{\text{сум}} = P_{PW} - M\omega, \quad (4.1)$$

где P_{PW} – мощность, регистрируемая ваттметром;

M – момент исследуемого двигателя;

ω – скорость вращения исследуемого двигателя.

Потери в статоре ΔP_S определяются по

$$\Delta P_S = 3i_S^2 R_S, \quad (4.2)$$

где i_S – ток статора исследуемого двигателя,

R_S – сопротивление статора.

Потери в роторе ΔP_R определяются по

$$\Delta P_R = M \omega_0 s, \quad (4.3)$$

где ω_0 – скорость вращения поля исследуемого двигателя;

s – скольжение.

Потери в ПЧ относительно невелики и их можно оценить по формуле:

$$\Delta P_{ПЧ} = 3I_{\delta\delta} \Delta U_{VT} \left(1 + \frac{f_{ШИМ}}{10000} \right) + 3 \frac{P_{сети}}{3U_{сети}} \Delta U_{VD} + P_{собств}, \quad (4.4)$$

где $\Delta U_{VT} = 2,5$ В — среднее падение напряжения на ключах инвертора, $\Delta U_{VD} = 1,9$ В — среднее падение напряжения на диодах выпрямителя. Принято, что на при ШИМ 10 кГц коммутационные потери инвертора приблизительно равны потерям проводимости, тогда для частоты ШИМ равной 5 кГц, используемой при проведении опыта, суммарные потери инвертора будут в полтора раза больше коммутационных потерь. $P_{собств}$ — потребление собственных нужд ПЧ — около 20 Вт.

Потери в железе ΔP_{iron} можно найти по формуле:

$$\Delta P_{iron} = \Delta P_{сум} - \Delta P_S - \Delta P_R - \Delta P_{ПЧ}. \quad (4.5)$$

Для исследуемого двигателя данные о потерях на гистерезис и вихревые токи при различных моментах нагрузки и частотах вращения сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Потери на гистерезис и вихревые токи

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

4.4 Определение числа масс роторной цепи

В виду того, что на низких скоростях выделяется масса меди, необходимо проверить, не выделяется ли масса алюминия в роторе на высоких скоростях.

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.

Асинхронный двигатель АД с короткозамкнутым ротором питается от сети и работает на естественной механической характеристике. Скорость вращения двигателя контролируется через преобразователь частоты ПЧ, который получает информацию с квадратурного (инкрементального) датчика скорости. Нагружение испытуемого двигателя осуществляется с помощью АДФР, включенного в режим динамического торможения. Изменяя ток статорной цепи, питаемой от тиристорного выпрямителя ТВ, обеспечивается постоянный момент на валу двигателя независимо от тепловых процессов и изменения скорости вращения.

Схема эксперимента для определения числа масс роторной цепи представлена на рисунке 4.14.

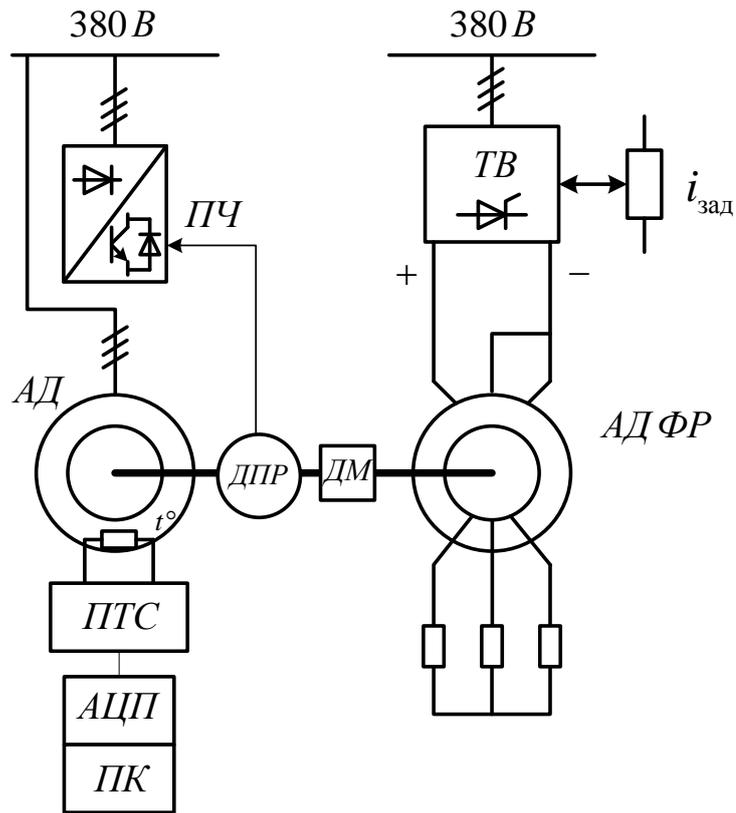


Рис. 4.14 – Схема эксперимента для определения числа масс роторной цепи (АД питается от сети, ПЧ используется для измерения скорости)

В процессе нагрева при постоянном моменте сопротивления будет меняться скольжение, по которому можно определить изменение температуры роторной цепи (рисунок 4.15).

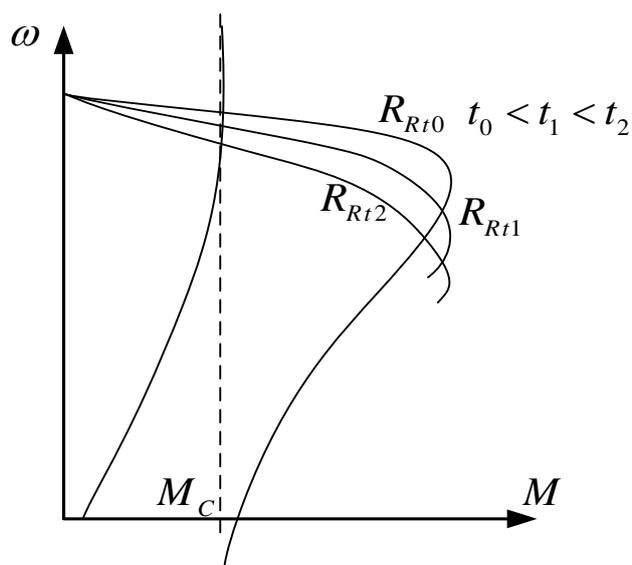


Рис. 4.15 – Изменение скольжения асинхронного двигателя при изменении сопротивления ротора

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.

Тепловые эксперименты проводились при следующих условиях:

- температура окружающей среды — 21,5 °С;
- подводимая мощность за время эксперимента изменялась в пределах от 3,022 до 3,06 кВт;
- коэффициент мощности за время эксперимента менялся в пределах от 0,804 до 0,807;
- момент сопротивления — 30 Нм.

На рисунке 4.16 представлен график изменения скорости во времени, снятый для исследуемого асинхронного двигателя. Экспериментальные данные о процессе нагрева при постоянном моменте сопротивления сведены в таблицу П7 Приложения Б.

На графике изменения скорости четко прослеживается только одна экспонента, что говорит о том, что для данного эксперимента ротор можно считать единой тепловой массой.

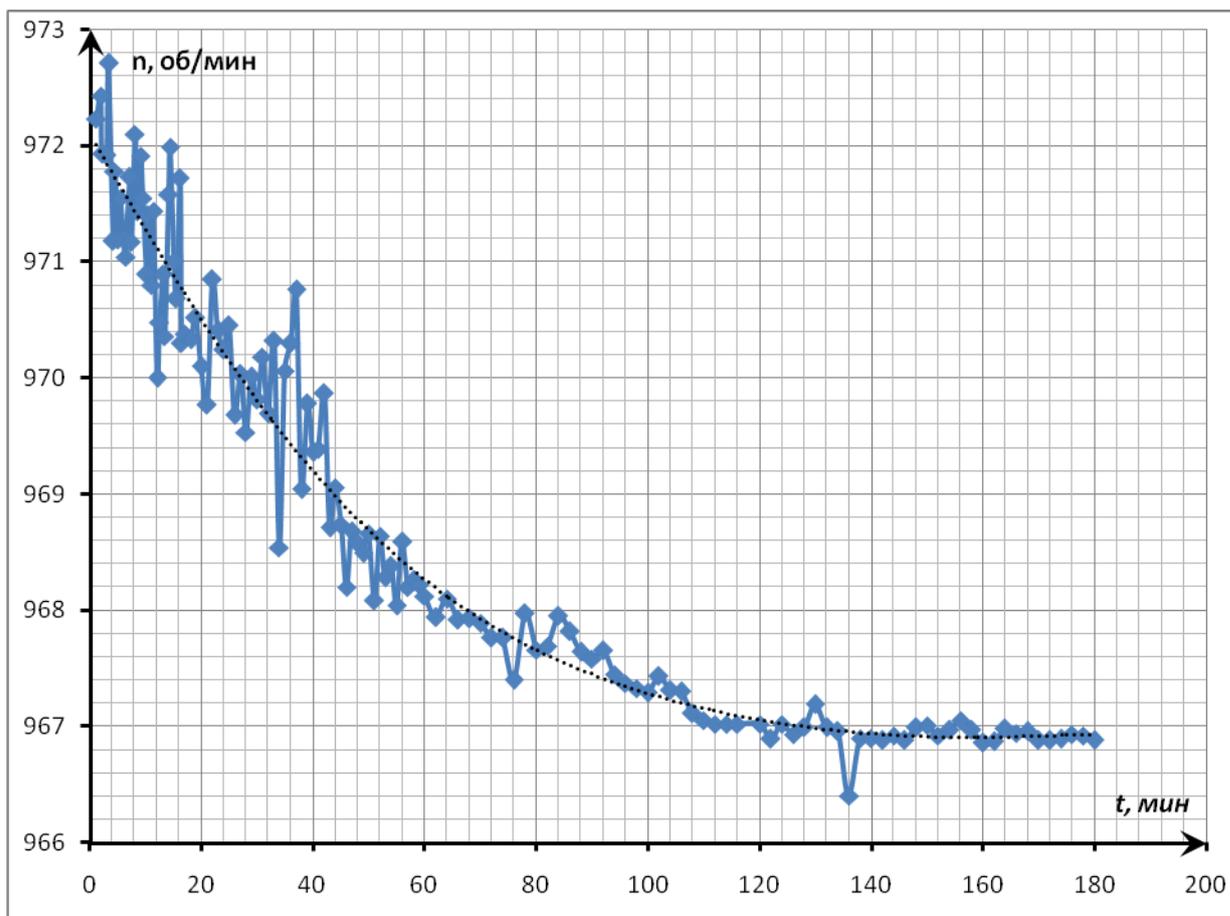


Рис. 4.16 – График изменения скорости при нагреве испытуемого двигателя при постоянном моменте сопротивления

Результаты и выводы:

Были разработаны схемы на базе стендов лаборатории учебного центра «АББ – МЭИ» для проведения испытаний по определению параметров двухмассовой тепловой модели.

На базе разработанных схем был проведен ряд тепловых экспериментов для различных частот вращения исследуемого асинхронного электродвигателя. По проведенным экспериментам можно сделать следующие выводы:

Для частот вращения выше 500 об/мин можно использовать двухмассовую тепловую модель с отдельными массами статора и ротора.

Для частот вращения ниже 500 об/мин следует использовать как минимум 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.

Экспериментально было подтверждено, что ротор асинхронных двигателей может быть представлен одномассовой системой и разделение его на массы алюминия и стали для двигателей с залитой беличьей клеткой не требуется.

Глава 5. Методика оценки теплового состояния электропривода с асинхронным электродвигателем в процессе работы для защиты по нагреву

Основным источником тепла в асинхронном двигателе являются потери в обмотках статора и ротора, в стали и механические потери [53]. Нагрев происходит, в основном, за счёт энергии, выделяющейся в проводниках с током. Кроме этого, тепло выделяется в стали (магнитные потери) и во вращающихся элементах машины (механические потери) [54]. При этом следует разделить механические потери, которые являются моментом нагрузки на валу и затратами на процесс охлаждения машины и потери в подшипниках, производящие нагрев двигателя. Последние, как показали результаты, представленные в третьей главе, пренебрежимо малы по сравнению с остальными потерями.

На сегодняшний день известен способ оценки и контроля нагрева и защиты обмоток электродвигателя от перегрева, возникающего от токовых перегрузок недопустимой продолжительности, в том числе при потере одной из фаз, с использованием тепловых реле, основой которых являются термоэлементы, связанные через исполнительный механизм с контактами в цепи катушки контактора, срабатывающих от превышения тока, который может привести к перегреву, тепловому старению изоляции обмоток и преждевременному выходу из строя электродвигателя [55].

Недостатком такого способа является несоответствие превышений номинального тока в обмотках статора электродвигателя температуре их нагрева при частотном регулировании при изменении скорости вращения вентилятора самовентилируемого двигателя. В этом случае даже при номинальном значении тока электродвигателя температура нагрева обмоток может превысить допустимые значения, в то время как защита не сработает. Кроме этого, данный способ не учитывает теплового состояния роторной цепи.

Наиболее близким аналогом к предлагаемой методике является способ оценки теплового состояния двигателя по среднеквадратичным токам фаз, заключающийся в измерении фазных токов двигателя, возведения их в квадрат и

нормировании относительно квадрата номинального тока. Полученное значение характеризует тепловыделение в обмотках статора по отношению к номинальному и, будучи поданным на одномассовую тепловую модель двигателя, позволяет вычислить его перегрев, что используется для защиты двигателя. Данный способ оценивает потери на активном сопротивлении статорной цепи асинхронного двигателя, может учитывать изменение теплоотдачи двигателя при регулировании скорости вращения самовентилируемых двигателей и позволяет сравнить их с номинальными потерями [1].

Недостатком данного способа является то, что он не применим при изменении поля двигателя при частотном регулировании, так как при изменении потока потери в роторной цепи могут меняться в широких пределах.

Из алгоритмов, применяемых в современных преобразователях частоты, нам доступна лишь информация по изделиям, разработанным на кафедре АЭП. Другие производители преобразователей частоты не публикуют информацию о применяемых алгоритмах. Так, тепловая модель в преобразователях частоты «Универсал», выпускаемых до 2012 года, была реализована по нижеописанному принципу.

Тепловая модель двигателя построена на базе метода эквивалентного тока, применяемого для проверки двигателя по нагреву [1]. Условия работы метода подразумевают, что двигатель работает с потоком, близким к номинальному, то есть с линейной кривой зависимости напряжения от частоты, так как только в этом случае метод способен правильно оценить потери и защитить двигатель от перегрева.

Нагрев двигателя происходит из-за выделения потерь, которые при постоянстве потока асинхронного двигателя будут приблизительно пропорциональны квадрату тока. Теплоотдача при номинальной скорости равна номинальным потерям при номинальном перегреве двигателя. При уменьшении скорости вращения двигателя у самовентилируемых машин наблюдается ухудшение теплоотдачи, которое приводит к тому, что двигатель на низких оборотах перегревается при протекании по нему номинального тока. Так как

постоянная времени нагрева двигателя определяется отношением теплоемкости двигателя к теплоотдаче, то при уменьшении теплоотдачи возрастает постоянная времени. Было проведено преобразование полной тепловой модели к расчетной для системы управления.

Полная тепловая модель, изображенная на рисунке 5.1, имеет на входе потери $\Delta P(i^2)$, которые принимаются пропорциональными квадрату тока. Потери, за вычетом теплоотдачи производят нагрев двигателя, имеющего теплоемкость C , после чего получается оценка перегрева τ' . Перегрев умножается на коэффициент теплоотдачи в номинальном режиме – A и коэффициент ухудшения теплоотдачи – β , вызванный возможным уменьшением скорости вращения двигателя.

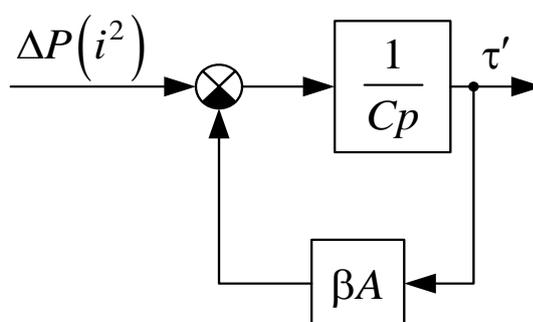


Рис. 5.1 – Тепловая модель двигателя в преобразователях частоты «Универсал», выпускаемых до 2012 года

После преобразования к системе относительных единиц и упрощения системы получаем структуру, показанную на рисунке 5.2.

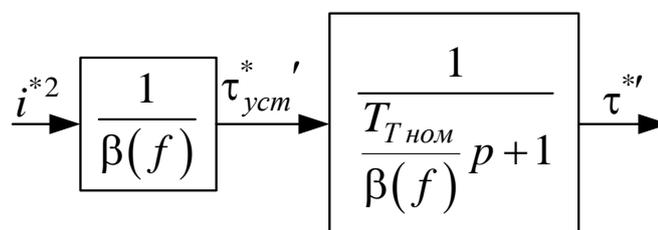


Рис. 5.2 – Результирующая тепловая модель для преобразователей частоты «Универсал», выпускаемых до 2012 года

На вход поступает квадрат тока двигателя. При номинальном значении тока и скорости это будет соответствовать номинальным потерям, а, следовательно, в установившемся режиме перегрев будет стремиться к номинальному. Однако коэффициент ухудшения теплоотдачи β меняется при изменении скорости вращения. Так как информации о скорости вращения у нас нет, то будем считать, что скорость вращения приблизительно равна выходной частоте (если выражать в относительных единицах). Тогда можно определить β из заданного допустимого тока при нулевой скорости – I_0 и допустимого тока при номинальной скорости – $I_{ном}$:

$$\beta = \beta_0 + (\beta_n - \beta_0) f = \left(\frac{I_0^*}{I_{ном}^*} \right)^2 + \left(1 - \left(\frac{I_0^*}{I_{ном}^*} \right)^2 \right) f^*. \quad (5.1)$$

С использованием полученных в предыдущих главах информации о двухмассовой тепловой модели следует разработать новый алгоритм организации защиты двигателя от перегрева средствами системы управления преобразователя частоты.

5.1 Методика оценки теплового состояния электропривода с асинхронным электродвигателем

Представленная методика оценки теплового состояния асинхронного электродвигателя основывается на использовании аппарата обобщенной электромеханической машины и двухмассовой тепловой модели.

Имеются уравнения равновесия статорной обмотки асинхронного двигателя в осях, вращающихся синхронно с напряжением статора:

$$\left. \begin{aligned} u_{sx} &= i_{sx} R_s + \frac{d\psi_{sx}}{dt} - \omega_0 \psi_{sy}; \\ u_{sy} &= i_{sy} R_s + \frac{d\psi_{sy}}{dt} + \omega_0 \psi_{sx}; \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

По измеренным токам и заданным напряжениям с помощью уравнений электромагнитных процессов статорной цепи асинхронного двигателя, пренебрегая переходными процессами, вычисляют потокосцепление статора [53]:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{sy} &= -\frac{u_{sx} - i_{sx}R_s}{\omega_0}; \\ \Psi_{sx} &= \frac{u_{sy} - i_{sy}R_s}{\omega_0}, \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

где u_{sx} и u_{sy} – напряжения статора по осям x, y;

i_{sx} и i_{sy} – токи статорной цепи;

R_s – активное сопротивление статорной цепи;

ω_0 – скорость холостого хода.

Затем, находятся потокосцепления по уравнениям:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{sx} &= L_s i_{sx} + L_m i_{rx}; \\ \Psi_{sy} &= L_s i_{sy} + L_m i_{ry}, \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

Зная данные потокосцепления, а также индуктивность статора и взаимную индуктивность, можно найти токи роторной цепи:

$$\left. \begin{aligned} i_{rx} &= \frac{\Psi_{sx} - L_s i_{sx}}{L_m}; \\ i_{ry} &= \frac{\Psi_{sy} - L_s i_{sy}}{L_m}, \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

где L_m – взаимная индуктивность статора и ротора.

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:

$$\Delta P_s = \frac{3}{2} (i_{sx}^2 R_s + i_{sy}^2 R_s) + \Delta P_{iron}, \quad (5.6)$$

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

$$\Delta P_r = \frac{3}{2} (i_{rx}^2 R_r + i_{ry}^2 R_r), \quad (5.7)$$

где R_r – активное сопротивление роторной цепи.

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

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 АВВ.

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.

Уравнения потерь подставляются в уравнения теплового баланса для двухмассовой тепловой модели асинхронного двигателя и вычисляются мгновенные значения температур масс статора и ротора [21]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\tau_s}{dt} &= \frac{1}{C_s} (\Delta P_s - A_{sr} (\tau_s - \tau_r) - A_{sa} \tau_s); \\ \frac{d\tau_r}{dt} &= \frac{1}{C_r} (\Delta P_r + A_{sr} (\tau_s - \tau_r)), \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

где C_s и C_r – теплоемкости статора и ротора;

A_{sr} и A_{sa} – теплопроводности между статором и ротором и между статором и окружающей средой, соответственно;

τ_s и τ_r – перегревы статора и ротора.

На рисунке 5.3 приведена схема, реализующая предлагаемую методику определения теплового состояния асинхронного электродвигателя.

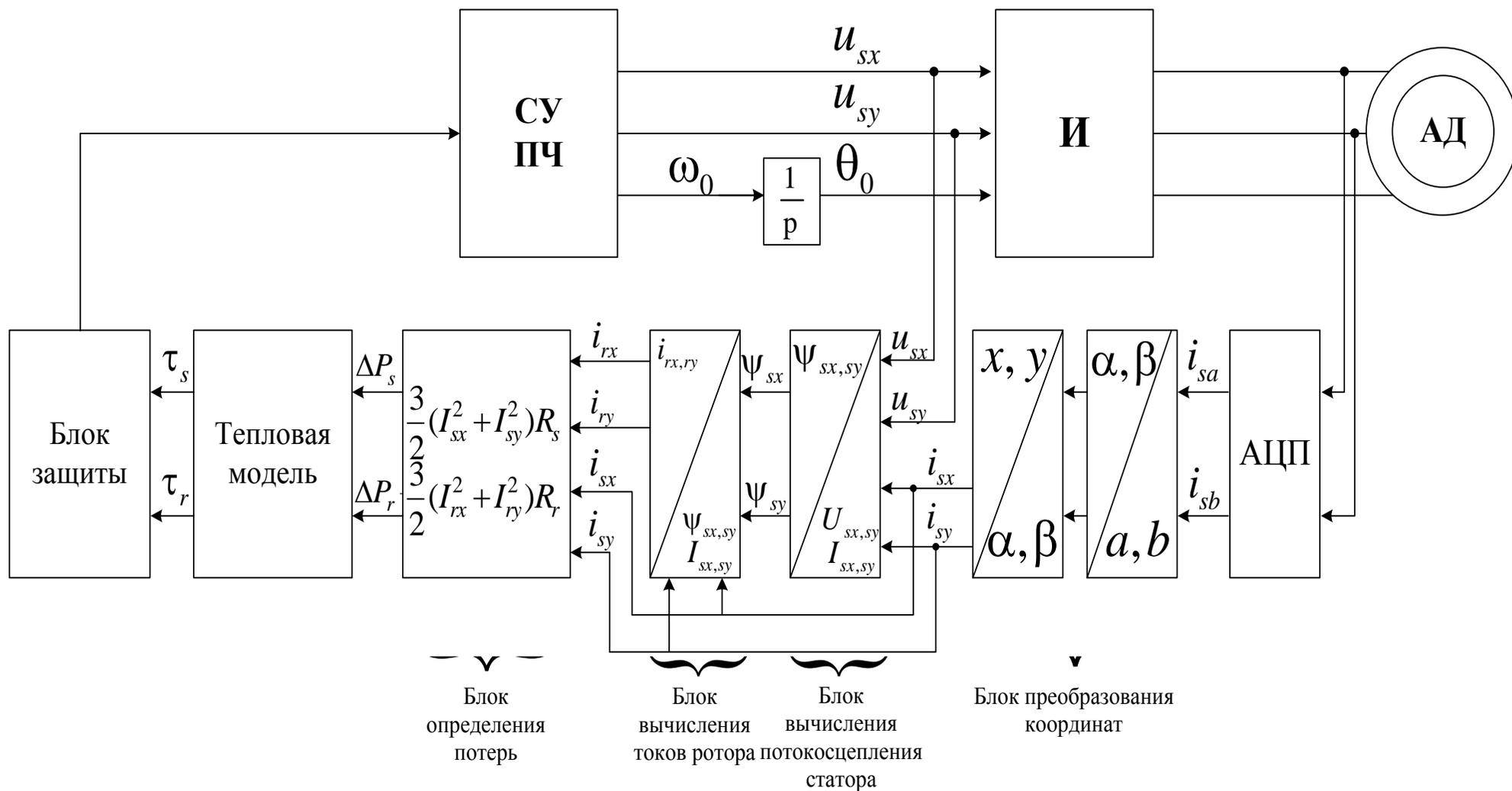


Рис.5.3 – Схема, реализующая методику определения теплового состояния асинхронного двигателя

Данная схема содержит систему управления преобразователем частоты *СУ ПЧ*, выходы которого соединены с инвертором *И*, через датчик тока соединенный с испытуемым двигателем. Выходы датчика тока подключены к аналогово-цифровому преобразователю *АЦП*, выходы которого соединены с блоком преобразования координат (к входу которого присоединяют выход с системы управления преобразователя частоты). К выходам блока преобразования координат подключен блок вычисления потокосцепления статора, к входам которого также присоединяют выходы с системы управления преобразователя частоты, а к выходам – присоединен блок вычисления токов ротора (к входам которого также присоединяются выходы с блока преобразования координат). К выходам блока вычисления токов подключен блок определения потерь, выходы которого подключены к блоку защиты. Выход с блока защиты приходит на один из входов системы управления преобразователем частоты.

5.2 Программная реализация алгоритма расчета теплового состояния электродвигателя в составе электропривода со скалярной системой управления

Методика определения теплового состояния асинхронного двигателя может быть заложена в преобразователь частоты и осуществляется следующим образом:

- Сигналы с датчика тока двигателя поступают на АЦП, а затем в блок преобразования координат, после чего преобразованные величины попадают в блок вычисления потокосцепления статора, в котором заложены формулы (5.3). Вычисленные значения попадают в блок вычисления токов ротора, в котором заложены формулы (5.5). С помощью полученных в предыдущих блоках значениях в блоке определения потерь, в котором заложены

формулы (5.6) и (5.7), находятся оценки тепловых потерь в статоре и роторе.

- Полученные оценки используют в тепловой модели для определения значений перегрева статора и ротора, которые впоследствии сравнивают с заданными величинами в блоке защиты. Если полученные значения превышают граничные, то в систему управления преобразователем частоты подаются сигналы на отключение или на снижение величин.

Блок-схема предложенного алгоритма представлена на рисунке 5.4.

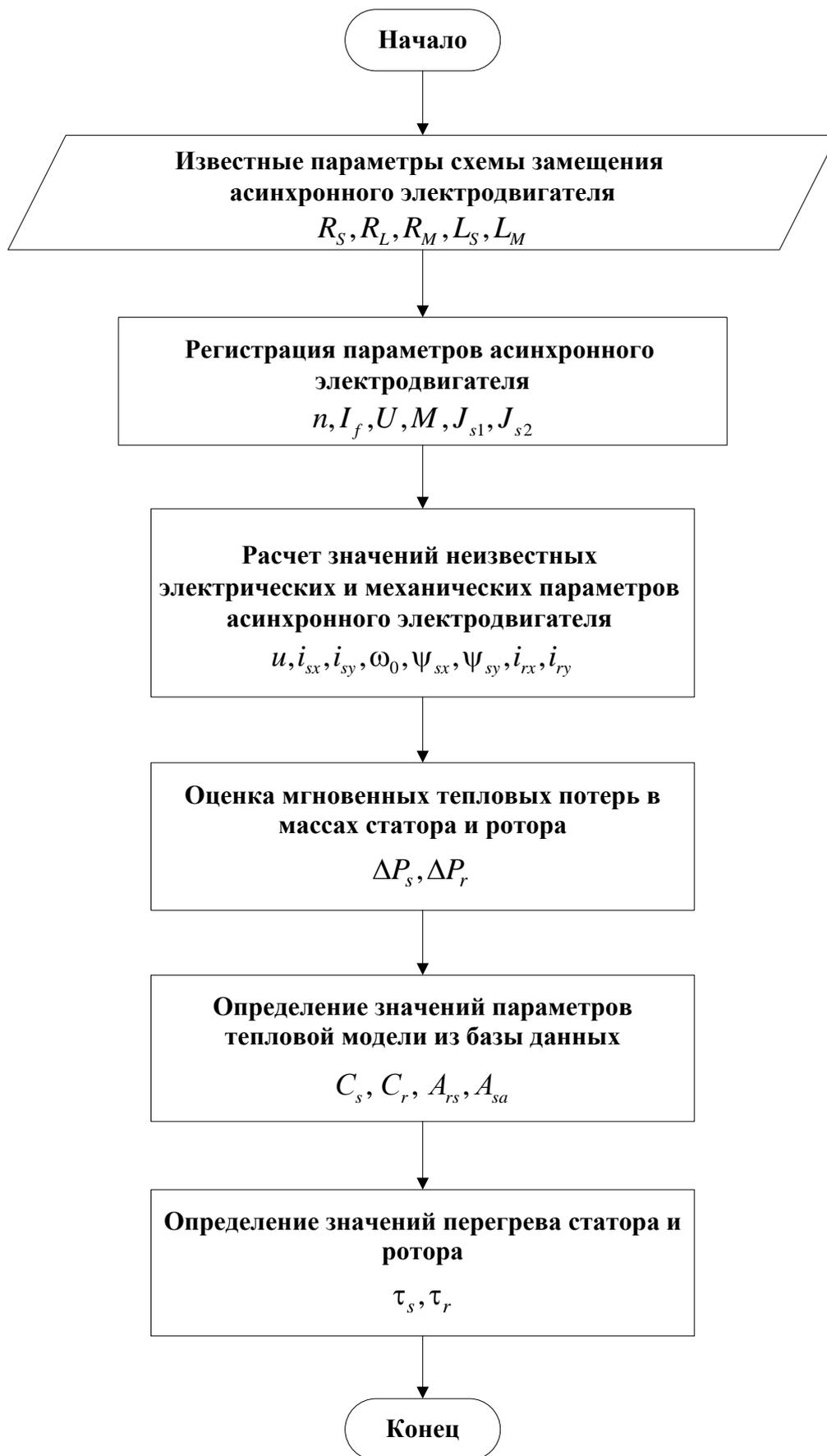


Рис. 5.4 – Блок–схема алгоритма расчета теплового состояния асинхронного электродвигателя

В процессе работы электропривода электрические параметры, такие как сопротивление статорной и роторной цепей могут меняться из-за изменения температуры. Данные изменения могут быть учтены с помощью выражений:

$$\left. \begin{aligned} R_s &= R_{s20}(1 + \alpha_{Cu}t_s); \\ R_r &= R_{r20}(1 + \alpha_{Al}t_r). \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

использующих данные из тепловой модели.

5.3 Проверка адекватности методики

Для проверки адекватности методики оценки теплового состояния, описанной в пятой главе, был проведен эксперимент, в котором были заданы циклограмма и тахограмма. Испытуемый двигатель питается от преобразователя частоты, фиксируется перегрев двигателя. С помощью параметров тепловой модели был рассчитан график перегрева двигателя.

Описание экспериментальной установки

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

Схема испытательного стенда для проведения опыта представлена на рисунке 5.5.

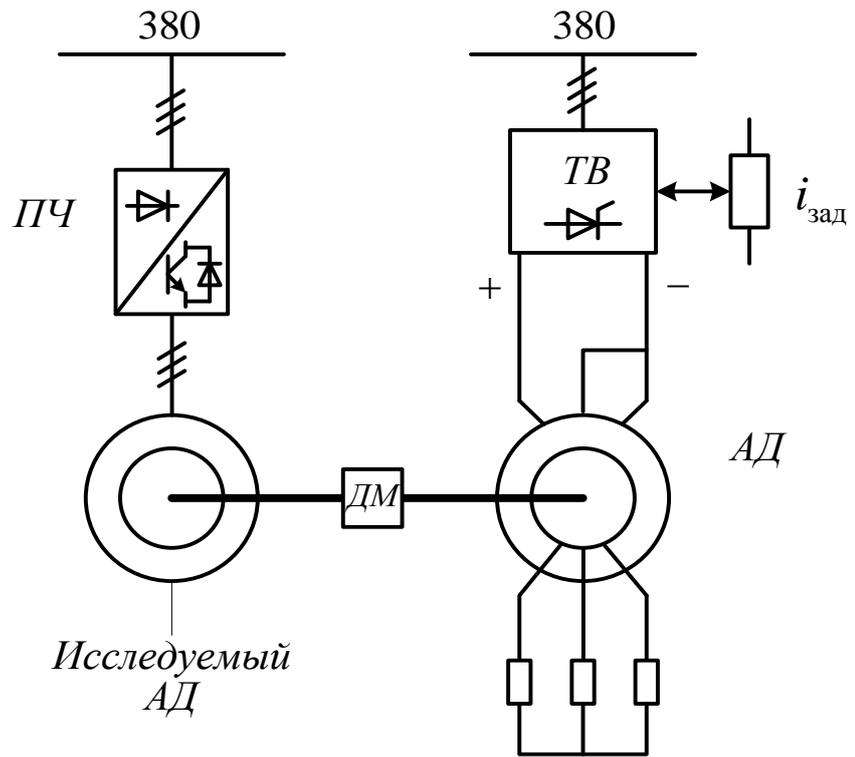


Рис. 5.5 – Схема испытательного стенда

Для заданной тахограммы и нагрузочной диаграммы (рисунок 5.6) экспериментально получен график изменения температуры лобовой части статорной обмотки, представленный на рисунке 5.7.

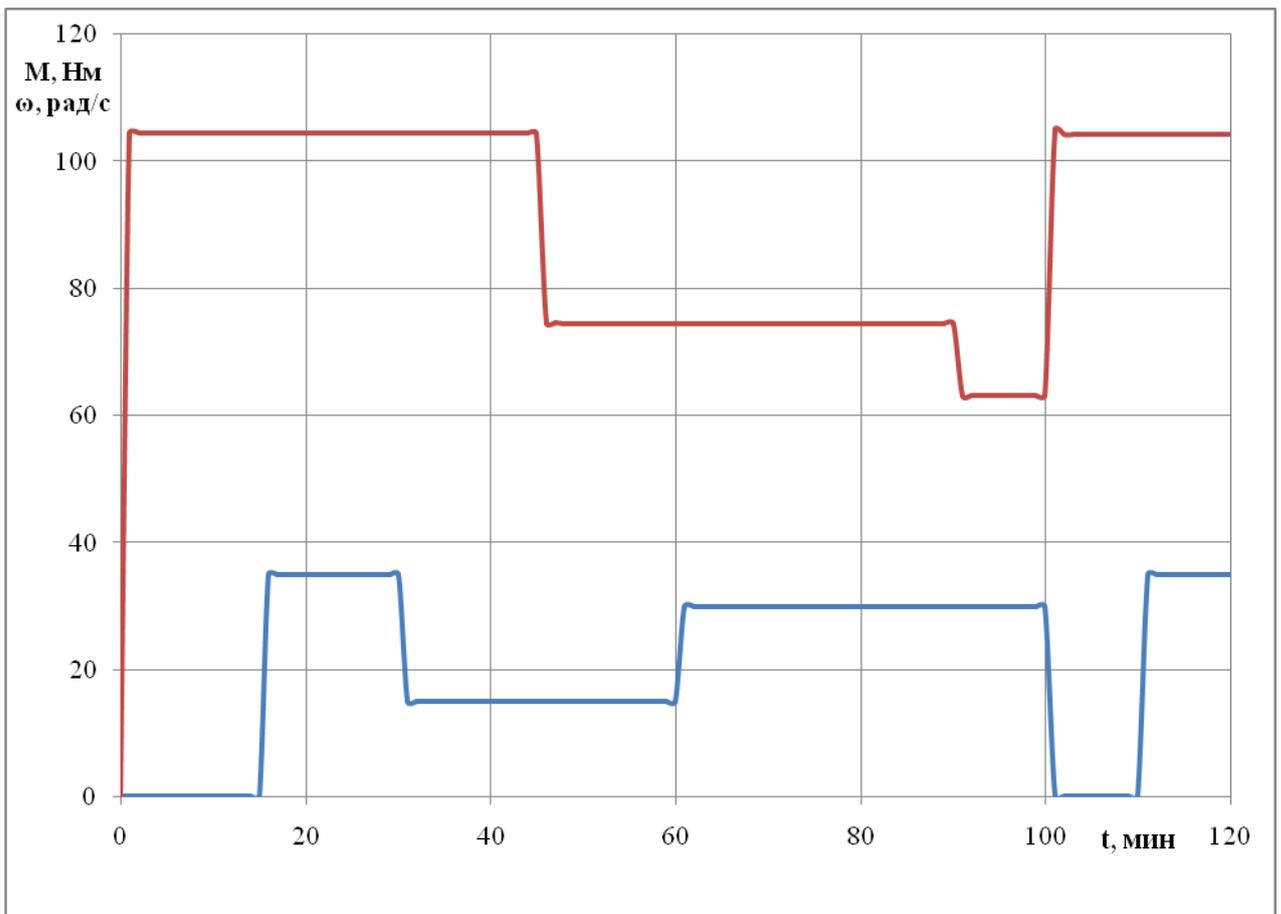


Рис. 5.6 – Тахограмма и нагрузочная диаграмма работы электропривода

Для представленной выше 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.

Экспериментальные и расчетные данные по нагреву электродвигателя при отработке заданных параметров изменения скорости и момента представлены в таблице П8 Приложения Б.

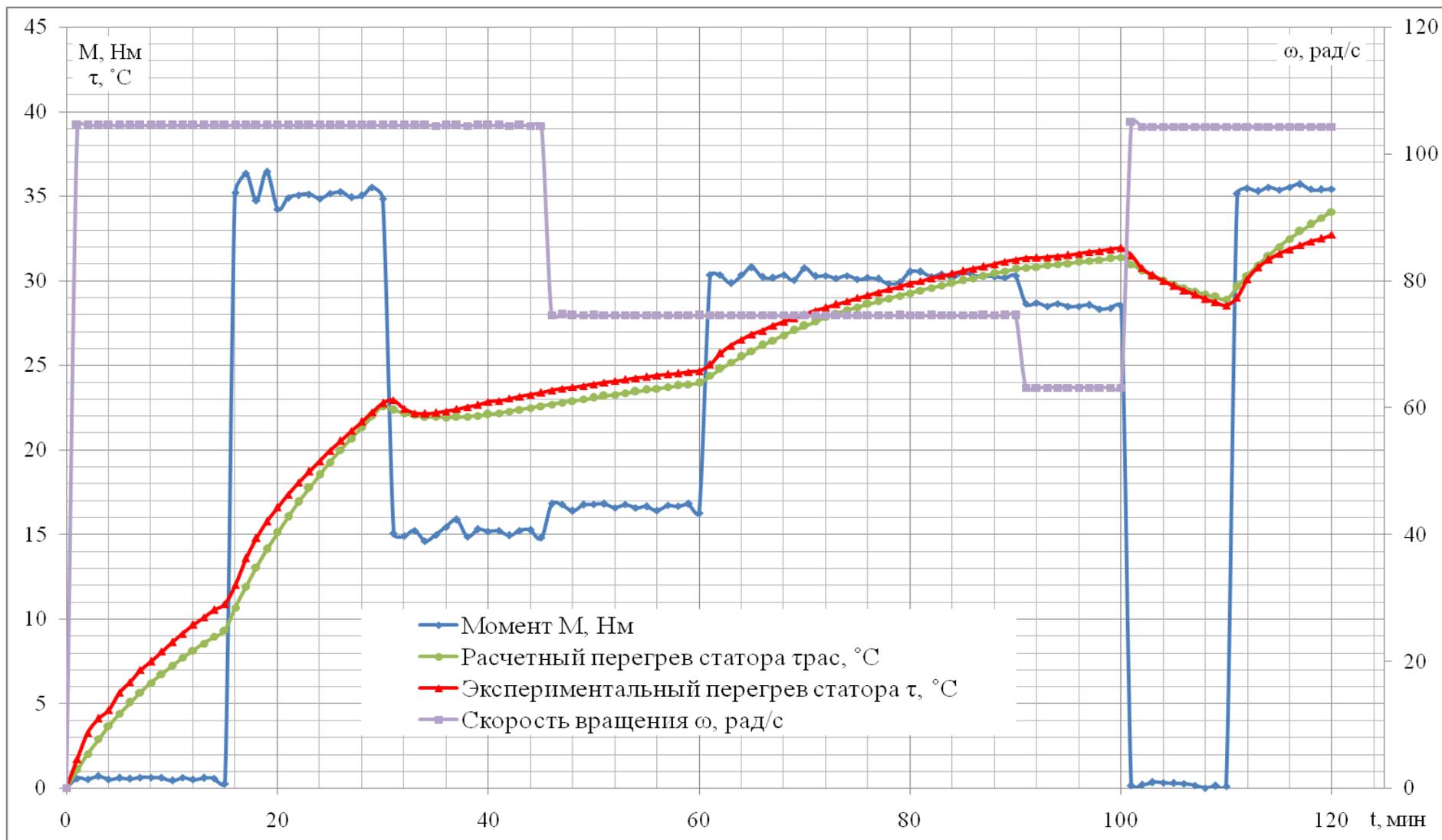


Рис 5.7 – Тахограмма и нагрузочная диаграмма работы электропривода и экспериментальные и модельные значения перегревов лобовой части обмотки статора по предложенной методике

Результаты и выводы:

В данной главе была рассмотрена реализация системы оценки теплового состояния частотно-регулируемого асинхронного электропривода, которая была в последствии реализована в системе управления преобразователей частоты серии «Универсал». Система построена на относительно простых уравнениях и функционирует в прерывании с частотой вызова 1 мс. Время выполнения одного шага расчета составляет около 2500 тактов, что для тактовой частоты микроконтроллера TMS320F2810 150 МГц составляет 17 мкс или 1,7 % процессорного времени.

Заключение

В ходе работы над диссертацией были разработаны следующие методики: методика экспериментального определения параметров тепловой модели асинхронного электродвигателя, построенная на измерении температуры железа статора или температуры лобовой части обмотки, и методика оценки теплового состояния асинхронного электродвигателя, применяемая для тепловой защиты электродвигателя средствами системы управления преобразователя частоты, отличающаяся большей точностью по сравнению с известными существующими методиками.

Были проведены серии экспериментов по определению параметров предложенной тепловой модели, а также для проверки адекватности разработанной методики оценки теплового состояния электродвигателя. Описаны порядок проведения экспериментов и требования к оборудованию.

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ существующих тепловых моделей электродвигателей в составе частотно-регулируемого электропривода и выбрана оптимизированная двухмассовая тепловая модель асинхронного двигателя, пригодная для численного моделирования тепловых процессов.

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

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

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

5. Показано, что для низких скоростей вращения желательнее 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.

6. Разработана и экспериментально проверена методика оценки теплового состояния электропривода с асинхронным электродвигателем в системе частотного регулирования при отработке 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» (см. Приложение В).

Библиографический список

1. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода. – М.: Издательство МЭИ, 2007
2. Москаленко В.В. Электрический привод [Текст] : учеб.пособие для сред. проф. образования / В. В. Москаленко. - 2-е изд., стер. - Москва :ACADEMIA, 2004. - 365, [1] с. :
3. Федорова К.Г. Компьютерная поддержка выбора асинхронного электропривода общепромышленных механизмов: маг.дисс. – М., 2011.
4. Онищенко Г.Б. Значение автоматизированного электропривода для модернизации экономики. Иваново. 2012
5. Михалев С.В., Пирогов М.Г. Экспериментальное определение постоянных времени тепловых моделей электродвигателей. – Релейная защита и автоматизация. 2014. № 1 (14). С. 22-25.
6. Цифровая релейная защита/ Э.М. Шнеерсон; М.: Энергоатомиздат, 2007.
7. 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.
8. Макаров А.В., Вечеркин М.В., Завьялов А.С. Обзор тепловых моделей асинхронных двигателей. – Электротехнические системы и комплексы, (2013), 21, С. 75-84
9. Блок микропроцессорный релейной защиты дифференциальный двигателя БМРЗ-ДД-04-Руководство по эксплуатации ДИВГ.468243.001-03 РЭ
10. ABB. Low voltage Industrial performance motors. Product catalog. URL: https://library.e.abb.com/public/ef25547cc63ba670c1257b130056f317/IPM_9AKK104_559%20EN%20Feb2010_low.pdf
11. Федоров М.М., Динамические тепловые модели узлов электрических машин // Електромашинобудування та електрообладнання. Міжвід. наук.техн. зб. 1999 Вип. 53. С.70-73

12. Котеленец Н.Ф, Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1988.
13. Докукин А.Л. Тепловые модели вентильно-индукторных двигателей в электроприводе: Дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2006. – 111с.
14. Шрейнер Р.Т., Костылев А.В., Кривовяз В.К., Шилин С.И. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления: учеб. пособие. / Под ред. Р.Т. Шрейнера. Екатеринбург: ГОУ ВПО «Рос.гос. проф. _пед. ун_т», 2008.
15. Минаков А.А. Разработка алгоритмов выбора двигателей в электроприводах со стохастической нагрузкой: Дисс.... канд.техн.наук. – М.: Моск. энерг. ин-т, 1986. – 197 с.
16. Бухгольц, Ю.Г. Основы аэродинамических и тепловых расчетов в электромеханике : учеб. пособие / В.А. Тюков, Т.В. Честюнина, Ю.Г. Бухгольц.— Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008
17. Адаптивная математическая модель тепловых процессов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Зализный Д.И., Широков О.Г., Попичев В.В. // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2015. Т. 1. № 1-1 (60). С. 31-43.
18. Булычев А.В., Ерохин Е.Ю., Поздеев Н.Д., Филичев О.А. Тепловая модель асинхронного двигателя для цепей релейной защиты // Электротехника. 2011. № 3. С. 26-30.
19. Осташевский, Н.А. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в нестационарных режимах / Н.А. Осташевский, В.П. Шайда // Электромашиностроение и электрооборудование. - 2010. -№ 75. -С. 46-51.
20. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. – М.: Энергия, 1971. – 432 с.
21. Горнов А.О. Нагрев и охлаждение электрических двигателей – М., МЭИ, 1980
22. Sensorless stator winding temperature estimation for induction machines, ZhiGao, Georgia Institute of Technology, 2006

23. Математические модели нагрева и охлаждения асинхронных двигателей для микропроцессорного реле тепловой защиты / Г.А. Бугаев, А.И. Леонтьев, Е.Ю. Ерохин [и др.] // Электромеханика. – 2001. – №2. – С.51-54.
24. Нагрев асинхронного двигателя при случайном характере нагрузки / Зюзев А.М., Метельков В.П. // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. 2013. № 1. С. 50-56
25. Оценка нагрева обмотки статора асинхронного двигателя в электроприводе с периодическим характером нагружения / Зюзев А.М., Метельков В.П. // Электротехнические системы и комплексы. 2010. № 1. С. 80.
26. 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.
27. Thermal Overload Capabilities of an Electric Motor and Inverter Unit Through Modeling Validated by Testing, Henning Lohse-Busch, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004. – P.70
28. Thermal modelling of small cage induction motors, Gunnar Kylander, Chalmers University of Technology, 1995. – P.113
29. Thermal Model of Induction Motor for Relay Protection, A.V. Bulychev, E.Yu. Erokhin, N.D. Pozdeev, and O.A. Filichev, Russian Electrical Engineering, 2011, Vol. 82, No. 3, pp. 144–148
30. Особенности тепловых расчетов неустановившихся режимов работы регулируемых асинхронных двигателей / В.С. Петрушин, А.М. Якимец // Электромашиностроение и электрооборудование. -2008. -№ 71. -С. 47-51.
31. Термодинамическая модель статора асинхронного двигателя с учетом нагрева лобовых частей обмотки / Зюзев А.М., Метельков В.П. // Электротехнические системы и комплексы. 2010. № 1. С. 129.
32. Расчет параметров двухмассовой термодинамической модели асинхронного двигателя / Зюзев А.М., Метельков В.П., Максимова В.А. // Энергетика.

Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. 2012. № 1. С. 121-131.

33. 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. 179-183.

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

35. Анучин А.С., Федорова К.Г., Двухмассовая тепловая модель асинхронного двигателя, Электротехника, №2, 2014 г., с. 21-24

36. 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

37. Ильинский Н.Ф. Моделирование в технике: Учеб. пособие для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 2004.

38. Каталог электродвигателей ОАО "ВЭМЗ". URL:

http://www.ges.ru/book/book_bemz_air/0.htm

39. Электродвигатели постоянного тока станочные серии ПБСТ. URL:

<http://energo-vesta.com.ua/catalog/electrodvigatel/seriya-pbst.html>

40. Анучин А.С. Автоматизированный электропривод. Описание лабораторных стендов. Методическое пособие, Издательский дом МЭИ, Москва, 2011. – 76 с.

41. Мультиметр цифровой Mastech MY-64 58957. Инструкция по применению

URL: http://kvt-shop.ru/pic/passport_MY61-64.pdf

42. Преобразователь угловых перемещений ЛИР-158. URL: [http://skbis-](http://skbis-lir.ru/index.php?a=Catalog&c=3&d=18)

[lir.ru/index.php?a=Catalog&c=3&d=18](http://skbis-lir.ru/index.php?a=Catalog&c=3&d=18)

43. Описание ПО «PowerGraph» URL: <http://www.powergraph.ru>

44. Таранов Д.М., Лыткин А.В., Каун О.Ю. Четырехмассовая тепловая модель электропривода, Научный журнал КубГАУ, №104(10), 2014 года. Электронный ресурс.

45. Низковольтные электродвигатели промышленного назначения. URL: https://library.e.abb.com/public/ae5e1c99ebe04864bac29d9a2505ba31/PPM_catalog_2016_03.pdf
46. Пакет информации об изделии CD2007P-2. URL: <http://www.baldor.com/catalog/CD2007P-2>
47. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе. Изд. 6-е, исправленное. Москва, «Энергия», 1977. 432 с. с ил.
48. Brushless Servomotors C-Series/Detailed information for: BSM100C-6250AA. URL: <http://www.abb.com/productdetails/ABB.BALDOR7BBSM100C-6250AA>
49. Frequency Converter/Detailed information for: ACS800-11-0016-3. URL: <http://www.abb.com/productdetails/TEMP.FIDRI68671230>
50. Приводы настенного монтажа ACS880-01. URL: <http://www.abb.ru/product/seitp322/c324943968c79de4c1257920004babbd.aspx>
51. ABB DC Drives DCS800. URL: <https://library.e.abb.com/public/e3306fa445ed85c7c1257dea00492199/3ADW000192R0701%20DCS800%20Technical%20catalog%20e%20g.pdf>
52. A. Anuchin, V. Kozachenko, "Current loop dead-beat control with the digital PI-controller", Proc. 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 14-ECCE Europe), pp. 1-8, 2014.
53. Ключев В.И. Теория электропривода – М., Энергоатомиздат, 2001, с. 226-235
54. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб.: Питер, 2008.
55. Пястолов А.А. и др. Эксплуатация и ремонт электрооборудования – М., Колос, 1976, с.190-191.
56. 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.
57. 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.

58. 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.

Приложение А

Текст программы определения теплоемкостей статора и ротора и коэффициента теплоотдачи между статором и ротором

```
findMin2()
{
    double csStep=(Form1->data.csMax-Form1->data.csMin)/Form1->data.n;
    double crStep=(Form1->data.crMax-Form1->data.crMin)/Form1->data.n;
    double arsStep=(Form1->data.arsMax-Form1->data.arsMin)/Form1->data.n;
    Form1->cs=Form1->data.csMin;
    int a,c,s;
    s=0;
    while (Form1->cs<Form1->data.csMax)
    {
        Form1->cr=Form1->data.crMin;
        c=0;
        while (Form1->cr<Form1->data.crMax)
        {
            Form1->ars=Form1->data.arsMin;
            a=0;
            while (Form1->ars<Form1->data.arsMax)
            {
                Form1->integ2[a][c][s]=0;
                Form1->cri[a][c][s]=Form1->cr;
                Form1->arsi[a][c][s]=Form1->ars;
                Form1->csi[a][c][s]=Form1->cs;
                Form1->ts=0;
                Form1->tr=0;
                for (int i=0; i<131; i++)
                {
                    if (MASSES!=1)
                    {
                        Form1->integ2[a][c][s]+=(Form1->ts-
                            Form1->tsm[i])*(Form1->ts-Form1->tsm[i]);
                        Form1->dts=(Form1->dp-Form1->ts*Form1->asa-(Form1->ts-
                            Form1->tr)*Form1->ars)/Form1->cs;
                        Form1->ts=Form1->ts+Form1->dts*Form1->h;
                    }
                }
            }
        }
    }
}
```

```

        Form1->dtr=(Form1->ts-Form1->tr)*Form1->ars/Form1->cr;
        Form1->tr=Form1->tr+Form1->dtr*Form1->h;
    }
    else
    {
        Form1->integ2[a][c][s]+=(Form1->ts-
            Form1->tsm[i])*(Form1->ts-Form1->tsm[i]);
        Form1->dts=(Form1->dp-Form1->ts*Form1->asa)/Form1->cs;
        Form1->ts=Form1->ts+Form1->dts*Form1->h;
    }
}
Form1->ars+=arsStep;
a++;
}
Form1->cr+=crStep;
c++;
}
Form1->cs+=csStep;
s++;
}

double min=Form1->integ2[0][0][0];
int mina=0;
int minc=0;
int mins=0;
for (s=0; s<Form1->data.n; s++)
    for (a=0; a<Form1->data.n; a++)
        for (c=0; c<Form1->data.n; c++)
            if (min>Form1->integ2[a][c][s])
            {
                mina=a;
                minc=c;
                mins=s;
                min=Form1->integ2[a][c][s];
            }
Form1->data.err=min;
Form1->Label1->Caption=Form1->cri[mina][minc][mins];
Form1->Label2->Caption=Form1->arsi[mina][minc][mins];
Form1->Label3->Caption=Form1->csi[mina][minc][mins];

```

```

Form1->ts=0;
Form1->tr=0;
Form1->ars=Form1->arsi [mina] [minc] [mins] ;
Form1->cr=Form1->cri [mina] [minc] [mins] ;
Form1->cs=Form1->csi [mina] [minc] [mins] ;
Form1->Image1->Canvas->Pen->Width=3;
Form1->Image1->Canvas->MoveTo (0, 480) ;
for (int i=0; i<131; i++)
{
    Form1->dts=(Form1->dp-Form1->ts*Form1->asa- (Form1->ts-
        Form1->tr) *Form1->ars) /Form1->cs;
    Form1->ts=Form1->ts+Form1->dts*Form1->h;
    Form1->dtr=(Form1->ts-Form1->tr) *Form1->ars/Form1->cr;
    Form1->tr=Form1->tr+Form1->dtr*Form1->h;
    if (Form1->data.draw==true) Form1->Image1->Canvas->LineTo (7*i,
        480-10*Form1->ts) ;
}
Form1->data.cs=Form1->cs;
Form1->data.cr=Form1->cr;
Form1->data.ars=Form1->ars;
return (0) ;
}

```

Приложение Б

Результаты тепловых исследований

В Приложение Б были сведены все экспериментальные данные, полученные в ходе диссертационной работы.

Таблица П1. Экспериментальные данные по нагреву электродвигателя А90L6 мощностью 1,5 кВт для определения коэффициента теплоотдачи статора

Время t , мин	Температура статора $T_{\text{дв}}$, °С	Перегрев τ , °С
При частоте вращения двигателя 500 об/мин, подводимая мощность 70 Вт		
0	18,5	0
1	19	0,5
2	20	1,5
3	21	2,5
4	21,5	3
5	22,5	4
6	23,5	5
7	24	5,5
8	25	6,5
9	25,5	7
10	27	8,5
11	27,5	9
12	28	9,5
13	28,7	10,2
14	29	10,5
15	29,7	11,2
16	30	11,5
17	30,5	12
18	31	12,5
19	31,5	13
20	32	13,5
21	32,1	13,6
22	32,2	13,7
23	32,5	14
24	32,7	14,2
25	32,9	14,4
26	33,5	15

27	34	15,5
28	34,3	15,8
29	34,7	16,2
30	35	16,5
31	35,2	16,7
32	35,5	17
33	36	17,5
34	36,1	17,6
35	36,3	17,8
36	36,5	18
37	37	18,5
38	37,2	18,7
39	37,4	18,9
40	37,7	19,2
41	38	19,5
42	38,1	19,6
43	38,2	19,7
44	38,4	19,9
45	38,5	20
46	39	20,5
47	39,1	20,6
48	39,2	20,7
49	39,3	20,8
50	39,5	21
51	40	21,5
52	40,1	21,6
53	40,2	21,7
54	40,3	21,8
55	40,5	22
56	41	22,5
57	41,1	22,6
58	41,2	22,7
59	41,3	22,8
60	41,5	23
61	41,8	23,3
62	42	23,5
63	42,1	23,6
64	42,2	23,7

65	42,3	23,8
66	42,4	23,9
67	42,5	24
68	43	24,5
69	43,05	24,55
70	43,1	24,6
71	43,15	24,65
72	43,2	24,7
73	43,25	24,75
74	43,3	24,8
75	43,5	25
76	44	25,5
77	44,1	25,6
78	44,2	25,7
79	44,3	25,8
80	44,4	25,9
81	44,5	26
82	44,6	26,1
83	44,7	26,2
84	44,7	26,2
85	45	26,5
86	45,1	26,6
87	45,2	26,7
88	45,3	26,8
89	45,4	26,9
90	45,5	27
91	45,7	27,2
92	46	27,5
93	46,05	27,55
94	46,1	27,6
95	46,15	27,65
96	46,2	27,7
97	46,25	27,75
98	46,3	27,8
99	46,5	28
100	46,5	28
101	46,8	28,3
102	46,9	28,4

103	47	28,5
104	47,05	28,55
105	47,1	28,6
106	47,15	28,65
107	47,2	28,7
108	47,25	28,75
109	47,3	28,8
110	47,35	28,85
111	47,4	28,9
112	47,5	29
113	47,9	29,4
114	48	29,5
115	48,03	29,53
116	48,06	29,56
117	48,09	29,59
118	48,12	29,62
119	48,15	29,65
120	48,18	29,68
121	48,21	29,71
122	48,24	29,74
123	48,27	29,77
124	48,3	29,8
125	48,33	29,83
126	48,36	29,86
127	48,39	29,89
128	48,42	29,92
129	48,45	29,95
130	48,5	30
При частоте вращения двигателя 0 об/мин, подводимая мощность 71 Вт		
0	0	21
1	1	22
2	1,5	22,5
3	2	23
4	3	24
5	3,5	24,5
6	4	25
7	4,5	25,5
8	5	26

9	5,4	26,4
10	5,9	26,9
11	6	27
12	6,5	27,5
13	7	28
14	7	28
15	7	28
16	8	29
17	8	29
18	8,7	29,7
19	9	30
20	9	30
21	9	30
22	9,7	30,7
23	10	31
24	10	31
25	10	31
26	10,5	31,5
27	11	32
28	11	32
29	11	32
30	11,9	32,9
31	12	33
32	12	33
33	12	33
34	12,7	33,7
35	12,9	33,9
36	13	34
37	13	34
38	13	34
39	13,5	34,5
40	13,7	34,7
41	13,9	34,9
42	14	35
43	14	35
44	14	35
45	14,5	35,5
46	14,7	35,7

47	14,9	35,9
48	15	36
49	15	36
50	15	36
51	15,5	36,5
52	15,7	36,7
53	15,9	36,9
54	16	37
55	16,4	37,4
56	16,5	37,5
57	16,7	37,7
58	16,9	37,9
59	17	38
60	17	38
61	17	38
62	17	38
63	17,5	38,5
64	17,7	38,7
65	17,8	38,8
66	18	39
67	18	39
68	18	39
69	18	39
70	18,4	39,4
71	18,5	39,5
72	18,7	39,7
73	18,9	39,9
74	19	40
75	19	40
76	19	40
77	19	40
78	19	40
79	19,4	40,4
80	19,5	40,5
81	19,6	40,6
82	19,7	40,7
83	19,8	40,8
84	19,9	40,9

85	20	41
86	20	41
87	20	41
88	20	41
89	20	41
90	20	41
91	20,4	41,4
92	20,5	41,5
93	20,6	41,6
94	20,7	41,7
95	20,9	41,9
96	20,9	41,9
97	21	42
98	21	42
99	21	42
100	21	42
101	21	42
102	21	42
103	21	42
104	21,3	42,3
105	21,4	42,4
106	21,4	42,4
107	21,5	42,5
108	21,6	42,6
109	21,7	42,7
110	21,8	42,8
111	21,9	42,9
112	22	43
113	22	43
114	22	43
115	22	43
116	22	43
117	22	43
118	22	43
119	22	43
120	22	43
121	22,5	43,5
122	22,6	43,6

123	22,7	43,7
124	22,8	43,8
125	22,8	43,8
126	22,9	43,9
127	22,9	43,9
128	22,9	43,9
129	22,95	43,95
130	22,95	43,95
131	23	44

Таблица П2. Результаты тепловых исследований электродвигателя М3АА132МС мощностью 5,5 кВт для частоты вращения 1000об/мин

Время t , мин	Мощность потерь в статорной цепи P , Вт	Температура статора $T_{дв}$, °С	Температура окружающей среды $T_{ос}$, °С	Перегрев τ , °С
0	0	20,84	22,12	-1,28
1	88,56	20,87	22,12	-1,25
2	89,76	20,98	22,12	-1,14
3	90,3	21,17	22,12	-0,95
4	88,46	21,35	22,12	-0,77
5	87,11	21,49	22,12	-0,63
6	88,13	21,64	22,12	-0,48
7	85,57	21,77	22,12	-0,35
8	87,25	21,89	22,12	-0,23
9	87,24	22,01	22,12	-0,11
10	83,83	22,12	22,12	0,00
11	86,25	22,22	22,12	0,10
12	86,03	22,31	22,12	0,19
13	87	22,41	22,12	0,29
14	86,72	22,49	22,12	0,37
15	87,52	22,58	22,12	0,46
16	84,32	22,66	22,12	0,54
17	82,77	22,73	22,12	0,61
18	87,28	22,8	22,12	0,68
19	82,95	22,87	22,12	0,75
20	83,71	22,94	22,12	0,82
21	86,05	22,99	22,12	0,87
22	85,96	23,06	22,12	0,94

23	84,41	23,11	22,12	0,99
24	83,64	23,116	22,12	1,00
25	83,75	23,22	22,12	1,10
26	83,94	23,27	22,12	1,15
27	84,19	23,32	22,12	1,20
28	82,8	23,37	22,12	1,25
29	84,72	23,41	22,12	1,29
30	83,34	23,46	22,12	1,34
31	84,27	23,49	22,12	1,37
32	83,77	23,54	22,12	1,42
33	82,57	23,58	22,12	1,46
34	80,06	23,62	22,12	1,50
35	81,37	23,66	22,12	1,54
36	82,47	23,69	22,12	1,57
37	82,51	23,73	22,12	1,61
38	84,22	23,76	22,12	1,64
39	81,59	23,8	22,12	1,68
40	84,41	23,84	22,12	1,72
41	83,5	23,876	22,12	1,75
42	82,64	23,91	22,13	1,78
43	81,15	23,94	22,13	1,81
44	84,32	23,98	22,13	1,85
45	83,17	24,01	22,13	1,88
46	82,67	24,045	22,13	1,91
47	81,56	24,085	22,14	1,95
48	84,69	24,11	22,14	1,97
49	83,86	24,14	22,14	2,00
50	84,2	24,17	22,14	2,03
51	82,39	24,195	22,14	2,06
52	83,43	24,22	22,14	2,08
53	84,94	24,25	22,14	2,11
54	83,11	24,28	22,14	2,14
55	83,25	24,306	22,15	2,16
56	83,35	24,325	22,15	2,18
57	82,42	24,35	22,15	2,20
58	82,97	24,38	22,15	2,23
59	82,29	24,4	22,15	2,25
60	83,37	24,42	22,15	2,27

65	82,19	24,53	22,17	2,36
70	81,59	24,64	22,17	2,47
75	82,14	24,74	22,18	2,56
80	83,26	24,83	22,20	2,63
85	82,55	24,92	22,22	2,70
90	82,6	24,996	22,23	2,77
95	79,63	25,07	22,24	2,83
100	81,44	25,14	22,26	2,88
105	79,29	25,22	22,28	2,94
110	77,9	25,315	22,29	3,03
115	78,72	25,4	22,31	3,09
120	81,04	25,47	22,33	3,14
125	83,28	25,53	22,35	3,18
130	79,27	25,58	22,37	3,21
135	80,16	25,63	22,39	3,24
140	77,99	25,67	22,41	3,26
145	76,67	25,706	22,44	3,27
150	78,11	25,74	22,45	3,29
155	81,6	25,78	22,48	3,30
160	79,43	25,83	22,50	3,33
165	79,47	25,83	22,52	3,31
170	81,3	25,895	22,55	3,35
175	78,32	25,95	22,57	3,38
180	76,63	25,986	22,59	3,40
185	80,94	25,999	22,62	3,38
190	75,05	26,03	22,64	3,39
195	73,54	26,045	22,66	3,39
200	77,56	26,077	22,68	3,40
210	77,61	26,116	22,74	3,38
220	76,62	26,156	22,78	3,37
230	77,4	26,2	22,84	3,36
240	75,41	26,25	22,88	3,37
250	76,56	26,305	22,88	3,43

Таблица ПЗ. Результаты тепловых исследований электродвигателя МЗАА132МС мощностью 5,5 кВт для частоты вращения 750 об/мин

Время t , мин	Мощность потерь в статорной цепи P , Вт	Напряжение U_{ab} , В	Ток I_a , А	Температура статора $T_{дв}$, °С	Температура окружающей среды $T_{ос}$, °С	Перегрев т. °С
0	0	0	0	21,46	22,36	-0,90
1	58,3	-144,4	-3,08	21,49	22,36	-0,87
2	57,99	54,1	3,34	21,55	22,367	-0,82
3	59,55	159,3	2,25	21,64	22,367	-0,73
4	57,67	-158,2	-1,34	21,77	22,367	-0,60
5	58,07	-130,8	0,04	21,88	22,367	-0,49
6	57,31	-90,5	-3,71	21,99	22,367	-0,38
7	59,09	3,1	-3,0	22,09	22,367	-0,28
8	58,9	78,8	3,22	22,17	22,367	-0,20
9	57,89	-117,9	-3,54	22,26	22,367	-0,11
10	57,19	-38,5	2,22	22,34	22,37	-0,03
11	56,51	-137,8	-3,33	22,42	22,37	0,05
12	58,34	-126,5	0,24	22,49	22,37	0,12
13	58,28	-143,1	-0,25	22,56	22,37	0,19
14	58,83	49,3	3,14	22,63	22,37	0,26
15	58,18	-107,2	0,84	22,68	22,37	0,31
16	57,71	-136,5	-3,22	22,75	22,38	0,37
17	58,16	-118,1	-3,51	22,81	22,38	0,43
18	56,02	-48,7	-3,49	22,87	22,38	0,49
19	57,87	49,1	3,22	22,92	22,386	0,53
20	56,49	15,0	2,93	22,97	22,386	0,58
21	55,93	90,7	3,31	23,02	22,386	0,63
22	56,01	140,9	2,74	23,08	22,386	0,69
23	58,96	-37,0	-3,23	23,11	22,386	0,72
24	56,05	139,1	2,73	23,16	22,39	0,77
25	57,04	44,4	3,02	23,21	22,386	0,82
26	57,37	-144,8	-3,19	23,24	22,39	0,85
27	55,89	53,8	-2,09	23,28	22,39	0,89
28	57,67	153,4	1,51	23,32	22,39	0,93
29	55,07	-130,7	-3,25	23,36	22,4	0,96
30	55,62	-48,3	2,03	23,39	22,4	0,99
31	54,07	108,4	-0,87	23,43	22,4	1,03
32	55,73	157,6	1,69	23,47	22,4	1,07
33	56,68	-156,3	-2,4	23,5	22,406	1,09
34	57,69	75,0	3,29	23,53	22,4	1,13
35	55,34	33,9	-2,4	23,56	22,406	1,15
36	56,1	-52,3	-3,45	23,596	22,41	1,19

37	56,84	-11,1	2,6	23,62	22,41	1,21
38	56,48	-5,3	2,63	23,655	22,41	1,25
39	55,67	20,1	2,89	23,68	22,41	1,27
40	55,15	80,1	3,33	23,71	22,42	1,29
41	55,74	139,1	2,76	23,73	22,42	1,31
42	54,77	153,4	1,18	23,76	22,42	1,34
43	55,84	-140,7	-0,73	23,785	22,42	1,37
44	56,58	34,7	3,03	23,81	22,425	1,39
45	55,97	-84,4	-3,48	23,83	22,425	1,41
46	54,55	143,0	0,61	23,86	22,425	1,44
47	53,52	-55,7	1,78	23,88	22,425	1,46
48	56,34	65,3	-1,91	23,9	22,43	1,47
49	57,27	135,4	2,82	23,93	22,43	1,50
50	55,44	-22,3	2,34	23,95	22,43	1,52
51	55,01	-146,7	-2,72	23,98	22,44	1,54
52	54	69,2	-1,75	24	22,44	1,56
53	54,05	155,8	1,75	24,03	22,445	1,59
54	56,22	-135,5	-0,15	24,045	22,445	1,60
55	54,82	-11,7	-3,09	24,07	22,445	1,63
56	54,4	152,2	1,85	24,085	22,445	1,64
57	53,8	109,7	3,03	24,1	22,445	1,66
58	53,57	65,6	0,27	24,12	22,45	1,67
59	55,74	19,9	2,86	24,14	22,45	1,69
60	55,15	118,8	-0,59	24,156	22,46	1,70
65	54,58	-18,8	-3,06	24,24	22,46	1,78
70	54,8	90,3	-1,32	24,32	22,48	1,84
75	53,83	-112,8	-3,37	24,39	22,48	1,91
80	53,67	-73,1	1,38	24,475	22,5	1,98
85	54,32	-101,2	-3,49	24,54	22,51	2,03
90	55,23	143,5	0,64	24,6	22,52	2,08
95	54,66	-125,4	0,13	24,66	22,536	2,12
100	55,46	-13,1	2,46	24,7	22,556	2,14
105	53,99	29,8	-2,57	24,76	22,56	2,20
110	54,19	103,6	1,12	24,8	22,58	2,22
115	53,51	-82,9	-3,56	24,85	22,6	2,25
120	53,96	0,06	2,52	24,89	22,61	2,28
125	53,94	16,6	-2,76	24,925	22,62	2,31
130	53,49	146,4	-0,87	24,96	22,64	2,32
135	53,47	105,4	3,03	25	22,65	2,35
140	52,98	-154,3	-2,08	25,03	22,67	2,36
145	52,59	-65,5	1,54	25,06	22,69	2,37
150	54,17	-151,9	-1,87	25,09	22,7	2,39
155	53	-28,9	-3,28	25,12	22,72	2,40

160	52,63	74,3	3,14	25,15	22,73	2,42
165	53,09	-139,9	-2,83	25,18	22,74	2,44
170	54,5	-154,3	-2,06	25,22	22,76	2,46
175	52,88	70,5	-1,81	25,25	22,78	2,47
180	52,8	-146,6	-1,32	25,276	22,8	2,48
185	52,55	82,9	-1,58	25,29	22,81	2,48
190	52,87	-51,7	-3,29	25,32	22,83	2,49
195	53,01	16,4	-2,69	25,36	22,86	2,50
200	52,44	-120,1	-3,26	25,39	22,89	2,50
210	53,18	148,1	1,78	25,44	22,93	2,51
220	51,82	148,6	1,09	25,5	22,96	2,54
230	52,33	140,5	0,48	25,54	23	2,54
240	51,81	-150,9	-2,37	25,58	23,03	2,55
250	52,87	-75,6	1,34	25,6	23,06	2,54

Таблица П4. Результаты тепловых исследований электродвигателя М3АА132МС мощностью 5,5 кВт для частоты вращения 500об/мин

Время t , мин	Мощность потерь в статорной цепи P , Вт	Напряжение U_{ab} , В	Ток I_a , А	Температура статора $T_{дв}$, °С	Температура окружающей среды T_{oc} , °С	Перегрев τ , °С
0	0	0	0	19,279	20,079	-0,8
1	43,59	-1,89	-11	19,29	20,079	-0,789
2	44,27	-0,33	-98	19,42	20,079	-0,659
3	43,53	-3,81	-70,2	19,55	20,079	-0,529
4	43,45	3,13	14	19,64	20,079	-0,439
5	44,47	-0,9	-103	19,73	20,08	-0,35
6	42,45	-3,34	-18,2	19,81	20,08	-0,27
7	43,19	-3,55	-29	19,88	20,08	-0,2
8	44,74	-3,34	-16	19,95	20,08	-0,13
9	41,92	2,35	107	20,01	20,08	-0,07
10	43,35	-0,72	-98	20,08	20,08	0
11	42,95	-3	-0,2	20,14	20,084	0,056
12	42,93	3,29	77,04	20,2	20,088	0,112
13	43,24	-3,68	-66	20,25	20,092	0,158
14	42,2	3,31	71,9	20,31	20,096	0,214
15	43,47	-3,79	-57,4	20,36	20,098	0,262
16	43,24	2,59	-9,5	20,405	20,098	0,307
17	43,05	-0,37	82,4	20,46	20,098	0,362
18	42,18	-3,34	-91,7	20,5	20,098	0,402
19	42,13	2,18	-27	20,55	20,098	0,452
20	41,83	1,65	107	20,59	20,098	0,492
21	41,09	-3,62	-38,4	20,63	20,099	0,531

22	42,41	-1,46	-107,9	20,67	20,1	0,57
23	41,39	2,96	6,4	20,72	20,102	0,618
24	42,18	3,22	81,6	20,76	20,104	0,656
25	42	2,29	106,7	20,796	20,105	0,691
26	42,39	1,07	105,3	20,83	20,106	0,724
27	41,93	0,7	99,3	20,86	20,107	0,753
28	42,39	1,01	1064	20,906	20,108	0,798
29	41,43	1,69	106	20,94	20,109	0,831
30	42,91	3,26	77,7	20,97	20,11	0,86
31	41,68	2,97	5,3	21	20,112	0,888
32	43	0,46	-80,3	21,04	20,114	0,926
33	41,37	-1,78	-106,4	21,06	20,116	0,944
34	41,56	-3,66	-66,6	21,09	20,118	0,972
35	42,25	-0,61	79,9	21,12	20,12	1
36	43,7	3,27	58,1	21,15	20,122	1,028
37	41,48	-0,56	-94,9	21,18	20,124	1,056
38	41,25	-3,67	-43,6	21,206	20,126	1,08
39	41,48	0,75	99,8	21,23	20,128	1,102
40	42,62	2,14	-29,8	21,26	20,13	1,13
41	41,43	-3,25	-95	21,28	20,132	1,148
42	41,61	-0,08	92,9	21,31	20,134	1,176
43	42,61	1,63	-43,9	21,336	20,136	1,2
44	42,75	-1,84	44,3	21,356	20,138	1,218
45	41,37	2,29	-18,7	21,38	20,14	1,24
46	41,57	-3,37	-27,4	21,41	20,142	1,268
47	39,53	2,2	102,1	21,43	20,144	1,286
48	41,85	-1,61	-104,9	21,45	20,146	1,304
49	42,51	-0,72	78,4	21,47	20,148	1,322
50	41,19	0,07	-85,4	21,49	20,15	1,34
51	41,47	-1,06	68,8	21,51	20,152	1,358
52	41,82	-0,08	-92,4	21,53	20,154	1,376
53	39,32	0,43	95	21,55	20,156	1,394
54	39,87	-1,57	-105	21,57	20,158	1,412
55	41,87	1,46	103	21,59	20,16	1,43
56	38,57	-2,65	-104,6	21,61	20,164	1,446
57	41,77	3,05	85,7	21,63	20,168	1,462
58	37,88	-3,6	-79,9	21,65	20,172	1,478
59	40,49	3	16,3	21,66	20,176	1,484
60	41,26	-0,72	76,4	21,68	20,18	1,5
65	43,75	-2,7	-103,6	21,76	20,18	1,58
70	41,8	-1,46	-105,4	21,85	20,2	1,65
75	40	0,4	-80	21,93	20,21	1,72
80	42,43	-2,3	29,4	21,99	20,22	1,77

85	38,71	2,77	95,8	22,06	20,24	1,82
90	38,65	-2,47	19,8	22,12	20,25	1,87
95	37,53	-3,6	-42,2	22,18	20,255	1,925
100	44,34	3,31	49,2	22,24	20,27	1,97
105	39,91	3,27	64,4	22,29	20,3	1,99
110	39,73	0,5	-75,5	22,34	20,32	2,02
115	40,48	2,98	22,7	22,39	20,34	2,05
120	38,91	1,27	102,4	22,44	20,35	2,09
125	37,53	-2,38	-106,7	22,49	20,37	2,12
130	37,66	-0,1	90	22,53	20,38	2,15
135	40,42	-0,76	74,4	22,57	20,39	2,18
140	42,22	2,86	24,8	22,61	20,42	2,19
145	40,88	1,16	-65,8	22,65	20,43	2,22
150	38,01	2,15	98,1	22,68	20,45	2,23
155	37,75	2,29	-15,6	22,72	20,47	2,25
160	41,22	2,85	14,6	22,75	20,48	2,27
165	35,89	-0,92	70,5	22,78	20,48	2,3
170	40,39	1,58	-45,9	22,82	20,49	2,33
175	39,15	0,87	-67	22,85	20,52	2,33
180	36,72	2,28	16,8	22,88	20,535	2,345
185	39,44	0,39	-76,6	22,906	20,55	2,356
190	41,2	2,5	95,7	22,932	20,56	2,372
200	39,04	2,71	92,2	22,98	20,6	2,38
210	40,47	-3,53	-21,7	23,04	20,64	2,4
220	36,49	2,77	8,7	23,09	20,68	2,41
230	35,85	0,76	95,9	23,13	20,71	2,42
240	39,14	2,66	2,7	23,18	20,75	2,43
250	38,6	2,98	67,2	23,22	20,79	2,43

Таблица П5. Результаты тепловых исследований электродвигателя МЗАА132МС мощностью 5,5 кВт для частоты вращения 250об/мин

Время t , мин	Мощность потерь в статорной цепи P , Вт	Напряжение U_{ab} , В	Ток I_a , А	Температура статора $T_{дв}$, °С	Температура окружающей среды T_{oc} , °С	Перегрев t , °С
0	0	0	0	21,18	22,01	-0,83
1	34,16	-11,7	2,44	21,23	22,01	-0,78
2	35,06	-47,3	0,09	21,43	22,01	-0,58
3	34,93	37,8	3,71	21,57	22,01	-0,44
4	34,24	7,0	3,28	21,675	22,01	-0,34
5	34,47	56,3	1,94	21,75	22,02	-0,27
6	32,69	-24,2	-3,76	21,83	22,02	-0,19
7	33,73	57,4	1,86	21,89	22,02	-0,13

8	32,44	-0,7	3,11	21,95	22,02	-0,07
9	33,69	57,0	1,55	22,01	22,02	-0,01
10	34,17	15,4	3,37	22,06	22,03	0,03
11	35,12	-41,3	0,73	22,11	22,03	0,08
12	35,08	-57,5	-2,22	22,16	22,03	0,13
13	34,13	16,9	3,45	22,2	22,03	0,17
14	32,62	-49,4	-0,28	22,25	22,03	0,22
15	33,56	54,1	2,79	22,29	22,03	0,26
16	34,18	28,0	-1,67	22,33	22,03	0,30
17	32,21	-44,9	-3,74	22,37	22,03	0,34
18	33,53	-57,4	-2,23	22,4	22,04	0,36
19	33,6	-57,9	-2,77	22,44	22,04	0,40
20	32,64	56,3	2,32	22,48	22,04	0,44
21	32,36	8,5	3,23	22,52	22,04	0,48
22	32,24	51,5	0,81	22,55	22,04	0,51
23	33,13	-23,9	1,71	22,59	22,04	0,55
24	33,09	49,2	3,09	22,62	22,04	0,58
25	32,84	56,3	2,29	22,65	22,05	0,60
26	33,08	-48,2	-0,22	22,68	22,05	0,63
27	32,77	9,7	-2,66	22,71	22,05	0,66
28	32,09	30,3	3,59	22,74	22,05	0,69
29	31,24	23,5	3,54	22,77	22,05	0,72
30	32,65	11,7	-2,54	22,8	22,06	0,74
31	31,99	54,7	2,32	22,83	22,06	0,77
32	31,36	12,9	3,29	22,86	22,06	0,80
33	32,19	48,1	3,2	22,886	22,06	0,82
34	31,93	-40,1	0,73	22,91	22,06	0,85
35	32,62	-42,7	-3,69	22,94	22,07	0,88
36	33,31	-29,4	-3,79	22,96	22,07	0,89
37	32,02	-41,6	-3,77	22,99	22,07	0,92
38	32,64	56,0	2,07	23,02	22,07	0,95
39	31,82	53,4	1,34	23,04	22,07	0,97
40	31,81	49,1	0,67	23,07	22,08	0,99
41	32,58	-51,9	-0,58	23,09	22,08	1,01
42	31,54	34,4	-1,24	23,11	22,08	1,03
43	32,69	-17,2	-3,6	23,11	22,08	1,03
44	32,25	-15,9	-3,53	23,16	22,08	1,08
45	32,64	13,4	3,31	23,18	22,09	1,10
46	31,9	-30,9	-3,73	23,205	22,09	1,12
47	32,76	-56,1	-2,11	23,225	22,09	1,14
48	32,15	-2,1	2,68	23,24	22,09	1,15
49	30,59	53,9	2,45	23,26	22,09	1,17
50	31,01	10,1	-2,57	23,29	22,10	1,20

51	30,68	44,1	-0,09	23,3	22,10	1,20
52	30,6	53,9	2,34	23,33	22,10	1,23
53	32,1	-23,9	-3,76	23,35	22,10	1,25
54	32,67	20,5	-2,06	23,37	22,10	1,27
55	32,43	-32,2	1,23	23,39	22,11	1,29
56	31,34	-48,5	-0,42	23,41	22,11	1,30
57	31,6	50,2	0,64	23,43	22,11	1,32
58	31,58	-55,4	-2,83	23,45	22,11	1,34
59	32,33	21,7	3,47	23,47	22,11	1,36
60	32,62	38,2	-0,84	23,48	22,12	1,37
65	32,49	-56,9	-1,77	23,57	22,14	1,44
70	30,93	-47,8	-3,48	23,65	22,15	1,51
75	31,61	-80	3,08	23,73	22,16	1,58
80	31,05	49,3	2,94	23,8	22,17	1,64
85	30,8	-50,7	-3,34	23,88	22,19	1,70
90	30,49	50,3	0,59	23,95	22,20	1,76
95	32,06	-54,8	-2,57	24,01	22,22	1,80
100	31,36	3,1	-2,96	24,08	22,23	1,86
105	30,59	53,7	1,95	24,14	22,24	1,90
110	30,99	-24,2	1,51	24,2	22,26	1,95
115	31,81	-35,6	-3,76	24,25	22,28	1,98
120	30,45	52,2	0,99	24,3	22,29	2,02
125	31,43	20,2	3,36	24,345	22,30	2,05
130	31,16	13,1	-2,29	24,39	22,32	2,08
135	31,06	52,2	1,25	24,43	22,33	2,10
140	31,48	-79	-2,95	24,475	22,35	2,13
145	29,84	12,6	3,17	24,52	22,37	2,16
150	31,32	-40,2	0,26	24,56	22,39	2,18
155	30,4	56,3	2,32	24,61	22,40	2,22
160	30,26	34,4	3,44	24,64	22,42	2,23
165	28,01	45,8	2,97	24,67	22,43	2,25
170	30,14	36,8	3,27	24,7	22,45	2,26
175	31,08	-39,1	0,44	24,73	22,47	2,27
180	30,6	24,5	-1,75	24,755	22,48	2,28
185	30,36	8,4	2,8	24,78	22,50	2,28
190	28,21	-20,4	1,75	24,81	22,52	2,30
195	30,06	10,1	-2,57	24,87	22,56	2,32
200	29,7	-33,4	0,98	24,92	22,59	2,34
210	28,75	0,9	2,66	24,96	22,62	2,35
220	28,82	36,4	-0,81	25,02	22,65	2,37
230	29,43	17,8	3,2	25,087	22,70	2,39
240	29,06	19,1	-1,89	25,14	22,75	2,40
250	28,26	-20,6	-1,55	25,185	22,79	2,40

Таблица П6. Результаты тепловых исследований электродвигателя М3АА132МС мощностью 5,5 кВт для частоты вращения 0об/мин (остановленный электропривод)

Время t , мин	Мощность потерь в статорной цепи P , Вт	Напряжение U_{ab} , В	Ток I_a , А	Температура статора $T_{дв}$, °С	Температура окружающей среды T_{oc} , °С	Перегрев τ , °С
0	0	0	0	23,23	23,23	0
1	168	20,1	8,33	23,79	23,23	0,56
2	208	22,96	8,9	29,86	23,23	6,63
3	188	21,57	8,74	34,71	23,23	11,48
4	200	22,29	8,97	37,19	23,23	13,96
5	200	22,23	8,92	38,93	23,23	15,7
6	196	22,23	8,89	40,11	23,23	16,88
7	204	22,89	8,99	40,99	23,23	17,76
8	200	22,39	8,92	41,85	23,23	18,62
9	200	22,42	8,9	42,52	23,23	19,29
10	200	22,42	8,88	43,11	23,23	19,88
11	200	22,42	8,87	43,66	23,23	20,43
12	200	22,42	8,85	44,17	23,23	20,94
13	200	22,42	8,83	44,65	23,23	21,42
14	196	22,42	8,82	45,12	23,23	21,89
15	200	22,45	8,81	45,57	23,23	22,34
16	196	22,45	8,81	46,03	23,23	22,8
17	196	22,45	8,78	46,46	23,23	23,23
18	196	22,48	8,77	46,88	23,23	23,65
19	196	22,46	8,76	47,29	23,23	24,06
20	200	22,64	8,83	47,74	23,23	24,51
21	200	22,64	8,79	48,23	23,23	25
22	200	22,64	8,78	48,65	23,23	25,42
23	200	22,64	8,77	49,05	23,23	25,82
24	200	22,68	8,76	49,45	23,23	26,22
25	200	22,68	8,75	49,83	23,23	26,6
26	200	22,68	8,75	50,2	23,23	26,97
27	200	22,68	8,74	50,57	23,23	27,34
28	196	22,68	8,73	50,93	23,23	27,7
29	200	22,71	8,72	51,28	23,23	28,05
30	196	22,71	8,72	51,61	23,23	28,38
31	196	22,71	8,71	51,96	23,23	28,73
32	200	22,87	8,75	52,3	23,23	29,07
33	200	22,89	8,75	52,71	23,23	29,48
34	200	22,89	8,74	53,09	23,23	29,86
35	200	22,93	8,74	53,46	23,23	30,23

36	200	22,93	8,73	53,79	23,23	30,56
37	200	22,89	8,72	54,13	23,23	30,9
38	200	22,93	8,72	54,44	23,23	31,21
39	200	22,93	8,72	54,76	23,23	31,53
40	200	22,93	8,71	55,07	23,23	31,84
41	200	22,93	8,7	55,37	23,23	32,14
42	200	22,96	8,7	55,67	23,23	32,44
43	200	22,96	8,69	55,96	23,23	32,73
44	200	22,96	8,68	56,26	23,23	33,03
45	200	22,99	8,68	56,54	23,23	33,31
46	200	22,99	8,67	56,83	23,23	33,6
47	200	22,99	8,67	57,11	23,23	33,88
48	200	22,99	8,66	57,38	23,23	34,15
49	200	23,03	8,66	57,66	23,23	34,43
50	200	23,03	8,65	57,94	23,23	34,71
51	200	23,03	8,65	58,21	23,23	34,98
52	200	23,06	8,65	58,48	23,23	35,25
53	200	23,06	8,64	58,75	23,23	35,52
54	200	23,06	8,64	59	23,23	35,77
55	200	23,06	8,63	59,27	23,23	36,04
56	200	23,09	8,6	59,67	23,256	36,414
57	200	23,12	8,6	60,01	23,282	36,728
58	200	23,15	8,57	60,23	23,308	36,922
59	200	23,18	8,55	60,43	23,334	37,096
60	200	23,25	8,53	60,63	23,36	37,27
65	200	23,28	8,53	61,63	23,386	38,244
70	200	23,31	8,51	62,75	23,412	39,338
75	200	23,34	8,49	63,79	23,438	40,352
80	196	23,34	8,47	64,83	23,464	41,366
85	196	23,37	8,46	65,8	23,49	42,31
90	200	23,44	8,45	66,74	23,516	43,224
95	196	23,44	8,44	67,59	23,542	44,048
100	200	23,47	8,44	68,41	23,568	44,842
105	200	23,5	8,43	69,18	23,594	45,586
110	200	23,53	8,42	69,92	23,62	46,3
115	196	23,53	8,41	70,67	23,646	47,024
120	196	23,56	8,39	71,34	23,672	47,668
125	196	23,53	8,39	72,03	23,698	48,332
130	200	23,69	8,41	72,65	23,724	48,926
135	200	23,69	8,4	73,24	23,75	49,49
140	200	23,69	8,4	73,81	23,776	50,034
145	200	23,72	8,38	74,35	23,802	50,548
150	200	23,72	8,38	75,02	23,828	51,192

155	200	23,72	8,37	75,53	23,854	51,676
160	200	23,78	8,37	76,02	23,88	52,14
165	200	23,78	8,35	76,47	23,906	52,564
170	200	23,78	8,34	76,93	23,932	52,998
175	200	23,81	8,33	77,36	23,958	53,402
180	200	23,85	8,31	77,76	23,984	53,776
185	200	23,85	8,31	78	24,01	54,07
190	200	23,88	8,3	78,54	24,036	54,504
200	200	23,91	8,3	79,23	24,062	55,168
210	200	23,94	8,3	79,87	24,088	55,782
220	200	23,91	8,27	80,5	24,114	56,386
230	196	23,94	8,27	81,07	24,14	56,93
240	200	23,97	8,26	81,62	24,166	57,454
250	196	23,94	8,26	82,1	24,192	57,908
260	196	23,97	8,26	82,56	24,218	58,342
270	196	23,97	8,25	83	24,244	58,756
280	200	24	8,25	83,42	24,27	59,15
290	196	24	8,25	83,81	24,296	59,514
300	196	24	8,24	84,16	24,322	59,838
310	196	24	8,24	84,49	24,348	60,142
320	196	24	8,24	84,78	24,374	60,406
330	196	24	8,24	85,04	24,4	60,64
340	196	24	8,24	85,07	24,426	60,644
350	0	0	0	85,1	24,452	60,648
360	168	20,1	8,33	85,13	24,478	60,652
370	208	22,96	8,9	85,16	24,504	60,656
380	188	21,57	8,74	85,19	24,53	60,66
390	200	22,29	8,97	85,22	24,556	60,664

Таблица П7. Экспериментальные данные по нагреву электродвигателя МЗАА132МС при постоянном моменте сопротивления в 30 Нм

Время t , мин	Частота вращения двигателя n , об/мин	Температура статора $T_{\text{де}}$, °С
0	0	21,57
1	972,229	27,43
2	972,43	29,04
3	971,92	30,12
4	971,18	31
5	971,19	31,73
6	971,19	32,4
7	971,73	33
8	972,1	33,51

9	971,91	33,99
10	970,89	34,53
11	970,8	34,97
12	970	35,48
13	970,9	35,96
14	971,58	36,37
15	971	36,76
16	971,72	37,21
17	970,38	37,66
18	970,33	38,03
19	970,52	38,41
20	970,1	38,81
21	969,77	39,15
22	970,85	39,55
23	970,41	39,92
24	970,24	40,26
25	970,45	40,6
26	969,68	40,95
27	970,03	41,32
28	969,53	41,56
29	970,01	41,88
30	969,81	42,24
35	970,06	43,6
40	969,36	44,89
45	968,74	46,06
50	968,66	47,07
55	968,04	47,95
60	968,12	48,82
65	967,92	49,58
70	967,89	50,29
75	967,4	50,92
80	967,66	51,44
85	967,82	51,93
90	967,58	52,42
95	967,37	52,82
100	967,29	53,22
105	967,3	53,49
110	967,05	53,83
115	967,02	54,21
120	967,02	54,41
125	966,93	54,72
130	967,19	54,88
135	966,4	55,15

140	966,9	55,24
145	966,88	55,45
150	967,01	55,61
155	967,05	55,72
160	966,86	55,87
165	966,94	56,05
170	966,88	56,16
175	966,93	56,2
180	966,88	56,22

Таблица П8. Экспериментальные и расчетные данные по нагреву электродвигателя М3АА132МС при отработке заданных параметров изменения скорости и момента

Время t , мин	$P_{ПЧ}$, кВт	Напряжение U_{ab} , В	Ток I_a , А	Частота вращения n , об/мин	Приложенный момент M , Нм	Температура статора $T_{дв}$, °С	Температура окружающей среды T_{oc} , °С	Перегрев статора τ , °С	Расчетный перегрев $\tau_{рас}$, °С
0	0	0	0.00	0.00	0.00	22.30	22.30	0.00	0
1	0.1	379	7.77	997.90	0.59	24.05	22.33	1.72	0,971836
2	0.1	379	7.74	997.90	0.52	25.63	22.36	3.27	1,844408
3	0.1	379	7.75	997.90	0.70	26.52	22.39	4.13	2,633593
4	0.1	379	7.75	997.90	0.53	27.04	22.42	4.62	3,350723
5	0.1	379	7.76	997.90	0.60	28.09	22.45	5.64	4,005847
6	0.1	379	7.75	997.90	0.55	28.75	22.48	6.27	4,606632
7	0.1	379	7.74	997.90	0.63	29.50	22.52	6.98	5,160386
8	0.1	379	7.74	997.90	0.64	30.04	22.55	7.49	5,67385
9	0.1	379	7.76	997.90	0.62	30.65	22.58	8.07	6,153306
10	0.1	379	7.75	997.90	0.44	31.24	22.61	8.63	6,601626
11	0.1	379	7.75	997.90	0.62	31.77	22.64	9.13	7,023229
12	0.1	379	7.75	997.90	0.51	32.33	22.67	9.66	7,421405
13	0.1	379	7.74	997.90	0.60	32.79	22.70	10.09	7,798454
14	0.1	379	7.74	997.80	0.59	33.27	22.73	10.54	8,157346
15	0.1	379	7.75	997.80	0.26	33.64	22.76	10.88	8,500643
16	4.2	379	10.75	997.80	35.19	34.80	22.79	12.01	9,666034
17	4.1	379	10.74	997.80	36.33	36.42	22.82	13.60	10,73917
18	4.1	379	10.69	997.80	34.74	37.64	22.85	14.79	11,72923
19	4.2	379	10.72	997.80	36.42	38.65	22.89	15.76	12,65273
20	4.1	379	10.72	997.80	34.23	39.52	22.92	16.60	13,51643
21	4.1	379	10.67	997.80	34.89	40.30	22.95	17.35	14,32406

22	4.1	379	10.71	997.80	35.06	41.04	22.98	18.06	15,08897
23	4.2	379	10.73	997.80	35.12	41.72	23.01	18.71	15,81496
24	4.2	379	10.71	997.80	34.84	42.37	23.04	19.33	16,504
25	4.2	379	10.69	997.75	35.14	43.02	23.07	19.95	17,1603
26	4.2	379	10.72	997.70	35.25	43.64	23.10	20.54	17,79109
27	4.2	379	10.68	997.70	34.93	44.25	23.13	21.12	18,39399
28	4.1	379	10.69	997.75	35.02	44.84	23.16	21.68	18,97551
29	4.1	379	10.66	997.72	35.53	45.42	23.19	22.23	19,53455
30	4.2	379	10.70	997.70	34.84	45.99	23.22	22.77	20,07836
31	1.8	379	8.33	997.70	15.04	46.18	23.25	22.93	20,11613
32	1.8	379	8.35	997.70	14.90	45.70	23.29	22.41	20,18471
33	1.8	379	8.34	997.68	15.23	45.49	23.32	22.17	20,27725
34	1.8	379	8.32	997.71	14.60	45.48	23.35	22.13	20,389
35	1.8	379	8.33	997.64	14.96	45.56	23.38	22.18	20,5182
36	1.9	379	8.32	997.70	15.43	45.69	23.41	22.28	20,66058
37	1.8	379	8.32	997.68	15.88	45.85	23.44	22.41	20,81429
38	1.8	379	8.33	997.65	14.87	46.00	23.47	22.53	20,97754
39	1.9	379	8.35	997.68	15.30	46.16	23.50	22.66	21,14899
40	1.8	379	8.33	997.68	15.19	46.37	23.53	22.84	21,32475
41	1.8	379	8.32	997.71	15.21	46.46	23.56	22.90	21,50406
42	1.9	379	8.31	997.65	14.94	46.62	23.59	23.03	21,68584
43	1.8	379	8.35	997.70	15.23	46.77	23.62	23.15	21,87223
44	1.8	379	8.32	997.65	15.25	46.92	23.66	23.26	22,05796
45	1.8	379	8.30	997.60	14.80	47.06	23.69	23.37	22,24315
46	1.7	271	8.36	711.92	16.81	47.24	23.72	23.52	22,37763
47	1.5	271	8.36	712.90	16.77	47.37	23.75	23.62	22,50975
48	1.5	270	8.36	711.88	16.39	47.48	23.78	23.70	22,63933
49	1.5	270	8.37	711.99	16.75	47.59	23.81	23.78	22,76705
50	1.5	271	8.38	711.91	16.79	47.72	23.84	23.88	22,89297

51	1.5	270	8.38	712.00	16.81	47.84	23.87	23.97	23,01657
52	1.5	271	8.36	711.94	16.58	47.97	23.90	24.07	23,13675
53	1.5	271	8.37	712.00	16.77	48.08	23.93	24.15	23,25544
54	1.5	270	8.38	711.99	16.58	48.20	23.96	24.24	23,37267
55	1.5	271	8.38	712.00	16.65	48.30	23.99	24.31	23,48788
56	1.5	271	8.37	711.94	16.41	48.41	24.02	24.39	23,60054
57	1.5	270	8.38	712.00	16.71	48.52	24.06	24.46	23,71195
58	1.5	271	8.37	711.99	16.66	48.61	24.09	24.52	23,82093
59	1.5	271	8.38	711.99	16.80	48.72	24.12	24.60	23,92875
60	1.5	271	8.38	711.90	16.27	48.81	24.15	24.66	24,03484
61	2.7	271	9.90	712.12	30.34	49.22	24.18	25.04	24,38893
62	2.7	271	9.91	712.02	30.33	49.91	24.21	25.70	24,72633
63	2.7	271	9.90	712.00	29.85	50.40	24.24	26.16	25,04701
64	2.7	271	9.89	711.99	30.33	50.79	24.27	26.52	25,35234
65	2.7	271	9.88	711.95	30.78	51.12	24.30	26.82	25,64354
66	2.7	271	9.89	711.98	30.22	51.37	24.33	27.04	25,92312
67	2.7	271	9.86	711.97	30.16	51.71	24.36	27.34	26,18919
68	2.7	271	9.94	712.00	30.35	51.97	24.39	27.58	26,45046
69	2.6	271	9.82	712.05	30.03	52.20	24.43	27.77	26,69335
70	2.7	270	9.87	711.97	30.74	52.47	24.46	28.01	26,93087
71	2.7	270	9.89	712.00	30.26	52.70	24.49	28.21	27,16154
72	2.7	270	9.91	711.99	30.29	52.92	24.52	28.40	27,38586
73	2.7	270	9.89	712.06	30.14	53.15	24.55	28.60	27,60146
74	2.7	270	9.96	711.97	30.30	53.35	24.58	28.77	27,8153
75	2.7	271	9.88	712.03	30.09	53.59	24.61	28.98	28,01689
76	2.6	271	9.81	711.99	30.17	53.78	24.64	29.14	28,20781
77	2.7	270	9.87	711.97	30.11	53.99	24.67	29.32	28,39766
78	2.7	271	9.88	712.00	29.81	54.20	24.70	29.50	28,58319
79	2.7	270	9.87	711.89	29.91	54.39	24.73	29.66	28,76323

80	2.7	270	9.88	711.93	30.53	54.58	24.76	29.82	28,93954
81	2.7	271	9.85	712.00	30.53	54.76	24.79	29.97	29,10951
82	2.7	270	9.87	711.88	30.24	54.97	24.83	30.14	29,27701
83	2.7	271	9.88	712.02	30.40	55.13	24.86	30.27	29,44147
84	2.7	270	9.87	711.97	30.17	55.32	24.89	30.43	29,60159
85	2.7	271	9.93	711.97	30.48	55.49	24.92	30.57	29,76258
86	2.7	271	9.88	711.99	30.29	55.66	24.95	30.71	29,9165
87	2.7	270	9.86	711.88	30.26	55.82	24.98	30.84	30,0659
88	2.7	271	9.89	712.01	30.23	55.98	25.01	30.97	30,21456
89	2.7	270	9.86	711.91	30.17	56.16	25.04	31.12	30,35821
90	2.7	271	9.87	711.91	30.28	56.30	25.07	31.23	30,49996
91	2.2	229	9.65	602.90	28.64	56.43	25.10	31.33	30,63077
92	2.2	229	9.63	603.13	28.68	56.49	25.13	31.36	30,75755
93	2.2	229	9.65	603.10	28.49	56.54	25.16	31.38	30,88327
94	2.2	229	9.65	603.19	28.63	56.62	25.20	31.42	31,00657
95	2.2	229	9.64	603.22	28.47	56.73	25.23	31.50	31,12686
96	2.2	229	9.65	603.14	28.48	56.84	25.26	31.58	31,24567
97	2.2	229	9.66	603.03	28.56	56.97	25.29	31.68	31,36305
98	2.2	229	9.65	603.07	28.33	57.07	25.32	31.75	31,47764
99	2.2	229	9.63	603.02	28.38	57.19	25.35	31.84	31,58888
100	2.2	229	9.70	603.11	28.52	57.30	25.38	31.92	31,70318
101	0.1	382	7.58	1004.20	0.18	56.90	25.41	31.49	31,24728
102	0.1	379	7.59	996.11	0.19	56.18	25.44	30.74	30,84968
103	0.1	379	7.58	996.08	0.35	55.79	25.47	30.32	30,50081
104	0.1	379	7.57	996.10	0.32	55.48	25.50	29.98	30,19357
105	0.1	378	7.60	996.11	0.30	55.22	25.53	29.69	29,9241
106	0.1	379	7.58	996.05	0.26	54.99	25.56	29.43	29,68429
107	0.1	379	7.59	996.11	0.16	54.78	25.60	29.18	29,47148
108	0.1	379	7.58	996.18	0.01	54.55	25.63	28.92	29,28075

109	0.1	379	7.59	996.21	0.13	54.38	25.66	28.72	29,11004
110	0.1	379	7.57	996.10	0.10	54.21	25.69	28.52	28,95492
111	4.1	379	10.69	996.11	35.14	54.71	25.72	28.99	29,6705
112	4.1	379	10.61	996.19	35.48	55.84	25.75	30.09	30,31163
113	4.2	379	10.65	996.17	35.28	56.56	25.78	30.78	30,89755
114	4.2	379	10.61	996.19	35.53	57.06	25.81	31.25	31,43014
115	4.2	379	10.73	996.10	35.37	57.42	25.84	31.58	31,9288
116	4.2	379	10.64	996.12	35.51	57.72	25.87	31.85	32,38227
117	4.2	378	10.63	996.05	35.70	57.99	25.90	32.09	32,80248
118	4.2	379	10.69	996.11	35.40	58.24	25.93	32.31	33,19916
119	4.2	379	10.64	995.98	35.38	58.45	25.97	32.48	33,56693
120	4.2	379	10.68	995.99	35.43	58.71	26.00	32.71	33,91628

Приложение В

Акты внедрения



НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ (ООО)

Россия, 111396, г. Москва, ул. Фрязевская, д. 4, стр. 3
Тел/факс: +7(495)301-44-98, 301-14-77



ENGINEERING COMPANY
(LTD)

Fryazevskaya str., 4, b.3, Moscow, Russia, 111396
Tel/fax: +7(495)301-44-98, 301-14-77

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Предложенная Федоровой Ксенией Георгиевной двухмассовая модель для защиты асинхронного частотно-регулируемого электропривода, разработанная в рамках выполнения работы на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 по теме: «Применение двухмассовой тепловой модели для организации защиты в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе», была встроена в программное обеспечение системы управления преобразователей частоты «Универсал» и «АРДН-3» производимых компанией ООО «НПП «ЦИКЛ ПЛЮС». Модель позволяет с более высокой точностью производить оценку температурного режима работы электродвигателя.

Главный инженер

ООО «НПП «ЦИКЛ ПЛЮС»,

кандидат технических наук

Корпусов Д.Е.

« 12 »

03

20 18 г.



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО «ЦЕНТРТЕХКОМПЛЕКТ»

Самохвалов А.В.

2018 г.



АКТ

о внедрении результатов
диссертационной работы
Федоровой Ксении Георгиевны
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Федоровой К.Г. по теме: «Применение двухмассовой тепловой модели для организации защиты в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе», выполненной на кафедре Автоматизированного электропривода ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», внедрены в преобразователях частоты, производимых нашей организацией. Проведено внедрение программного обеспечения с модернизированной тепловой моделью асинхронного электропривода, которая работает параллельно исходной модели, построенной по одномассовой схеме. Отмечена более высокая точность оценки температуры электродвигателя в диапазоне скоростей, необходимых для работы насосного оборудования при правильной настройке параметров модели.

Главный инженер проекта, к.т.н. Тарасов Д.В.

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to D.V. Tarasov, written over a horizontal line.