Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Брянский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО БГТУ)

На правах рукописи

Бондаренко Денис Андреевич

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТЕПЛОВОЗА

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научные руководители:
доктор технических наук, профессор
Михальченко Георгий Сергеевич
кандидат технических наук, доцент
Воробьев Владимир Иванович

Брянск 2017

Содержание

Введение 5
1 Анализ технических решений по автоматизации систем охлаждения тяговых двигателей тепловозов 11
1.1 Анализ направлений работ по созданию и совершенствованию тепловозов с ТАД 11
1.2 Влияние температурного режима обмоток тягового асинхронного двигателя на параметры его работы 13
1.3 Системы охлаждения тяговых двигателей локомотивов и требования, предъявляемые к ним 15
1.4 Классификация и основные характеристики приводов вентиляторов систем охлаждения 22
1.5 Электроприводы вентиляторов систем охлаждения 28
1.6 Постановка задач исследования 33
2 Разработка математической модели тепловых процессов тягового асинхронного двигателя 36
2.1 Анализ математических моделей тепловых процессов тягового асинхронного двигателя 36
2.2 Эквивалентная тепловая схема двигателя 41
2.3 Определение мощности потерь в активных узлах двигателя 58
2.4 Разработка дифференциальных уравнений теплового состояния двигателя. Определение теплоемкостей элементов двигателя 62
2.5 Математическая модель теплового состояния двигателя 68
Выводы 74
3 Автоматическая система управления температурой тягового асинхронного двигателя тепловоза 76
3.1 Общие сведения о автоматических системах управления температурой 76
3.2 Определение передаточных функций АСУТ 78
3.2.1 Задающее устройство 78
3.2.2 Устройство сравнения 78
3.2.3 Блок ограничения 79
3.2.4 Устройство управления 79
3.2.5 Исполнительное устройство 81
3.2.6 Объект управления 86
3.2.7 Измерительное устройство 90
3.2.8 Регулятор 92

3.3 Синтез автоматического регулятора температуры, определение устойчивости и показателей качества АСУТ 94

3.3.1 Методика решения задачи синтеза 94

3.3.2 Решение задачи синтеза для АСУТ тягового асинхронного двигателя 97

3.3.3 Определение критериев качества процесса управления линеаризованной АСУТ с комбинированным регулятором 110

3.3.4 Определение критериев качества процесса управления в нелинейной АСУТ с комбинированным регулятором 113

3.3.5 Синтез регулятора АСУТ, настроенной на технический оптимум, определение критериев качества процесса управления линеаризованной системы 123

3.3.6 Определение критериев качества процесса управления нелинейной АСУТ, настроенной на технический оптимум 126

Выводы 135

4 Экспериментальные исследования электропривода вентилятора с преобразователем частоты как исполнительного устройства и системы охлаждения тягового асинхронного двигателя 137

4.1 Обоснование и структура физической модели тягового привода 137

4.2 Оценка возможности использования серийных машин промышленного назначения в качестве модели тягового асинхронного двигателя тепловоза 138

4.3 Комплексный стенд для исследования автоматической системы управления температурой тягового асинхронного двигателя 141

Выводы 152

5 Расчет технико-экономической эффективности разработанной АСУТ ТАД 154

Заключение 158

Список литературы 160

ПРИЛОЖЕНИЯ 176

Список сокращений и условных обозначений

АД – асинхронный двигатель;

АДПЧ – асинхронный двигатель с преобразователем частоты;

АСУТ – автоматическая система управления температурой;

ВО – вентилятор охлаждения;

КПД – коэффициент полезного действия;

РЭПВ – регулируемый электропривод вентилятора;

САУ – система автоматического управления;

СО – система охлаждения;

ТАД – тяговый асинхронный двигатель.

Введение

Актуальность темы исследования. Железнодорожный транспорт представляет собой основной вид транспорта России, его технический уровень и состояние определяют экономическую эффективность и безопасность перевозок. В настоящее время при создании современных тепловозов с электрической передачей наметилась тенденция использовать тяговый асинхронный двигатель (ТАД). Применение ТАД с короткозамкнутым ротором, обладающих рядом известных преимуществ в сравнении с тяговыми двигателями постоянного тока, способствует повышению надежности и экономичности тепловозов, улучшает их тяговые качества. Вместе с этим неисправная работа, либо выход из строя ТАД приводит не только к его ремонту или замене, но и к значительным финансовым расходам в связи с неопределенным временем простоя тепловоза. Анализ данных различных исследований, позволил сделать вывод, что существенное число неисправностей двигателей прямым или косвенным образом связано с повышенным нагревом его элементов.

Рост температуры в узлах двигателя приводит к увеличению его потерь, тем самым снижая КПД. КПД уменьшается вплоть до 89…77% при изменении температуры в диапазоне 0…160°С. Кроме того изменяется жесткость его механической характеристики, что делает возможным возникновение процессов боксования, что приводит к изменению тяговых свойств тепловоза. Таким образом возникает необходимость учета влияния температуры ТАД в передачах мощности тепловозов. Кроме того одним из резервов повышения экономичности тепловоза и увеличения его силы тяги является сокращение затрат мощности на вспомогательные нужды. Так затраты мощности на вспомогательные системы тепловоза (насосы, компрессор, вентиляторы охлаждения и т. д.) составляют 8–17% и более от общей мощности тепловоза. В настоящее время проблема плавного (непрерывного) управления температурой тяговых электродвигателей подвижного состава, эксплуатируемого в России недостаточно

проработана. Таким образом возникает необходимость разработки автоматической системы управления температурой (АСУТ) ТАД.

В диссертации рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования АСУТ тепловоза, содержащей частотно-управляемый электропривод вентилятора охлаждения как исполнительное устройство.

Степень разработанности темы. Исследованиями систем охлаждения (СО) тягового электрооборудования, автоматических регуляторов и АСУТ в электрических передачах локомотивов занимались: А.В. Грищенко, Е.С. Дорохина, А.А. Зарифьян, А.С. Захарчук, А.Н. Качанов Г.Ф. Кашников, И.Г. Киселев, А.С. Космодамианский, В.Д. Кузьмич, Ю.А. Куликов, А.С. Курбасов, Н.М. Луков, Е.Ю. Логинова, Ю.И. Миловидов, В.А. Петраков, А.А. Петрожицкий, О.Л. Рапопорт, В.И. Рахманинов, А.Н. Савоськин, В.Л. Сергеев, В.В. Стрекопытов, Ф.В. Тихонов, С.В. Торба, В.В. Чащин Л.А. Чернышов, Е.Б. Черток, О.В. Цурган, G. Kylander, M. Mahmoudi, A.A. Melnik, L. Popova, и др.

Цель и задачи. Целью данной работы является разработка АСУТ ТАД тепловоза, содержащей частотно-управляемый электропривод вентилятора охлаждения как исполнительное устройство для плавного управления температурой в широком диапазоне.

Для достижения поставленной в работе цели решены следующие задачи:

– разработана математическая модель теплового состояния тягового асинхронного двигателя в стационарном и нестационарном режимах;

– исследованы статические и динамические свойства тягового асинхронного двигателя как объекта управления температурой и частотно-управляемого электропривода вентилятора охлаждения как исполнительного устройства;

– разработана и исследована автоматическая система управления температурой тягового асинхронного двигателя тепловоза, в которой применен

электропривод вентилятора охлаждения с преобразователем частоты как исполнительное устройство;

– синтезирован регулятор температуры, состоящий из изодромных звеньев и звеньев обратной связи, обеспечивающий требуемые значения критериев качества переходного процесса разработанной системы управления температурой тягового асинхронного двигателя, а также ПИ-регулятор, обеспечивающий настройку системы на технический оптимум;

– разработана и изготовлена физическая модель тягового асинхронного двигателя, система охлаждения тягового асинхронного двигателя с возможностью реализации на ней экспериментальных исследований процессов нагревания и охлаждения;

– проведен расчет технико-экономической эффективности применения разработанной автоматической системы управления температурой на тепловозе.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– разработана математическая модель тепловых процессов, протекающих в ТАД, позволяющая рассчитывать значение температуры в 53 узлах двигателя, с учетом наличия тепловых потерь в 31 узле в статических и динамических режимах работы;

– получены динамические свойства ТАД как объекта управления температурой и частотно-управляемого электропривода вентилятора охлаждения как исполнительного устройства;

– разработана АСУТ, содержащая частотно-управляемый электропривод вентилятора охлаждения как исполнительное устройство, позволяющая плавно управлять температурой наиболее нагретого элемента двигателя;

– решена задача синтеза автоматического регулятора управления температурой ТАД;

– разработан и изготовлен стенд, содержащий физическую модель ТАД и систему его охлаждения.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

– разработана АСУТ ТАД, применение которой позволит плавно управлять его температурой в широком диапазоне;

– разработана математическая модель теплового состояния ТАД, применение которой позволяет исследовать распределение температуры в 53 узлах двигателя в различных режимах работы двигателя и его системы охлаждения;

– разработан стенд, на базе которого возможно проводить широкий спектр экспериментальных исследований температурных режимов двигателя.

Методы и методы исследований. При решении поставленных задач в диссертации выполнены обобщения и анализ материалов научно-технической литературы, использованы методы расчета тепловых полей электродвигателей, теории автоматического управления и электропривода. Математическое моделирование проведено в программном пакете Matlab. Экспериментальные исследования были проведены на разработанном стенде.

Положения, выносимые на защиту:

– математическая модель теплового состояния ТАД, применение которой позволяет определить распределение температуры в 53 узлах двигателя при различных режимах его работы;

– структура, принцип работы и динамические свойства АСУТ ТАД, обеспечивающие плавное управление температурой ТАД;

– структура и принцип работы разработанного стенда, содержащего физическую модель ТАД и систему его охлаждения.

Степень достоверности результатов. Достоверность подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов расчетов с данными экспериментальных испытаний, проведенных на разработанном стенде. Расхождение результатов между теоретическими и экспериментальными исследованиями при определении времени переходного процесса во всех выделенных элементах ТАД не превышает 3 %, при определении значения температуры в этих узлах – 6 %.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на научно-технических и научно-практических конференциях: международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение XXI век» (ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» Госуниверситет – УНПК, 2013 г.), VII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014 г.), V и VI международная научно-практическая конференция «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке и образовании» (БГТУ, 2014 г.), заседании учебно-методической комиссии совмещенной с научно-технической конференцией, проводимой совместно с ЗАО «УК БМЗ» (БГТУ, 2014 г.), II Международной (V Всероссийской) научно-технической конференции «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» (УГНТУ, 2015 г.), III Международной научно-технической конференции, посвящённой 85-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора В.В. Стрекопытова «Локомотивы. XXI век» (ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015 г.), заседании кафедры «Подвижной состав железных дорог» (БГТУ, 2015 г.), заседании кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» (ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017 г.), 7-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные инновации в науке и технике» (ЮЗГУ, 2017 г.).

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследований использовались при выполнении госбюджетной НИР № 1.02.09 (06/47) «Разработка конструкций, математическое моделирование и испытание узлов транспортных машин» в 2014 – 2015 г. на кафедре «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета (БГТУ). Основные результаты работы использовались: в научных проектах РФФИ № 14-08-31274 (2014 – 2015 гг.) и Фонда содействия инновациям № 4701ГУ1/2014 (2014 г), а также внедрены и используются в БГТУ на кафедре «Подвижной состав железных дорог» при подготовке студентов очной

и заочной форм обучения по специальности 190300 – «Подвижной состав железных дорог».

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 13 научных трудов, в этом числе: два патента на полезную модель №148359 и №156446, четыре статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК: «Наука и техника транспорта», №3 2014 г., «Вестник Брянского государственного университета», №2 2015 г., №3 2015 г., «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии», №5-2 2015 г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения с основными результатами и выводами, списка использованных источников из 143 наименований, шести приложений и содержит 175 страниц основного текста, 87 рисунка и 10 таблиц.

Автор выражает признательность научному консультанту А.Н. Савоськину за помощь и поддержку при подготовке работы; благодарит кафедру «Электропоезда и локомотивы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)», научного руководителя В.И. Воробьева и коллектив кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета.

1 Анализ технических решений по автоматизации систем охлаждения тяговых двигателей тепловозов

1.1 Анализ направлений работ по созданию и совершенствованию тепловозов с ТАД

В первых тепловозах с электрической передачей использовался тяговый электропривод с двигателями постоянного тока. Отечественными представителями таких тепловозов стали $Э^{эл}2$ и $Щ^{эл}1$.

26 марта 1956 г. доц. МИИТа И.Б. Башуком был получен патент на электропередачу переменно-постоянного тока (ЭППТ) [9]. В 60-х гг. прошлого века ведущие тепловозостроительные предприятия всего мира приступили к созданию тепловозов с ЭППТ. В СССР этими разработками занимался Луганский тепловозостроительный завод, что привело к появлению в 1963 г. тепловоза ТЭ109, спроектированного НИИЭТМ, электрическое оборудование было изготовлено на заводе «Электротяжмаш» в г. Харькове, выпрямительная установка была разработана в г. Таллине на электротехническом заводе

Первый зарубежный тепловоз с ЭППТ был разработан во Франции компанией «Alstom» мощностью 1765 кВт серии 67000 (года выпуска 1963–1964), который ранее выпускался с передачей постоянного тока. На протяжении 70-х гг. XX века компанией «Alstom» были построены опытные тепловозы серий 67300 с ЭППТ мощностью 1765 и 2060 кВт, а также тепловоз мощностью 3530 кВт с двумя дизелями, одномоторными тележками и бироторным синхронным генератором серии CC70000. В 1967 г. компанией было начато серийное производство тепловоза CC72000, который имел мощность 2650 кВт.

Основными тепловозами с ЭППТ, разработанными в США стали тепловозы мощностью 2200 и 2650 кВт, которые выпускались с 1964 г. компаниями «Alco», «GE» и «GM». В этих же годах английская фирма «Brush» представила проект тепловоза мощностью 2950 кВт с ЭППТ, который использовался для серийного производства тепловоза «Kestrel».

Первым грузовым тепловозом с двумя секциями повышенной мощности стал 2ТЭ116, которой был изготовлен Луганским тепловозостроительными заводом в 1971 г. Пассажирский тепловоз с ЭППТ ТЭП70 мощностью 2940 кВт был разработан Коломенским тепловозостроительным заводом. Его изготовление началось в 1973 г. Принцип компоновки передачи, которая была реализована на ТЭП70, был принят на всех магистральных тепловозах СССР и России серийного производства.

Первой фирмой, которая спроектировала и изготовила тепловоз с тяговым асинхронным двигателем (ТАД), стала «Brush Traction», а первым отечественным тепловозом стал опытный ВМЭ1А. Отличительной чертой при применении ТАД является потребность в управлении частотой питающего их напряжения с целью реализации нужной характеристики. Первым опытным тепловозом с электрической передачей переменного тока стал ТЭ120, который был изготовлен в 1975 году на базу ТЭ109. На отечественном маневровом тепловозе ТЭМ21 также применена передача переменного тока.

Применение генераторов переменного тока и ТАД в компоновке электрической передачи переменного тока позволяет увеличить ее мощность, повысить надёжность, упростить обслуживание и снизить массу. В случае, когда требуется применение промежуточных блоков, например инвертора и выпрямителя, использование синхронного генератора с ТАД является технико-экономически обоснованным [9].

Так, начиная с 2006 г., на Брянском машиностроительном заводе серийно впускается тепловоз 2ТЭ25А с передачей переменного тока. При этом используемый на нем электропривод вентилятора охлаждения (ВО) ТАД включает в себя асинхронный двигатель.

Таким образом, в настоящее время в Российской Федерации и зарубежом эксплуатируется большое количество локомотивов с ТАД: ЭП20, 2ЭС5, 2ЭС10, НПМ2, ДС3, ДЭЛ-02, 2ТЭ25А, ТЭ33А, KZ8A, TGV TMST, Shinkansen E6.

В связи с этим анализ тепловых режимов тягового привода тепловоза целесообразно проводить для асинхронных двигателей переменного тока.

Наряду с этим в последнее десятилетие наметилась очевидная тенденция в регулируемых электроприводах вентиляторов (РЭПВ) по переходу от двигателей постоянного тока к асинхронным двигателям. Это обусловлено в первую очередь более выгодными массогабаритными, эксплуатационными и стоимостными показателями [111, 114, 117].

1.2 Влияние температурного режима обмоток тягового асинхронного двигателя на параметры его работы

В последние годы существенные усилия направлены на развитие методов диагностики повреждений и неисправностей асинхронных двигателей, а также на создание методов их защиты. Важнейшей частью любой защиты является наличие тепловой защиты, необходимой для исключения тепловых перегрузок, и, следовательно, продления срока эксплуатации тягового двигателя. Тепловые перегрузки, вызывающие повреждения тягового двигателя приводят к гораздо более интенсивному старению изоляции [10]. Кроме того, они могут привести к выходу из строя ключевых элементов двигателя: изоляции обмотки статора, стержней ротора, сердечника статора и ротора и т.д. [82, 84].

Анализ данных в работах [51, 110, 127, 128] позволяет заключить, что значительный объем повреждений прямым или косвенным образом вызван перегревом тех или иных частей двигателя.

Повышенный нагрев изоляции обмоток тягового электродвигателя чаще всего вызван следующими причинами:

– наличием динамических перегрузок во время переходных процессов (пуск, изменение частоты вращения, реверс, торможение);

– повышенными нагрузками, а соответственно большими токами в обмотках статора ТАД (тепловые перегрузки);

– несимметричностью источников питания;

– высокой температурой атмосферного воздуха;

– недостаточными условиями охлаждения.

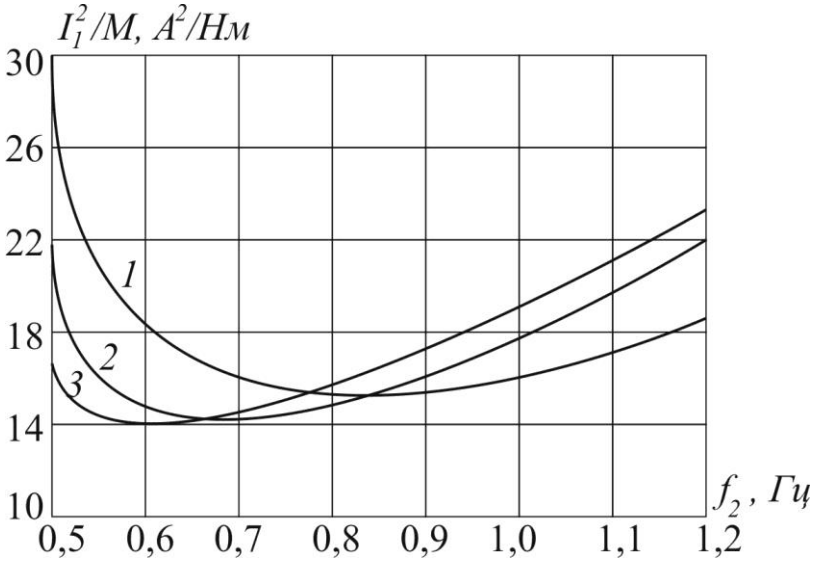
В [117] критерием оценки эффективности работы тягового привода принят коэффициент экономичности:

$$\varepsilon(f_2) = \frac{I_1^2}{M} \to min, \qquad (1.1)$$

где I_1 – ток обмотки статора;

M – момент, развиваемый электроприводом.

На рисунке 1.1 приведены зависимости коэффициента $\varepsilon(f_2)$ для тягового двигателя ДАТ-305 [117].



1 – θ = 165 ºС, 2 – θ = 130 ºС, 3 – θ = 95 ºС,

Рисунок 1.1 – Зависимость коэффициента экономичности двигателя ДАТ-305 от частоты тока ротора f_{2*} при различных значениях температуры обмоток статора θ

Анализ данных, приведенных на рисунке 1.1 позволяет сделать вывод о том, что при увеличении температуры обмоток тягового двигателя оптимальное значение частоты тока обмотки ротора смещается в зону больших скольжений согласно условию $\varepsilon(f_2) \to min$: при θ = 95 ºС, $f_{2\ опт}$ = 0,63 Гц, при θ = 165 ºС, $f_{2\ опт}$ = 0,87 Гц. Сами значения тока статора и амплитуды напряжения при $\varepsilon(f_2) \to min$ меняются незначительно. Расхождение между действительной частотой тока ротора и ее оптимальным значением приводит к резкому увеличению тока статорной обмотки и возрастанию коэффициента экономичности.

Вопреки тому, что при рациональном управлении ТАД работает во всем диапазоне температур с минимально возможными значениями тока статора, с увеличением температуры обмоток его экономичность снижается, так как повышается значение коэффициента $\varepsilon(f_2)$: при температуре обмоток $\theta = 0$ ºС, $\varepsilon(f_2) = 10{,}5$ А^2/Н·м; при температуре обмоток $\theta = 180$ ºС, $\varepsilon(f_2) = 14{,}4$ А^2/Н·м [117].

Поэтому в современных системах управления необходимо учитывать влияние температуры обмоток на процессы, протекающие в силовой и управляющей системах.

1.3 Системы охлаждения тяговых двигателей локомотивов и требования, предъявляемые к ним

С целью поддержания необходимого теплового режима тяговых двигателей в процессе их работы на локомотивах используют системы воздушного охлаждения. Основными элементами, которые входят в состав системы охлаждения (СО) являются: вентиляторы, нагнетательные каналы с воздухораспределительными устройствами, фильтры, воздухозаборные устройства, всасывающие каналы, и сам охлаждаемый объект. Согласно эксплуатационным условиям и основным показателям использования материалов тяговые двигатели, применяемые на локомотивах должны оборудоваться принудительным охлаждением [1, 44]. Основные классификационные признаки локомотивных систем охлаждения представлены в [58, 63, 64, 67].

При этом СО, используемые на локомотивах должны удовлетворять таким требованиям, как максимально допустимые габаритные размеры, массе, величине мощности потерь на привод вентиляторов охлаждения (ВО), и выполнять свою главную задачу – поддержание заданного теплового режима работы ТАД.

Отношение мощности, затраченной на привод вентиляторов охлаждения к мощности, которая была затрачена на тягу определяет экономичность локомотивных СО. Порядка 6-17% от мощности тепловоза затрачивается на при-

вод его вспомогательных механизмов и агрегатов (вспомогательный генератор, вентиляторы охлаждения, насосы, компрессор и т.д.), что отражено в таблице 1.1. Данные по расходу мощности на вспомогательные нужды некоторых иностранных электровозов приведены в таблицу 1.2 [91, 104, 116, 131].

Таблица 1.1

Мощность вспомогательного оборудования отечественных тепловозов

Тепловоз	Мощность привода вентиляторов холодильной камеры, кВт	Мощность привода ВО ТАД, кВт	Суммарная вспомогательная мощность, кВт	Доля вспомогательной мощности от мощности дизеля, %
2ТЭ116	183,2	94,7	225,5	16,9
2ТЭ25А	130	142	381	15,2
ТЭ109	107,5	47,8	270,8	12,3
ТЭП60	132,5	40,2	266,4	12
2ТЭ10Л	121,4	40,4	261,1	11,8
ТЭ3	58,9	8,8	261,1	11,8
ТЭМ2У, ТЭМ18	38,3	10,5	103,1	11,7
ТЭМ2	37,5	13,9	103,4	11,7
ТЭМ1	22,8	8,8	86,1	11,7
ТЭП70	100	96,2	263,2	8,95
2ТЭ121	74,4	131,3	257,2	8,95
ТЭП70А	70	96,2	263,2	7,93
ТЭМ7	70	71,3	256	5,82

Таблица 1.2

Мощность вспомогательных систем иностранных электровозов

Серия электро-воза	Полная мощ-ность, кВт	Общая вспомога-тельная мощность, кВт	Доля вспомогательной мощности от полной, %
1822	4400	256	5,82
460	4800	200	4,17
412	6000	440	7,33
402	5600	320	5,71
152	6400	320	5
145	4200	240	5,71
101	6400	360	5,64
12X	6400	240	3,75
LE560	5600	240	4,29
S252	5600	240	4,29
EA3000	4000	195	4,86

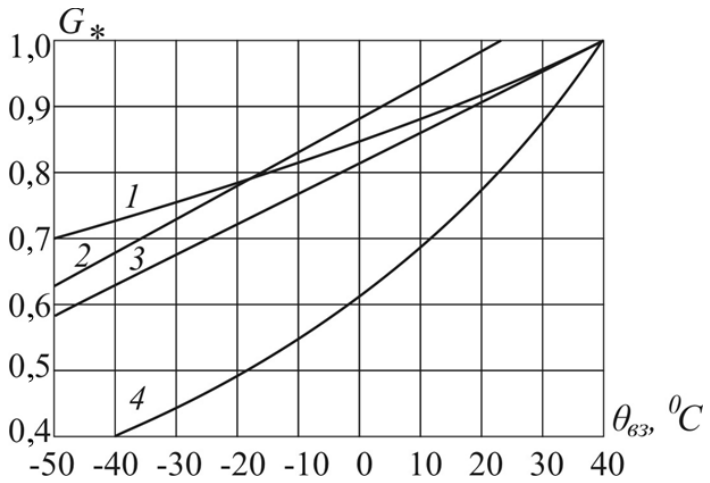
Как видно из таблицы 1.1 доля вспомогательной мощности от полной мощности тепловозов варьируется в диапазоне 5,82…16,9 %. Как правило большее значение затрат энергии на вспомогательные нужды соответствует грузовым тепловозам, а меньшее маневровым. Данные таблицы 1.2 позволяют сделать вывод о том, что доля вспомогательной мощности от полной для электровозов в целом ниже чем у тепловозов.

Исследованиями СО энергетических установок и тяговых двигателей локомотивов, АСУТ и автоматических регуляторов занимались ученые: А.В. Грищенко, Е.С. Дорохина, А.А. Зарифьян, А.С. Захарчук, Г.Ф. Кашников, И.Г. Киселев, А.Н. Коняев, А.С. Космодамианский, В.Д. Кузьмич, Ю.А. Куликов, А.С. Курбасов, Н.М. Луков, Е.Ю. Логинова, Ю.И. Миловидов, В.М. Новиков, В.А. Петраков, А.А. Петрожицкий, О.Л. Рапопорт, В.И. Рахманинов, А.Н. Савоськин, В.Л. Сергеев, В.В. Стрекопытов, Ф.В. Тихонов,

С.В. Торба, В.В. Чащин, Л.А. Чернышов, Е.Б. Черток, О.В. Цурган, G. Kylander, M. Mahmoudi и др.

Исследования, посвященные совершенствованию СО тяговых двигателей локомотивов, с целью повышения их экономичности выполнены во ВНИИЖТ, ВНИКТИ, ВЭлНИИ, ЛМСИ, МГУПС, НИИЭТМ и др. организациях.

В работах [63, 64] рассмотрены возможные пути снижения расхода охлаждающего тяговый двигатель воздуха в зависимости от температуры окружающего среды. В них отмечается, что существующий принцип управления охлаждением тяговых двигателей тепловозов позволяет при температуре окружающей среды ниже 18°С сократить расход охлаждающего тяговый двигатель воздуха на 25% [64].



1 – блок тормозных резисторов (при температуре ленты 640 ºС), 2 – тяговый электродвигатель НБ418К6, 3 – сглаживающий реактор (при температуре обмоток 130 ºС), 4 – выпрямительная установка

Рисунок 1.2 – Зависимости требуемой подачи охлаждающего воздуха $G_* = G_{вз}/ G_{вз.ном}$ от его температуры $\theta_{вз}$

На рисунке 1.2 приведены зависимости требуемой подачи воздуха G_* от его температуры, полученные по результатам работы [91]. Очевидно, что при 0 ºС существует возможность сокращения подачи охлаждающего воздуха на 13 – 38 %, а при температуре окружающей среды равной -40 ºС – на 28 – 60 % в зависимости от типа охлаждаемого оборудования. В качестве номинального

расхода воздуха взят расход при температуре окружающего среды равной 25 ºС – для тяговых двигателей и 40 ºС – для прочего электрооборудования.

По результатам работы [91] определено, что условия теплового равновесия в установившемся режиме могут быть использованы для определения необходимой подачи охлаждающего воздуха в зависимости от изменения токовой нагрузки:

$$kI^2r = \rho c\theta_\infty G_{вз}^n, \qquad (1.2)$$

где k – коэффициент тепловых потери, кроме потерь в меди;

I – величина силы тока электрооборудования, А;

r – величина активного сопротивления, которое зависит от температуры, Ом;

ρ – плотность воздуха, кг/ м^3;

c – теплоемкость окружающего воздуха, $\frac{\text{Вт}\cdot\text{с}}{°\text{С}\cdot\text{кг}}$;

$\theta_\infty = \Delta P/A$ – установившееся значение превышения температуры электрооборудования над температурой окружающей среды (отклонение величины выделяемой энергии ΔP к теплоотдаче тела A), ºС;

$G_{вз}$ – величина равная подаче охлаждающего воздуха вентилятором;

n – показатель степени в уравнении, связывающим критерии Нуссельта и Рейнольдса.

Зависимость подачи воздуха от тока нагрузки при его значении, отличном от номинального:

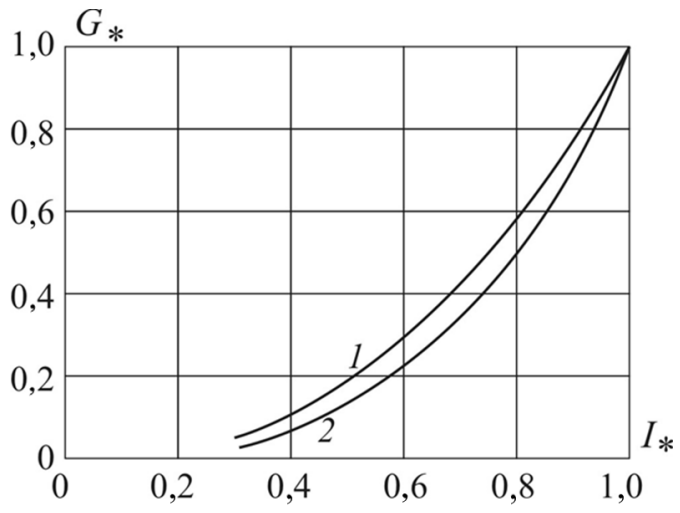
$$G_{вз} = G_{вз.ном}\left(\frac{I}{I_{ном}}\right)^{\frac{2}{n}}. \qquad (1.3)$$

В [7] показано, что коэффициент n = 0,8 – для тягового двигателя и преобразовательной установки, n = 0,72 – для силовых реакторов.

Расчетные зависимости необходимой подачи воздуха от тока нагрузки представлены на рисунке 1.3.

Применение СО локомотивов, содержащих электропривод вентиляторов, с возможностью плавного и автоматического изменения величины подачи охлаждающего воздуха в зависимости от температуры электрооборудования,

температуры окружающей среды и токовой нагрузки позволяют достичь наилучшего эффекта при решении проблемы снижения затрат мощности на вспомогательные нужды.



1 – тяговый двигатель и преобразовательная установка,
2 – тормозные резисторы

Рисунок 1.3 – Зависимость требуемой относительной подачи воздуха от относительного тока нагрузки $I_* = I/ I_{ном}$

Решению проблем автоматизации систем охлаждения тяговых электрических двигателей и созданию АСУТ посвящены работы [14, 16, 19, 22, 33, 52, 54, 58, 64, 66, 67, 69 – 74, 93, 97, 99, 100, 110, 124]. В этих работах рассмотрены варианты автоматических регуляторов температуры, которые могут применяться в СО тяговых двигателей локомотивов, при использовании радиальных и осевых вентиляторов охлаждения:

- микропроцессорный автоматический регулятор температуры с независимым электрическим приводом радиального вентилятора;
- автоматический регулятор температуры с радиальным вентилятором, имеющим механический привод, и регулирующим дросселирующим органом;
- автоматический регулятор температуры осевого вентилятора, имеющим гидродинамический привод;
- автоматический регулятор температуры с механическим приводом осевого вентилятора и поворотными лопатки;

– микропроцессорный автоматический регулятор температуры имеющим механический привод осевого вентилятора и поворотные лопатки;
– микропроцессорный автоматический регулятор температуры имеющим независимый электрический привод осевого вентилятора и раздельным управлением частоты вращения и угла наклона лопаток вентиляторного колеса.

На электровозах ВЛ80^{с} была реализован один из первых ресурсосберегающих методов – система автоматического управления частоты вращения мотор-вентиляторов (САУВ), охлаждающих тяговые двигатели.

Это решение позволяет автоматически изменять частоту вращения мотор-вентиляторов охлаждения тягового оборудования в зависимости от теплового состояния самого нагретого узла электровоза. САУВ позволяет использовать две частоты вращения вентиляторов охлаждения: номинальную, с частотой вращения мотор-вентиляторов равной n = 1450 мин$^{-1}$ от трехфазной сети 380В, 50 Гц фазорасщепителя электровоза и пониженную, с частотой вращения равной n = 450 мин$^{-1}$, при этом мотор-вентиляторы питаются трехфазным напряжением 40 В, 16,7 Гц, источником которого является преобразователем частоты системы САУВ.

Использование данной САУВ на электровозах, эксплуатируемых на Горьковской железной дороге позволило сократить затраты электроэнергии на тягу в среднем на 8%. При этом затраты электроэнергии на привод восьми мотор-вентиляторов в режиме номинальной частоты вращения составляют 240 кВт, в то время как в режиме пониженной это значение снижается до 16 кВт.

В [58] подчеркнуто, что при разработке АСУТ кроме требований к ее статическим и динамическим характеристикам должны быть выполнены и требования рационального выбора массы, габаритных размеров, стоимости, монтажной гибкости конструкции элементов автоматического регулятора, затрат энергии на привод исполнительного устройства и других параметров, определяемых конкретными условиями эксплуатации.

1.4 Классификация и основные характеристики приводов вентиляторов систем охлаждения

К системам управления приводов вентиляторов охлаждения предъявляют следующие требования [90]:

– процесс управления должен быть оптимальным и обеспечивать достаточно быстрое затухание управляемого параметра;

– желательно, чтобы система имела апериодическую динамическую характеристику, а продолжительность переходного процесса была как можно меньше;

– система управления должна быть устойчивой к толчкам и вибрациям, возникающим при движении локомотивов. Надежность необходимо обеспечивать, применяя машины, аппараты и приборы отработанных конструкций, допускающих длительную эксплуатацию без существенных износов;

– система управления не должна быть дорогой в изготовлении и эксплуатации. Снижения ее стоимости можно достичь, применяя минимальное количество однотипных машин и аппаратуры небольшой стоимости при высокой степени их надежности в эксплуатации;

– привод вентилятора, являющийся исполнительным звеном (элементом), должен иметь простую конструкцию, достаточную надежность, максимально возможный КПД, простую и надежную систему управления, обеспечивающую необходимое быстродействие, минимальный вес, габаритные размеры и удобную компоновку на локомотиве. Кроме того, привод вентилятора не должен создавать недопустимых уровней вибраций и шума.

Существует большое разнообразие приводов вентиляторов охлаждения, их конструктивного исполнения и систем управления. На рисунке 1.4 приведена классификация приводов вентиляторов охлаждения, применяемых на локомотивах.

Рисунок 1.4 – Классификация приводов вентиляторов охлаждения локомотивов

Механический нерегулируемый привод ВО применяется на маневровых тепловозах, например на тепловозе ТЭ1. ВО приводится во вращение от дизеля через клиноременную передачу. При этом запуск и остановка вентилятора происходит вручную посредством рукоятки, воздействующей на фрикционную муфту. Основной недостаток этого типа привода – отсутствие возможности управления скоростью вращения вентиляторного колеса в зависимости от режима работы холодильника. Наиболее существенен этот недостаток для магистральных тепловозов большой мощности [90].

Механический привод с ограниченным управлением работает по принципу включено-выключено, его называют релейным. Этот тип привода разработан в процессе совершенствования механического нерегулируемого привода путем внедрения в его конструкцию фрикционных, электромагнитных и других типов муфт, которые управляются вручную или при помощи термореле. Ограниченно регулируемый привод ВО с фрикционной муфтой применен на тепловозе ТЭ3 и имеет две скорости (зимний и летний режимы). К основному недостатку данного вида привода относят значительный расход энергии на охлаждение, вызванный его периодическим включением и отключением. Ручное управление вентилятором приводит к снижению экономичности

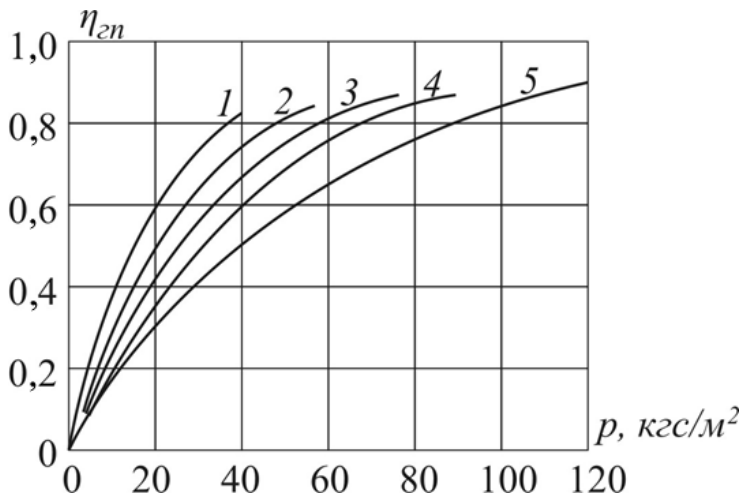
дизеля и усложнению работы машиниста, который вынужден включать и отключать вентилятор до нескольких десятком раз в течении поездки. Это приводит к преждевременному износу дисков муфты сцепления.

Плавное нарастание частоты вращения вентилятора обеспечивается использованием электромагнитной порошковой муфты (ЭПМ). В ней отсутствуют изнашивающиеся диски фрикционной муфты. Основным недостатком привода с ЭПМ является возможность реализации только одной частоты вращения вентилятора. С целью изменения частоты вращения необходимо устанавливать несколько муфт. В приводе вентилятора тепловоза ТЭ10 две ЭПМ и сложный редуктор: возможно автоматическое переключение с летнего режима на зимний.

В роли регулируемого звена привода с гидродинамической муфтой вентилятора охлаждения выступает гидромуфта. Ее конструкция была спроектирована и разработана с переменным наполнением. Она выступила в роли прототипа муфт привода вентилятора охлаждения тепловозов. Несомненными достоинствами при использовании гидромуфт являются увеличение экономичности привода и автоматизация управления. Главным недостатком является сложность компоновки холодильника тепловоза при использовании данного решения [90]. Данный вид привода применен на тепловозах Г1, ТЭ3, ЧМЭ3, ТЭМ7.

Привод с электромагнитной муфтой скольжения использован на тепловозах Alco DL500 (США), построенных для Индии, и на французских тепловозах фирмы. Диски муфты закрепляются на ведущей части валопровода, связанного с дизелем. В массиве дисков устанавливается катушка, через которую подается ток в результате чего диски становятся полюсами электромагнита. При вращении ведущей части муфты в ведомой возникают вихревые токи, которые взаимодействуют с магнитным потоком, который создают ведущие диски. В результате этого взаимодействия возникает крутящий момент, передаваемый вентилятору холодильника. Примененные в приводе вентилятора холодильника электромагнитные муфты скольжения имеют высокий КПД и могут успешно конкурировать с гидродинамическими муфтами.

Более благоприятным по удобству монтажа приводом вентиляторов по сравнению с гидродинамическим приводом является гидрообъемный привод. Он предоставляет возможность плавно управлять частотой вращения, но наряду с этим требует наличия специальных гидромашин, устройств для фильтрации рабочей жидкости привода и устройств, управляющих перепуском для управления частотой вращения.



1 – $n_{нас}$ = 730 об/мин, 2 – $n_{нас}$ = 870 об/мин, 3 – $n_{нас}$ = 1050 об/мин, 4 – $n_{нас}$ = 1190 об/мин, 5 – $n_{нас}$ = 1370 об/мин

Рисунок 1.5 – Зависимость КПД гидрообъемного привода вентилятора охлаждения $\eta_{гп}$ от давления в системе ρ и частоты вращения валов гидронасосов $n_н$ для тепловозов ТЭП60 и ТЭП70

На рисунке 1.5 приведены опытные данные КПД гидрообъемного привода при различных значениях частоты вращении гидронасосов и давлении масла в системе [99, 100, 102].

Величина КПД гидростатического и гидродинамического приводов, а также затраты удельной мощности энергии на привод в зависимости от относительной частоты вращения приведены на рисунке 1.6.

Мощность, расходуемая на привод ВО связана с требуемым расходом охлаждающего воздуха [100] характеристикой, которая приведена на рисунке 1.7.

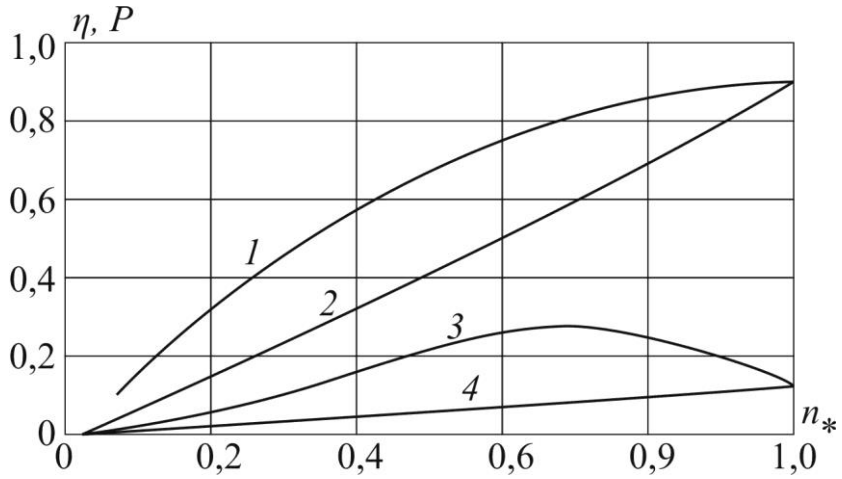


Рисунок 1.6 – Зависимость КПД гидростатического (1) и гидродинамического (2) приводов и затраты удельной мощности энергии на гидродинамический (3) и гидростатический (4) приводы от относительной частоты вращения

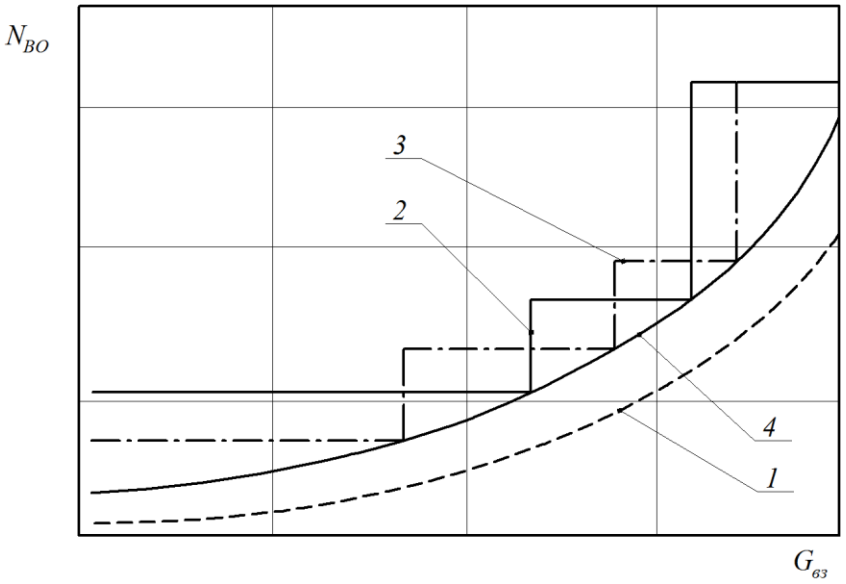


Рисунок 1.7 – Затраты мощности $N_{во}$ на привод вентилятора охлаждения при оптимальном (1), трехступенчатом механическом приводе (2), четырехступенчатом электроприводе (3) и частотном управлении асинхронным двигателем (4)

Анализ данных рисунка 1.7 позволяет сделать вывод о том, что КПД приводов меняется пропорционально частоте вращения выходного вала, причем в режимах, когда гидромашины привода работают значительную часть времени, величина КПД не превышает 0,5. С целью увеличения величины КПД гидропривода необходимо поднимать верхний предел диапазона частоты вращения

его входного и выходного валов, что приведет к повышенной мощности и избыточной подаче воздуха. Одни из возможных решений увеличения значения КПД этого привода являет повышение качества изготовления гидромашин или использования насосов, обладающих регулируемой подачей. Однако, реализация последнего решения затруднено, так как связано со значительными затратами на изготовление и эксплуатацию привода.

Из рисунка 1.7 видно, что трехступенчатый механический привод вентилятора обладает тремя рабочими точками, при которых мощность привода удовлетворяет требуемой. Во всех остальных случаях мощность механического привода вентилятора существенно завышена, что приводит к уменьшению КПД электрической передачи тепловоза и увеличению потери мощности тепловоза. Это касается и четырехступенчатого (релейного) электропривода вентилятора, который обладает более низкими затратами мощности чем трехступенчатый механический привод, но уступает приводу с плавным управлением частотой вращения ВО с асинхронным двигателем, имеющим частотное управление.

Электропривод по сравнению с другими видами приводов вспомогательных механизмов тепловоза, рассмотренных выше, обладает рядом преимуществ – удобством компоновки, значительным срок службы, высокой надежностью, удобством монтажа, возможностью управления частотой вращения, малым износом и простотой обслуживания. В настоящее время наилучшими технико-экономическими показателями обладает электропривод переменного тока, который имеет более простую конструкцию, надежнее и дешевле в изготовлении, чем электропривод с двигателями постоянного тока. Этому послужило появление на рынке мощных полупроводниковых элементов – тиристоров и транзисторов, которые сделали возможным технический прогресс в области регулируемого электропривода с асинхронными двигателями переменного тока.

1.5 Электроприводы вентиляторов систем охлаждения

Отечественными и зарубежными учеными, которые внесли существенный вклад в создание и развитие теории систем электропривода переменного тока и преобразовательной техники стали: А.А. Булгаков, А.Б. Виноградов, В.А. Винокуров, В.И. Загрядцкий, Н.Ф. Ильинский, Ю.М. Иньков, А.Н. Качанов, В.И. Ключев, А.Е. Козярук, М.П. Костенко, С.О. Кривицкий, В.А. Кучумов, В.В. Литовченко, В.В. Москаленко, О.А. Некрасов, Г.Б. Онищенко, А.А. Пугачев, Н.А. Ротанов, Ю.А. Сарбатов, И.И. Эпштейн, М.Г. Юньков, H. Wayne Beaty, F. Blaschke, K. Hameyer, J. Holtz, A. Knight, D.W. Novotny и др.

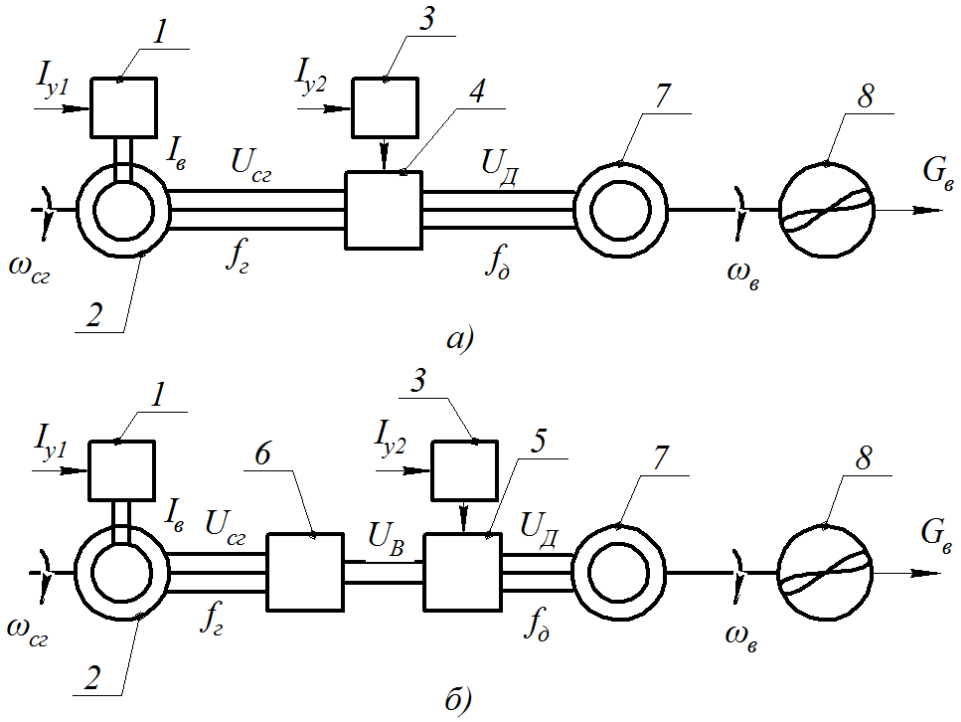
В настоящее время сформировались тенденции к использованию регулируемых электроприводов с асинхронными двигателями вспомогательных агрегатов подвижного состава. На подвижном составе железных дорог используют электроприводы ВО следующих типов:

а) с асинхронным двигателем фазового управления;

б) с асинхронным двигателем частотного управления, имеющим короткозамкнутый ротор.

Функциональная схема электроприводов ВО с фазовым управлением асинхронным двигателем, имеющих источник энергии переменного тока, которые применяются на тепловозах и электровозах, приведена на рисунке 1.8, а, с частотным управлением на рисунке 1.8, б.

Электроприводы вентиляторов с тиристорным фазовым управлением (рисунок 1.8, а) асинхронным электродвигателем применяются на тепловозах и электровозах, имеющих источник энергии переменного тока.



1 – блок управления генератором синхронным; 2 – генератор синхронный; 3 – блок управления преобразователем; 4 – преобразователь напряжения тиристорный; 5 – преобразователь частоты полупроводниковый; 6 – выпрямительная установка; 7 – асинхронный двигатель; 8 – вентилятор охлаждения

Рисунок 1.8 – Функциональные схемы электроприводов вентиляторов охлаждения для АСУТ: а – с фазовым управлением асинхронным двигателем; б – с частотным управлением асинхронным двигателем

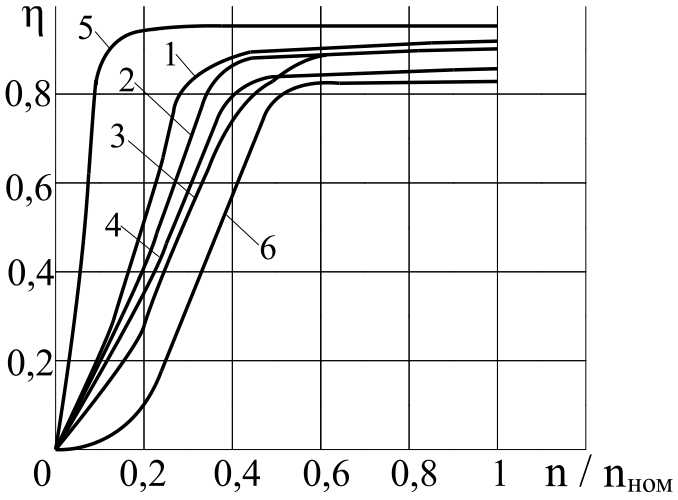
Управлять максимальным моментом асинхронного двигателя можно при изменении величины напряжения, подводимого к статору. При этом критический момент изменяется пропорционально квадрату напряжения. При управлении напряжением скорость холостого хода и критическое скольжение не зависят от напряжения на статоре. Поэтому управление скоростью возможно только в очень небольшом диапазоне скоростей. При более глубоком управлении ток двигателя интенсивно возрастает. Причиной этого являются потери скольжения в роторе двигателя. Даже при вентиляторном характере нагрузки, когда максимальная мощность скольжения составляет всего 15% номинальной, во избежание перегрева двигателя, его установленную мощность нужно существенно увеличивать при номинальных потерях в роторе 2 – 3%.

В работах [111, 112, 116] указывается на возможность применения тиристорных регуляторов напряжения, когда достигается технико-экономический эффект управления, благодаря меньшей стоимости, массогабаритным показателям и простоте. Эффект экономии может получиться, когда управление требуется не мгновенной, а средней производительности насоса, работающего на резервуары, когда допустим двухуровневый режим по производительности. В этом случае, при работе на каждом из уровней, потери скольжения соизмеримы с потерями в частотно-управляемом электроприводе. При таком типе электропривода асинхронный электродвигатель имеет габаритные размеры и массу в 1,5 раза больше, чем асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором той же мощности и частоты вращения вала, применяемый в схемах частотного управления (рисунок 1.8, б).

Для обеспечения возможности управления частотой вращения асинхронного двигателя требуется использовать источник напряжения переменного тока, который имеет возможность управления частотой тока статора. В качестве таких источников выступают полупроводниковые преобразователи частоты. В настоящее время используют два типа преобразователей частоты:

- с промежуточным звеном постоянного тока и автономным инвертором напряжения или тока;
- непосредственные преобразователи частоты.

Результаты экспериментальных исследований асинхронных двигателей моделей АО-52/4, А91-4, МА 142-2/4, АР-74-10 при работе с различными моментами сопротивления M_c и питании от полупроводниковых преобразователей частоты со звеном постоянного тока и от синхронного генератора приведены на рисунке 1.9 [42].



1 – зависимость КПД от частоты вращения асинхронного двигателя с частотным управлением и питанием от синхронного генератора, $M_c = const$; 2 – зависимость КПД от частоты вращения асинхронный двигателя с частотным управлением и питанием от преобразователя частоты со звеном постоянного тока, $M_c = const$; 3 – зависимость КПД от частоты вращения асинхронного двигателя с частотным управлением, $M_c \sim \omega^2$; 4 – зависимость КПД от частоты вращения асинхронного двигателя с частотным управлением и питанием от преобразователя частоты со звеном постоянного тока с учетом потерь в преобразователе частоты, $M_c = const$;
5 – КПД преобразователя частоты; 6 – зависимость КПД от частоты вращения асинхронного двигателя с частотным управлением и питанием от синхронного генератора с учетом потерь в синхронном генераторе

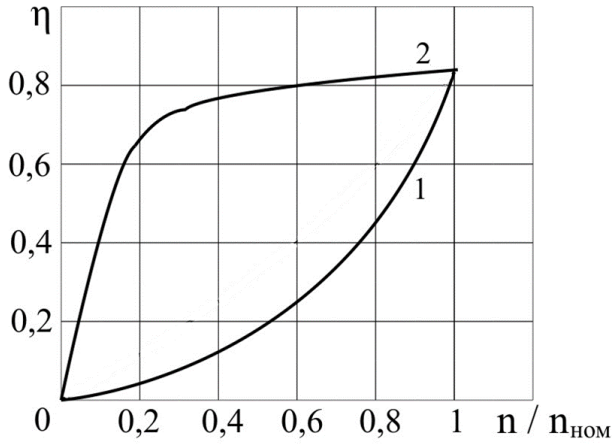
Рисунок 1.9 – Зависимости КПД от частоты вращения вала ротора асинхронного двигателя

Кривая 5 (рисунок 1.9) представляет собой зависимость КПД преобразователя частоты при работе с двигателем модели А91-4 и вентиляторной нагрузкой. При этом напряжение на асинхронном двигателе изменялось в соответствии с законом $U / f = const$. За счет дополнительных потерь от высших гармоник при питании от полупроводниковых преобразователей частоты в номинальном режиме работы асинхронного двигателя ($f_{ном}$ = 50 Гц) суммарные потери энергии возрастают на 35...55%.

Определено, что несинусоидальность напряжения источника энергии значительно уменьшает КПД асинхронного двигателя и увеличивает его нагрев [42, 91].

В результате проведенного анализа характеристик 1 и 3 рисунка 1.9 установлено, что при частотном управлении асинхронным двигателем с вентиляторной нагрузкой и питании его от синхронного генератора с уменьшением частоты КПД асинхронного двигателя снижается в большей степени, чем при постоянном моменте сопротивления. Это связано с тем, что при частотном управлении по закону $U / f = const$ уменьшение частоты напряжения источника энергии приводит к тому, что потери в асинхронном двигателе уменьшаются в меньшей степени, чем полезная мощность на валу при вентиляторной нагрузке по сравнению с асинхронным двигателем, работающем при постоянном моменте сопротивления.

Наибольшее распространение в электроприводах с фазовым и частотным управлениями нашли асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.



η – КПД электропривода, n, $n_{ном}$ – текущая и номинальная частоты вращения вала ротора, 1 – электропривод с тиристорным преобразователем в цепи обмотки статора; 2 – частотно-управляемый электропривод с преобразователем частоты инверторного типа

Рисунок 1.10 – КПД электроприводов

На рисунке 1.10 изображены зависимости КПД различных видов управляемых электроприводов от частоты вращения в установившихся режимах работы. В таблице 1.3 приведены интегральные показатели качества, основными из которых являются удельный вес кг/кВт и удельная стоимость тыс.р./кВт.

Таблица 1.3

Показатели качества электроприводов

Интегральный показатель качества	1	2
Удельный вес, кг / кВт	14…17	10…11
Удельная стоимость, тыс.р. / кВт	6…8	3…4

Использование фазной обмотки вместе с внешними сопротивлениями с целью увеличения активного сопротивления обмотки ротора позволяет улучшить регулировочные характеристики асинхронного электродвигателя [113].

Анализ конструктивных решений и технических характеристик электроприводов содержащих асинхронный двигатель вспомогательных агрегатов тягового подвижного состава как отечественного, так и импортного производства позволил сделать вывод о том, что все применяемые в настоящее время виды управляемых электроприводов, в состав которых входят асинхронные двигатели, обладают совокупностью недостатков, затрудняющих их применение на локомотивах. Одним из возможных вариантов электропривода вентилятора охлаждения является плавно управляемый электропривод с асинхронным двигателем, имеющим преобразователь частоты. Такое решение позволяет улучшить технико-экономические характеристики электропривода: повысить его надежность, минимизировать удельные затраты на функционирование вспомогательных систем, снизить стоимость, улучшить показатели качества работы АСУТ в которых будет применяться этот электропривод.

1.6 Постановка задач исследования

В настоящее время в эксплуатируемом парке локомотивов (электровозов и тепловозов) отсутствует управляемый привод вентиляторов охлаждения тяговых асинхронных двигателей.

Анализ проведенных исследований показал, что в сравнении с позиционными системами управления, обладающими двумя и более ступенями, непре-

рывные системы обладают рядом неоспоримых преимуществ [52, 56]. Главным недостатком позиционных систем является то, что при релейном управлении затраты энергии на охлаждение оборудования значительно выше, чем при непрерывном управлении (см. рисунок 1.7). Помимо этого, работа вентилятора в релейном режиме оказывает отрицательное воздействие на надежность элементов оборудования тепловоза, что объясняется колебательным характером изменения управляемой температуры, а значит и термических напряжений в них. Более того привод вентилятора охлаждения может испытывать периодические перегрузки в коммутационных режимах (при включении и отключении).

Целью данной работы является разработка АСУТ ТАД тепловоза, содержащей частотно-управляемый электропривод вентилятора охлаждения как исполнительное устройство для плавного управления температурой в широком диапазоне.

Для достижения поставленной в работе цели решены следующие задачи:

– разработана математическая модель теплового состояния тягового асинхронного двигателя в стационарном и нестационарном режимах;

– исследованы статические и динамические свойства тягового асинхронного двигателя как объекта управления температурой и частотно-управляемого электропривода вентилятора охлаждения как исполнительного устройства;

– разработана и исследована автоматическая система управления температурой тягового асинхронного двигателя тепловоза, в которой применен электропривод вентилятора охлаждения с преобразователем частоты как исполнительное устройство;

– синтезирован регулятор температуры, состоящий из изодромных звеньев и звеньев обратной связи, обеспечивающий требуемые значения крите-

риев качества переходного процесса разработанной системы управления температурой тягового асинхронного двигателя, а также ПИ-регулятор, обеспечивающий настройку системы на технический оптимум;

– разработана и изготовлена физическая модель тягового асинхронного двигателя, система охлаждения тягового асинхронного двигателя с возможностью реализации на ней экспериментальных исследований процессов нагревания и охлаждения;

– проведен расчет технико-экономической эффективности применения разработанной автоматической системы управления температурой на тепловозе.

2 Разработка математической модели тепловых процессов тягового асинхронного двигателя

2.1 Анализ математических моделей тепловых процессов тягового асинхронного двигателя

Согласно данным приведенным в работе [137] в процессе исследования тепловых процессов двигателей можно использовать следующие методы контроля температуры: метод сопротивления, метод встроенных датчиков температуры, метод термометра.

Метод сопротивления подразумевает использование зависимости сопротивления обмоток двигателя от температуры [137]. При этом проводится измерение средней температуры обмотки двигателя, как при снятом, так и при поданном напряжении. Главным недостатком такого метода являются существенные аппаратные затраты в случае двигателей, которые эксплуатируются под напряжением.

Необходимым условием использования второго метода встроенных датчиков температуры при определении температуры узлов электродвигателя является наличие встроенных датчиков температуры таких как термопары, термометры сопротивления, инфракрасные датчики температуры и т.д., например, в массиве обмотки статора двигателя [137]. Реализация данного технического решения представляется возможным только при изготовлении двигателя. При этом лишь небольшая часть из эксплуатирующихся в настоящее время двигателей имеют в своей конструкции такие датчики, что объясняется целым рядом экономических и технических причин, связанных со стоимостью, трудностью установки датчиков и их эксплуатации.

Использование третьего метода подразумевает регистрацию температуры поверхности двигателя [137]. Отсутствие информации о температуре его внутренних узлов является главным недостатком данного способа контроля температуры.

В настоящее время с учетом развития микропроцессорных и цифровых систем большое распространение получил способ контроля температуры ТАД,

основанный на данных математической модели тепловых процессов, рассчитываемых на основе известных (измеряемых) электрических параметров, а также конструктивных параметров двигателя.

Выбор тепловой модели должен осуществляться на основе всестороннего анализа условий эксплуатации асинхронного двигателя (АД). В современных условиях имеется необходимость развития тепловых моделей для анализа работы асинхронных электроприводов с частотным управлением.

Математическому моделированию тепловых процессов, протекающих в электродвигателе, посвящено множество научных работ [3, 4, 12, 15, 16, 23, 29, 35, 36 – 39, 51 – 53, 59, 64, 68, 78, 85 – 89, 100, 120, 122, 123, 128 – 130, 132 – 135, 139 – 142]. При этом рассмотренные в них методики подразделяются на два типа: с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и с использованием метода эквивалентных тепловых схем (ЭТС) замещения.

Использование метода МКЭ предполагает значительный объем вычислений с использованием специальных программных комплексов, например, ANSYS, которые позволяют моделировать тепловые поля, а также наличия подробной информации о геометрических размерах конструктивных узлов двигателя. В [138] рассмотрены особенности конвективного обмена между воздушными потоками в каналах охлаждения двигателя. Проанализированы вопросы, связанные с естественным и принудительным охлаждением, приведены соответствующие критерии и расчетные соотношения для определения числа Нуссельта. При этом расчеты выполнены для стационарных тепловых процессов. В [129] с использованием МКЭ выполнено моделирование нестационарных тепловых процессов, протекающих в статоре двигателя. По результатам экспериментальных исследований, сделан вывод о том, что математическая модель обладает высокой точностью при моделировании стационарных тепловых процессов, а в динамике ошибка может достигать 10 °С.

Второй тип методик, базирующийся на ЭТС, широко применяется при разработке и исследовании двигателей. Он позволяет определять средние значения температур отдельных узлов двигателя.

Существует достаточно большое количество работ, посвященных исследованию теплового состояния АД на основе ЭТС замещения [3, 4, 15, 16, 36]. Во всех них применены схемы с различной степенью детализации, с разным количеством рассматриваемых узлов и теплонагруженных элементов АД. Основным достоинством методик, основанных на методе ЭТС, является возможность масштабирования разработанной схемы под другие двигатели схожей конструкции без необходимости разработки новой математчиеской модели. Однако в большинстве работ отсутствуют расчетные формулы и не приводятся методики расчета для определения тепловых сопротивлений этих схем замещения. Вместе с этим, корректное определение сопротивлений тепловой модели – залог ее адекватной работы в установившихся и переходных режимах.

Результаты исследований четырех массовой модели двигателя, которая позволяет учитывать влияние высших гармоник токов статора для нестационарного теплового процесса приведены в [143]. При этом необходимые расчетные соотношения для оценки влияния температуры охлаждающего воздуха в этой работе не рассмотрены. Модель нестационарных тепловых процессов протекающих в двигателе АИР160S4, состоящая из 16 узлов, рассмотрена в [87]. Для соответствующих узлов двигателя были построены кривые нагревания. Тепловая модель двигателя, которая состоит из 17 узлов приведена в [98]. Она позволяет учесть механические потери в подшипниках двигателя. Построены семейства расчетных и опытных значений температур статора двигателя и его подшипникового щита. В [129] разработана методика для определения параметров двух массовой тепловой модели двигателя на базе экспериментальных исследований. Предложенная методика требует большего числа испытаний.

Для численного решения задачи неоднородной теплопроводности в теле с распределенными источниками теплоты используется метод конечных разностей, который при шаге сетки, соизмеримым с линейными размерам элементарных узлов ТАД, преобразуется в метод ЭТС для решения трехмерных задач теплопроводности и теплопередачи.

При использовании метода ЭТС для расчета температурных полей в электрической машине тепловая система с непрерывно распределенными параметрами заменяется эквивалентной системой однородных тел (узлов), между которыми устанавливаются кондуктивные связи, определяемые соответствующими процессами теплообмена, что позволяет такие системы уравнений решать стандартными численными методами [24, 25].

Основанием для такого перехода является возможность рассматривать распределение теплового поля в элементе как результат взаимодействия нескольких одномерных тепловых потоков. Возникающая при этом погрешность зависит от линейных размеров элементарных узлов [25].

При расчете температурных полей электрических машин в исследовательских целях количество узлов, на которые разбивается машина, может выбираться практически любым, гарантирующим заданную точность расчета. Для тех узлов схемы, приведенная теплоемкость которых незначительна по сравнению с другими узлами, а именно, для узлов воздушных потоков в каналах машины, на основании теории теплообмена в термически связанных телах дифференциальные уравнения, описывающие тепловое состояние узлов, заменяются алгебраическими уравнениями [36].

Общий вид уравнения, описывающего тепловое состояние *i*-ого узла системы, которое контактирует со смежными *n* узлами имеет вид [88]

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial t} = P_i - \sum_{n=1}^{n} \frac{\theta_i - \theta_n}{R_{i,n}}, \qquad i = 1...n. \tag{2.1}$$

$\partial \theta_i$ – это малое приращение температуры *i*-го узла, °С за малое приращение времени ∂t, с;

P_i – мощность потерь *i*-го узла, Вт (равна нулю, если узел пассивный);

θ_i – мгновенное значение температуры *i*-го узла, °С;

θ_n – мгновенное значение температуры смежного узла, °С (1…n);

$R_{i,n}$ –тепловое сопротивление смежного узла (1…*n*), контактирующих с *i*-ым узлом, °С/Вт;

$\sum_{n=1}^{n} \frac{\theta_i - \theta_n}{R_{i,n}}$ – сумма разностей мгновенных значений температур i-го узла с каждым контактирующим смежным узлом (1…n), отнесенная соответственно к тепловым сопротивлениям этих узлов, Вт.

Метод ЭТС, как было сказано выше, заключается в определении средних значений температур отдельных узлов двигателя, может быть использован не только при исследовании стационарного теплового состояния двигателя, но и в случае нестационарных тепловых состояний.

Тепловое состояние двигателя для нестационарного теплового режима может быть описано сложной системой связанных между собой элементов, процессы в которых могут быть представлены системой дифференциальных уравнений в частных производных с взаимосвязанными граничными условиями [36].

В случае если сделать допущение (не рассматривать температурные поля каждого отдельно взятого узла двигателя), то можно использовать систему линейных дифференциальных уравнений первого порядка для описания нестационарного теплового процесса. В этом случае число уравнений равно количеству тел, на которые разделяется двигатель. При этом число узлов ЭТС должно равняться количеству тел. Дифференциальное уравнение теплового баланса записывается для каждого узла принятой ЭТС.

В [87, 89] указывается на увеличение средних по двигателю значений температур вплоть до 29 %. В связи с тем, что добавочные потери в роторе составляют около 65% от общей суммы добавочных потерь двигателя, то наиболее существенным является их совместное влияние вместе с изменяющимися условиями охлаждения. Анализ работ, связанных с расчетными и экспериментальными исследованиями теплового состояния двигателей частотного управления при различных законах управления позволяет сделать вывод о том, что распределение температуры по длине массива ротора имеет форму несимметричного колокола [87, 89, 115].

На основе обзора литературных источников [3, 4, 15, 16, 23, 24, 25, 29, 36, – 39, 51 – 53, 59, 64, 68, 85 – 89, 100, 120, 122, 123, 128 – 130, 135] в качестве

выбранного метода для исследования распределения температур в ТАД был принят метод ЭТС, который позволяет рассчитывать тепловое состояние узлов двигателя во всех режимах его работы при незначительной погрешности.

2.2 Эквивалентная тепловая схема двигателя

Двигатель имеет сложную конструкцию, что затрудняет задачу её теплового моделирования. Сложность и в тоже время точность тепловой модели во многом будет зависеть от количества рассматриваемых узлов. Критические значения температуры регистрируются для различных частей обмотки статора и ротора асинхронных двигателей. Это важно учитывать при разработке эквивалентной тепловой модели и моделировать такие узлы двигателя большим количеством элементов, чтобы результаты расчета были наиболее точными и корректными.

Далее рассмотрим разработку ЭТС для электродвигателя АО-63-4.

Общий вид ЭТС АД схематично показан на рисунке 2.5.

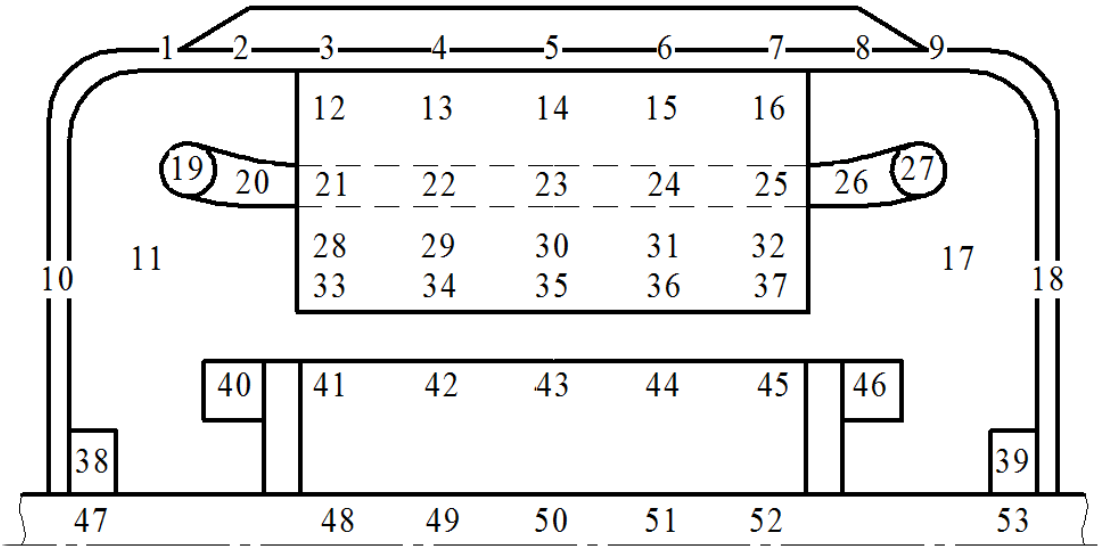


Рисунок 2.1 – Эскиз АД

Как видно из рисунка 2.1 с тепловой точки зрения АД состоит из 53 теплонагруженных узлов. Выбор этих узлов был сделан на основании обзора исследований теплового состояния АД различных конструкции, назначения и схем охлаждения [40, 41, 60, 61, 85 – 89, 109, 112, 115, 128, 130, 135].

Разработанная ЭТС, соответствующая эскизу представлена на рисунке 2.2.

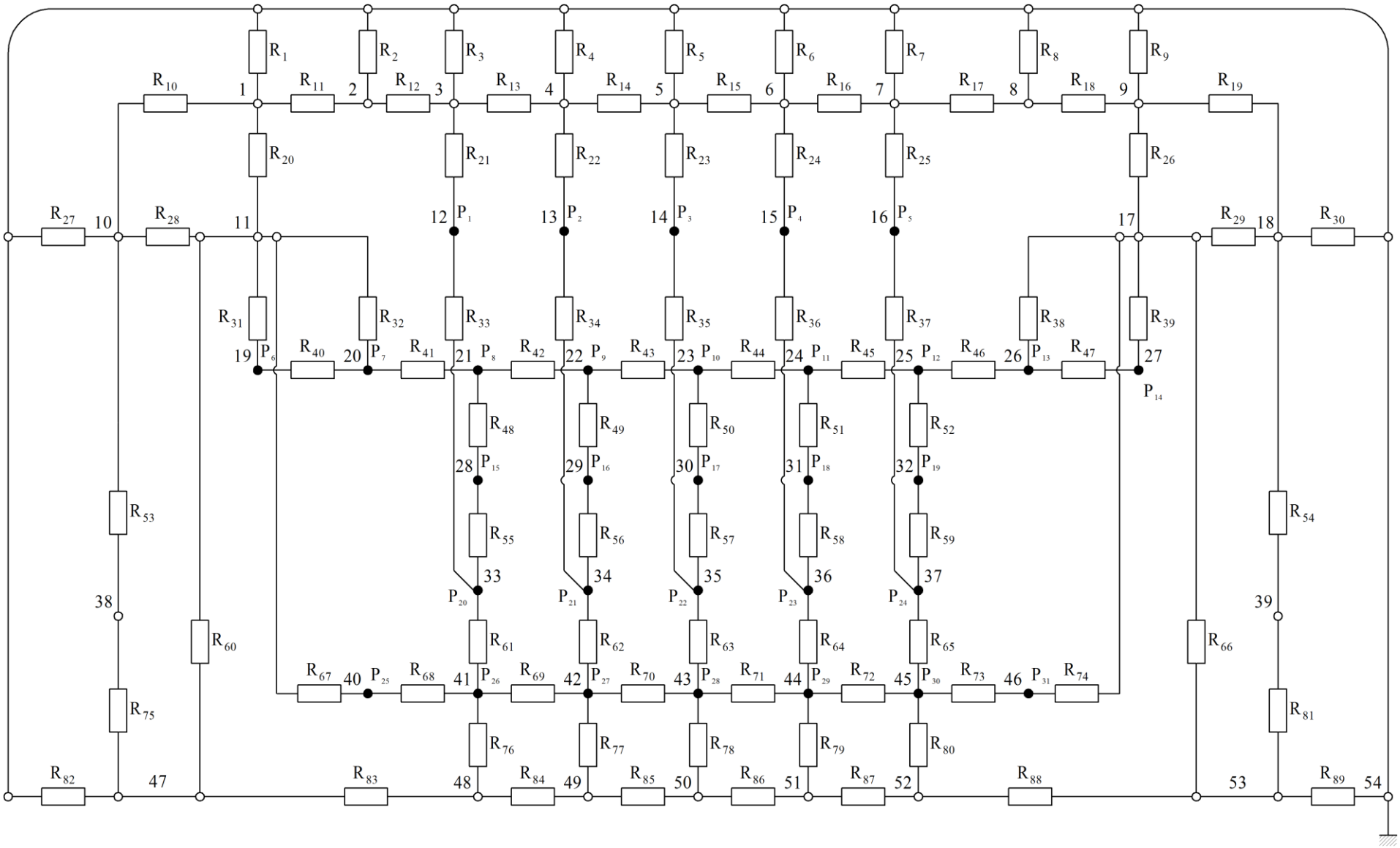


Рисунок 2.2 – Эквивалентная тепловая схема двигателя АО-63-4

Тепловые сопротивления, приведенные в ЭТС сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Тепловые сопротивления асинхронного двигателя АО-63-4

$R_1 \ldots R_9$	Радиальное тепловое сопротивление от корпуса двигателя к окружающему воздуху
R_{10}	Аксиальное тепловое сопротивление от верхней части корпуса к его левой торцевой крышке
$R_{11} \ldots R_{18}$	Собственное аксиальное тепловое сопротивление верхней части корпуса
R_{19}	Аксиальное тепловое сопротивление от верхней части корпуса к его правой торцевой крышке
R_{20}	Тепловое сопротивление от корпуса к охлаждающему воздуху
$R_{21} \ldots R_{25}$	Радиальное тепловое сопротивление воздушного зазора между корпусом и сердечником статора двигателя
R_{26}	Тепловое сопротивление от корпуса к охлаждающему воздуху
R_{27}	Радиальное тепловое сопротивление левой торцевой крышке к окружающему воздуху
R_{28}	Тепловое сопротивление левой торцевой крышке к охлаждающему воздуху
R_{29}	Тепловое сопротивление правой торцевой крышке к охлаждающему воздуху
R_{30}	Радиальное тепловое сопротивление правой торцевой крышке к окружающему воздуху
R_{31}	Тепловое сопротивление лобовой части обмотки статора к охлаждающему воздуху
R_{32}	Тепловое сопротивление свободного участка пазовой части обмотки статора к охлаждающему воздуху
$R_{33} \ldots R_{37}$	Радиальное тепловое сопротивление пазовой части обмотки статора к его сердечнику
R_{38}	Тепловое сопротивление свободного участка пазовой части обмотки статора к охлаждающему воздуху
R_{39}	Тепловое сопротивление лобовой части обмотки статора к охлаждающему воздуху
R_{40}	Собственное аксиальное тепловое сопротивление лобовой части обмотки статора
R_{41}	Собственное аксиальное тепловое сопротивление свободного участка пазовой части обмотки статора
$R_{42} \ldots R_{45}$	Собственное аксиальное тепловое сопротивление пазовой части обмотки статора
R_{47}	Собственное аксиальное тепловое сопротивление лобовой части обмотки статора
$R_{48} \ldots R_{52}$	Собственное аксиальное тепловое сопротивление верхней части зубцов статора

Продолжение таблицы 2.1

R_{53}	Тепловое сопротивление от левого подшипника к левой торцевой крышке корпуса двигателя
R_{54}	Тепловое сопротивление от правого подшипника к левой торцевой крышке корпуса двигателя
$R_{55}…R_{59}$	Собственное радиальное тепловое сопротивление нижней части зубцов статора
R_{60}	Тепловое сопротивление от левой части вала ротора двигателя к охлаждающему воздуху
$R_{61}…R_{65}$	Радиальное тепловое сопротивление воздушного зазора между ротором и статором двигателя
R_{66}	Тепловое сопротивление от левой части вала ротора двигателя к охлаждающему воздуху
R_{67}	Тепловое сопротивление от левой части ротора двигателя к охлаждающему воздуху
$R_{68}…R_{73}$	Собственное аксиальное тепловое сопротивление стержней ротора
R_{74}	Тепловое сопротивление от правой части ротора двигателя к охлаждающему воздуху
R_{75}	Тепловое сопротивление между подшипником и левой частью вала ротора двигателя
$R_{76}…R_{80}$	Радиальное тепловое сопротивление между стержнями и валом ротора
R_{81}	Тепловое сопротивление между подшипником и правой частью вала ротора двигателя
R_{82}	Тепловое сопротивление от левой части вала ротора двигателя к окружающему воздуху
$R_{83}… R_{88}$	Собственное аксиальное тепловое сопротивление вала ротора двигателя
R_{89}	Тепловое сопротивление от правой части вала ротора двигателя к окружающему воздуху

Значения тепловых сопротивлений элементов исследуемого двигателя, составляющих его ЭТС, зависят от его конструкции. Геометрические размеры основных элементов АД представлены в приложении А.

Рассмотрим отдельные узлы АД для определения значений тепловых сопротивлений ЭТС [21].

Упрощенная ЭТС, поясняющая теплопередачу между корпусом и окружающим воздухом, полученная при упрощении ЭТС двигателя приведена на рис. 2.7.

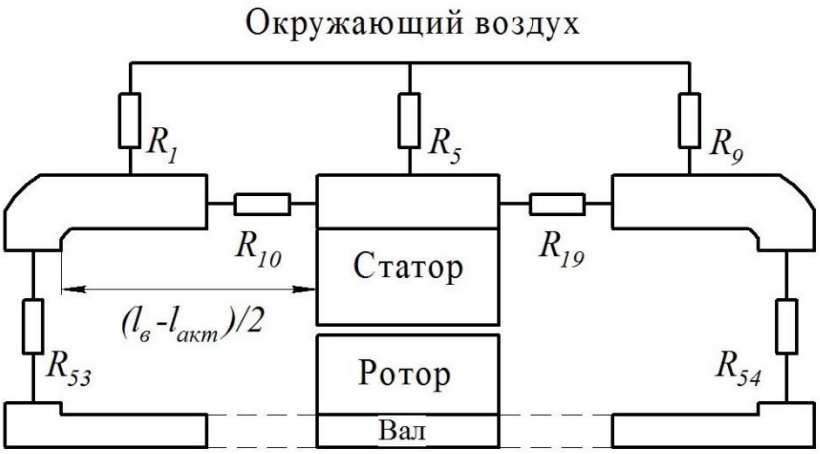


Рисунок 2.3 – Упрощенная ЭТС, поясняющая теплопередачу между корпусом двигателем и окружающим воздухом

Корпус рассеивает тепло благодаря конвекции и излучению через тепловые сопротивления R_1–R_9 его верхней поверхности между корпусом и окружающей средой.

$$R_{1...9} = \frac{l_к}{\alpha_1 \varepsilon_1 S_{корп}}, \tag{2.2}$$

где $l_к$ – длина элемента корпуса двигателя, м,

α_1 – коэффициент теплоотдачи свободной конвекции от поверхности корпуса к окружающему воздуху,

ε_1 – коэффициент теплового излучения, который эквивалентен коэффициенту свободной конвекции. Учитывая наличие ребер охлаждения, принимаем, что площадь поверхности корпуса увеличивается на 50 %, то есть ε = 1,5 [135].

$S_{корп}$ – площадь поперечного сечения корпуса двигателя ($S_{корп} = \pi(r_{к.нар} - r_{к.вн})^2$), м^2,

$r_{к.нар}$ – наружный радиус корпуса двигателя, м,

$r_{к.вн}$ – внутренний радиус корпуса двигателя, м.

Торцевые крышки корпуса двигателя рассеивают тепло через тепловые сопротивления R_{27} и R_{30}

$$R_{27,30} = \frac{h_{торц}}{\alpha_1 \varepsilon_2 S_{торц}}, \tag{2.3}$$

где $h_{торц}$ – толщина торцевой крышки двигателя, м,

ε_2 – коэффициент теплового излучения, который эквивалентен коэффициенту свободной конвекции. Учитывая отсутствие ребер охлаждения, принимаем, что $\varepsilon_2 = 1$ [135].

$S_{торц}$ – площадь поперечного сечения торцевой крышки двигателя, м^2, $S_{торц} = \pi(r_{торц.нар} - r_{торц.вн})^2$, м^2,

$r_{торц.нар}$ – наружный радиус торцевой крышки корпуса двигателя, м,

$r_{торц.вн}$ – внутренний радиус торцевой крышки корпуса двигателя, м.

Аксиальные тепловые сопротивления верхней поверхности корпуса $R_{10}\ldots R_{19}$ соединены с тепловыми сопротивлениями торцевых крышек R_{53} и R_{54}, с тепловыми сопротивлениями охлаждающего воздуха R_{20} и R_{26}, с радиальными тепловыми сопротивлениями сердечника статора $R_{21}\ldots R_{25}$. Теплопередача в них будет обусловлена температурным градиентом из-за разности температур со стороны подачи охлаждающего воздуха и со стороны привода. При их определении сделано допущение о том, что расстояние от левой торцевой крышки до средней части корпуса равно расстоянию от правой торцевой крышки до средней части корпуса и корпус симметричен относительно своей средней линии.

$$R_{10...19} = \frac{l_в - l_{акт}}{2\lambda_к \pi\left(\left(r_{н-с} + h_к\right)^2 - r_{н-с}^2\right)} \qquad (2.4)$$

$l_в$ – длина вала двигателя, м,

$l_{акт}$ – длина активной части статора, м,

$\lambda_к$ – теплопроводность корпуса двигателя, Вт/м·К,

$r_{н-с}$ – наружный радиус статора, м,

$h_к$ – толщина корпуса двигателя, м.

Тепловые сопротивления торцевых крышек R_{53} и R_{54} определяются следующим образом:

$$R_{53,54} = \frac{h_{торц}}{\lambda_к \pi \left(r_{н-торц}^2 - r_{вн-торц}^2 \right)}, \qquad (2.5)$$

$r_{н-торц}$ – наружный радиус торцевой крышки двигателя, м,

$r_{вн-торц}$ – внутренний радиус торцевой крышки двигателя, м, $r_{вн-торц} = r_{н-в}$,

где $r_{н-в}$ – наружный радиус вала двигателя, м.

Тепло от корпуса двигателя передается к охлаждающему воздуху внутри двигателя через тепловые сопротивления R_{20} и R_{26}

$$R_{20,26} = \frac{1}{\alpha_1 A_1}, \qquad (2.6)$$

где α_1 – эмпирический коэффициент, Вт/м·К, характеризующий теплопроводность охлаждающего воздуха в зависимости от частоты вращения ротора двигателя, вычисляемый как [128]

$$\alpha_1 = 15 + (6,75\gamma \frac{x}{d_h} r_{вн-р})^{0,65}, \qquad (2.7)$$

$r_{вн-р}$ – внутренний радиус ротора двигателя, м,

γ – коэффициент учитывающий изменение подачи охлаждающего воздуха,

$\frac{x}{d_h}$ – отношение расстояний от входа охлаждающего воздуха до рассматриваемой точки к общей длине рассматриваемого элемента [128];

ω – частота вращения двигателя, рад/с,

A_1 – площадь соприкосновения охлаждающего воздуха с корпусом двигателя (рисунок 2.4).

$$A_1 = \pi (r_{н-с}^2 + r_{н-с} \left(l_в - l_c \right)) \ , \qquad (2.8)$$

$r_{н-с}$ – наружный радиус статора двигателя, м;

l_c – длина статора двигателя, м.

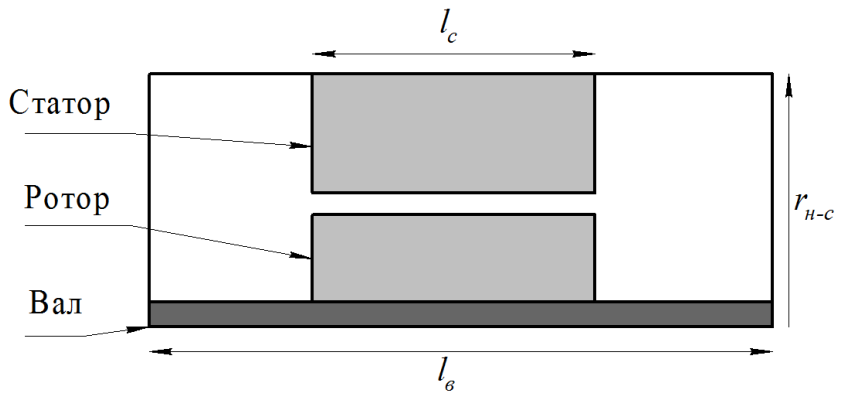


Рисунок 2.4 – Продольное сечение двигателя

Тепло, выделяемое в сердечнике статора, на пути к корпусу встречает сопротивление $R_{21}...R_{25}$

$$R_{21...25} = \frac{\ln(r_{н-с}) - \ln(r_{в-с} + h_з)}{2\pi\lambda_c l_{акт}} , \qquad (2.9)$$

$r_{в-с}$ – внутренний радиус статора двигателя, м,

$h_з$ – высота зубца статора, м,

λ_c – теплопроводность сердечника статора, Вт/м·К.

На рисунке 2.5 представлено поперченное сечение статора двигателя.

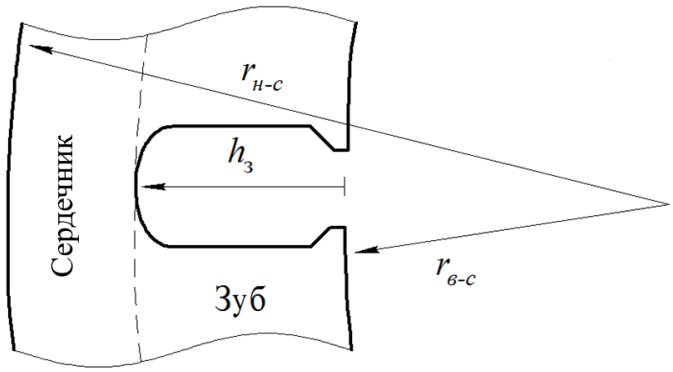


Рисунок 2.5 – Поперечное сечение статора двигателя

Контакт между корпусом двигателя и сердечником статора является случайным и неравномерным (рисунок 2.6) [130]. В данной работе реальный контакт заменен эквивалентным равномерным контактом.

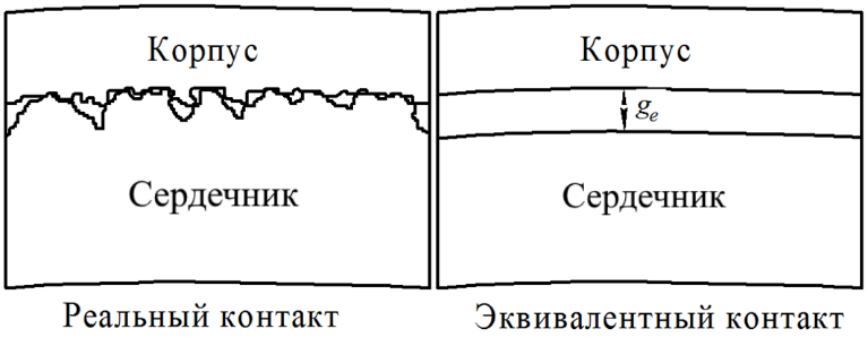


Рисунок 2.6 – Зона контакта между корпусом и сердечником двигателя

Тепловые сопротивления $R_{33}...R_{37}$ между сердечником статора и зубцами статора определяются как

$$R_{33–37} = \frac{1}{2\pi\lambda_c l_{акт}}\left(-1+\frac{2r_{н-с}^2 \ln\left(\frac{r_{н\text{-}с}}{r_{в\text{-}з}}\right)}{r_{н-с}^2 - r_{н-з}^2}\right). \qquad (2.10)$$

Здесь $r_{н\text{-}з}=r_{в\text{-}с}+h_з$ – наружный радиус зубцов статора (см. рисунок 2.5).

Разделение обмотки статора и ротора на узлы ЭТС приведены на рисунке 2.7

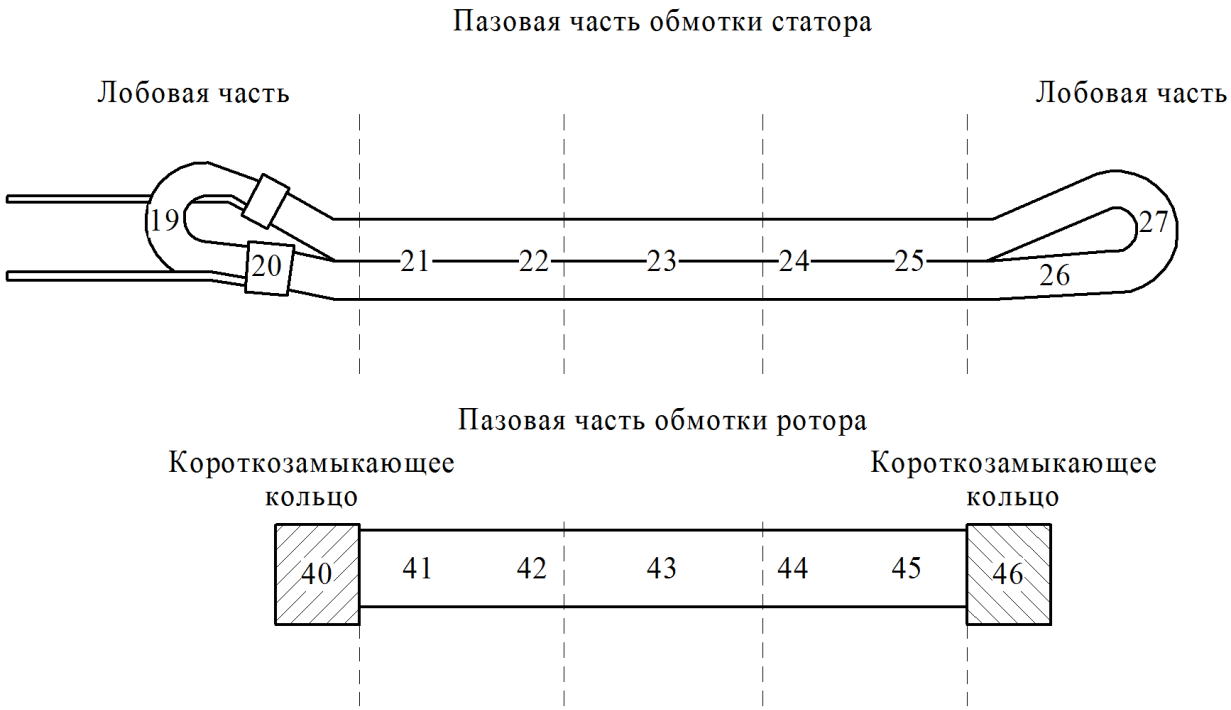


Рисунок 2.7 – Элементарные тепловые узлы ЭТС обмоток ротора и статора

Тепловые сопротивления лобовой части обмотки статора R_{40} и R_{47} определяются как

$$R_{40,47} = \frac{l_{пол}}{\lambda_{cu} A_{cu} Q_{П} 6}\ , \qquad (2.11)$$

где $l_{пол}$ – длина полуоборота лобовой части статорной обмотки (рисунок 2.8), м,

λ_{cu} – теплопроводность материала статорной обмотки (меди), Вт/м·К,

A_{cu} – площадь поперечного сечения лобовой части обмотки статора, м^2,

$Q_{П}$ – число пазов статорной обмотки, шт.

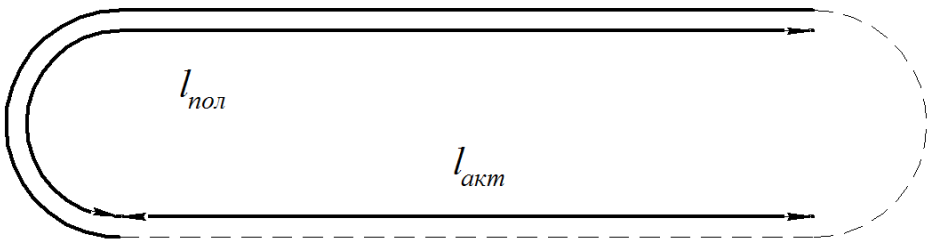


Рисунок 2.8 – Длина полуоборота лобовой части обмотки статора

Если данных о размерах $l_{пол}$ не приведено, то приближенно эту длину можно вычислить как [128]

$$l_{пол} = l_{акт} + 1,2\tau_{p} + l', \qquad (2.12)$$

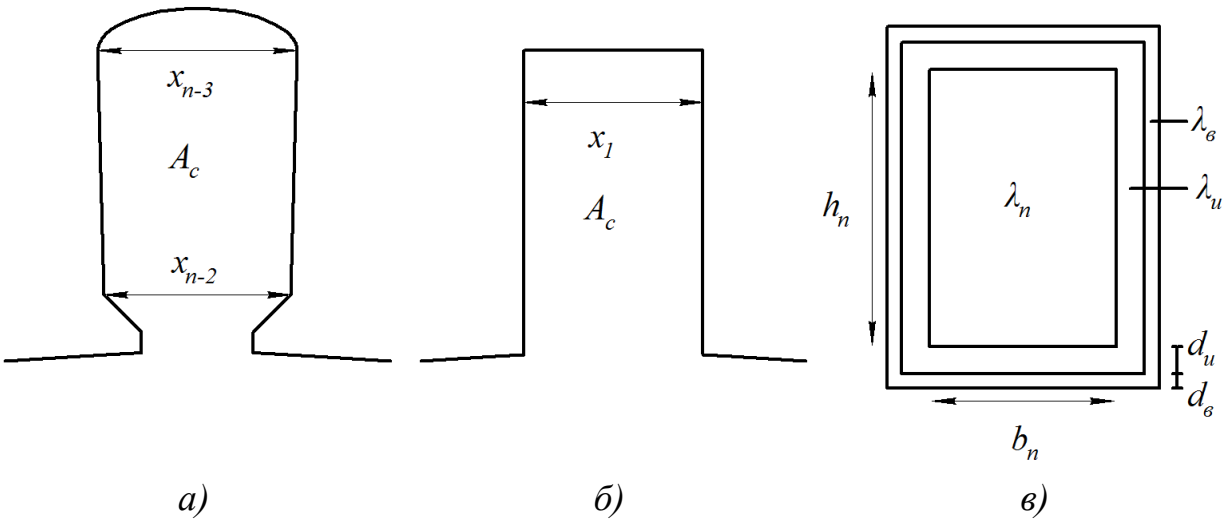
где τ_{p} – шаг полюсов;

l' – эмпирически вычисленная длина, м, для двигателей средней мощности составляет 0,05 м.

В отличии от теплового сопротивления обмотки статора двигателя, где теплопередача происходит через слой изоляционного материала перпендикулярно друг другу, здесь теплопередача происходит через изоляционный материал в параллельном направлении. В связи с тем, что теплопроводность меди значительно выше теплопроводности изоляционного материала, тепловым воздействием изоляции можно пренебречь.

При определении теплового сопротивления пазовой части обмотки статора форма паза статора, в который укладывается его обмотка принята прямоугольной эквивалентной реальной форме (рисунок 2.9). Данное допущение принято на основании того, что пазы статора реальных тяговых асинхронных двигателей выполняются прямоугольными, в отличии от асинхронных двигателей средней мощности, к которым относится рассматриваемая модель двигателя АО-63-4, где обмотка статора «всыпная» [65].

На рисунке 2.9 $d_в$ – это эквивалентное расстояние между изоляцией и зубцом, приблизительно равно 0,0003 м [130], $d_и$ – это толщина изоляции, определяемая по паспортным данным или эмпирическим путем, она составляет около 0,001 м для рассматриваемого двигателя, $\lambda_в$ – теплопроводность воздуха, Вт/м·К, $\lambda_и$ – теплопроводность изоляции, Вт/м·К, $\lambda_П$ – эквивалентная теплопроводность паза статора двигателя, которая зависит от плотности укладки меди в пазе, Вт/м·К, $h_п$ – высота паза, м, $b_п$ – ширина паза, м.



а) – форма паза статора модели ТАД; *б)* форма паза статора ТАД; *в)* принятая эквивалентная форма паза статора

Рисунок 2.9 – Реальные и принятая эквивалентная формы паза статора

Тепло передается в направлении осей X и Y следующим образом

$$R_{xп} = \frac{b}{h\lambda_п},$$

$$R_{уп} = \frac{h}{b\lambda_п},$$

Тепловое сопротивление изоляционного материала и воздушной прослойки определяется как

$$R_{их} = \frac{d_и}{h\lambda_и} + \frac{d_в}{h\lambda_в},$$

$$R_{иу} = \frac{d_и}{b\lambda_и} + \frac{d_в}{b\lambda_в}.$$

Суммарно

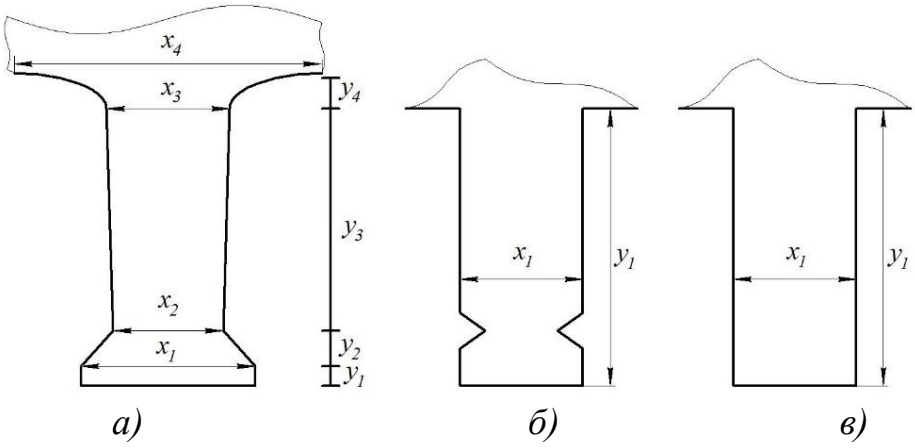
$$R_у = \frac{1}{2}\left(R_{иу} + \frac{R_{уп}}{6}\right),$$

$$R_х = \frac{1}{2}\left(R_{их} + \frac{R_{хп}}{6}\right).$$

Окончательно тепловое сопротивление обмотки статора R_{41-46} определяется как

$$R_{41-46} = \frac{R_х R_у}{Q_п l_{акт}(R_х + R_у)}\left(1 - \frac{R_{хо}R_{уо}}{720 R_х R_у}\right). \qquad (2.13)$$

Для максимально точного определения теплового сопротивления зубцов статора двигателя $R_{46}\ldots R_{52}$ и $R_{55}\ldots R_{59}$ необходимо четкое понимание их геометрии. На рисунке 2.10 представлена структура зубца статора как модели ТАД, реального ТАД, так и принятой эквивалентной формы зубца статора модели [65].



а) – модели ТАД; б) – реального ТАД; в) принятый эквивалентный вариант

Рисунок 2.10 – Геометрия зубца статора

Площадь зубца определяется следующим образом

$$R_{48...52,55...59} = Q_c x_1 y_1, \tag{2.14}$$

где Q_c – число пазов статора, шт;

x_1 – эквивалентная ширина зубца, м;

y_1 – эквивалентная высота зубца, м

Тепловое сопротивление обмотки статора к внутреннему воздуху $R_{31,39}$ и $R_{32,38}$ двигателя (рисунок 2.11) рассчитываются как

$$R_{31,39} = \frac{1}{\alpha_{31,39} A_{31,39}}, \tag{2.15}$$

где

$$\alpha_{31,39} = 6,5 + (5,25\omega r_{н-р})^{0,6}. \tag{2.16}$$

и

$$A_{31,39} = A_\alpha + A_\beta + A_\gamma. \tag{2.17}$$

$$R_{32,38} = \frac{1}{\alpha_{31,38} A_{32,38}}, \tag{2.18}$$

где

$$\alpha_{32,38} = 6,5 + (5,25\omega r_{н-р})^{0,6}. \tag{2.19}$$

и

$$A_{32,38} = A_\delta + A_\varepsilon. \tag{2.20}$$

Слагаемые выражения (2.17 и 2.20) представляют собой условные площади при суммировании которых получается полная площадь обмотки статора (рисунок 2.11).

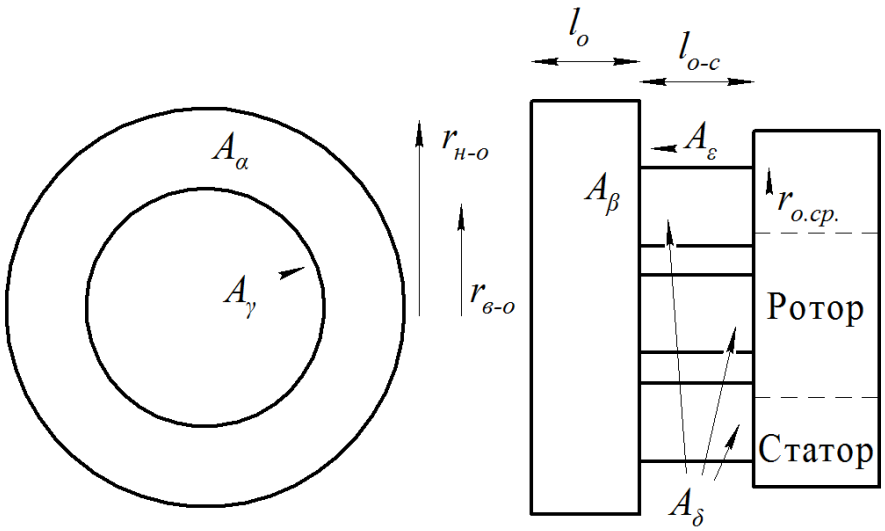


Рисунок 2.11 – К определению площади поверхности обмотки статора

$A_\alpha = \pi\left(r_{н-о}^2 - r_{в-о}^2\right)$–площадь лобовой части обмотки статора в поперечном сечении, м^2, где $r_{н-о}$ – наружный радиус обмотки статора, м, $r_{в-о}$– внутренний радиус обмотки статора, м;

$A_\beta = 2\pi r_{н-о} l_o$– площадь лобовой части обмотки статора в продольном сечении, м^2, где l_o – длина лобовой части обмотки статора, м;

$A_\gamma = 2\pi r_{в-о} l_o$ – площадь внутренней свободной части лобовой обмотки статора, м^2;

$A_\delta = Q_s 2\pi r_{о.ср.} l_{о-с}$– площадь свободной части статорных пазов, м^2, где $l_{о-с}$ – длина свободной части обмотки статора, м;

$A_\varepsilon = A_\alpha - Q_c \pi r_{о.ср}^2$– площадь свободной части лобовой обмотки со стороны статора;

$r_{о.ср}$– средний радиус статорной обмотки, м.

Согласно [128] тепловые сопротивления R_{67} и R_{74} от лопастей ротора к внутреннему воздуху определяются по эмпирически установленному выражению:

$$R_{67,74} = \frac{1}{\alpha_{67,74} A_{67,74}}, \qquad (2.21)$$

где

$$\alpha_{67,74} = \left(16,4\omega r_{вн-р}\right)^{0,65}. \qquad (2.22)$$

$A_{67,74}$ – площадь равная сумме площадей лопастей ротора и площади поперечного сечения ротора (рисунок 2.12).

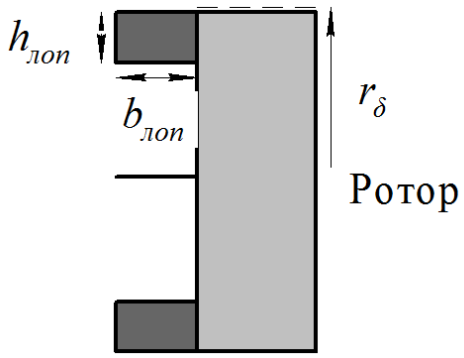


Рисунок 2.12 – К расчету суммарной площади ротора и его лопастей

$$A_{67,74} = 2b_{лоп}h_{лоп}n_{лоп} + \pi r_\delta^2, \qquad (2.23)$$

$b_{лоп}$ – ширина лопастей ротора двигателя, м,

$h_{лоп}$ – высота лопастей ротора двигателя, м,

$n_{лоп}$ – число лопастей ротора двигателей, шт,

r_δ – средний радиус воздушного зазора, м.

$$r_\delta = \frac{r_{в-с} + r_{н-р}}{2}. \qquad (2.24)$$

Моделирование теплового сопротивление воздушного зазора между ротором и статором осложнено тем, что передача тепла в этом случае происходит под действием всех трех видов – теплопроводности, излучения и конвекции. Излучение представляет наименьшую часть передачи тепла через воздушный зазор, поэтому ей пренебрегают [128]. Исследования [135] показали, что для гладкой поверхности ротора тепловые сопротивления воздушного зазора $R_{61}...R_{65}$ между статором и ротором определяются как

$$R_{61...65} = \frac{1}{2\pi r_\delta l_{акт}\alpha_{возд.з}}, \qquad (2.25)$$

$$\alpha_{возд.з} = \frac{N_u \cdot \lambda_в}{2 \cdot \delta}, \tag{2.26}$$

где δ – толщина слоя воздушного зазора между статором и ротором, м,

N_u – число Нуссельта, которое определяется числом Тейлора

$$T_a = \frac{\omega^2 r \delta^3}{\nu^2}. \tag{2.27}$$

Если значение числа Тейлора меньше 1740, то значение числа Нуссельта равно 2, если больше (для больших частот вращения ротора двигателя), то определяется по формуле [130]

$$N_u = 0,409 T_a^{0,241} - 137 T_a^{-0,75}, \tag{2.28}$$

где ν – кинематическая вязкость среды, м^2/с, находится как

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \tag{2.29}$$

где μ – динамическая вязкость среды, Па·с, определяемая для воздуха как

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{C}{T_0} \right), \tag{2.30}$$

где C – постоянная Сатерленда для газов, К;

T – температура газа, К;

μ_0 – динамическая вязкость воздуха при нормальной температуре T_0.

Соответствующие значения величин при нормальных условиях

$$C = 120\,\text{К},$$

$$T_0 = 291{,}15\,\text{К},$$

$$\mu_0 = 18,27 \cdot 10^{-6}\,\text{Па·с}.$$

Теплопередача через воздушный зазор двигателя зависит от его температуры, а также скорости вращения ротора

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{C}{T_0} \right). \tag{2.31}$$

Аксиальное тепловые сопротивления стержней ротора R_{68}…R_{73} определяются как

$$R_{68...73} = \frac{l_{акт}}{Q_p A_p \lambda_p}, \tag{2.32}$$

Q_p – число пазов ротора, шт,

A_p – площадь поперечного сечения одного стержня ротора, м^2,

λ_p – теплопроводность ротора, Вт/м·К.

Тепло выделяемое в стержнях ротора встречает тепловые сопротивления R_{76}…R_{80} на пути к валу ротора, которые определяются как

$$R_{76...80} = \frac{\ln r_{н-в} - \ln r_{в-н}}{2\pi\lambda_p l_{акт}}, \tag{2.33}$$

где $r_{в-н}$ – наружный радиус вала ротора, м.

Теплопередача в вале ротора происходит только в осевом направлении. Аксиальные тепловые сопротивления вала ротора R_{83}…R_{88}, определяются как

$$R_{83...88} = \frac{l_в}{\pi r_{в-р}^2 \lambda_в}, \tag{2.34}$$

где $l_в$ – длина вала ротора от первого до второго подшипника, м,

$\lambda_в$ – теплопроводность материала вала ротора, Вт/м·К.

Тепловые сопротивления подшипников вала ротора R_{75} и R_{81} двигателя определяются в соответствии с эмпирическими формулами, полученными в исследованиях [128]

$$R_{75} = 0,45\left(0,12 - db_{вент}\right)\left(33 - \omega \cdot db_{вент}\right), \tag{2.35}$$

$$R_{81} = 0,45\left(0,12 - db_n\right)\left(33 - \omega \cdot db_n\right), \tag{2.36}$$

где db_n и $db_{вент}$ – диаметры подшипников со стороны привода и вентилятора соответственно, м.

В соответствии с тем, что диаметр подшипника со стороны привода больше чем диаметр подшипника со стороны вентилятора охлаждения, тепловые сопротивления буду отличаться.

Тепловые сопротивления от торцов вала ротора к окружающему воздуху R_{82} и R_{89} определяются как

$$R_{82...89} = \frac{l_в}{\pi r_{н-в}^2 \lambda_в}. \quad (2.37)$$

Тепловые сопротивления между валом ротора и охлаждающим воздухом определяются следующим образом

$$R_{60,66} = \frac{l_в}{\pi r_{н-в}^2 \lambda_в}. \quad (2.38)$$

Значения всех тепловых сопротивлений элементов двигателя рассчитаны в программном комплексе Matlab. Текст программы расчета приведен в приложении А.

2.3 Определение мощности потерь в активных узлах двигателя

Определение мощности потерь в активных узлах двигателя осуществляется на основе моделирования ТАД с использованием Т-образной схемы замещения двигателя [136] с приведением параметров ротора к параметрам статорной обмотки и заменой механической нагрузки двигателя переменным активным сопротивлением (рисунок 2.13).

Основными источниками потерь в АД являются медь обмоток статора и ротора (стержни и их кольца), сталь сердечников статора и ротора, а также механические потери при трении в подшипниках. Для корректного определения потерь в эквивалентной схеме замещения АД необходимо учесть все электрические и магнитные потери. Наибольшую трудность представляет учет потерь в стали.

Включение в схему замещения сопротивления параллельно взаимоиндуктивности, которое пропорционально потерям в стали, является оптимальным вариантом для их моделирования [30, 79]. При таком подходе распределение потерь в обмотках ротора, стали статора и обмотках статора наилучшим образом согласуется с действительной картиной. На рисунке 2.13 приведена схема замещения одной фазы двигателя для описанного выше случая.

На рисунке 2.13 использованы следующие обозначения R_c, R_s, R_r – сопротивление, эквивалентное потерям в стали, сопротивления обмотки статора и

ротора (приведенное к обмотке статора); L_μ, $L_{\sigma s}$, $L_{\sigma r}$, – взаимоиндуктивность, индуктивности рассеяния обмотки статора и ротора (приведенная к обмотке статора); I_s, I_c, I_r, I_μ, U_s –токи и напряжение в соответствующих ветвях схемы.

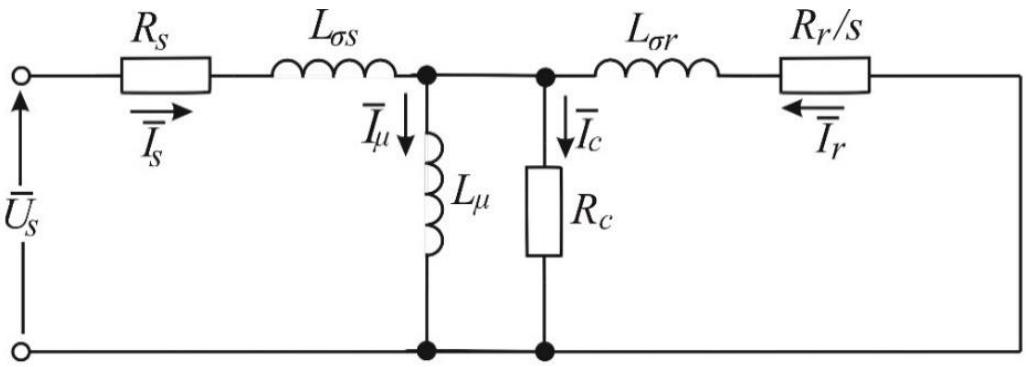


Рис. 2.13 – Эквивалентная схема замещения одной фазы асинхронного двигателя

С целью рассмотрения влияния вихревых токов возможно включение параллельно резистору R_c индуктивности. Однако, анализ работ [30, 126] показал, что точность расчета изменится не существенно в случае если этой индуктивностью пренебречь.

Учет нелинейности потерь в стали от частоты определяется зависимостью:

$$R_c = \begin{cases} 88,3135 + 5,646 f_s + 0,0534 f_s^2, & f_s \le 50 Гц, \\ 1261,3 - 37868 / f_s, & f_s > 50 Гц \end{cases}$$

В связи с тем, что эффект вытеснения тока оказывает существенное влияние на асинхронный двигатель при его работе на пониженных частотах, сопротивление обмотки ротора необходимо определять с его учетом для получения наиболее полной картины энергетических и электромеханических процессов. Соответственно выражения для определения активного и индуктивного сопротивлений примут вид:

$$R_r = K_R R_{rп} + R_{rл}, \; X_r = K_X X_{rп} + X_{rл},$$

где $R_{гл}$ и $X_{гл}$ – сопротивления участков короткозамыкающих колец между соседними стержнями ротора, $R_{гп}$ и $X_{гп}$ – сопротивления пазовой части обмотки ротора, K_R и K_X – коэффициенты, которые учитываеют изменения активного и индуктивного сопротивлений стержня ротора под дейтсвием эффекта вытеснения тока:

$$K_R = \xi \frac{sh2\xi + \sin 2\xi}{ch2\xi - \cos 2\xi},\ K_X = \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{sh2\xi - \sin 2\xi}{ch2\xi - \cos 2\xi},$$

где $\xi = 2\pi \cdot 10^{-3} \cdot h \cdot \sqrt{\frac{sf_1 b}{10\rho b_п}}$ – приведенная высота стержня, b – ширина стержня, h – высота стержня, b_n – ширина паза, ρ – удельное сопротивление материала стержня.

Для исследования влияния температуры на распределение мощности потерь при работе асинхронного двигателя используем следующую зависимость активного сопротивления обмоток от температуры:

$$R = R_{20}\left[1 + \alpha(T - T_{20})\right], \tag{2.39}$$

где R_{20} – активное сопротивление обмотки асинхронного двигателя при температуре $T_{20} = 20$ °С,

α – температурный коэффициент сопротивления,

T – текущая температура обмотки.

С целью анализа энергетических процессов, протекающих в двигателе, необходимо выполнить их оценку согласно следующим выражениям.

Потери в обмотке статора двигателя, Вт

$$\Delta P_s = 3I_s^2 R_s.$$

Потери в обмотке (стержнях) ротора двигателя, Вт

$$\Delta P_r = 3I_r^2 R_r.$$

Потери в сердечнике статора двигателя, Вт

$$\Delta P_c = 3I_c^2 R_c.$$

Момент развиваемый на валу двигателя, Н·м

$$M = 2M_к \frac{\left(1+\left(\frac{R_s}{R_r}\right)s_к\right)}{\left(\frac{s}{s_к}+\frac{s_к}{s}+2s_к\frac{R_s}{R_r}\right)}, \qquad (2.40)$$

где $M_к$ – критический момент двигателя, Н·м;

s – скольжение;

$s_к$ – критическое скольжение.

Для исследования зависимости мощностей потерь от момента двигателя решим при помощи ЭВМ выражение (2.40) относительно скольжения s двигателя.

$$s = -\frac{s_К\left(\sqrt{-(R_r + R_S s_К)\cdot(M - M_К)\cdot(MR_r + M_К R_r - MR_S s_К + M_К R_S s_К)}\right)}{MR_r} - \\ -\frac{M_К R_r}{MR_r} + \frac{MR_S s_К}{MR_r} - \frac{M_К R_S s_К}{MR_r}, \qquad (2.41)$$

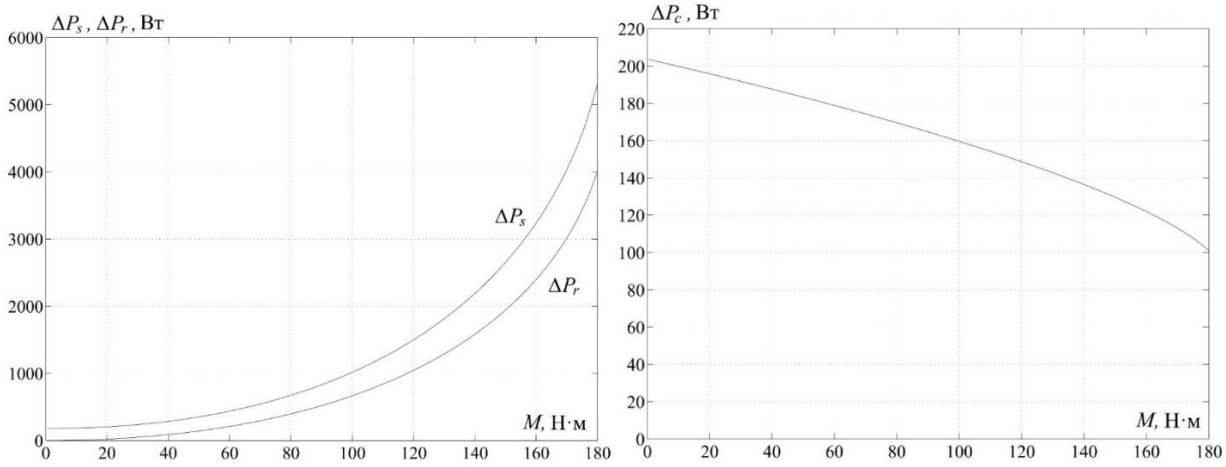
Полученное выражение (2.41) необходимо подставить в систему уравнений (2.39) и найти его корни.

Расчет основных энергетических характеристик асинхронного двигателя выполняется для рассматриваемого двигателя АО-63-4 в программном комплексе Matlab.

Параметры двигателя АО-63-4: $U_{sном}$ = 220 В; $I_{1ном}$ = 27,4 А; $2p$ = 4; $M_{ном}$ = 89 Н·м, $P_{ном}$ = 14 кВт; $n_{ном}$ = 1460 об/мин; $f_{s,ном}$ = 50 Гц; $X_{\sigma s}$ = 0,73 Ом; $X_{\sigma r,ном}$ = 1,68 Ом; R_s = 0,34 Ом; $R_{r,пуск}$ = 0,41 Ом; $R_{r,ном}$ = 0,29 Ом; $X_{\mu,ном}$ = 31 Ом; R_c = 504 Ом; $X_{\sigma r,пуск}$ = 0,73 Ом,

где $2p$ – число полюсов обмотки статора, $P_{ном}$ – номинальная мощность двигателя.

На рисунке 2.14 приведены зависимости потерь в стали и меди двигателя от развиваемого момента.



а) б)

Рисунок 2.14 – Зависимости мощности потерь в меди статора ΔP_s, меди ротора ΔP_r а) и стали статора ΔP_c б) от момента M при законе управления $u_s/f_s=const$

Как видно из рисунка 2.14 при номинальных значениях частоты f_s и напряжения U_s мощность потерь распределяется следующим образом: в режиме холостого хода – 24%/0/76% (соотношение ΔP_s/ ΔP_r/ ΔP_c), в режиме номинальной нагрузки – 49%/33%/18% в холодном состоянии; в горячем состоянии – 35%/0/65% и 53%/37%/11% для холостого хода и номинальной нагрузки соответственно.

2.4 Разработка дифференциальных уравнений теплового состояния двигателя. Определение теплоемкостей элементов двигателя

В зависимости от режима работы во всех АД в разных объемах возникают нестационарные тепловые процессы (переходные тепловые процессы). Они отличаются от стационарных (установившихся) тем, что температура нагрева элементов конструкций АД изменяется во времени, то есть кривые нагрева со-

держат апериодические (свободные) составляющие. Нестационарный тепловой режим может быть вызван: пуском АД; изменением питающего напряжения и частоты; управлением напряжения и частоты; реверсированием двигателя, изменениями нагрузки на валу.

При разработке ЭТС двигателя была поставлена задача исследования динамических тепловых процессов, которые можно моделировать, если ввести в уравнение (2.1) теплоемкости узлов. В результате общий вид дифференциального уравнения теплового состояния для *i*-го узла двигателя, составленного на основании метода узловых потенциалов [88], записанного в форме Коши примет вид

$$C_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = P_i - \sum_{n=1}^{n} \frac{\theta_i - \theta_n}{R_{i,n}}, \qquad i = 1...n. \tag{2.42}$$

Теплоемкость *i*-го элемента двигателя вычисляется следующим образом

$$C_i = \sum_{j=1}^{l} m_l \cdot c_l, \tag{2.43}$$

где m_l – масса элемента, кг,

c_l – удельная теплоемкость материала, из которого изготовлен элемент двигателя, Дж/кг·К. Индекс *l* в выражении (2.43) указывает на различные материалы из которых изготовлен элемент двигателя.

В большинстве случаев теплоемкость элементов двигателя определяется достаточно просто при известных паспортных данных с геометрическими размерами. Однако, теплоемкости некоторых узлов двигателя нуждаются в комментариях. Теплоемкость статорной обмотки складывается из теплоемкостей меди и изоляции. Масса изоляции может быть рассчитана исходя из коэффициента свободного пространства в пазе статора и площади его изоляции.

Также предполагается, что площадь поперечного сечения витков лобовой части обмотки статора равна площади поперечного сечения витков в пазовой части.

На рисунке 2.15 приведен фрагмент включения теплоемкостей элементов в ранее разработанную ЭТС двигателя.

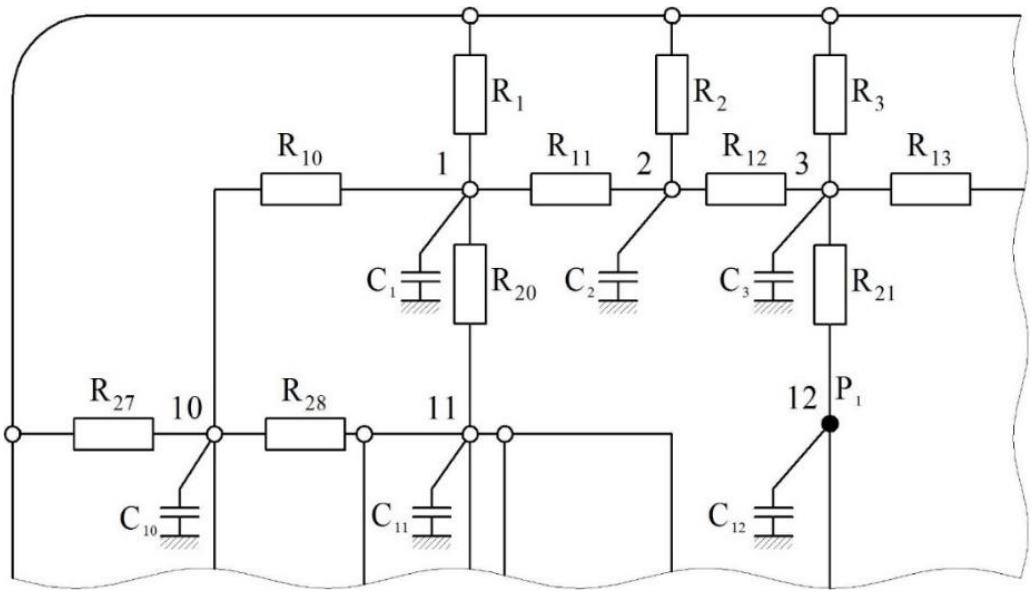


Рисунок 2.15 – Фрагмент динамической ЭТС

Для узлов ЭТС в нестационарных режимах уточним массы, используемые для определения их теплоемкостей: $m_1 \ldots m_9$ – массы элементарных частей корпуса двигателя, m_{10} и m_{18} – массы левой и правой торцевых крышек корпуса двигателя, $m_{12} \ldots m_{16}$ – массы элементарных частей сердечника статора, $m_{19} \ldots m_{27}$ – массы элементарных сегментов статорной обмотки, $m_{28} \ldots m_{37}$ – массы элементарных сегментов зубцов статора, m_{38} и m_{39} массы подшипников двигателя, $m_{40} \ldots m_{46}$ – массы элементарных сегментов обмотки ротора, $m_{47} \ldots m_{53}$ – массы элементарных частей вала ротора.

Система дифференциальных уравнений теплового состояния для 53 узлов двигателя согласно выражению (2.42) примет вид

$$
\begin{cases}
C_1 \dfrac{d\theta_1}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_1 - \theta_{10}}{R_{10}} + \dfrac{\theta_1 - \theta_2}{R_{11}} + \dfrac{\theta_1 - \theta_{54}}{R_1} + \dfrac{\theta_1 - \theta_{11}}{R_{20}} \right), \\
C_2 \dfrac{d\theta_2}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_2 - \theta_1}{R_{11}} + \dfrac{\theta_2 - \theta_3}{R_{12}} + \dfrac{\theta_2 - \theta_{54}}{R_2} \right), \\
C_3 \dfrac{d\theta_3}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_3 - \theta_2}{R_{12}} + \dfrac{\theta_3 - \theta_4}{R_{13}} + \dfrac{\theta_3 - \theta_{54}}{R_3} + \dfrac{\theta_3 - \theta_{12}}{R_{21}} \right), \\
C_4 \dfrac{d\theta_4}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_4 - \theta_3}{R_{13}} + \dfrac{\theta_4 - \theta_5}{R_{14}} + \dfrac{\theta_4 - \theta_{54}}{R_4} + \dfrac{\theta_4 - \theta_{13}}{R_{22}} \right), \\
C_5 \dfrac{d\theta_5}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_5 - \theta_4}{R_{14}} + \dfrac{\theta_5 - \theta_6}{R_{15}} + \dfrac{\theta_5 - \theta_{54}}{R_5} + \dfrac{\theta_5 - \theta_{14}}{R_{23}} \right), \\
C_6 \dfrac{d\theta_6}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_6 - \theta_5}{R_{15}} + \dfrac{\theta_6 - \theta_7}{R_{16}} + \dfrac{\theta_6 - \theta_{54}}{R_6} + \dfrac{\theta_6 - \theta_{15}}{R_{24}} \right), \\
C_7 \dfrac{d\theta_7}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_7 - \theta_6}{R_{16}} + \dfrac{\theta_7 - \theta_8}{R_{17}} + \dfrac{\theta_7 - \theta_{54}}{R_7} + \dfrac{\theta_7 - \theta_{16}}{R_{25}} \right), \\
C_8 \dfrac{d\theta_8}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_8 - \theta_7}{R_{17}} + \dfrac{\theta_8 - \theta_9}{R_{18}} + \dfrac{\theta_8 - \theta_{54}}{R_8} \right), \\
C_9 \dfrac{d\theta_9}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_9 - \theta_8}{R_{18}} + \dfrac{\theta_9 - \theta_{18}}{R_{19}} + \dfrac{\theta_9 - \theta_{54}}{R_9} + \dfrac{\theta_9 - \theta_{17}}{R_{26}} \right), \\
C_{10} \dfrac{d\theta_{10}}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_{10} - \theta_{54}}{R_{27}} + \dfrac{\theta_{10} - \theta_{11}}{R_{28}} + \dfrac{\theta_{10} - \theta_1}{R_{10}} + \dfrac{\theta_{10} - \theta_{38}}{R_{53}} \right), \\
C_{11} \dfrac{d\theta_{11}}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_{11} - \theta_{10}}{R_{28}} + \dfrac{\theta_{11} - \theta_{19}}{R_{31}} + \dfrac{\theta_{11} - \theta_{20}}{R_{32}} + \dfrac{\theta_{11} - \theta_1}{R_{20}} + \dfrac{\theta_{11} - \theta_{47}}{R_{60}} + \dfrac{\theta_{11} - \theta_{40}}{R_{67}} \right), \\
C_{12} \dfrac{d\theta_{12}}{dt} = \Delta P_1 - \left(\dfrac{\theta_{12} - \theta_3}{R_{21}} + \dfrac{\theta_{12} - \theta_{33}}{R_{33}} \right), \\
C_{13} \dfrac{d\theta_{13}}{dt} = \Delta P_2 - \left(\dfrac{\theta_{13} - \theta_4}{R_{22}} + \dfrac{\theta_{13} - \theta_{34}}{R_{34}} \right), \\
C_{14} \dfrac{d\theta_{14}}{dt} = \Delta P_3 - \left(\dfrac{\theta_{14} - \theta_5}{R_{23}} + \dfrac{\theta_{14} - \theta_{35}}{R_{35}} \right), \\
C_{15} \dfrac{d\theta_{15}}{dt} = \Delta P_4 - \left(\dfrac{\theta_{15} - \theta_6}{R_{24}} + \dfrac{\theta_{15} - \theta_{36}}{R_{36}} \right), \\
C_{16} \dfrac{d\theta_{16}}{dt} = \Delta P_5 - \left(\dfrac{\theta_{16} - \theta_7}{R_{25}} + \dfrac{\theta_{16} - \theta_{37}}{R_{37}} \right),
\end{cases}
\tag{2.44}
$$

$$
\begin{cases}
C_{17}\dfrac{d\theta_{17}}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_{17}-\theta_{26}}{R_{38}} + \dfrac{\theta_{17}-\theta_{46}}{R_{74}} + \dfrac{\theta_{17}-\theta_{27}}{R_{39}} + \dfrac{\theta_{17}-\theta_{18}}{R_{29}} + \dfrac{\theta_{17}-\theta_{53}}{R_{66}} + \dfrac{\theta_{17}-\theta_{9}}{R_{26}}\right), \\
C_{18}\dfrac{d\theta_{18}}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_{18}-\theta_{17}}{R_{29}} + \dfrac{\theta_{18}-\theta_{54}}{R_{30}} + \dfrac{\theta_{18}-\theta_{9}}{R_{19}} + \dfrac{\theta_{18}-\theta_{39}}{R_{54}}\right), \\
C_{19}\dfrac{d\theta_{19}}{dt} = \Delta P_6 - \left(\dfrac{\theta_{19}-\theta_{11}}{R_{31}} + \dfrac{\theta_{19}-\theta_{20}}{R_{40}}\right), \\
C_{20}\dfrac{d\theta_{20}}{dt} = \Delta P_7 - \left(\dfrac{\theta_{20}-\theta_{19}}{R_{40}} + \dfrac{\theta_{20}-\theta_{21}}{R_{41}} + \dfrac{\theta_{20}-\theta_{11}}{R_{32}}\right), \\
C_{21}\dfrac{d\theta_{21}}{dt} = \Delta P_8 - \left(\dfrac{\theta_{21}-\theta_{20}}{R_{41}} + \dfrac{\theta_{21}-\theta_{22}}{R_{42}} + \dfrac{\theta_{21}-\theta_{28}}{R_{48}}\right), \\
C_{22}\dfrac{d\theta_{22}}{dt} = \Delta P_9 - \left(\dfrac{\theta_{22}-\theta_{21}}{R_{42}} + \dfrac{\theta_{22}-\theta_{23}}{R_{43}} + \dfrac{\theta_{22}-\theta_{29}}{R_{49}}\right), \\
C_{23}\dfrac{d\theta_{23}}{dt} = \Delta P_{10} - \left(\dfrac{\theta_{23}-\theta_{22}}{R_{43}} + \dfrac{\theta_{23}-\theta_{24}}{R_{44}} + \dfrac{\theta_{23}-\theta_{30}}{R_{50}}\right), \\
C_{24}\dfrac{d\theta_{24}}{dt} = \Delta P_{11} - \left(\dfrac{\theta_{24}-\theta_{23}}{R_{44}} + \dfrac{\theta_{24}-\theta_{25}}{R_{45}} + \dfrac{\theta_{24}-\theta_{31}}{R_{51}}\right), \\
C_{25}\dfrac{d\theta_{25}}{dt} = \Delta P_{12} - \left(\dfrac{\theta_{25}-\theta_{24}}{R_{45}} + \dfrac{\theta_{25}-\theta_{26}}{R_{46}} + \dfrac{\theta_{25}-\theta_{32}}{R_{52}}\right), \\
C_{26}\dfrac{d\theta_{26}}{dt} = \Delta P_{13} - \left(\dfrac{\theta_{26}-\theta_{25}}{R_{46}} + \dfrac{\theta_{26}-\theta_{27}}{R_{47}} + \dfrac{\theta_{26}-\theta_{17}}{R_{38}}\right), \\
C_{27}\dfrac{d\theta_{27}}{dt} = \Delta P_{14} - \left(\dfrac{\theta_{27}-\theta_{26}}{R_{47}} + \dfrac{\theta_{27}-\theta_{17}}{R_{39}}\right), \\
C_{28}\dfrac{d\theta_{28}}{dt} = \Delta P_{15} - \left(\dfrac{\theta_{28}-\theta_{21}}{R_{48}} + \dfrac{\theta_{28}-\theta_{33}}{R_{55}}\right), \\
C_{29}\dfrac{d\theta_{29}}{dt} = \Delta P_{16} - \left(\dfrac{\theta_{29}-\theta_{22}}{R_{49}} + \dfrac{\theta_{29}-\theta_{34}}{R_{56}}\right), \\
C_{30}\dfrac{d\theta_{30}}{dt} = \Delta P_{17} - \left(\dfrac{\theta_{30}-\theta_{23}}{R_{50}} + \dfrac{\theta_{30}-\theta_{35}}{R_{57}}\right), \\
C_{31}\dfrac{d\theta_{34}}{dt} = \Delta P_{18} - \left(\dfrac{\theta_{31}-\theta_{24}}{R_{51}} + \dfrac{\theta_{31}-\theta_{36}}{R_{58}}\right), \\
C_{32}\dfrac{d\theta_{32}}{dt} = \Delta P_{19} - \left(\dfrac{\theta_{32}-\theta_{25}}{R_{52}} + \dfrac{\theta_{32}-\theta_{37}}{R_{59}}\right),
\end{cases}
\tag{2.44}
$$

$$
\begin{cases}
C_{33}\dfrac{d\theta_{33}}{dt} = \Delta P_{20} - \left(\dfrac{\theta_{33}-\theta_{12}}{R_{33}} + \dfrac{\theta_{33}-\theta_{28}}{R_{55}} + \dfrac{\theta_{33}-\theta_{41}}{R_{61}}\right), \\
C_{34}\dfrac{d\theta_{34}}{dt} = \Delta P_{21} - \left(\dfrac{\theta_{34}-\theta_{13}}{R_{34}} + \dfrac{\theta_{34}-\theta_{29}}{R_{56}} + \dfrac{\theta_{34}-\theta_{42}}{R_{62}}\right), \\
C_{35}\dfrac{d\theta_{35}}{dt} = \Delta P_{22} - \left(\dfrac{\theta_{35}-\theta_{14}}{R_{35}} + \dfrac{\theta_{35}-\theta_{30}}{R_{57}} + \dfrac{\theta_{35}-\theta_{43}}{R_{63}}\right), \\
C_{36}\dfrac{d\theta_{36}}{dt} = \Delta P_{23} - \left(\dfrac{\theta_{36}-\theta_{15}}{R_{36}} + \dfrac{\theta_{36}-\theta_{31}}{R_{58}} + \dfrac{\theta_{36}-\theta_{44}}{R_{64}}\right), \\
C_{37}\dfrac{d\theta_{37}}{dt} = \Delta P_{24} - \left(\dfrac{\theta_{37}-\theta_{16}}{R_{37}} + \dfrac{\theta_{37}-\theta_{32}}{R_{59}} + \dfrac{\theta_{37}-\theta_{45}}{R_{65}}\right), \\
C_{38}\dfrac{d\theta_{38}}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_{38}-\theta_{10}}{R_{53}} + \dfrac{\theta_{38}-\theta_{47}}{R_{75}}\right), \\
C_{39}\dfrac{d\theta_{39}}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_{39}-\theta_{18}}{R_{54}} + \dfrac{\theta_{39}-\theta_{53}}{R_{81}}\right), \\
C_{40}\dfrac{d\theta_{40}}{dt} = \Delta P_{25} - \left(\dfrac{\theta_{40}-\theta_{11}}{R_{67}} + \dfrac{\theta_{40}-\theta_{41}}{R_{68}}\right), \\
C_{41}\dfrac{d\theta_{41}}{dt} = \Delta P_{26} - \left(\dfrac{\theta_{41}-\theta_{40}}{R_{68}} + \dfrac{\theta_{41}-\theta_{42}}{R_{69}} + \dfrac{\theta_{41}-\theta_{33}}{R_{61}} + \dfrac{\theta_{41}-\theta_{48}}{R_{76}}\right), \\
C_{42}\dfrac{d\theta_{42}}{dt} = \Delta P_{27} - \left(\dfrac{\theta_{42}-\theta_{41}}{R_{69}} + \dfrac{\theta_{42}-\theta_{43}}{R_{70}} + \dfrac{\theta_{42}-\theta_{34}}{R_{62}} + \dfrac{\theta_{42}-\theta_{49}}{R_{77}}\right), \\
C_{43}\dfrac{d\theta_{43}}{dt} = \Delta P_{28} - \left(\dfrac{\theta_{43}-\theta_{42}}{R_{70}} + \dfrac{\theta_{43}-\theta_{44}}{R_{71}} + \dfrac{\theta_{43}-\theta_{35}}{R_{63}} + \dfrac{\theta_{43}-\theta_{50}}{R_{78}}\right), \\
C_{44}\dfrac{d\theta_{44}}{dt} = \Delta P_{29} - \left(\dfrac{\theta_{44}-\theta_{43}}{R_{71}} + \dfrac{\theta_{44}-\theta_{45}}{R_{72}} + \dfrac{\theta_{44}-\theta_{36}}{R_{64}} + \dfrac{\theta_{44}-\theta_{51}}{R_{79}}\right), \\
C_{45}\dfrac{d\theta_{45}}{dt} = \Delta P_{30} - \left(\dfrac{\theta_{45}-\theta_{44}}{R_{72}} + \dfrac{\theta_{45}-\theta_{46}}{R_{73}} + \dfrac{\theta_{45}-\theta_{37}}{R_{65}} + \dfrac{\theta_{45}-\theta_{52}}{R_{80}}\right), \\
C_{46}\dfrac{d\theta_{46}}{dt} = \Delta P_{31} - \left(\dfrac{\theta_{46}-\theta_{45}}{R_{73}} + \dfrac{\theta_{46}-\theta_{17}}{R_{74}}\right), \\
C_{47}\dfrac{d\theta_{47}}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_{47}-\theta_{54}}{R_{82}} + \dfrac{\theta_{47}-\theta_{48}}{R_{83}} + \dfrac{\theta_{47}-\theta_{38}}{R_{75}} + \dfrac{\theta_{47}-\theta_{11}}{R_{60}}\right), \\
C_{48}\dfrac{d\theta_{48}}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_{48}-\theta_{47}}{R_{83}} + \dfrac{\theta_{48}-\theta_{41}}{R_{76}} + \dfrac{\theta_{48}-\theta_{49}}{R_{84}}\right),
\end{cases}
\tag{2.44}
$$

$$\begin{cases} C_{49}\dfrac{d\theta_{49}}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_{49}-\theta_{48}}{R_{84}} + \dfrac{\theta_{49}-\theta_{50}}{R_{85}} + \dfrac{\theta_{49}-\theta_{42}}{R_{77}}\right), \\ C_{50}\dfrac{d\theta_{50}}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_{50}-\theta_{49}}{R_{85}} + \dfrac{\theta_{50}-\theta_{51}}{R_{86}} + \dfrac{\theta_{50}-\theta_{43}}{R_{78}}\right), \\ C_{51}\dfrac{d\theta_{51}}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_{51}-\theta_{50}}{R_{86}} + \dfrac{\theta_{51}-\theta_{52}}{R_{87}} + \dfrac{\theta_{51}-\theta_{44}}{R_{79}}\right), \\ C_{52}\dfrac{d\theta_{52}}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_{52}-\theta_{51}}{R_{87}} + \dfrac{\theta_{52}-\theta_{53}}{R_{88}} + \dfrac{\theta_{52}-\theta_{45}}{R_{80}}\right), \\ C_{53}\dfrac{d\theta_{53}}{dt} = -\left(\dfrac{\theta_{53}-\theta_{52}}{R_{88}} + \dfrac{\theta_{53}-\theta_{54}}{R_{89}} + \dfrac{\theta_{53}-\theta_{18}}{R_{66}} + \dfrac{\theta_{53}-\theta_{39}}{R_{81}}\right). \end{cases} \quad (2.44)$$

Разработанная система дифференциальных уравнений (2.44) позволяет исследовать тепловое состояние двигателя при широком изменении частот вращения и нагрузки на валу.

2.5 Математическая модель теплового состояния двигателя

Разработанная динамическая ЭТС двигателя АО-63-4 использовалась для моделирования тепловых процессов при различных значениях питающего тока 0,5 $I_{ном}$, 0,8 $I_{ном}$ и 1,0 $I_{ном}$. Система дифференциальных уравнений (2.44) была решена в программном комплексе Matlab Simulink методом Тейлора. Фрагмент модели Matlab Simulink исследования теплового состояния асинхронного двигателя АО-63-4 приведен в приложении Б.

На рисунках 2.16 – 2.19 представлены кривые нагревания узлов двигателя для четырех поперечных сечений полученные в результате моделирования Matlab Simulink при значениях питающего тока 0,5 $I_{ном}$. Для исследования теплового состояния двигателя были выбраны его следующие узлы: *1* – обмотка статора, *2* – обмотка (стержни) ротора, *3* – сердечник с валом ротора, *4* – верхняя часть зубцов статора, *5* – нижняя часть зубцов, *6* – сердечник статора и *7* – корпус двигателя. Выбор третьего сечения, располагающего на расстоянии 2/3 от длины пазовой части статорной обмотки обусловлен исследованиями [115], в которых отражено, что наиболее нагретым узлом в асинхронном двигателе

является пазовая часть, на расстоянии 2/3 от ее длины со стороны подачи охлаждающего воздуха. Время переходного процесса нагревания принято равным 12000 с или 200 мин.

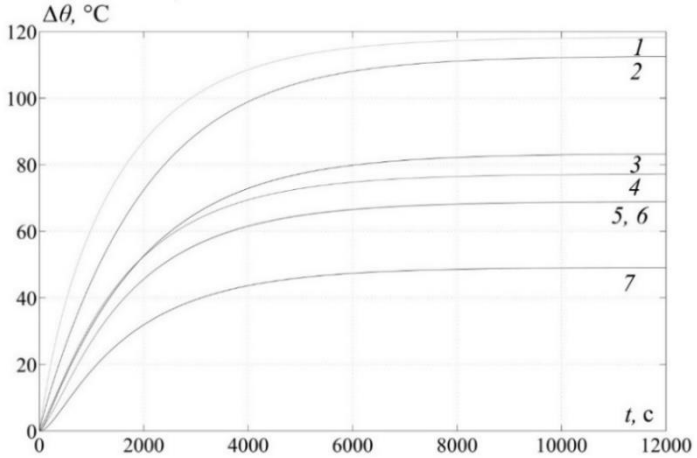


Рисунок 2.16 – Кривые нагревания узлов двигателя в поперечном сечении, проходящем через лобовую часть обмотки статора со стороны подачи охлаждающего воздуха

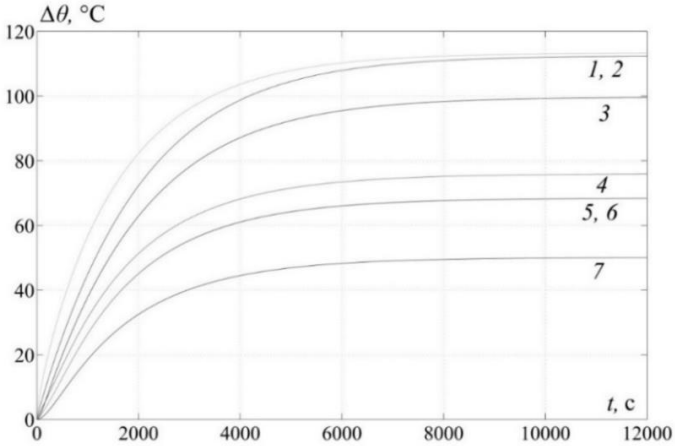


Рисунок 2.17 – Кривые нагревания узлов двигателя в среднем сечении

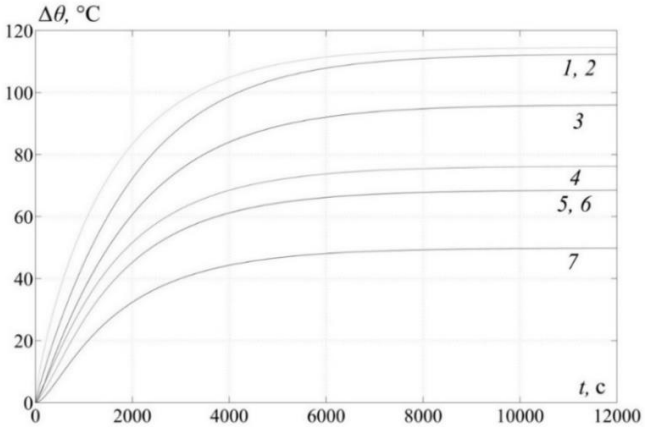


Рисунок 2.18 – Кривые нагревания узлов двигателя в поперечном сечении на расстоянии 2/3 статорной обмотки со стороны охлаждающего воздуха

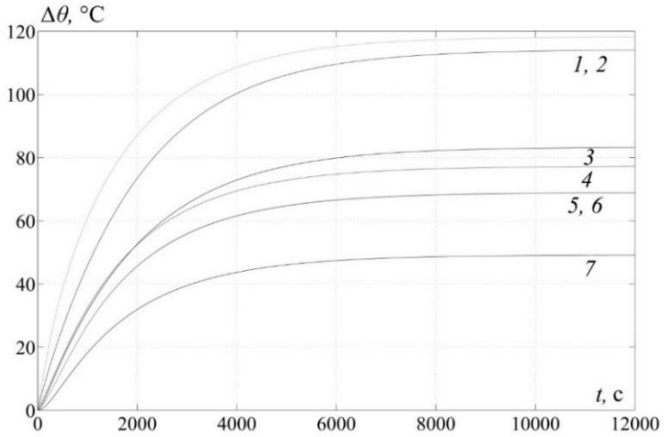


Рисунок 2.19 – Кривые нагревания узлов двигателя в поперечном сечении, проходящем через лобовую часть обмотки статора со стороны противоположной охлаждающему воздуху

Анализ рисунков 2.16 – 2.19 позволяет сделать вывод о том, что наиболее нагретыми узлами двигателя при отсутствии охлаждения являются лобовая часть обмотки статора и обмотка ротора по всей своей длине. При этом значение температуры обмотки статора в среднем на 5 °С выше температуры обмотки ротора по всей длине двигателя. Наименее нагретым узлом двигателя является корпус двигателя.

Полученные в результате моделирования кривые охлаждения узлов двигателя с подачей охлаждающего воздуха равной $G_{вз}$ = 0,95 м^3/с и токе статора ТАД равном 0,5 $I_{ном}$ представлены на рисунках 2.25 – 2.28. Время переходного процесса охлаждения двигателя составило 9000 с или 150 мин.

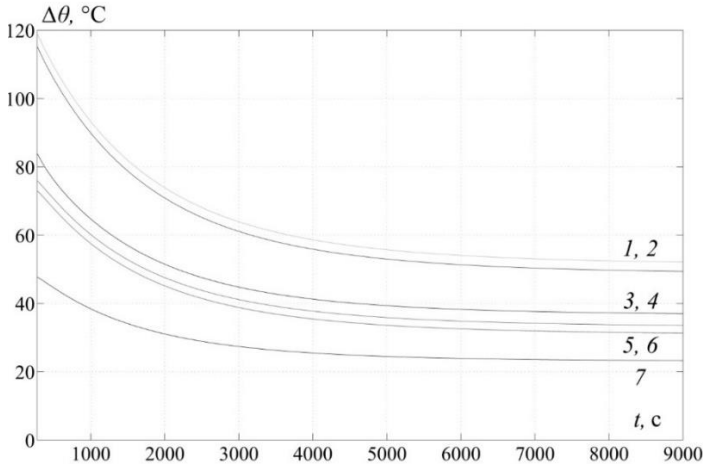


Рисунок 2.20 – Кривые охлаждения узлов двигателя в поперечном сечении, проходящем через лобовую часть обмотки статора со стороны подачи охлаждающего воздуха

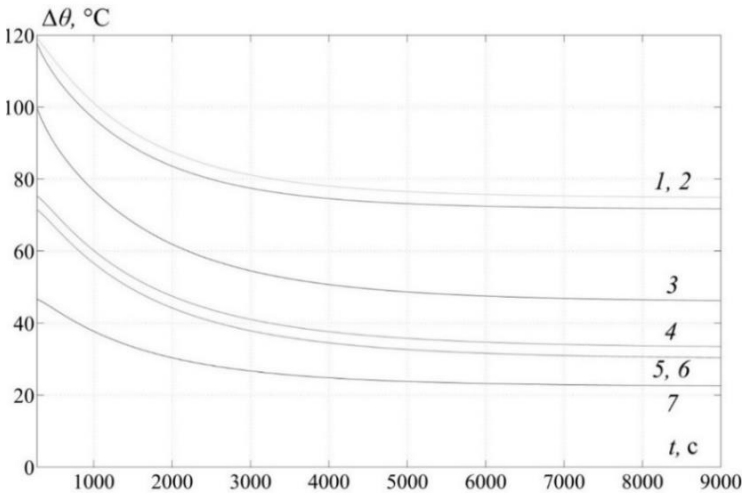


Рисунок 2.21 – Кривые охлаждения узлов двигателя
в среднем сечении

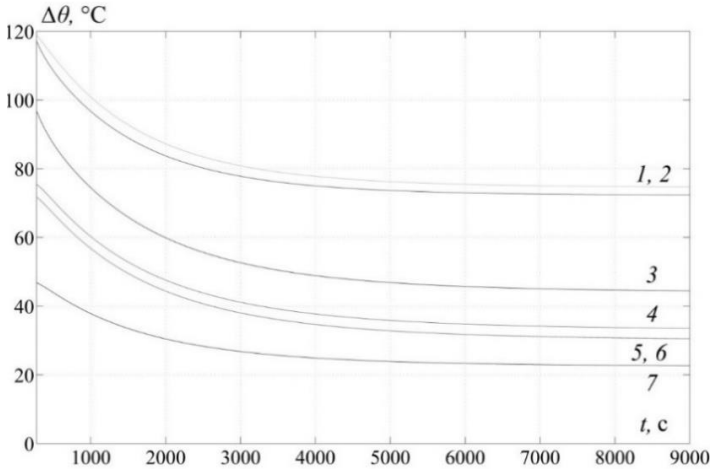


Рисунок 2.22 – Кривые охлаждения узлов двигателя в поперечном сечении на расстоянии 2/3 статорной обмотки со стороны подачи охлаждающего воздуха

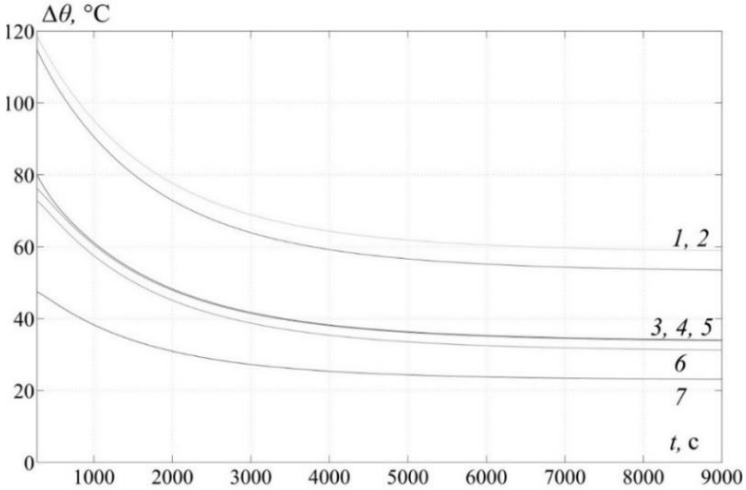


Рисунок 2.23 – Кривые охлаждения узлов двигателя в поперечном сечении, проходящем через лобовую часть обмотки статора
со стороны противоположной подачи охлаждающего воздуху

Как показывают данные рисунков 2.20 – 2.23 наиболее теплонагруженным узлом двигателя при использовании охлаждения является пазовая часть обмотки статора на расстоянии 2/3 его длины со стороны подачи охлаждающего воздуха. Следующим по величине нагрева узлом двигателя является обмотка (стержни) ротора.

Вид кривых нагревания и охлаждения, приведенных на рисунках 2.16 – 2.23, соответствует дифференциальному уравнению первого порядка, которое имеет вид:

$$T_\theta \frac{d\theta}{dt} + \theta = f\left(G_{вз}\right), \qquad (2.45)$$

где θ – текущая температура ТАД, °*C*;

t – текущее время, *c*;

$\theta = f\left(G_{вз}\right)$ – нелинейная зависимость текущей температуры θ от подачи охлаждающего воздуха $G_{вз}$.

В процессе исследования теплового состояния двигателя были рассмотрены распределения превышения температур по длине статора и ротора, которые представлены на рисунках 2.24 – 2.26. Кривые построены по девяти и пяти точкам соответственно для статора и ротора с применением интерполяционного многочлена Лагранжа третьего порядка. За начало отсчета по оси абсцисс принята точка входа охлаждающего воздуха.

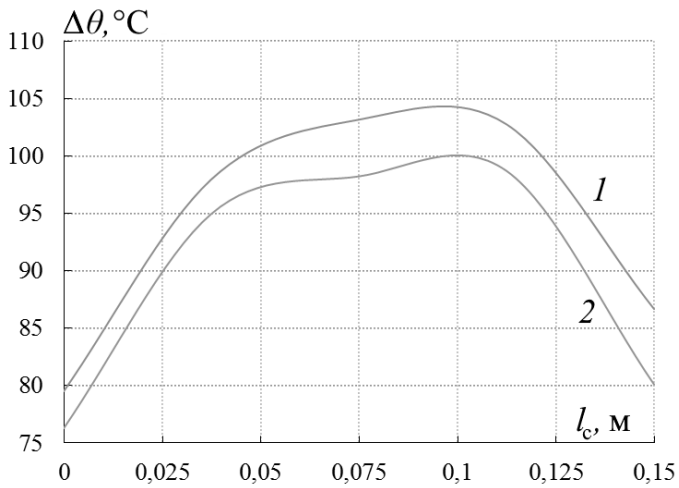


Рисунок 2.24 – Распределение температур по длине обмотки статора *1* и ротора *2* при I_s = 0,8 $I_{ном}$

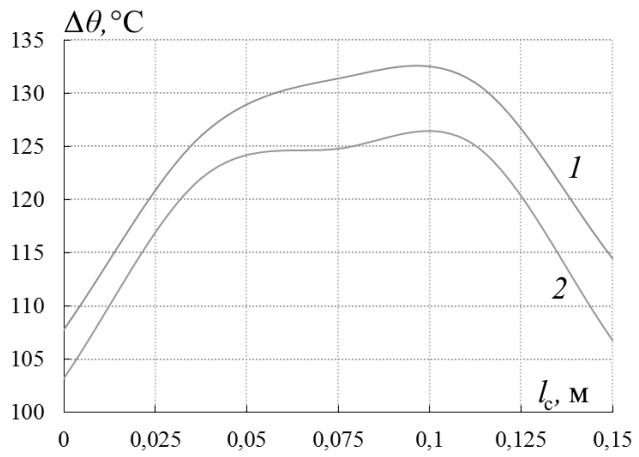


Рисунок 2.25 – Распределение температур по длине обмотки статора *1* и ротора *2* при I_s = 0,9 $I_{ном}$

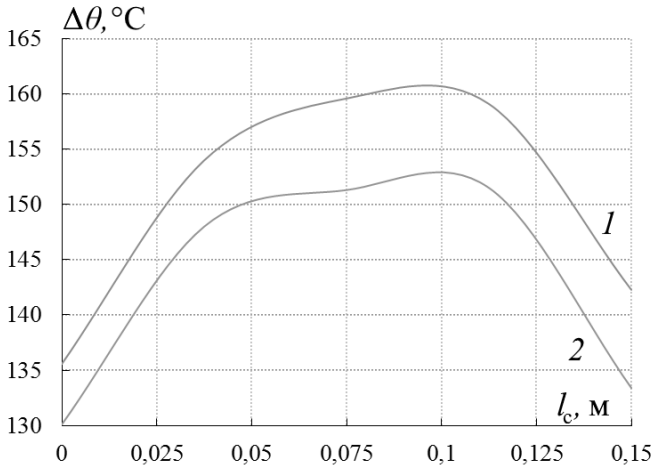


Рисунок 2.26 – Распределение температур по длине обмотки статора *1* и ротора *2* при I_s = 1,0 $I_{ном}$

Согласно данным рисунков 2.24 – 2.26 распределение температур по длине обмотки статора и ротора имеет форму несимметричного колокола, что согласуется с исследованиями [87, 89, 115]. При этом большему значению тока статора I_s соответствует большая разница температур между обмоткой статора и ротора, которая достигает 10 °С.

Результаты моделирования, представленные на рисунках 2.16 – 2.26 свидетельствуют о том, что наибольший перегрев испытывает обмотка статора АД. Это объясняется тем, что в отличие от ротора, статор не имеет вентиляци-

онных каналов и лопаток для принудительного охлаждения. Поэтому при синтезе АСУТ все рассуждения касающиеся температуры АД относятся к обмотке статора, как лимитирующему по температуре узлу.

Уравнение для узла i=24, входящее в систему дифференциальных уравнений (2.44) АД, описывающих его тепловое состояние, является нелинейным и соответствует наиболее нагретой части обмотки статора – расположенной на расстоянии 2/3 длины статора со стороны подачи охлаждающего воздуха. Для ее решения в различных динамических режимах работы двигателя можно использовать аппроксимацию экспериментальных кривых нагревания или охлаждения ТАД.

Выводы

1. Анализ публикаций, посвященных разработкам математических моделей для исследования тепловых процессов в асинхронном двигателе показал, что в настоящее время наиболее широкое распространение получили методы эквивалентных тепловых схем и конечных элементов. В данной работе в качестве базового принят метод эквивалентных тепловых схем, который базируется на методе узловых потенциалов и не требует разработки конечно-элементной компьютерной модели исследуемого двигателя.

2. Разработанная математическая модель для исследования установившихся и переходных тепловых процессов тягового асинхронного двигателя позволяет регистрировать превышения температур пятидесяти трех узлах двигателя, тридцать один из которых, являются активными источниками тепла.

3. Синтезированные расчетные формулы позволяют определять тепловые сопротивления узлов разработанной эквивалентной тепловой схемы двигателя и определять мощности потерь в активных узлах.

4. В результате математического моделирования эквивалентной тепловой схемы тягового асинхронного двигателя установлено, что

– наиболее нагретыми узлами двигателя при отсутствии охлаждения являются лобовая часть обмотки статора и обмотка ротора по всей своей длине.

При этом значение температуры обмотки статора в среднем на 5 °С выше температуры обмотки ротора по всей длине двигателя;

– наиболее теплонагруженным узлом двигателя при использовании охлаждения является пазовая часть обмотки статора на расстоянии 2/3 его длины со стороны подачи охлаждающего воздуха. Следующим по величине нагрева узлом двигателя является обмотка (стержни) ротора на том же расстоянии; разница в температуре между пазовой частью обмотки статора и стержнями ротора составляет 2…10 °С при отсутствии охлаждения и 1,5…6 °С при номинальном расходе охлаждающего воздуха в диапазоне токов статора 0,5…1,1$I_{ном}$;

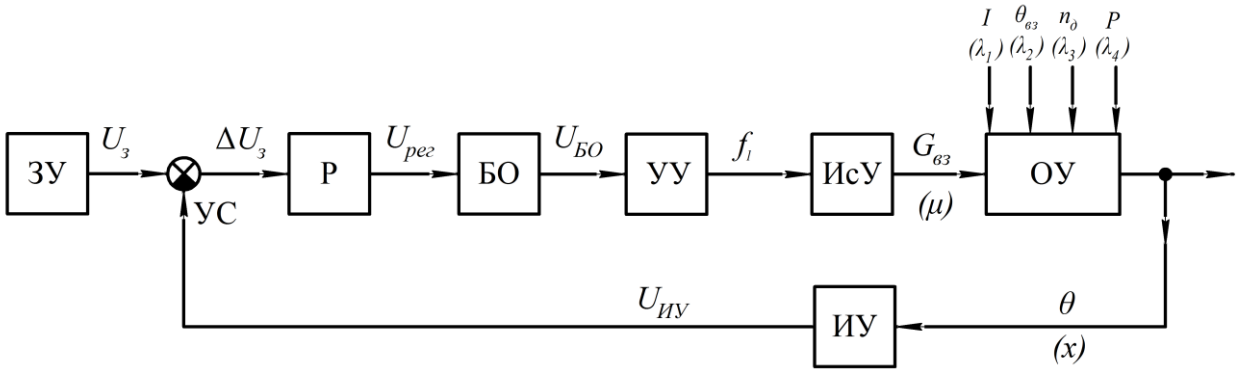
– время переходного процесса для всех узлов тягового асинхронного двигателя примерно одинаково и отличается не более чем на 5…10%.

5. В качестве лимитирующего по нагреву узла для определения передаточной функции выбрана обмотка статора тягового асинхронного двигателя. Установлено, что полученные кривые переходного процесса тягового асинхронного двигателя как объект управления температурой соответствуют дифференциальному уравнению первого порядка.

3 Автоматическая система управления температурой тягового асинхронного двигателя тепловоза

3.1 Общие сведения о автоматических системах управления температурой

Исследование систем автоматического управления (САУ) предполагает знание статических и динамических свойств основных функциональных элементов составляющих данную систему. Традиционно, в состав АСУТ входят [105, 106]: задающее устройство ЗУ, регулятор Р, устройство управления УУ, исполнительное устройство ИсУ, объект управления ОУ и измерительное устройство ИУ. На рисунке 3.1 приведена функциональная схема АСУТ, пригодная для применения на тяговом подвижном составе [52].



ЗУ – задающее устройство; БО – блок ограничения; Р – регулятор; УУ – устройство управления; ИсУ – исполнительное устройство; ОУ – объект управления (процесс нагревания или охлаждения ТАД); ИУ – измерительное устройство; λ_i – возмущающие воздействия; μ – управляющее воздействие; x – управляемая величина; θ – температура объекта управления; $U_з$ – напряжение задания; $U_{иу}$ – приращение сигнала управления; $G_{вз}$ – подача охлаждающего воздуха вентилятором

Рисунок 3.1 – Функциональная схема АСУТ ТАД

В качестве задающего устройства (ЗУ) в современных САУ применяют пульт управления или микропроцессорную систему. Регулятор (Р) предназначен для коррекции разрабатываемой АСУТ с целью обеспечения заданных критериев качества управления. Устройством управления (УУ) в АСУТ выступает преобразователь частоты для возможности управления исполнительным устройством (ИСУ). В состав ИсУ входят асинхронный двигатель, который приводит во вращение центробежный вентилятор охлаждения и сам вентилятор охлаждения. Для определения температуры ТАД необходимо использовать измерительное устройство – датчик температуры, которое формирует электрический сигнал пропорциональный температуре.

С позиций теории автоматического управления систему охлаждения ТАД следует рассматривать как объект управления температурой. Управляющим воздействием в данном случае будет являться подача охлаждающего воздуха $G_{вз}$, управляемой величиной – температура θ наиболее нагретой детали ТАД, основными возмущающими воздействиями – нагрузочный ток I, температура охлаждающего воздуха $\theta_{вз}$, скорость вращения вала $n_д$ и мощность P ТАД.

Исследования системы охлаждения ТАД как объекта управления температуры предполагают в первую очередь определение статических и динамических характеристик и параметров, необходимых для выбора типа автоматического регулятора и расчета параметров его настройки. Поэтому для разработки АСУТ ТАД необходимо составить дифференциальные или алгебраические уравнения, которые связывают сигналы выхода и входа, каждого из её функциональных элементов, с учетом возможных нелинейностей. Далее необходимо выполнить линеаризацию этих уравнений и определить передаточные функции элементов АСУТ по которым впоследствии определяется передаточная функция разомкнутой и замкнутой системы с целью дальнейшего синтеза

регулятора, который будет обеспечивать требуемые показатели качества переходного процесса. Это даёт возможность решать задачи синтеза автоматического регулятора, а также выполнять оценку устойчивости и качества САУ [105, 106].

3.2 Определение передаточных функций АСУТ

3.2.1 Задающее устройство

Задающее устройство в разрабатываемой АСУТ устанавливает требуемое значение управляемой величины либо задает закон (алгоритм) ее изменения. В системах управления роль задающего устройства может выполнять пульт или специализированная вычислительная машина. При проведении экспериментальных исследований в четвертом разделе диссертации в качестве задающего устройство используется персональный компьютер с специализированным программным обеспечением DriveStudio для управления исполнительным устройством (преобразователем частоты) компании ABB, которое позволяет задавать требуемое значение управляемой величины (температуры ТАД) $U_з$, а также контролировать его текущее значение при помощи сигналов измерительного устройства (термопар).

3.2.2 Устройство сравнения

Согласно функциональной схемы (рисунок 3.1) сигнал $\Delta U_з$ определяется выражением:

$$\Delta U_з = U_з - U_{ИУ}, \tag{3.1}$$

где $U_з$ – напряжение задания соответствующее заданному значению температуры задания ТАД, *В*;

$U_{ИУ}$ – напряжение измерительного устройство (термопар) соответствующее текущему значению температуры ТАД, *В*.

3.2.3 Блок ограничения

Для ограничения максимального значения напряжения регулятора (Р), которое обусловлено ограничением по максимальной частоте вращения вала исполнительного устройства (ИСУ) в функциональной схеме разрабатываемой АСУТ предусмотрено блок ограничения (БО). Математическое описание этого устройства имеет вид:

$$U_{БО} = \begin{cases} U_{рег}, \text{при } U_{рег} \le U_{рег}^{\max}; \\ U_{рег}^{\max}, \text{при } U_{рег} > U_{рег}^{\max}. \end{cases}, \tag{3.2}$$

где $U_{рег}^{\max} = 10B$ – максимальное значение напряжение регулятора.

Блок ограничения – это нелинейный элемент и в линеаризованной системе при малых отклонениях от положения равновесия эта нелинейность не учитывается.

3.2.4 Устройство управления

Учитывая современный уровень развития силовой электроники, устройством управления, входящим в структуру разрабатываемой АСУТ, является преобразователь частоты (ПЧ), который реализован по схеме «неуправляемый выпрямитель (звено постоянного тока) автономный инвертор напряжения». Элементная база инвертора – биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), алгоритм управления формирования выходного напряжения – синусоидальная широтно-импульсная модуляция (ШИМ).

На рисунке 3.2, *а)* показана функциональная схема инвертора ПЧ, к выходу которого подключен статор асинхронного двигателя (АД) [116].

Управление четными и нечетными ключами полумостовых пар производится парафазно, для чего в каналы управления четных ключей включены инверторы логических функций. Логический сигнал управления ключами формируется компараторами (К), на входы которых подаются синусоидальные

сигналы заданных фазных напряжений u_{1a}^*, u_{1b}^*, u_{1c}^* и сигнал линейной развертки u_s с выхода генератора пилообразного сигнала (ГПС).

Компараторы на рисунке 3.2, *а)* выполняют математическую функцию определения знака разности сигналов $u_к = \overline{\mathrm{sign}(u_1^* - u_s)}$, где $u_к$ – сигнал на выходе компаратора. На выходах компараторов фазных сигналов показаны двухпозиционные реле с гистерезисом. Наличие гистерезиса необходимо для исключения «дребезга» при переключении компаратора, но обычно гистерезис вводится просто с помощью положительной обратной связи по напряжению охватывающей компаратор. При этом первая гармоника фазного напряжения совпадает по фазе и амплитуда ее пропорциональна амплитуде сигнала задания.

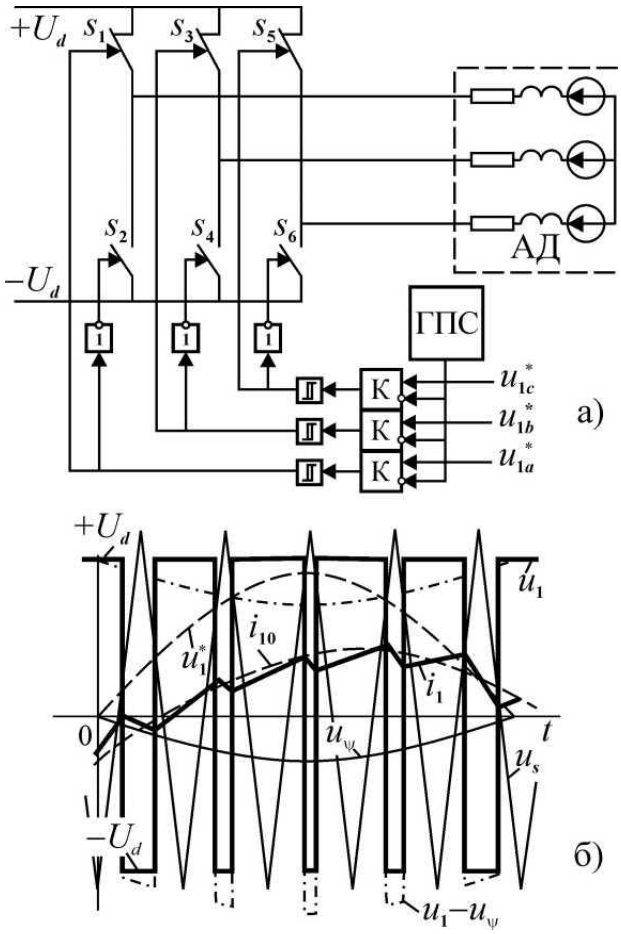


Рисунок 3.2 – Функциональная схема инвертора с широтно-импульсной модуляцией *а)* и временные диаграммы работы *б)*

Фазный ток i_1 в межкоммутационных интервалах формируется из участков экспонент (рисунок 3.2, б). При этом в цепи фазной обмотки действует разность напряжения формируемого инвертором u_1 и ЭДС ротора u_ψ. Если частота сигнала развертки на порядок и более превышает частоту сигнала задания, то кривая тока имеет спектр, состоящий более чем на 99% из основной гармоники i_{10}.

Алгебраическое уравнение, связывающее входную (напряжение регулятора) и выходную (частоту тока статора) переменные примет вид

$$f_1 = k_{ПЧ} \cdot U_{рег}. \tag{3.3}$$

Таким образом, при синтезе АСУТ преобразователь частоты как устройство управления является усилительным звеном с постоянным коэффициентом усиления:

$$W_{ПЧ}(p) = k_{ПЧ} = \frac{f_1}{U_{рег}}, \tag{3.4}$$

где $k_{ПЧ}$ – коэффициент усиления ПЧ – отношение выходной частоты (частоты тока статора) к входному напряжению регулятора. Для разрабатываемой АСУТ была принята стандартная шкала напряжений управления $U_{рег\max} = -10В...10В$. Максимальная частота тока статора асинхронного двигателя $f_{1\max}$, который является приводом вентилятора охлаждения равна $50Гц$. Соответственно $k_{ПЧ} = f_1 / U_{рег} = f_{1\max} / U_{рег\max} = 50/10 = 5Гц/В$.

3.2.5 Исполнительное устройство

В качестве исполнительного устройства (АД) в разрабатываемой АСУТ ТАД использован электропривод, содержащий асинхронный двигатель, питаемый от преобразователя частоты, который приводит во вращение вал вентилятора охлаждения ТАД. Преимущества электропривода перед другими приводами подробно изложены в первом разделе диссертации.

Для описания электромагнитных и электромеханических процессов в асинхронном двигателе применяют модель обобщенной электрической машины, которая является упрощенной моделью реальной машины [49, 50].

В обобщенной машине сосредоточенные в пазах проводники с током заменяются синусоидальными токовыми слоями, эквивалентными по МДС первым гармоникам МДС соответствующих реальных обмоток, а неравномерность, обусловленная пазами, не учитывается. При анализе динамических процессов в обобщенной электрической машине принимается, что магнитная цепь не насыщается. В основу математического описания модели асинхронного двигателя положены дифференциальные уравнения электрического и механического равновесия, а также уравнения преобразования электромагнитной энергии в механическую. Точное описание реальной асинхронной машины, представляющей собой совокупность сложных электрических цепей с различной магнитной проницаемостью, оказывается очень сложной задачей, так как определить электромагнитное поле в любой, даже самой простой машине практически невозможно. Расчеты электромагнитного поля базируются на основе уравнений Максвелла. При разработке моделей пользуются упрощенным представлением о физических процессах в машине, приближенно учитывая, а в некоторых случаях и вообще не рассматривая влияние меняющегося насыщения магнитной цепи, эффекта вытеснения тока, потерь в стали и других факторов. Уравнения, записанные с учетом таких допущений, являются приближенной математической моделью реальной машины, но в большинстве случаев они описывают явления в машине и ее поведение с достаточной для практических целей точностью, если правильно определены основные параметры машины. В зависимости от особенностей анализируемых явлений степень приближения может быть различной. Поэтому принятые допущения должны быть четко оговорены, а их приемлемость обоснована [39, 45, 48].

При замене асинхронного двигателя моделью обобщённой машины применяют следующие основные допущения и ограничения [49, 50]:

– нелинейные магнитные процессы в стали отсутствуют, магнитная цепь машины ненасыщенна;

– реальная распределенная обмотка заменяется сосредоточенной;

– поверхности статора и ротора в зоне воздушного зазора гладкие, статор и ротор имеют однотипные обмотки, воздушный зазор равномерен;

– МДС и магнитные индукции распределяются в воздушном зазоре синусоидально;

– магнитная проводимость по внутреннему диаметру статора постоянна и не зависит от положения ротора, все параметры ее линейные (в том числе индуктивности потоков рассеяния фаз статора и ротора постоянны).

Электромагнитные постоянные времени обмоток статора и ротора асинхронных двигателей составляют единицы или десятки миллисекунд. Очевидно, что электромагнитные постоянные времени ($T_э \simeq 0,01c$) на несколько порядков ниже электромеханических постоянных времени ($T_{эм} \simeq 0,5c$), поэтому они не оказывают существенного влияния на динамику асинхронного двигателя, нагрузкой которого является вентилятор охлаждения, вращающиеся части которого обладают значительным моментом инерции. Кроме того объект управления температурой имеет тепловую постоянную времени, составляющую сотни и даже тысячи секунд. Поэтому не только электромагнитная, но и электромеханическая постоянные времени асинхронного двигателя существенного влияния на динамику АСУТ не оказывает.

Таким образом, асинхронный двигатель будем описывать уравнением, связывающим выходную координату (частоту вращения) и входную координату (частоту тока статора), которая определяется уравнением механической характеристики и скольжением асинхронного двигателя.

Уравнение механической характеристики обобщенной машины при указанных выше допущениях получено в [45] и имеет вид

$$M = \frac{2M_к\left(1+\frac{r_s}{r_r'}\right)}{\frac{s_к}{s}+\frac{s}{s_к}+2s_к\frac{r_1}{r_2'}}, \qquad (3.5)$$

где M – электромагнитный момент асинхронного двигателя, *Н·м*;

$M_к$ – критический момент двигателя, *Н·м*;

r_s – сопротивления обмоток статора, *Ом*;

$r_r^{'}$ – сопротивление обмоток ротора, приведенное к обмотке статора, *Ом*;

s – текущее скольжение;

$s_к$ – критическое скольжение двигателя.

Связь между частотой вращения асинхронного двигателя и его текущим скольжением определяется выражением [45]:

$$\omega = \omega_0 (1 - s), \tag{3.6}$$

где ω_0 – частота вращения магнитного поля статора асинхронного двигателя, *рад/с*.

Частота вращения магнитного поля статора определяется как [46]

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{n_p}, \tag{3.7}$$

где f_1 – частота тока статора асинхронного двигателя, Гц;

n_p – число пар полюсов асинхронного двигателя.

На рабочем участке механической характеристики асинхронного двигателя $s >> s_к$ и слагаемым в выражении (3.5) можно пренебречь. Тогда согласно (3.5) и (3.6) получим алгебраическое уравнение

$$\omega = k_{АД} f_1, \tag{3.8}$$

где $k_{АД} = \frac{2\pi}{n_p}\left(\frac{r_s + r_r^{'} - (r_s + r_r^{'})(Mr_r^{'} s_к)}{(r_s + r_r^{'})(M_к r_s + M_к r_r^{'} - Mr_s s_к)} \right)$.

Выражение (3.8) дает однозначную линейную зависимость между выходной координатой (частотой вращения ω) и входной координатой (частотой тока статора f_1).

В итоге передаточная функция асинхронного двигателя как исполнительного устройства соответствует усилительному звену:

$$W_{АД}(p) = k_{АД}, \tag{3.9}$$

где $k_{АД}$ – коэффициент усиления асинхронного двигателя, $k_{АД} = 3{,}11$ для номинального режима работы асинхронного двигателя.

Момент сопротивления на валу асинхронного двигателя создается вентилятором охлаждения. Рассмотрим работу вентилятора охлаждения. Для него входным сигналом является частота вращения вала вентилятора, а выходным подача воздуха.

В работе [39] показано, что подача воздуха вентилятором G при работе на сеть без статической составляющей напора пропорциональна частоте вращения его вала ω

$$\frac{G_{вз1}}{\omega_1}\omega_i = G_{взi}. \qquad (3.10)$$

где $G_{вз1}$ – текущая подача воздуха вентилятором, *м*^{3}/*с*;

ω_1 – текущая частота вращения вала вентилятора охлаждения при которой подача воздуха равна $G_{вз1}$, *рад/с*;

$G_{взi}$ – *i*-я подача воздуха вентилятором, *м*^{3}/*с*;

ω_i – *i*-я частота вращения вала вентилятора охлаждения при которой подача воздуха равна $G_{взi}$, *рад/с*.

Зависимость подачи охлаждающего воздуха от частоты вращения вала вентилятора охлаждения приведена на рисунке 3.3.

Если в выражении (3.10) принять $k_{ВО} = \frac{G_{вз1}}{\omega_1}$, тогда

$$G_{взi} = k_{во}\omega_i \qquad (3.11)$$

или

$$k_{во} = \frac{G_{взi}}{\omega_i}. \qquad (3.12)$$

Соответственно вентилятор охлаждения с точки зрения теории автоматического управления представляет собой усилительное звено, при этом его передаточная функция примет вид

$$W_{ВО}(p) = k_{ВО} = \frac{G_{взi}}{\omega_i}, \qquad (3.13)$$

где $k_{ВО}$ – коэффициент усиления вентилятора охлаждения, $k_{ВО} = 0{,}01$*м*^{3}/*рад*.

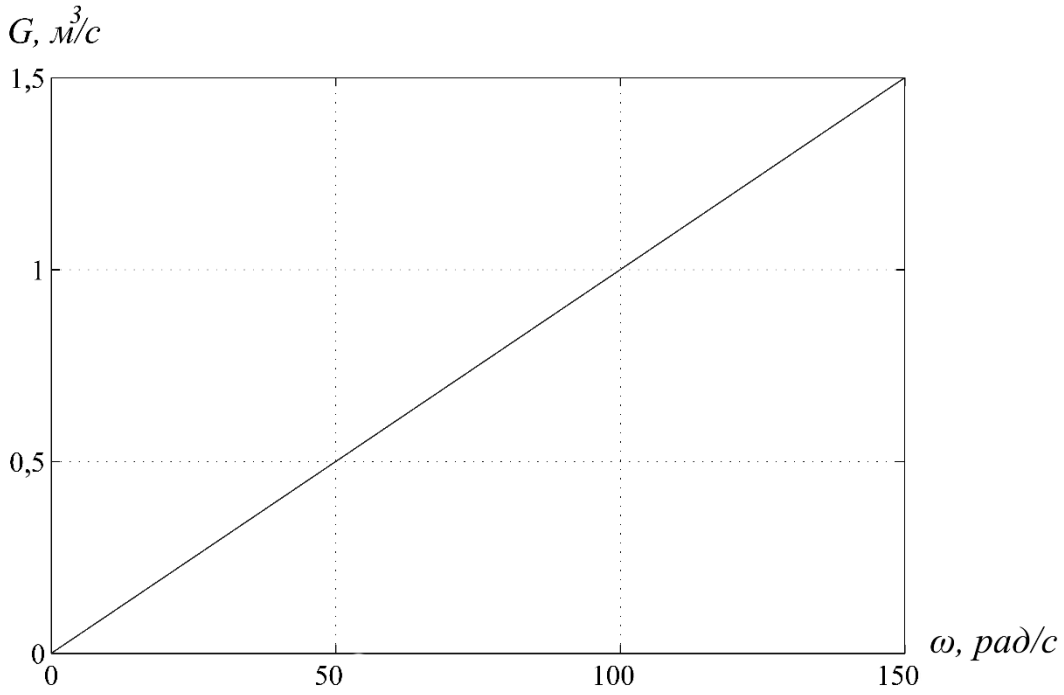


Рисунок 3.4 – Статическая зависимость подачи охлаждающего воздуха от частоты вращения вала вентилятора охлаждения как исполнительного устройства

Исполнительное устройство разрабатываемой АСУТ включает в себя асинхронный двигатель, который приводит во вращение вентилятор охлаждения. Согласно выражениям (3.9) и (3.13) вентилятор охлаждения и асинхронный двигатель представляют собой два последовательно включенных усилительных звена. Следовательно, передаточная функция исполнительного устройства будет определяться произведением передаточных функций этих звеньев:

$$W_{ИсУ}(p) = W_{ВО}(p)W_{АД}(p) = \frac{G_{вз}}{\omega}\frac{\omega}{f_1} = \frac{G_{вз}}{f_1} = k_{ВО}k_{АД} = k_{ИсУ}, \qquad (3.14)$$

где $k_{ИсУ} = 0,0311(м^3 \cdot Гц)/(рад \cdot В)$.

3.2.6 Объект управления

Динамические свойства ТАД как объекта управления температурой определяются зависимостью температуры от расхода охлаждающего воздуха и тока статора ТАД. Как показали исследования [52, 87, 98, 129, 143] данная зависимость носит нелинейный характер, что обусловлено физикой процессов

нагрева и охлаждения. Как показали результаты исследований, проведенных во втором разделе переходный процесс ТАД как объекта управления температурой можно представить дифференциальным уравнением

$$T_\theta \frac{d\theta}{dt} + \theta = f\left(G_{вз}\right), \tag{3.15}$$

где θ – текущая температура ТАД, °C;

t – текущее время, c.

Зависимость $\theta = f\left(G_{вз}\right)$, полученная во втором разделе, приведена на рисунке 3.3 и может быть аппроксимирована выражением:

$$\theta = B_{0-2}G_{вз}^2 + B_{0-1}G_{вз} + B_{0-0}, \tag{3.16}$$

где $B_{0-2} = 78{,}125(°Cм^6 / c)$; $B_{0-1} = -248{,}75(°Cм^3 / c)$; $B_{0-0} = 242°C$.

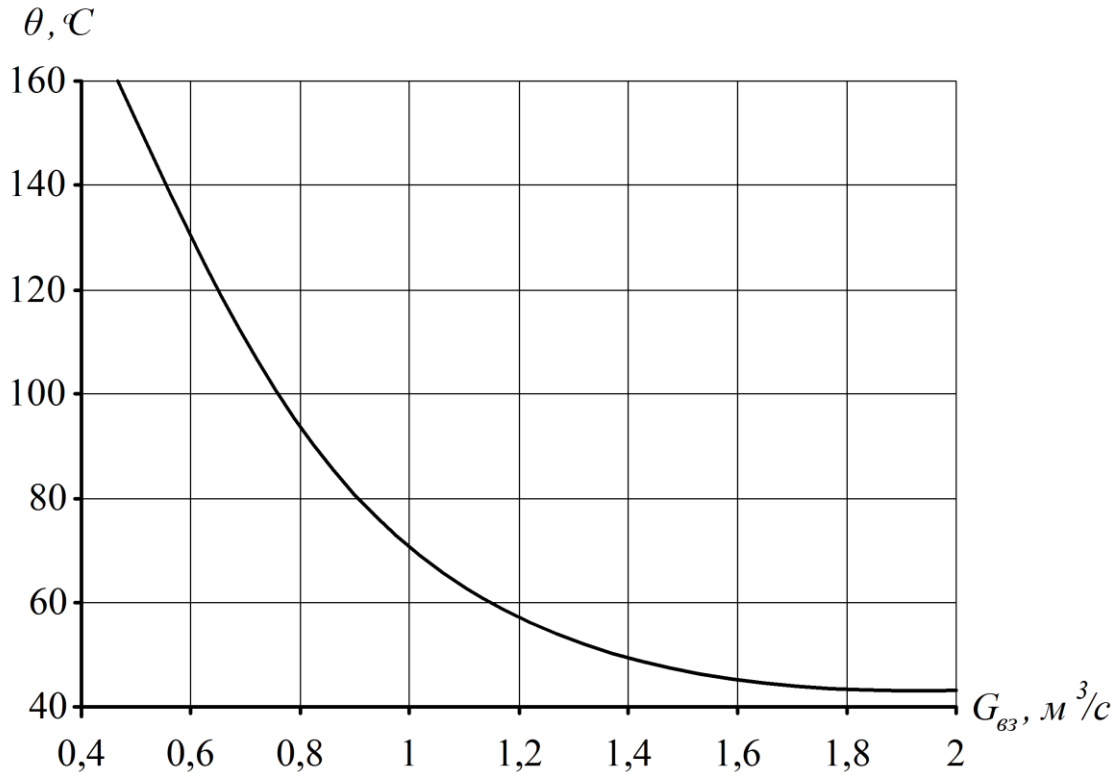


Рисунок 3.3 – Зависимость температуры ТАД θ от подачи охлаждающего воздуха $G_{вз}$

Для линеаризации допустим, что входная величина $G_{вз}$ получила малое отклонение $\Delta G_{вз}$ от исходного состояния $G_{вз0}$, тогда:

$$G_{вз} = G_{вз0} + \Delta G_{вз}.$$

Это малое отклонение $\Delta G_{вз}$ вызовет также малое отклонение выходной величины $\Delta\theta$ от исходного состояния θ_0. Поэтому выходную величину запишем аналогичным образом:

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta .$$

Подставим эти выражения в уравнение (3.15), тогда:

$$T_\theta \frac{d\Delta\theta}{dt} + \left(\theta_0 + \Delta\theta\right) = f\left(G_{вз0} + \Delta G_{вз}\right). \qquad (3.17)$$

В первом слагаемом производная от исходного состояния равна нулю, так как производная берется от постоянной величины.

Запишем уравнение исходного состояния:

$$\theta_0 = f\left(G_{вз0}\right). \qquad (3.18)$$

Вычтя из уравнения (3.17) уравнение исходного состояния, получим линейное уравнение в отклонениях, из которого можно будет найти передаточную функцию:

$$T_\theta \frac{d\Delta\theta}{dt} + \Delta\theta = f\left(\Delta G_{вз}\right). \qquad (3.19)$$

Поскольку зависимость $\theta = f\left(G_{вз}\right)$ задана графически (рисунок 3.3), то линеаризацию этой зависимости выполним графически.

Для примера выберем рабочую точку со значениями $\theta = 81°C$ и $G_{вз0}$=0,9 $м^3/с$. На рисунке 3.4 выполнена линеаризация зависимости $\theta = f\left(G_{вз}\right)$. К графику зависимости $\theta = f\left(G_{вз}\right)$ проведена касательная в рабочей точке.

Из рисунка 3.4 очевидно, что $\theta = \theta_0 + \Delta\theta$, а $\Delta\theta = \mathrm{tg}\alpha\Delta G$. В итоге получим зависимость $\Delta\theta = k_\theta \Delta G_{вз}$. Для рабочей точки со значениями $\theta = 81°C$ и $G_{вз}$=0,9 $м^3/с$ имеем $k_\theta = 1{,}07(°C/(м^6/с))$. Далее подставим полученную зависимость $\Delta\theta = k_\theta \Delta G_{вз}$ в выражение (3.19) и получим:

$$T_\theta \frac{d\Delta\theta}{dt} + \Delta\theta = k_\theta \Delta G_{вз}$$

или в операторной форме

$$(T_\theta p + 1)\Delta\theta(p) = k_\theta \Delta G_{вз}(p). \qquad (3.20)$$

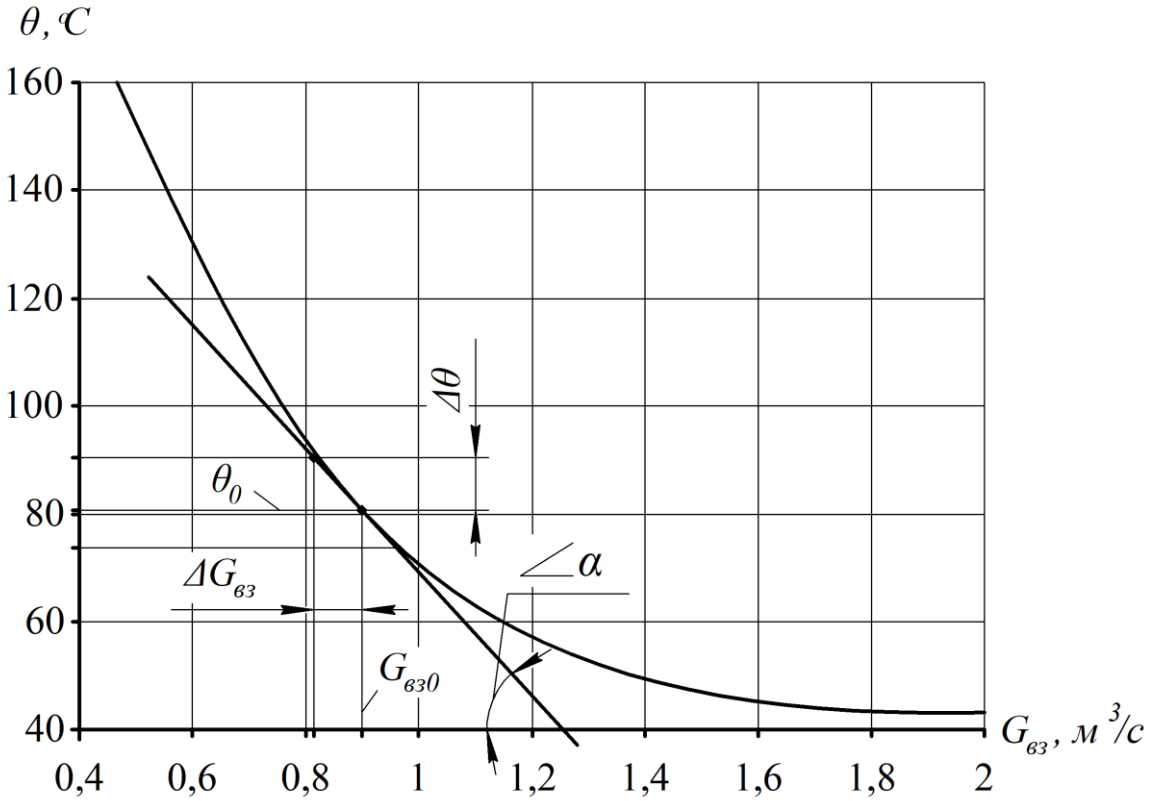


Рисунок 3.4 – Линеаризация зависимости $\theta = f\left(G_{вз}\right)$

Согласно выражению (3.20) запишем передаточную функция ТАД как объекта управления температурой, которая соответствует апериодическому (инерционному) звену I порядка:

$$W_\theta(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta G_{вз}(p)} = \frac{k_\theta}{\left(T_\theta p + 1\right)}. \qquad (3.21)$$

где k_θ – коэффициент усиления ТАД как объекта управления температурой, $°C/(м^3/c)$,

T_θ – постоянная времени ТАД как объекта управления температурой; $T_\theta = 1312c$.

3.2.7 Измерительное устройство

Измерительным устройством в АСУТ является датчик температуры, который регистрирует значение наибольшего перегрева ТАД, формируя на выходе электрический сигнал, пропорциональный регистрируемый температуре.

Наиболее распространенными средствами измерения температуры являются термоэлектрические преобразователи – термопары.

Термоэлектрический метод измерения температуры основан на зависимости термоэлектродвижущей силы (термоЭДС), развиваемой термопарой от температуры ее рабочего конца. ТермоЭДС возникает в цепи, составленной из двух разнородных проводников (электродов) если значения температуры мест соединения не равны (при равенстве температур термоЭДС равна нулю).

На рисунке 3.5 приведена номинальная статическая характеристика хромель-копелевой термопары в рассматриваемом диапазоне температур (0…200°*C*), которую будем использовать в качестве датчика температуры разрабатываемой АСУТ.

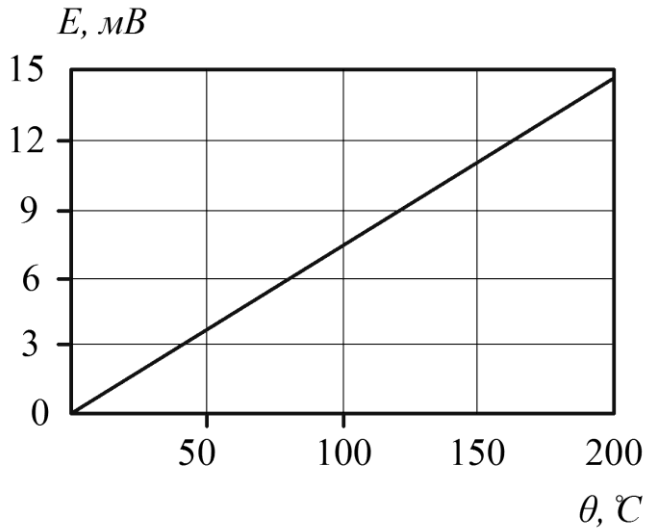


Рисунок 3.5 – Номинальная статическая характеристика хромель-копелевой термопары

Анализ рисунка 3.5 позволяет сделать вывод о линейной зависимости между входным (температурой) и выходным (термоЭДС) сигналами.

В соответствии с рисунком 3.5 алгебраическое уравнение, которое связывает сигнал выхода $U_{ИУ}$ и сигнал входа θ измерительного устройства имеет вид

$$U_{ИУ} = k_{ИУ}\theta, \tag{3.22}$$

где $k_{ИУ}$ – коэффициент пропорциональности измерительного устройства.

В соответствии с выражением (3.22) передаточная функция измерительного устройства определяется как

$$W_{ИУ}(p) = \frac{U_{ИУ}}{\theta} = k_{ИУ}, \tag{3.23}$$

где $k_{ИУ}$ – коэффициент усиления измерительного устройства, *В/°С*.

Значение $U_{ИУ\max}$ принимают равным максимальному напряжению в системе автоматического управления, в нашем случае это $10B$. Величина $\theta_{\max}$ принимается равной максимальному допустимому значению температуры ТАД, а именно $180°C$. В итоге получим $k_{ИУ} = 0{,}056\,B/°C$.

В итоге система нелинейных уравнений, которая описывает работу разрабатываемой нелинейной АСУТ без учета регулятора согласно выражениям (3.1), (3.2), (3.3), (3.8), (3.11), (3.15) и (3.22) примет вид:

$$\begin{cases} \Delta U_з = U_з - U_{ИУ}, \\ U_{БО} = \begin{cases} U_{рег}, \text{ при } U_{рег} \le U_{рег}^{\max}; \\ U_{рег}^{\max}, \text{ при } U_{рег} > U_{рег}^{\max}. \end{cases} \\ f_1 = k_{ПЧ} U_{БО}, \\ G_{вз} = k_{ИсУ} f_1, \\ T_\theta \dfrac{d\theta}{dt} + \theta = 78{,}125 G_{вз}^{\ 2} - 248{,}75 G_{вз} + 242, \\ U_{ИУ} = k_{ИУ}\theta. \end{cases} \tag{3.24}$$

Система линеаризованных уравнений, описывающая работу этой АСУТ без учета регулятора примет вид:

$$\begin{cases} \Delta U_з^{'} = \Delta U_з - \Delta U_{ИУ}, \\ \Delta f_1 = k_{ПЧ} \Delta U_з^{'}, \\ \Delta G_{вз} = k_{ИсУ} \Delta f_1, \\ T_\theta \dfrac{d\theta}{dt} + \Delta\theta = 156,25 G_{вз} - 248,75, \\ \Delta U_{ИУ} = k_{ИУ} \Delta\theta. \end{cases} \tag{3.25}$$

Соответственно передаточные функции элементов разрабатываемой линеаризованной АСУТ при малых отклонениях имеют вид:

для измерительного устройства

$$W_{ИУ}(p) = \frac{\Delta U_{ИУ}}{\Delta\theta} = k_{ИУ}, \tag{3.26}$$

для объекта управления

$$W_\theta(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta G_{вз}(p)} = \frac{k_\theta}{\left(T_\theta p + 1\right)}, \tag{3.27}$$

где $k_\theta = 156,25 G_{вз} - 248,75$;

для исполнительного устройства

$$W_{ИсУ}(p) = \frac{\Delta G_{вз}}{\Delta f_1} = k_{ИсУ}, \tag{3.28}$$

для устройства управления

$$W_{ПЧ}(p) = \frac{\Delta f_1}{\Delta U_з} = k_{ПЧ}. \tag{3.29}$$

3.2.8 Регулятор

В работе будут рассмотрены два варианта реализации регулятора. В качестве первого варианта будет использован комбинированный регулятор с двумя последовательно включёнными изодромными звеньями и звеньями обратной связи. Структурная схема комбинированного регулятора приведена на рисунке 3.6.

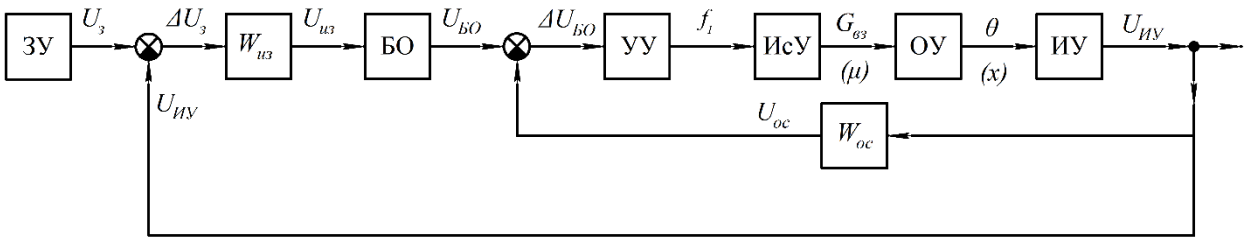


Рисунок 3.6 – Структурная схема АСУТ с комбинированным регулятором

Передаточная функция двух последовательно включенных изодромных звеньев определяется выражением

$$W_{из}(p) = \left(k_{из} + \frac{1}{T_и p}\right)^2 = \left(\frac{T_{из} p + 1}{T_и p}\right)^2 = \left(\frac{k_{из}(T_{из} p + 1)}{T_{из} p}\right)^2, \qquad (3.30)$$

где $k_{из}$ – коэффициент усиления изодромного звена;

$T_и$ – постоянная времени интегрирования, c;

$T_{из}$ – постоянная времени «изодрома», $T_{из} = k_{из} T_и$.

Дифференциальное уравнение, связывающие сигналы выхода и входа такого регулятора, как и величины $k_{из}$, $T_{из}$ и передаточная функция звеньев обратной связи $W_{ос}(p)$ будут определены в процессе решения задачи синтеза ниже.

Вторым вариантом будет настройка АСУТ на технический оптимум [7, 39, 45, 46, 48, 114, 116]. Структурная схема такой системы приведена на рисунке 3.7.

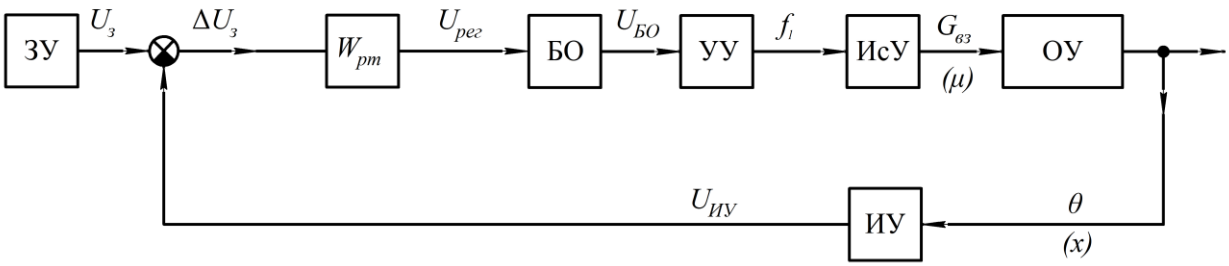


Рисунок 3.7 – Структурная схема АСУТ с ПИ-регулятором

Параметры этих регуляторов будут выбраны по методикам, рассмотренным в данном разделе.

3.3 Синтез автоматического регулятора температуры, определение устойчивости и показателей качества АСУТ

3.3.1 Методика решения задачи синтеза

Проектируемая АСУТ, помимо реализации своих непосредственных функций, должна также отвечать ряду требований. Главным образом эти требования предусматривают обеспечение устойчивости и качества управления. Задача проектирования такой системы с заранее заданными свойствами называется задачей синтеза АСУТ. При ее решении часть системы полагают уже заданной и дополняют ее необходимыми корректирующим звеньями. К заданной неизменной части системы в данном случае относятся следующие функциональные устройства, обеспечивающие ее работу: УУ, ИСУ, ИУ и ОУ.

Задача, таким образом, сводится к дополнению разомкнутой АСУТ корректирующими звеньями, обеспечивающими выполнение требований к устойчивости и качеству управления. В [105] показано, что для синтеза САУ подвижным составом наиболее предпочтительна комбинированная коррекция, когда часть звеньев включается последовательно с разомкнутой САУ, а другая часть в обратную связь.

Для обеспечения нормальной работоспособности САУ температурой ТАД должна обладать астатизмом II порядка [105, 106]. С этой целью будем включать последовательно с разомкнутой АСУТ два изодромных звена. Последовательное включение двух изодромных звеньев придает системе астатизм второго порядка, что повышает качество управления в установившемся режиме, обеспечивая нулевые установившиеся ошибки по координате (температуре) и по скорости ее изменения (градиенту температуры), а также обеспечивает её устойчивость.

Последовательное включение звеньев $W_к(p)$ и $W_р(p)$ называют исходной системой. Передаточная функция этой системы равна:

$$W_{исх}(p) = W_к(p)W_р(p), \qquad (3.31)$$

Для обеспечения устойчивости системы и требований к качеству управления в переходном режиме дополним исходную систему корректирующими звеньями обратной связи с передаточной функцией $W_{ос}(p)$, которую найдём в

процессе решения задачи синтеза. При этом обратная связь, как показано в [105], должна охватывать только разомкнутую часть АСУТ, а не всю исходную систему в целом. В результате структурная схема системы примет окончательный вид, показанный на рисунке 3.8.

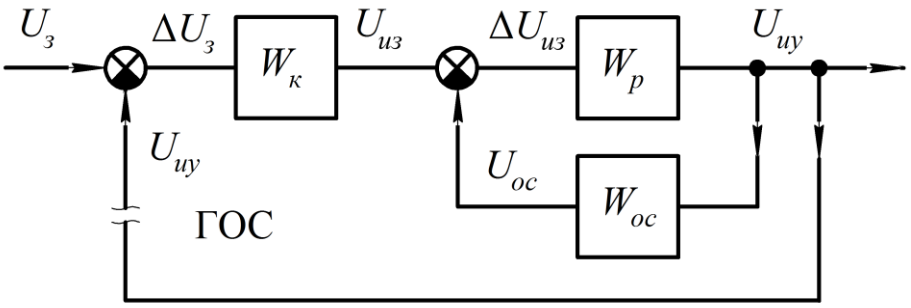


Рисунок 3.8 – Структурная схема разомкнутой скорректированной АСУТ

Применение звеньев обратной связи помимо обеспечения устойчивости и качества управления в переходном режиме снижает влияние нелинейности и нестационарности охваченной части системы. Эти свойства обратной связи особенно важны для АСУТ ТАД, так как статические характеристики звеньев, входящих в состав её разомкнутой АСУТ нелинейны.

Если в структурной схеме рисунок 3.8 разомкнуть главную обратную связь (ГОС), то система будет называться скорректированной разомкнутой системой, передаточная функция которой $W_{скр}(p)$ равна:

$$W_{скр}(p) = W_к(p)\frac{W_р(p)}{1+W_р(p)W_{ос}(p)} = \frac{W_{исх}(p)}{1+W_р(p)W_{ос}(p)}, \qquad (3.32)$$

где $W_{исх}(p)$ – передаточная функция исходной системы:

$$W_{исх}(p) = W_к(p)W_р(p) = \left(\frac{k_{из}(T_{из}p+1)}{T_{из}p}\right)^2 \frac{k_р}{T_\theta p+1} = \frac{k_р k_{из}{}^2\left(T_{из}p+1\right)^2}{T_{из}{}^2 p^2\left(T_\theta p+1\right)}, \qquad (3.33)$$

где $k_{исх}$ – коэффициент усиления исходной системы (добротность системы по ускорению):

$$k_{исх} = k_р k_{из}^2. \qquad (3.34)$$

В этой скорректированной системе остается неизвестным, какие именно звенья следует включать в обратную связь и как выбрать параметры $k_{из}$ и $T_{из}$. Для решения этих задач воспользуемся методом синтеза АСУТ по логарифмическим амплитудным частотным характеристикам (ЛАЧХ). Для этого вначале, заменяя оператора Лапласа p на оператор Фурье $j\omega$, перейдем от передаточных функций $W(p)$ к частотным характеристикам $W(j\omega)$, а затем к амплитудно-частотным характеристикам (АЧХ) $A(\omega)=\left|W\left(j\omega\right)\right|$ и далее к ЛАЧХ $L\left(\omega\right)=20\lg A(\omega)$.

В соответствие с этим частотная характеристика (ЧХ) разомкнутой скорректированной системы определяется выражением:

$$W_{скр}(j\omega)=W_{к}(j\omega)\frac{W_{р}(j\omega)}{1+W_{р}(j\omega)W_{ос}(j\omega)}=\frac{W_{исх}(j\omega)}{1+W_{р}(j\omega)W_{ос}(j\omega)}. \qquad (3.35)$$

Для обоснования порядка решения задачи синтеза, как это сделано в [105] запишем упрощения выражения (3.35), которые можно получить, рассматривая низко и высокочастотные диапазоны этой ЧХ.

В диапазоне низких частот, когда $\left|W_{р}(j\omega)W_{ос}(j\omega)\right|<<1$, можно считать, что выполняется условие:

$$W_{скр}(j\omega)\approx W_{исх}(j\omega), \qquad (3.36)$$

из которого следует, что в этом низком диапазоне частот корректирующие звенья обратной связи $W_{ос}(j\omega)$ не влияют на частотную характеристику $W_{скр}(j\omega)$, так как характеристики исходной и скорректированной систем практически совпадают.

В диапазоне высоких частот, когда $\left|W_{р}(j\omega)W_{ос}(j\omega)\right|>>1$, единицей в знаменателе (3.35) можно пренебречь и

$$W_{скр}(j\omega)=\frac{W_{исх}(j\omega)}{W_{р}(j\omega)W_{ос}(j\omega)}=\frac{W_{к}(j\omega)W_{р}(j\omega)}{W_{р}(j\omega)W_{ос}(j\omega)}=\frac{W_{к}(j\omega)}{W_{ос}(j\omega)}, \qquad (3.37)$$

Отсюда следует, что разомкнутая система не влияет на ЧХ скорректированной разомкнутой системы. В соответствие с (3.37) можно записать, что

$$L_{скр}(\omega) = L_к(\omega) - L_{ос}(\omega) = L_{исх}(\omega) - L_р(\omega) - L_{ос}(\omega), \quad (3.38)$$

Это выражение определяет порядок решения задачи синтеза, который сводится к нахождению $L_{ос}(\omega)$:

$$L_{ос}(\omega) = -L_{исх}(\omega) - L_{скр}(\omega) - L_р(\omega), \quad (3.39)$$

Задачу определения $L_{ос}(\omega)$ в соответствие с (3.39) обычно решают в два этапа:

– на первом находят промежуточную ЛАЧХ $L_{ос}(\omega)$:

$$L_1(\omega) = L_{исх}(\omega) - L_{скр}(\omega), \quad (3.40)$$

– на втором этапе находят $L_{ос}(\omega)$:

$$L_{ос}(\omega) = L_1(\omega) - L_р(\omega), \quad (3.41)$$

При этом необходимо учитывать, что коэффициент усиления $L_{скр}(\omega)$ должен быть меньше, чем $-20дБ$. Поэтому коэффициент усиления $L_{исх}(\omega)$ выбирают так, чтобы в низкочастотном диапазоне $L_{исх}(\omega)$ проходила ниже, чем $L_{скр}(\omega)$ на $20дБ + 20\lg k_р$.

Помимо определения $L_{ос}(\omega)$ необходимо найти ещё и $\varphi_{скр}(\omega)$ – фазовую частотную характеристику (ФЧХ) скорректированной разомкнутой системы. Обычно эту задачу решают на основании выражения:

$$\varphi_{скр}(\omega) = \varphi_к(\omega) - \varphi_{ос}(\omega), \quad (3.42)$$

В соответствие с этим решение задачи синтеза начнём с построения ЛАЧХ скорректированной разомкнутой системы.

3.3.2 Решение задачи синтеза для АСУТ тягового асинхронного двигателя

1. Построение ЛАЧХ разомкнутой скорректированной системы.

Чтобы построить эту ЛАЧХ задаются ее желаемым видом, который обеспечит устойчивость, а также выполнение показателей качества в переходном режиме. Эту ЛАЧХ строят в трех частотных диапазонах (низкочастотном НЧ, среднечастотном СЧ и высокочастотном ВЧ) по определенным рекомендациям [105]. Построение начинают со среднечастотного диапазона.

1.1. Построение СЧ-диапазона ЛАЧХ желаемой скорректированной системы.

Этот диапазон определяет выполнение требований к устойчивости и качеству управления в переходном режиме для скорректированной АСУТ. ЛАЧХ в этом диапазоне должна иметь наклон –20*дБ/дек* и должна пересекать ось частот на частоте среза $\omega_{ср}$ скорректированной разомкнутой системы. Диапазон простирается от $\omega_{ср}$ в каждую сторону до пересечения с ординатой ±16*дБ*. Частота среза, в свою очередь, определяется показателями качества переходного режима, и может быть найдена как

$$\omega_{ср} = \frac{\pi\lambda}{t_p},\ Гц \tag{3.43}$$

где $\lambda = \lambda(\sigma)$ – коэффициент, зависящий от перерегулирования.

Величину λ определяют по графику зависимости $\lambda(\sigma)$ [105]. Если в нашем случае принять $\sigma = 0,20$, то получим $\lambda = 1,5$. В итоге частота среза при $t_p = 2000\,c$ будет равна

$$\omega_{ср} = \frac{\pi\lambda}{t_p} = \frac{3,14 \cdot 1,5}{2000} = 0,002355\ Гц. \tag{3.44}$$

Проведём через частоту $\omega_{ср}$ линию с наклоном –20*дБ/дек*. Тогда границам СЧ части будут соответствовать частоты ω_1=0,00022*Гц* и ω_2=0,013*Гц* (рисунок 3.9).

1.2. Построение НЧ-диапазона $L_{скр}(\omega)$.

Этот диапазон определяет качество управления в установившемся режиме; его наклон (-20ν) *дБ/дек*, где $\nu = 0,1,2...$ – порядок астатизма системы. Поскольку в нашем случае $\nu = 2$, то этот наклон составит –40 дБ/дек. Примем также, что СЧ и НЧ диапазоны стыкуются непосредственно, тогда ордината точки стыковки составит 16*дБ*, как и левая граница СЧ-диапазона (рисунок 3.9).

1.3. Построение ВЧ-диапазона.

Вид ВЧ-диапазона $L_{скр}(\omega)$ не влияет на устойчивость и качество управления. Наклон ЛАЧХ в этом диапазоне обычно принимают на 20*дБ/дек* большим (по модулю), чем наибольший из наклонов НЧ и СЧ диапазонов. В нашем случае он составит –60*дБ/дек* (рисунок 3.9).

2. Построение ЛАЧХ разомкнутой системы.

Построение логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) разомкнутой системы $L_p(\omega)$ выполним по найденной передаточной функции $W_p(p)$, которая определяется произведением передаточных функций устройства управления, исполнительного устройства, объекта управления и измерительного устройства. Для этого от передаточной функции перейдём к ЧХ и запишем выражение для АЧХ:

$$W_p(j\omega) = \frac{k_p}{(T_\theta j\omega + 1)} \tag{3.45}$$

$$A_p(\omega) = \frac{k_p}{\sqrt{1 + \omega^2 T_\theta^2}} \tag{3.46}$$

По выражению АЧХ (3.47) можно найти ЛАЧХ:

$$L_p(\omega) = 20\lg A_p(\omega) = 20\lg k_p - 20\lg\left(\sqrt{1 + \omega^2 T_\theta^2}\right). \tag{3.47}$$

Для построения графика $L_p(\omega)$ необходимо вначале найти сопрягающую частоту $\omega_{сп1} = 1/T_\theta = 1/1312 = 7,6219 \cdot 10^{-4}\,Гц$.

График $L_p(\omega)$ представим в виде отрезков асимптот. Для этого рассмотрим отдельные частотные диапазоны.

Первый частотный диапазон $\omega < \omega_{сп1} = 7,6219 \cdot 10^{-4}\,Гц$ и уравнение первой асимптоты имеет вид:

$$L_{ра1}(\omega) = 20\lg k_p = 20\lg 1,1339 = 1,092\,дБ. \tag{3.48}$$

Второй частотный диапазон $\omega > \omega_{сп1}$, уравнение второй асимптоты:

$$L_{p\,a2}(\omega) = 20\lg k_p - 20\lg \omega T_\theta = 20\lg 1{,}1339 - 20\lg \omega T_\theta = \\ = 1{,}092 - 20\lg \omega T_\theta, дБ. \quad (3.49)$$

Графиком второй асимптоты $L_{pa2}(\omega)$ является прямая с наклоном –20*дБ/дек* (рисунок 3.9).

Анализ выражений (3.48) и (3.49) позволяет сделать вывод, что график $L_p(\omega)$ на первом участке ($\omega < \omega_{сп1}$) будет представлять собой прямую горизонтальную линию, отстоящую от оси частот на 1,092*дБ* и проходящую от оси ординат до частоты $\omega_{сп1}$ (рисунок 3.9). На сопрягающей частоте равной $\omega_{сп1} = 7{,}6219 \cdot 10^{-4}\,Гц$ наступает «перелом» и график $L_p(\omega)$ на втором участке $(\omega > \omega_{сп1})$ будет иметь наклон –20*дБ/дек*.

3. Построение ЛАЧХ исходной системы.

Выражения ЧХ, АЧХ и ЛАЧХ, соответствующие передаточной функции исходной системы (3.31) будут иметь вид:

$$W_{исх}(j\omega) = \frac{k_{исх}\left(1 + j\omega T_{из}\right)^2}{\left(j\omega\right)^2\left(1 + j\omega T_\theta\right)}, \quad (3.50)$$

$$A_{исх}(\omega) = \frac{k_{исх}\left[\sqrt{\left(1 + \omega^2 T_{из}^2\right)^2}\right]^2}{\omega^2\sqrt{1 + \omega^2 T_\theta^2}}, \quad (3.51)$$

$$L_{исх}(\omega) = 20\lg k_{исх} - 40\lg \omega - 20\lg\sqrt{1 + \omega^2 T_\theta^2} + 40\lg\sqrt{1 + \omega^2 T_{из}^2}, дБ. \quad (3.52)$$

Выражение (3.52) позволяет сделать вывод, что график $L_{исх}(\omega)$ обладает двумя сопрягаемыми частотами $\omega_{сп1} = T_\theta^{-1}\,Гц$ и $\omega_{сп2} = T_{из}^{-1}\,Гц$, причём $\omega_{сп1} << \omega_{сп2}$. Отметим также, что величина $T_{из}$ неизвестна и подлежит определению в процессе решения задачи синтеза.

Первый частотный диапазон $\omega < \omega_{сп1}$, уравнение первой асимптоты:

$$L_{исх\,a1}(\omega) = 20\lg k_{исх} - 20\lg \omega^2 = 20\lg k_{исх} - 40\lg \omega. \quad (3.53)$$

Величина $k_{исх}$ неизвестна и подлежит определению в процессе решения задачи синтеза. В соответствие с ранее сформулированными рекомендациями

построим график этой асимптоты в виде прямой с наклоном –40*дБ/дек*. Эта асимптота должна «лежать» ниже $L_{скр}(\omega)$ на величину 20+$20\lg k_p$=21,092*дБ*. Она достигает значения $\omega = 1 Гц$ при $20\lg k_{исх} = -142 дБ$. Поэтому $k_{исх} = \mathrm{A}\lg(-7{,}1) \simeq 8\cdot 10^{-8}$. Поскольку в соответствие с (3.39) $k_{исх} = k_p k_{из}^2$, то $k_{из}^2 = k_{исх}/k_p = 7{,}0553\cdot 10^{-8}$. Тогда $k_{из} = \sqrt{7{,}0553\cdot 10^{-8}} = 2{,}656\cdot 10^{-4}$.

Второй частотный диапазон – $\omega_{сп1} < \omega < \omega_{сп2}$, уравнение второй асимптоты:

$$L_{исх\,а2}(\omega) = 20\lg k_{исх} - 40\lg \omega T_p - 20\lg \omega^2 T_\theta^2 = \\ = -142 - 40\lg\omega - 20\lg \omega T_\theta. \qquad (3.54)$$

Графиком этой асимптоты будет прямая с наклоном –60*дБ/дек*. Переход от первой асимптоты ко второй происходит при сопрягающей частоте $\omega_{сп1} = T_\theta^{-1} = 7{,}6219\cdot 10^{-4}\, Гц$.

Третий частотный диапазон – $\omega > \omega_{сп3}$, уравнение третьей асимптоты:

$$L_{исх\,а3}(\omega) = 20\lg k_{исх} - 40\lg\omega - 20\lg \omega T_\theta + 40\lg \omega T_{из} \qquad (3.55)$$

Графиком $L_{исх}$ в этом частотном диапазоне будет прямая с наклоном –20*дБ/дек*. Примем величину $\omega_{сп2}$ равной 0,1*Гц*. Тогда величина $T_{из}$ будет равна $T_{из} = \omega_{сп2}^{-1} = 10\, с$.

4. Построение промежуточной ЛАЧХ $L_1(\omega)$.

Эта ЛАЧХ получается как разность между ЛАЧХ исходной системы и желаемой ЛАЧХ скорректированной разомкнутой системы. Поэтому в частотном диапазоне до первого перелома графика $L_{скр}(\omega)$ первый участок $L_1(\omega)$ будет горизонтальной прямой, отстоящей от оси частот на величину –18,908*дБ* (рисунок 3.9).

После этого перелома наклон графика $L_1(\omega)$ изменится и станет равным –20*дБ/дек*. С таким наклоном график $L_1(\omega)$ будет проходить до сопрягающей частоты $\omega_{сп1}$, при которой наклон графика $L_1(\omega)$ изменится ещё раз и станет

равным –40*дБ/дек*. С таким наклоном график $L_1(\omega)$ будет проходить до второго перелома графика $L_{скр}(\omega)$. После этого перелома график $L_1(\omega)$ будет представлять собой горизонтальную линию, которая будет проходить до частоты $\omega_{сп2} = 10 Гц$. При этой частоте наклон изменится и станет равным +40*дБ/дек* (рисунок 3.9).

5. Построение ЛАЧХ обратной связи.

ЛАЧХ обратной связи $L_{ос}(\omega)$ строим по выражению (3.41):

$$L_{ос}(\omega) = L_1(\omega) - L_p(\omega).$$

На первом низкочастотном участке до первой частоты перелома $L_{скр}(\omega)$ графики характеристик $L_1(\omega)$ и $L_p(\omega)$ имеют вид горизонтальных прямых, отстоящих друг от друга на 20*дБ*. Поэтому на этом участке график $L_{ос}(\omega)$ также будет горизонтальной прямой, отстоящей от оси частот на –20*дБ* (рисунок 3.9). На следующем участке до частоты $\omega_{сп1}$ график $L_1(\omega)$ имеет наклон –20*дБ/дек*, а график $L_p(\omega)$ остаётся горизонтальной прямой. Поэтому график $L_{ос}(\omega)$ в соответствие с (3.52) будет иметь наклон –20*дБ/дек* (рисунок 3.9). После сопрягающей частоты $\omega_{сп1}$ наклон графика $L_1(\omega)$ составляет –40*дБ/дек*, а графика $L_p(\omega)$ составляет –20*дБ/дек*. Поэтому график $L_{ос}(\omega)$ останется, как и на предыдущем участке прямой с наклоном –20*дБ/дек*.

При частоте ω_2 второго перелома $L_{скр}(\omega)$ наклон графика $L_1(\omega)$ становится равным 0*дБ/дек*, а графика $L_p(\omega)$ остаётся равным –20*дБ/дек*. Поэтому наклон графика $L_{ос}(\omega)$ станет равен +20*дБ/дек*. После частоты $\omega_{сп2}$ наклон графика $L_1(\omega)$ становится равным +40*дБ/дек*, а $L_p(\omega)$ также остаётся равным –20*дБ/дек*. Поэтому наклон $L_{ос}(\omega)$ становится равным +60*дБ/дек*.

Все ЛАЧХ для разрабатываемой АСУТ показаны на рисунке 3.9, там же пунктиром показано, что ЛАЧХ исходной системы попала бы в точку

$L_{исх}(1) = -142 дБ$ при ω=1*Гц*. Как видно из рисунка 3.9 величина $b_{ос}$, на которую отстоит ЛАЧХ $L_{ос}(\omega)$ от оси частот в НЧ – диапазоне (на своем горизонтальном участке) составляет –20*дБ*, что согласуется с рекомендациями, приведенными в [105].

После того, как найдена эквивалентная ЛАЧХ звеньев обратной связи, можно определить её передаточную функцию:

$$L_{ос}(\omega) = \frac{k_{ос}\left(T_2 p + 1\right)^2 (T_{из} p + 1)^2}{(T_1 p + 1)} = \frac{0{,}1\left(76{,}923 p + 1\right)^2 (10 p + 1)^2}{(3125 p + 1)}. \qquad (3.56)$$

6. Корректировка выражения $W_{ос}(p)$ и новый вид $W_{скр}(p)$.

Полученный вид $W_{ос}(p)$ (3.56) отличается тем, что в числителе этого выражения стоит полином четвёртого порядка, что существенно затрудняет его реализацию. При этом второй множитель числителя этого выражения $(10p+1)^2$ имеет сопрягающую частоту $\omega_{сп2}$=0,1*Гц*, что почти в десять раз превышает частоту ω_2=0,013*Гц* второго перелома $L_{скр}(\omega)$, т. е. соответствует ВЧ-части $L_{скр}(\omega)$. Поскольку эта часть практически не влияет на запас устойчивости и качество управления, то полиномом $(10p+1)^2$ числителя (3.56) можно пренебречь, что вызовет изменение наклона ВЧ-части $L_{скр}(\omega)$ скорректированной разомкнутой системы и не повлияет на запас устойчивости и качества управления. Введём это упрощение и определим новый вид ЛАЧХ $L^{н}_{скр}(\omega)$, решив заново задачу синтеза.

Вначале построим новую ЛАЧХ обратной связи $L^{н}_{ос}(\omega)$ по передаточной функции

$$W^{н}_{ос}(p) = \frac{k_{ос}\left(T_2 p + 1\right)^2}{(T_1 p + 1)} = \frac{0{,}1\left(76{,}923 p + 1\right)^2}{(3125 p + 1)}. \qquad (3.57)$$

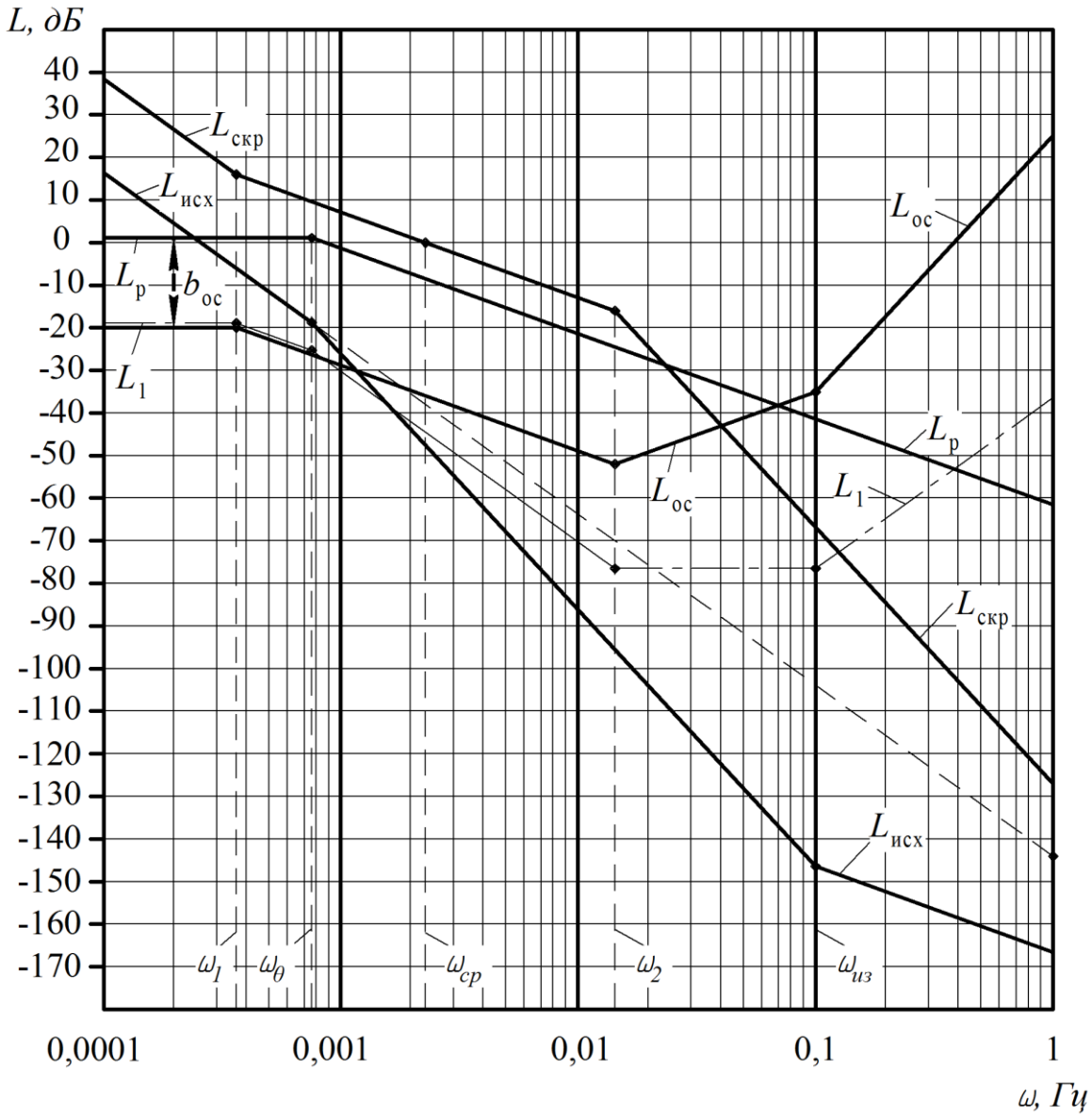


Рисунок 3.9 – ЛАЧХ для нахождения звеньев обратной связи

ЛАЧХ, соответствующая этой передаточной функции имеет следующий вид:

$$L_{oc}^{н}(\omega) = 20\lg k_{oc}^{н} - 20\lg\sqrt{1+\omega^2 T_1^2} + 20\lg\sqrt{1+\omega^2 T_2^2}\,. \qquad (3.58)$$

Построим график этого выражения (рисунок 3.10).

1) Первая асимптота $L_{oc}^{н}(\omega)$ при частоте $\omega < \omega_1$ определится выражением:

$$L_{oca1}^{н}(\omega) = 20\lg k_{oc} = 20\lg 0{,}1 = -20\partial Б\,.$$

Графиком этого выражения будет горизонтальная прямая, проходящая ниже оси частот на $20\partial Б$.

2) Выражение для второй асимптоты в диапазоне частот $\omega_1 < \omega < \omega_2$ запишем как:

$$L_{oca2}^{н}(\omega) = 20\lg k_{oc} - 20\lg \omega T_1 = 20\lg 0{,}1 = -20 - 20\lg \omega T_1,\ \partial Б$$

Графиком этой асимптоты будет прямая с наклоном –20*дБ/дек*.

3) Третья асимптота при частотах $\omega > \omega_2$, определится выражением:

$$L_{oca2}^{н}(\omega) = -20 - 20\lg \omega T_1 + 40\lg \omega T_2,\ \partial Б\,.$$

Графиком этой асимптоты будет прямая с наклоном +20*дБ/дек*.

Далее найдём график $L_1^{н}(\omega)$ на основе (3.40) как:

$$L_1^{н}(\omega) = L_{oc}^{н}(\omega) + L_p(\omega)\,. \qquad (3.59)$$

Просуммировав графически ЛАЧХ, стоящие в правой части, получим следующее. При частотах $\omega < \omega_1$, графиком $L_1^{н}(\omega)$ будет горизонтальная прямая, отстоящая от оси частот на $-18{,}902\partial Б$ (рисунок 3.10). При частотах $\omega_1 < \omega < \omega_{сп1}$ графиком $L_1^{н}(\omega)$ будет прямая с наклоном –20*дБ/дек*. При частотах $\omega_{сп1} < \omega < \omega_2$ графиком $L_1^{н}(\omega)$ будет прямая с наклоном –40*дБ/дек*. И, наконец, при частотах $\omega > \omega_2$ графиком $L_1^{н}(\omega)$ будет горизонтальная прямая.

Зная графики $L_1^н(\omega)$ и $L_{исх}(\omega)$, можно построить новый график ЛАЧХ скорректированной разомкнутой системы:

$$L_{скр}^н(\omega) = L_{исх}(\omega) - L_1^н(\omega). \qquad (3.60)$$

График этого выражения в диапазоне частот $\omega < \omega_1$ представляет собой прямую с наклоном –40*дБ/дек*. В частотном диапазоне $\omega_1 < \omega < \omega_{сп1}$ наклон графика этой характеристики станет равным –20*дБ/дек*. Этот наклон сохранится до частоты ω_2. В частотном диапазоне $\omega_2 < \omega < \omega_{сп2}$ график $L_{скр}^н(\omega)$ будет иметь наклон –60*дБ/дек*. И, наконец, в диапазоне частот $\omega > \omega_{сп2}$ наклон графика $L_{скр}^н(\omega)$ станет равен –20*дБ/дек*.

Таким образом, действительно наклон высокочастотной части $L_{скр}^н(\omega)$ при частоте $\omega_{сп2}$ меняется с –60*дБ/дек* на –20*дБ/дек*, но, как уже говорилось, это не влияет на запасы устойчивости и качество управления.

Определив параметры ЧХ скорректированных звеньев обратной связи, необходимо на основании выражения (3.42) вычислить ФЧХ скорректированной разомкнутой системы. В нашем случае с учетом полученного выражения для $W_{ос}^н(jw)$ ФЧХ скорректированной разомкнутой системы определяется формулой:

$$\begin{aligned}\varphi_{скр}(\omega) = \varphi_к(\omega) - \varphi_{ос}(\omega) = 2\mathrm{arctg}(\omega T_{из}) - 180° - \left(2\mathrm{arctg}(\omega T_2) - \mathrm{arctg}(\omega T_1)\right) = \\ = 2\mathrm{arctg}(\omega T_{из}) - 180° - 2\mathrm{arctg}(\omega T_2) + \mathrm{arctg}(\omega T_1).\end{aligned} \qquad (3.61)$$

Результаты вычислений ФЧХ сведены в таблицу 3.1.

График $\varphi_{скр}(\omega)$ приведен на рисунке 3.10. По графикам $L_{скр}^н(\omega)$ и $\varphi_{скр}(\omega)$ можно выполнить оценку запасов устойчивости АСУТ.

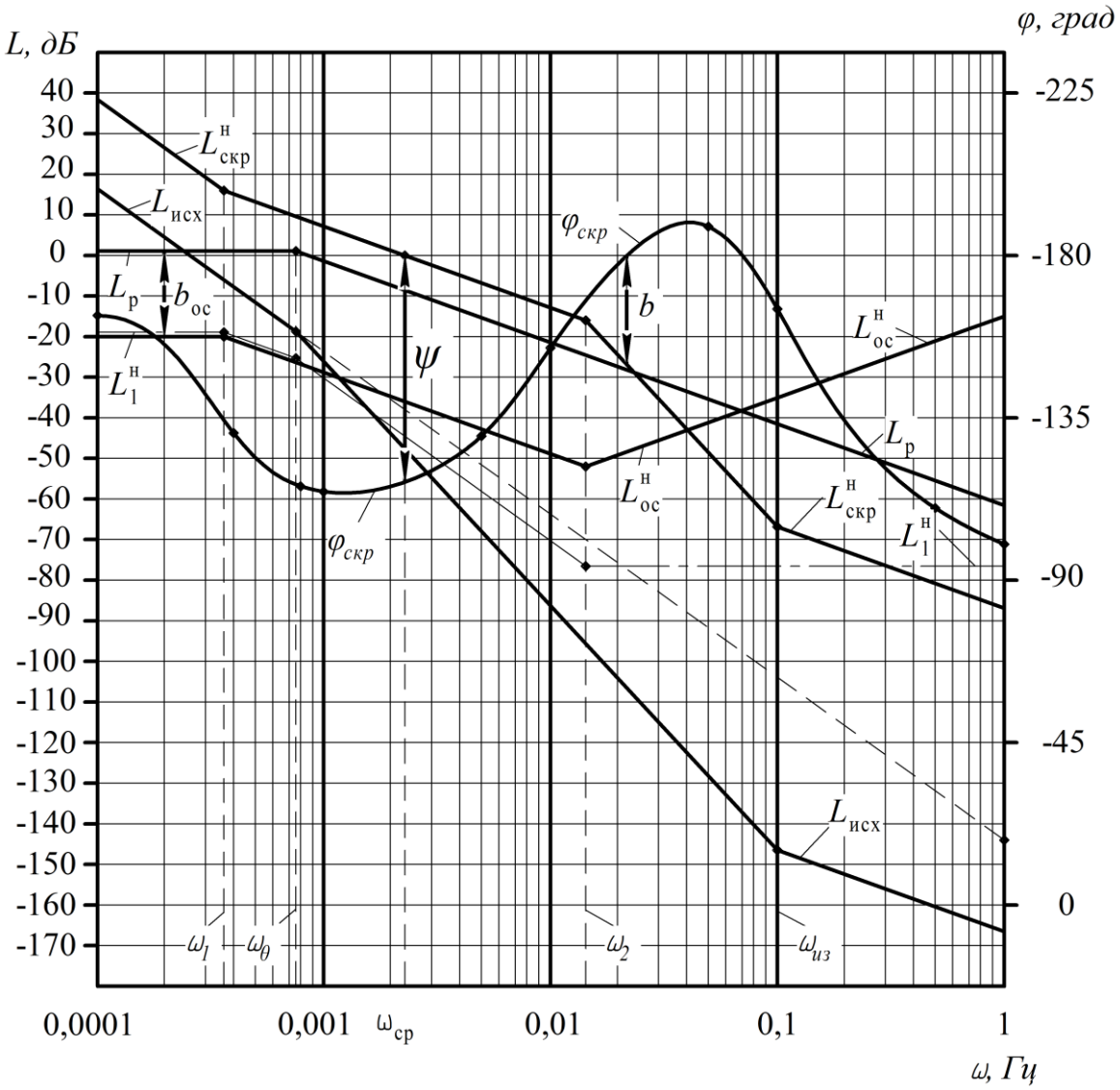


Рисунок 3.10 – ЛАЧХ для нахождения новой ЛАЧХ скорректированной системы

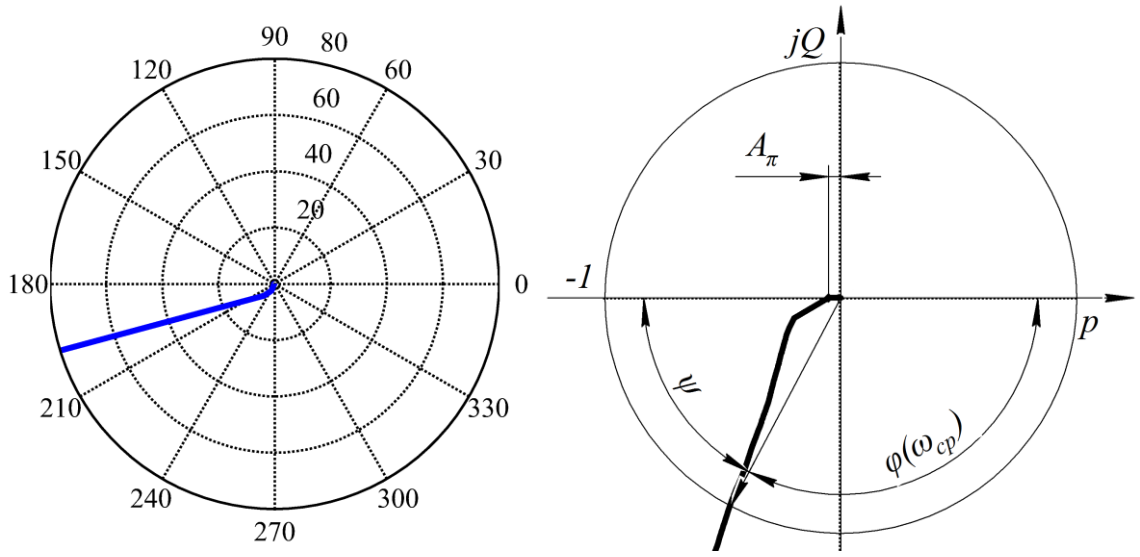
Запас устойчивости по амплитуде b скорректированной разомкнутой системы представляет собой значение $L^{н}_{скр}(\omega_{ср}) = 20\lg A_{\pi}$ на частоте среза $\omega_{ср}$, при которой значение ЛФЧХ системы $\varphi^{н}_{скр}(\omega_{ср}) = -180^{\circ}$. Из рисунка 3.10 можно сделать вывод, что запас устойчивости по амплитуде составляет $b = -28 дБ$ и удовлетворяет условию $|b| \geq 6 дБ$.

Таблица 3.1

Рассчитанные значения ФЧХ АСУТ с комбинированным регулятором

Частота, *Гц*	$2\mathrm{arctg}(\omega T_{из})$, *град*	$2\mathrm{arctg}(\omega T_2)$, *град*	$\mathrm{arctg}(\omega T_1)$, *град*	$\varphi_{скр}(\omega)$, *град*
0,0001	0,114	0,88	17,35	-163,42
0,0004	0,46	3,52	51,34	-131,72
0,0008	0,92	7,04	68,2	-117,92
0,001	1,14	8,8	72,26	-115,4
0,005	5,72	42	86,33	-129,95
0,01	11,42	75,14	88,17	-155,55
0,05	53,12	150,86	89,63	-188,11
0,1	90	165,18	89,82	-165,36
0,5	157,38	177,02	89,96	-109,68
1	168,58	178,5	89,98	-99,94

На рисунке 3.11 приведен годограф разработанной АСУТ и показаны запасы устойчивости по АФХ.



а) б)

а) – годограф АСУТ; б) – увеличенное изображение годографа АСУТ

Рисунок 3.11 – Определение запасов устойчивости по АФХ разомкнутой АСУТ

Запас устойчивости по фазе ψ представляет собой значение ЛФЧХ при частоте среза $\varphi^{н}_{скр}(\omega_{ср})$. Данные рисунков 3.10 и 3.11 свидетельствуют, что запас устойчивости системы по фазе составляет $\psi = -55^{\circ}$, что меньше допустимого значения $\psi = -30^{\circ}$ и, таким образом запас устойчивости по фазе также является достаточным.

Перейдем в найденных передаточных функциях изодромных звеньев, определяемой выражением (3.29) и звеньев обратной связи, определяемой (3.57), найденных в процессе синтеза регулятора из области оператора Лапласа p во временную область. Для такого перехода в этих выражениях достаточно заменить оператор p на d/dt. В соответствии с этим запишем дифференциальные уравнения, связывающее сигналы на выходе и входе изодромных звеньев и звеньев обратной связи

$$U_{из} T^2_{из} \frac{d^2 U_{рег}}{dt^2} = k^2_{из} \left(T^2_{из} \frac{d^2 U_з}{dt^2} + 2T_{из} \frac{dU_з}{dt} + U_з \right). \qquad (3.62)$$

где $U_{из}$ – сигнал на выходе изодромных звеньев, *В*;

$U_з$ – сигнал на входе изодромных звеньев, *В*;

$k_{из}$, $T_{из}$ – параметры изодромных звеньев, которые были определены в процессе решения задачи синтеза комбинированного регулятора.

$$U_{ос} \left(T_1 \frac{dU_{иу}}{dt} + 1 \right) = k_{ос} \left(T_2 \frac{dU_{иу}}{dt} + 1 \right)^2, \qquad (3.63)$$

где $U_{ос}$ – сигнал на выходе звеньев обратной связи, *В*;

$U_{иу}$ – сигнал на входе звеньев обратной связи, *В*;

$k_{ос}$, T_1, T_2 – параметры звеньев обратной связи, которые были определены в процессе решения задачи синтеза комбинированного регулятора.

3.3.3 Определение критериев качества процесса управления линеаризованной АСУТ с комбинированным регулятором

Устойчивая система при отработке различных воздействий может оказаться недостаточно точной с недопустимо медленно затухающими переходными процессами. Любая САУ должна обладать еще достаточным качеством процессов управления, то есть обеспечивать необходимую точность работы при установившихся и переходных режимах. Качество процессов управления оценивают критериями, значения которых определяют по графикам переходных процессов, вызванных задающими и возмущающими воздействиями.

К критериям качества процессов управления относятся [105]:

1. Ошибка в установившемся режиме, Δ_y – ее используют для оценки точности работы САУ в установившемся режиме.
2. Характер переходного процесса – оценивают по виду переходной функции $h(t)$, которая может монотонной, апериодической или колебательной.
3. Время управления (время переходного процесса), t_p – время, в течение которого, начиная с момента приложения воздействия $1(t)$ к системе, отклонения переходной функции $h(t)$ от ее установившегося значения $h(\infty)$ будут меньше заданной величины: $|h(t)-h(\infty)|100 \le \varepsilon$, $\varepsilon = 1-5\%$.
4. Перерегулирование, σ – максимальное относительное отклонение переходной функции от установившегося значения, выражаемое в процентах:

$$\sigma = \frac{h_б - h(\infty)}{h(\infty)} 100.$$

5. Крутизна переднего фронта переходной функции оценивается значением производной $\left[dh(t)/dt\right]_{\max}$ в начале переходного процесса, то есть при $t \to 0$
6. Колебательность переходного процесса определяет характер его затухания и оценивается числом колебаний управляемой величины за время

управления t_p, определяемое числом минимумов кривой $h(t)$ за время t_p.

На первом этапе определим показатели качества переходного процесса, который описывается алгебраическими и дифференциальными уравнениями, связывающими все сигналы разрабатываемой линеаризованной АСУТ. Для получения системы дифференциальных уравнений, описывающих разработанную линеаризованную АСУТ используем полученные ранее уравнения (3.1), (3.2), (3.3), (3.8), (3.11), (3.15) и (3.21), которые связывают сигналы на выходе и входе каждого из функциональных элементов разработанной АСУТ. В итоге система дифференциальных уравнений примет вид

$$\begin{cases} \Delta U_з^{'} = \Delta U_з - \Delta U_{ИУ}, \\ \Delta U_{из} T_{из}^2 \dfrac{d^2 \Delta U_{рег}}{dt^2} = k_{из}^2 \left(T_{из}^2 \dfrac{d^2 \Delta U_з}{dt^2} + 2T_{из} \dfrac{d\Delta U_з}{dt} + \Delta U_з \right), \\ \Delta f_1 = k_{ПЧ} \Delta U_{БО}, \\ \Delta G_{вз} = k_{ИсУ} \Delta f_1, \\ T_\theta \dfrac{d\Delta\theta}{dt} + \Delta\theta = 156,25 G_{вз} - 248,75, \\ \Delta U_{ИУ} = k_{ИУ} \Delta\theta. \\ \Delta U_{ос} \left(T_1 \dfrac{d\Delta U_{иу}}{dt} + 1 \right) = k_{ос} \left(T_2 \dfrac{d\Delta U_{иу}}{dt} + 1 \right)^2. \end{cases} \tag{3.64}$$

Полученную систему дифференциальных уравнений (3.62) решим с использованием программного пакета Matlab Simulink методом численного интегрирования Адамса-Башворта-Мултона. Это адаптивный метод, который может обеспечить высокую точность решения и не требует понижения степени производной. Результаты моделирования, полученные в программном пакете Matlab Simulink приведены на рисунке 3.21.

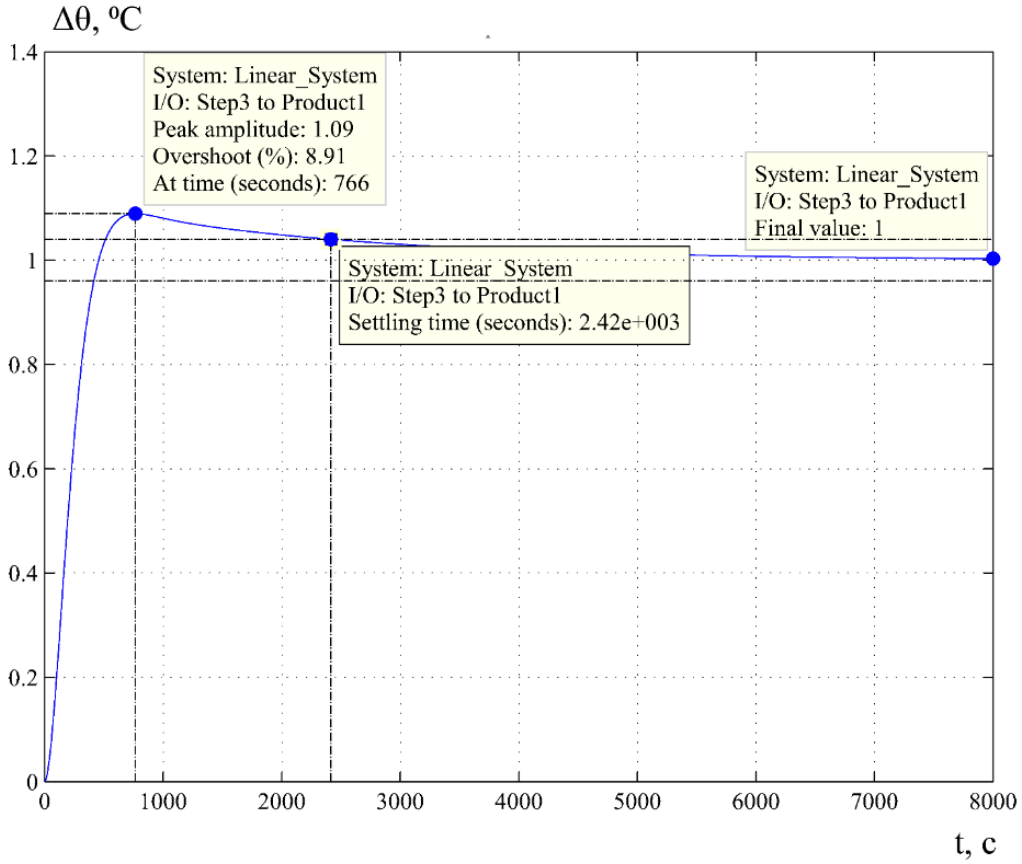


Рисунок 3.21 – Переходный процесс в скорректированной замкнутой АСУТ при единичном скачке

В соответствии с результатами моделирования разработанной АСУТ, приведенными на рисунке 3.21, показатели качества управления имеют следующие значения:

– характер переходного процесса – апериодический,

– ошибка в установившемся режиме равна 0,

– время управления $t_p = 3650\,c$ при $\varepsilon = 5\%$,

– перерегулирование $\sigma = 12{,}3\%$,

– крутизна переднего фронта переходной функции составляет $\left[dh(t)/dt\right]_{\max} = 1{,}55 \cdot 10^{-3} {}^{\circ}C \cdot c$,

– колебательность равна 0.

3.3.4 Определение критериев качества процесса управления в нелинейной АСУТ с комбинированным регулятором

Известно, что колебания нелинейных систем отличаются рядом особенностей [91, 118]. В таких системах, в частности, не выполняется принцип суперпозиции, т. е. реакция системы на одновременное действие двух возмущений не равна сумме реакций на каждое из этих возмущений, а также изменение масштаба возмущения не приводит к пропорциональному изменению масштаба реакции. Кроме того, в них возможно существование нескольких положений равновесия; свободные колебания неизохронны, т. е. частота свободных колебаний зависит от начальных условий; амплитуды вынужденных колебаний неоднозначно зависят от частоты возмущения; возможно возникновение субгармонических и супергармонических (ультрагармонических) колебаний, возможность появления автоколебательных режимов, а также явлений захватывания, затягивания, вибрационной линеаризации и т. п.

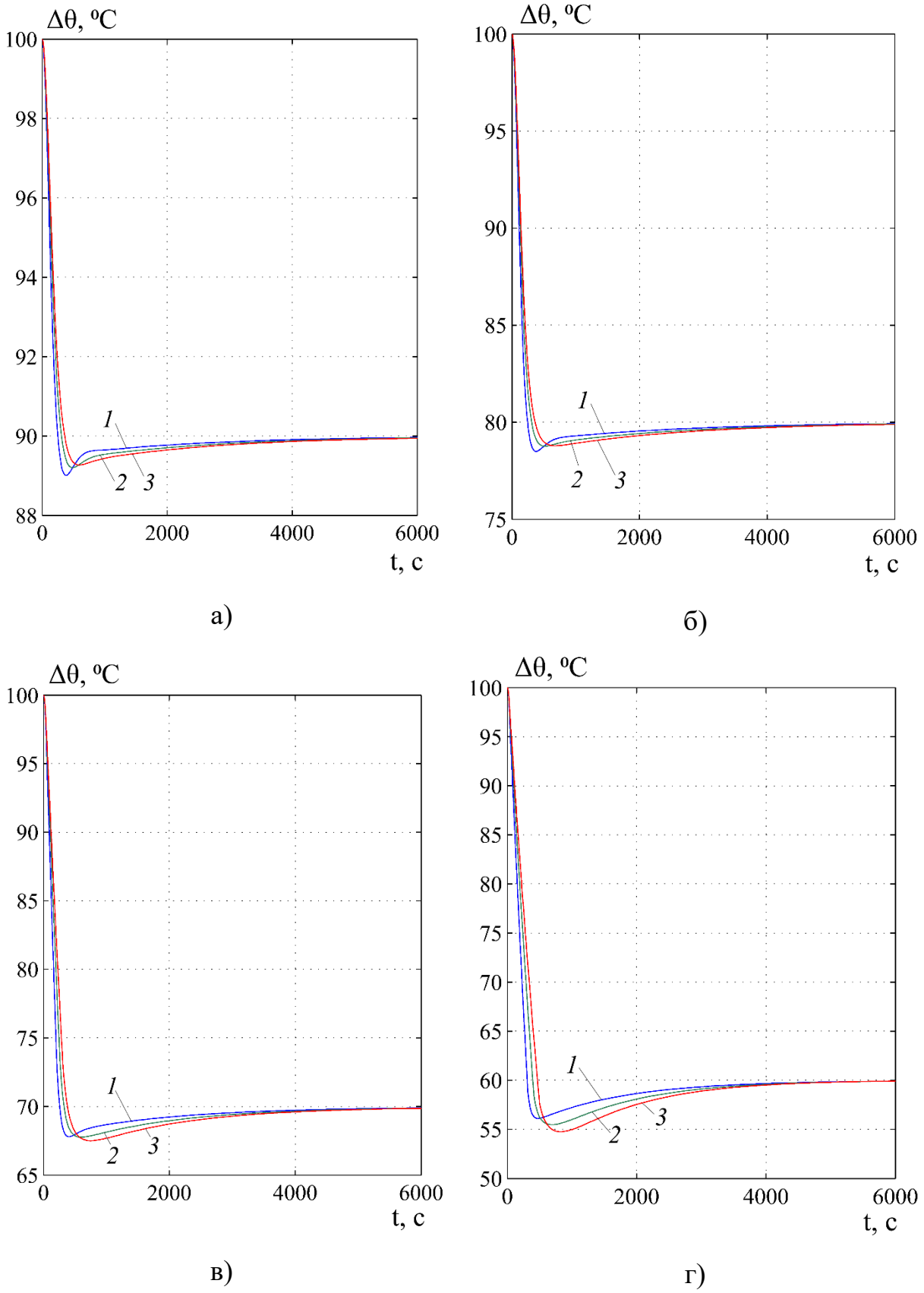
Поэтому для определения показателей качества управления в разработанной нелинейной АСУТ необходимо выполнить численное интегрирование системы нелинейных дифференциальных уравнений (3.69), которая будет учитывать нелинейность изменения коэффициента усиления ТАД как объекта управления температурой, определяемого выражением (3.2) и дополнена уравнением (3.17), которое учитывает ограничение выходного напряжения регулятора $U_{из}$, ограничивающее максимальное значение частоты вращения вала исполнительного устройства (вентилятора охлаждения) и подачи охлаждающего воздуха при различных начальных условиях и при разных скачках задающего воздействия. В итоге система уравнений нелинейной АСУТ примет вид:

$$\begin{cases} \Delta U_з = U_з - U_{иу}, \\ U_{из} T_{из}^2 \dfrac{d^2 U_{рег}}{dt^2} = k_{из}^2 \left(T_{из}^2 \dfrac{d^2 U_з}{dt^2} + 2T_{из} \dfrac{dU_з}{dt} + U_з \right), \\ \Delta U_{БО} = \begin{cases} U_{рег} - U_{ос}, \text{ при } U_{рег} \le U_{рег}^{\max}, \\ U_{рег}^{\max} - U_{ос}, \text{ при } U_{рег} > U_{рег}^{\max}. \end{cases} \\ f_1 = k_{ПЧ} U_{БО}, \\ G_{вз} = k_{ИсУ} f_1, \\ T_\theta \dfrac{d\theta}{dt} + \theta = 156,25 G_{вз} - 248,75, \\ U_{ИУ} = k_{ИУ} \theta. \\ U_{ос} \left(T_1 \dfrac{dU_{иу}}{dt} + 1 \right) = k_{ос} \left(T_2 \dfrac{dU_{иу}}{dt} + 1 \right)^2. \end{cases} \tag{3.65}$$

При помощи программного пакета Matlab Simulink решим полученную систему дифференциальных уравнений методом численного интегрирования Адамса-Башворта-Мултона.

Результаты моделирования разработанной нелинейной АСУТ, полученные с использованием программного пакета Matlab Simulink приведены на рисунках 3.22 – 3.25.

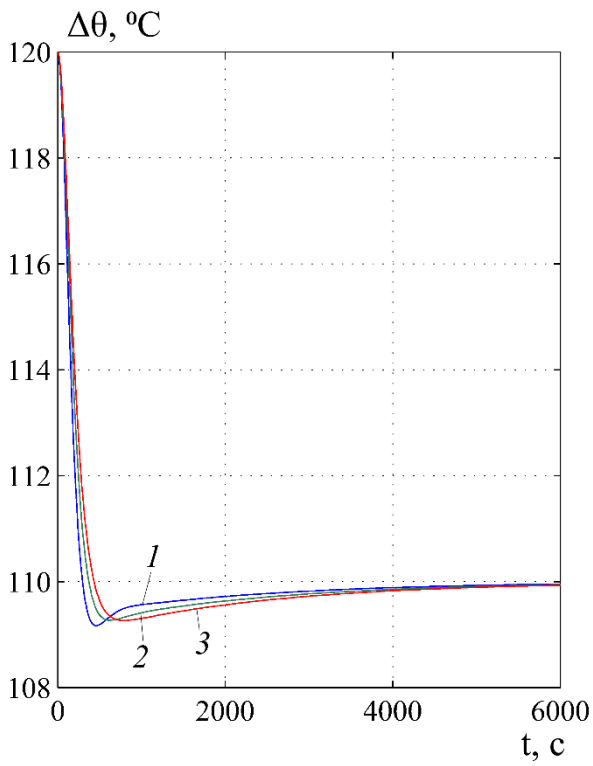
На рисунках 3.26 – 3.29 приведены поверхности, которые отражают зависимость критериев качества процессов управления для нелинейной АСУТ комбинированной коррекции при множестве различных начальных условиях, которые полностью определяют динамические качества системы во всем диапазоне рабочих режимов ТАД.



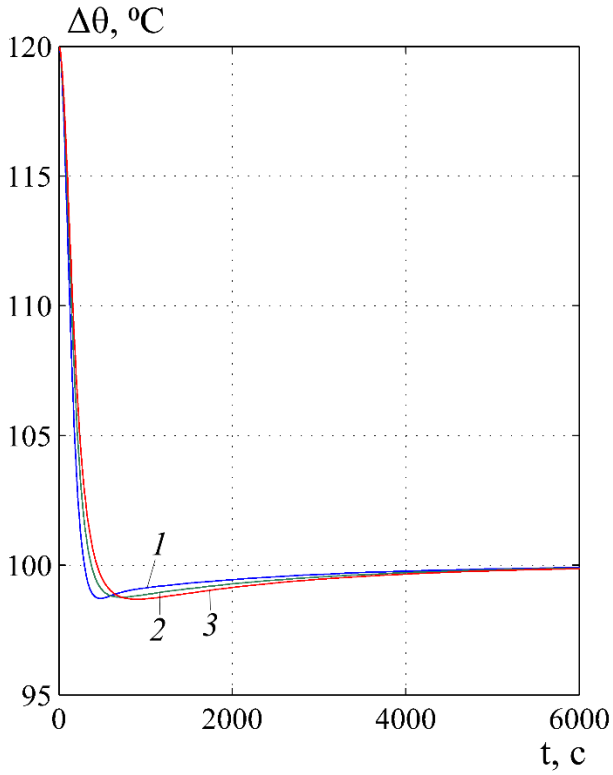
а) $\Delta\theta = 10\,°C$, б) $\Delta\theta = 20\,°C$, в) $\Delta\theta = 30\,°C$, г) $\Delta\theta = 40\,°C$;

$1 - I_s^* = 0{,}5$, $2 - I_s^* = 0{,}8$, $3 - I_s^* = 1{,}0$

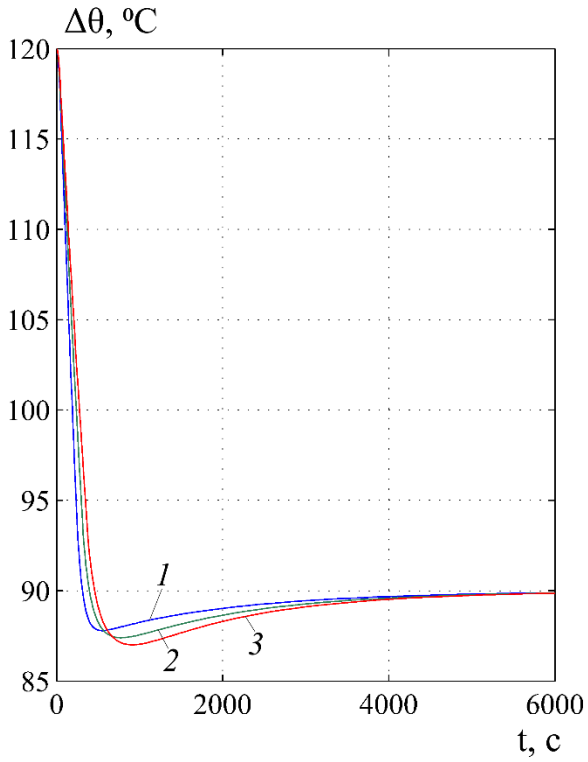
Рисунок 3.22 – Переходные процессы в нелинейной АСУТ при $\theta_{нач} = 100°C$



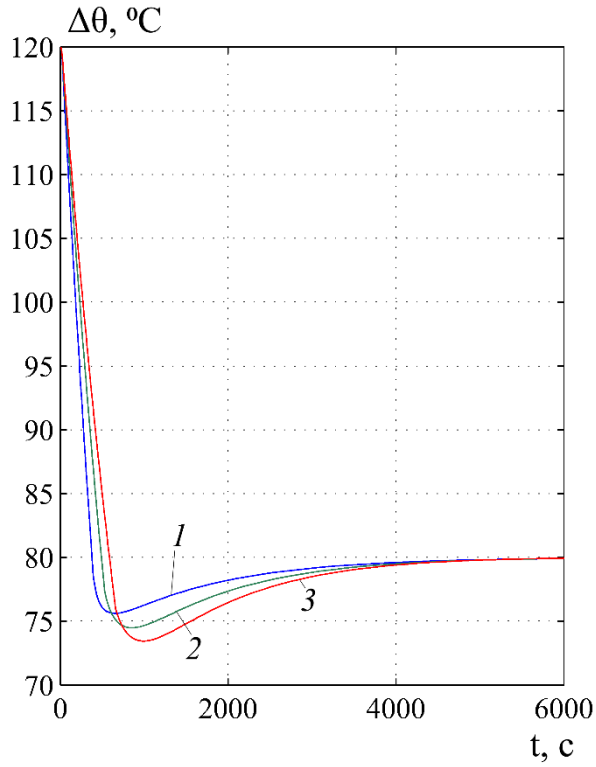
а)



б)



в)

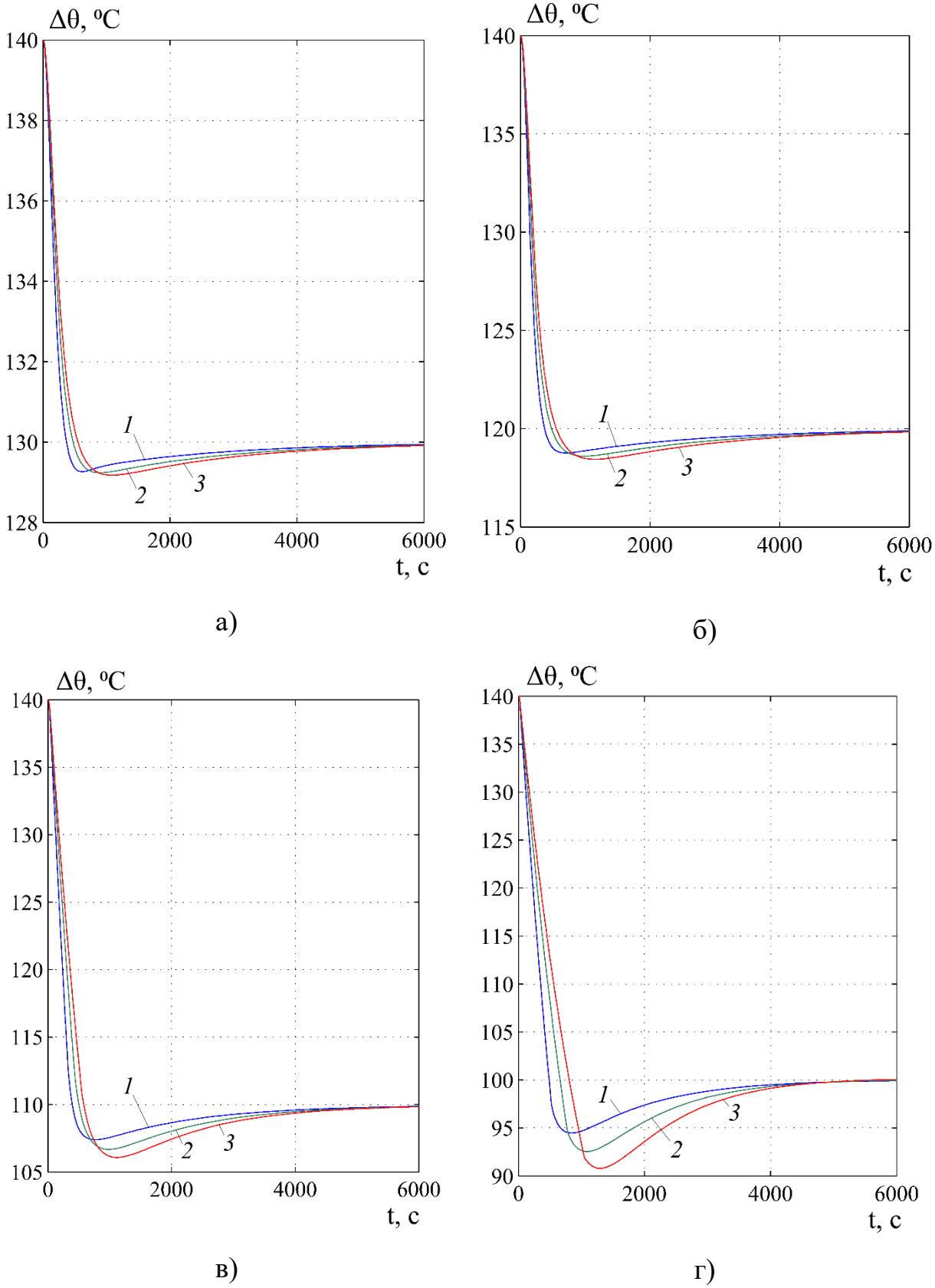


г)

а) $\Delta\theta = 10\,°C$, б) $\Delta\theta = 20\,°C$, в) $\Delta\theta = 30\,°C$, г) $\Delta\theta = 40\,°C$;

$1 - I_s^* = 0{,}5$, $2 - I_s^* = 0{,}8$, $3 - I_s^* = 1{,}0$

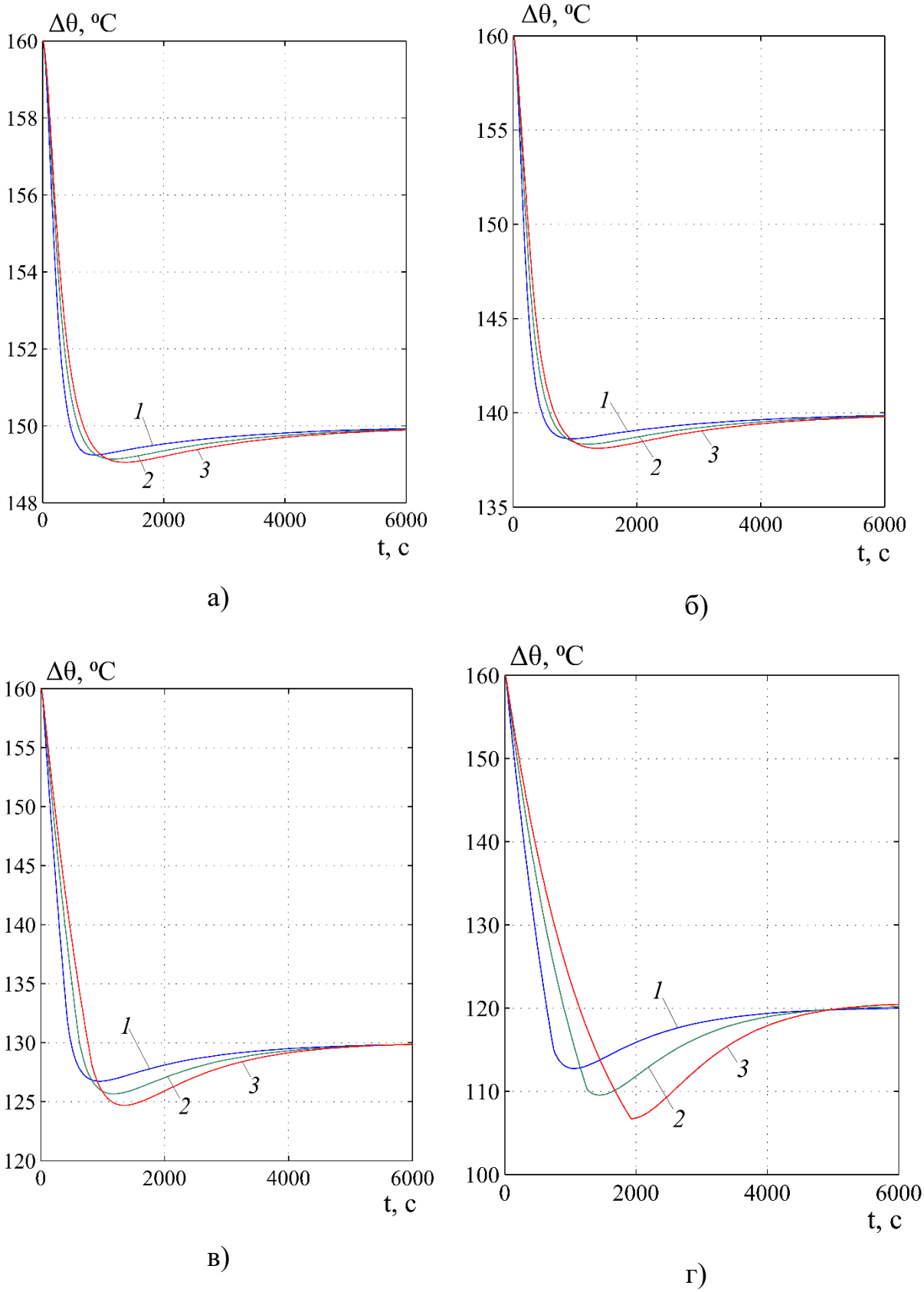
Рисунок 3.23 – Переходные процессы в нелинейной АСУТ при $\theta_{нач} = 120°C$



а) $\Delta\theta = 10\,°C$, б) $\Delta\theta = 20\,°C$, в) $\Delta\theta = 30\,°C$, г) $\Delta\theta = 40\,°C$;

$1 - I_s^* = 0{,}5$, $2 - I_s^* = 0{,}8$, $3 - I_s^* = 1{,}0$

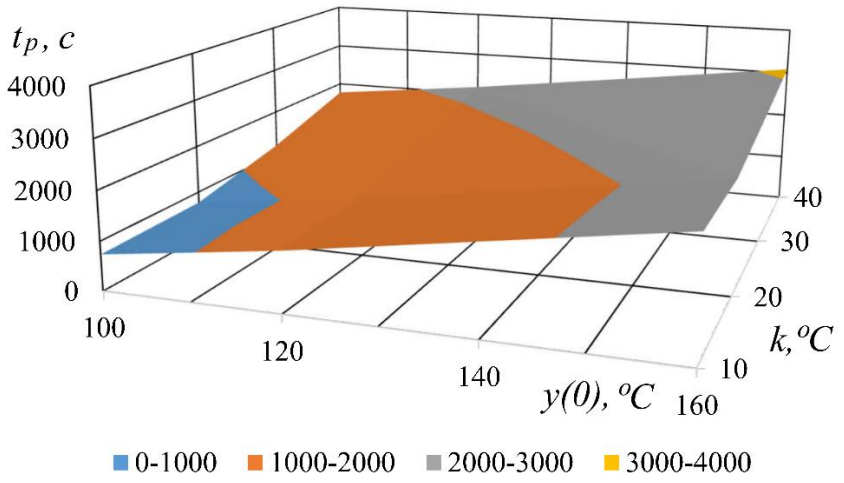
Рисунок 3.24 – Переходные процессы в нелинейной АСУТ при $\theta_{нач} = 140°C$



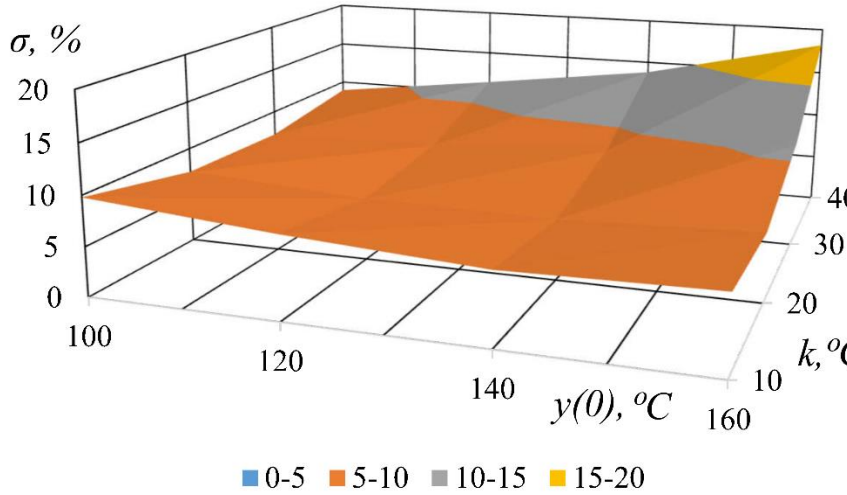
а) $\Delta\theta = 10\,°C$, б) $\Delta\theta = 20\,°C$, в) $\Delta\theta = 30\,°C$, г) $\Delta\theta = 40\,°C$;

$1 - I_s^* = 0{,}5$, $2 - I_s^* = 0{,}8$, $3 - I_s^* = 1{,}0$

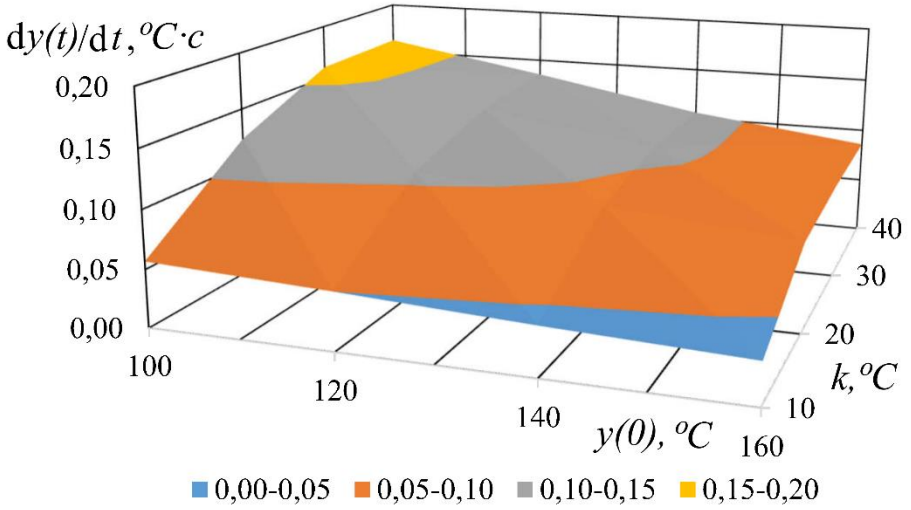
Рисунок 3.25 – Переходные процессы в нелинейной АСУТ при $\theta_{нач} = 160°C$



а)



б)

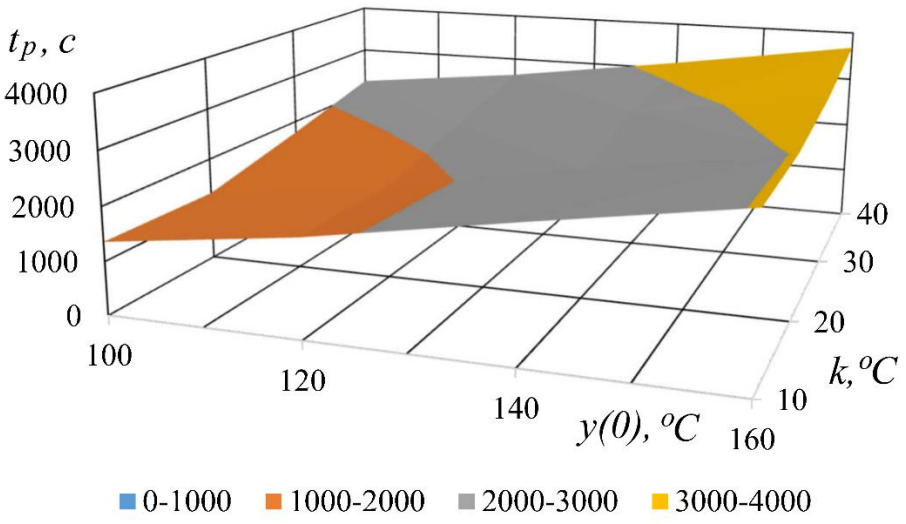


в)

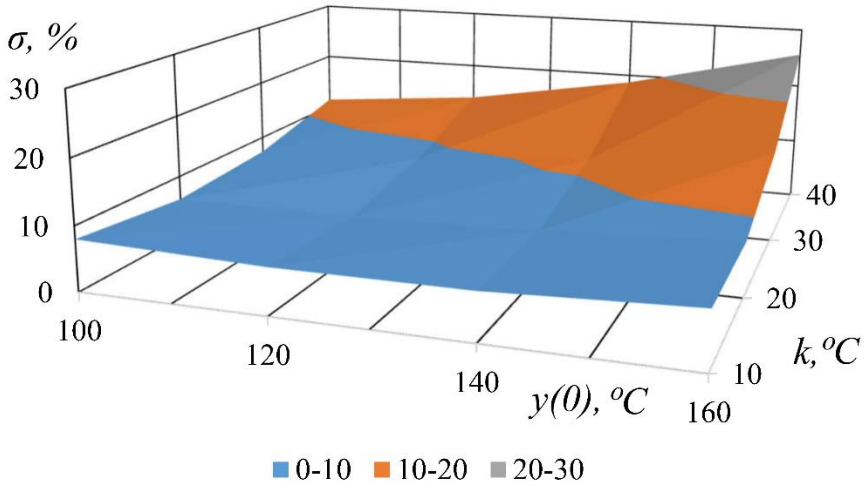
а) время переходного процесса t_p, c; б) перерегулирование σ, %;

в) крутизна переднего фронта $\mathrm{d}y(t)/\mathrm{d}t$, $°C \cdot c$

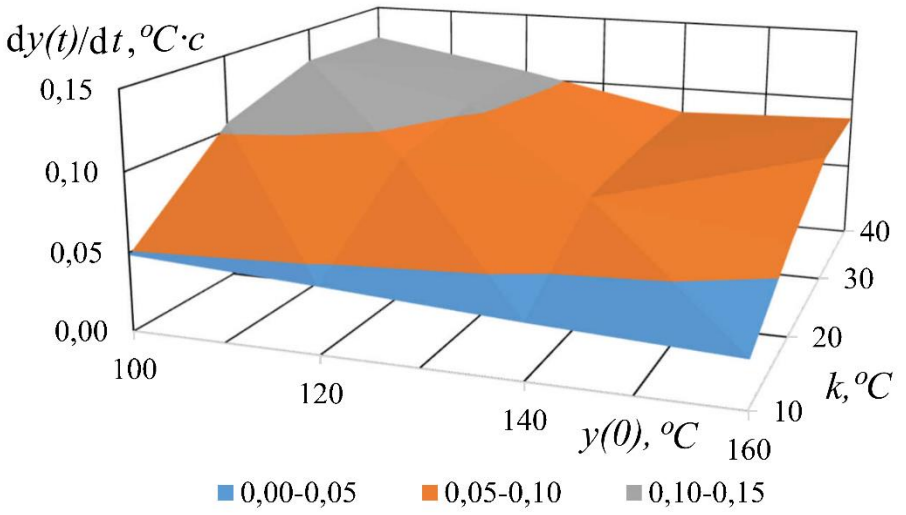
Рисунок 3.26 – Зависимости критериев качества нелинейной АСУТ комбинированной коррекции от величины скачка температуры задания *k* и начальной температуры ТАД *y(0)* при $I_s^* = 0{,}5$



а)



б)

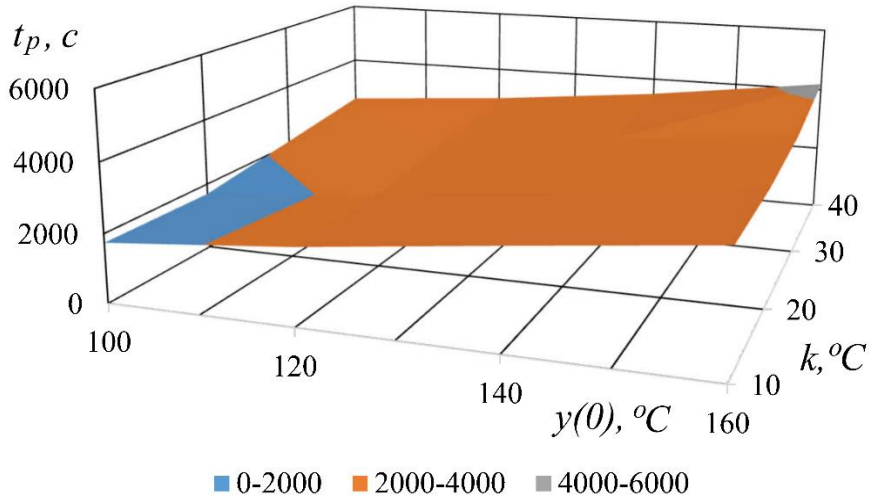


в)

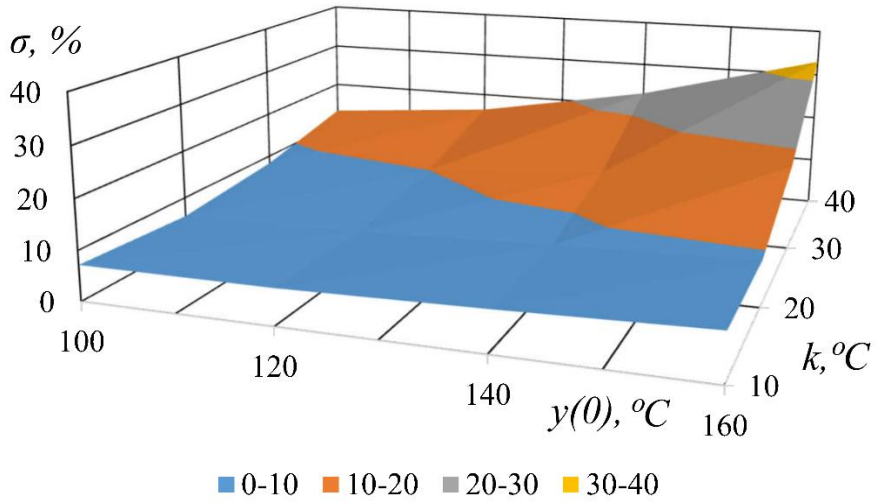
а) время переходного процесса t_p, c; б) перерегулирование σ, %;

в) крутизна переднего фронта $\mathrm{d}y(t)/\mathrm{d}t$, $°C \cdot c$

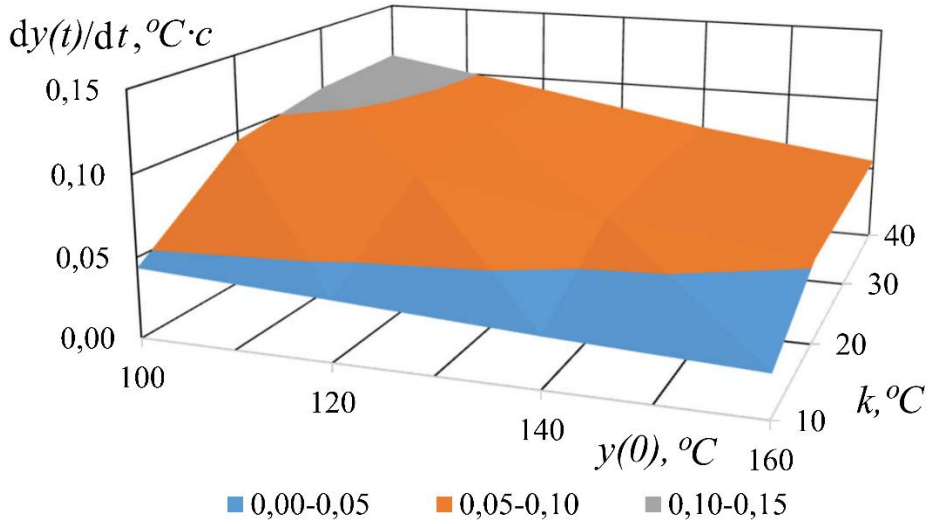
Рисунок 3.27 – Зависимости критериев качества нелинейной АСУТ комбинированной коррекции от величины скачка температуры задания k и начальной температуры ТАД $y(0)$ при $I_s^* = 0{,}8$



а)



б)



в)

а) время переходного процесса t_p, *c*; б) перерегулирование σ, %;

в) крутизна переднего фронта $\mathrm{d}y(t)/\mathrm{d}t$, $°C \cdot c$

Рисунок 3.28 – Зависимости критериев качества нелинейной АСУТ комбинированной коррекции от величины скачка температуры задания *k* и начальной температуры ТАД *y(0)* при $I_s^* = 1{,}0$

На рисунках 3.22 – 3.28 приняты обозначения: $I_s^* = I_s / I_{s\,ном}$ и $\theta_{нач}$ – начальная температура.

Численные значения каждого из критериев качества АСУТ комбинированной коррекции приведены в приложении В.

Анализ рисунков 3.22 – 3.28 позволяет сделать вывод о том, что с увеличением задания возрастает время переходного процесса.

В таблице 3.2 приведены сравнительные параметры качества управления линеаризованной и нелинейной АСУТ с комбинированным регулятором. Для нелинейной АСУТ приведены максимальные значения соответствующих параметров качества.

Таблица 3.2

Сравнительные параметры качества управления линеаризованной и нелинейной АСУТ с комбинированным регулятором.

Тип АСУТ	Время переходного процесса t_p, с	Перерегулирование σ, %	Крутизна переднего фронта $\mathrm{d}y(t)/\mathrm{d}t$, $°C \cdot c$
Линеаризованная	3650	12,3	$1{,}55 \cdot 10^{-3}$
Нелинейная	4189	19,3	$1{,}06 \cdot 10^{-3}$
Относительная разница, %	14,8	56,9	46,2

При применении комбинированной коррекции перерегулирование σ и время управления t_p в замкнутой АСУТ увеличивается с ростом задания на температуру. С ростом начальной температуры $\theta_{нач}$ перерегулирование уменьшается, а время управления растет. Чем выше ток нагрузки I_s ТАД тем меньше перерегулирование и выше время управления.

3.3.5 Синтез регулятора АСУТ, настроенной на технический оптимум, определение критериев качества процесса управления линеаризованной системы

Для определения структуры и параметров регулятора воспользуемся настройкой разработанной системы на технический оптимум [7, 39, 45, 46, 48, 114, 116]. Данная настройка обеспечивает время управления $t_p = 4,7T_u$ при перерегулировании $\sigma = 0,043$. Такая настройка оптимальна для множества электроприводов и используется в качестве основной стандартной настройки [45].

При настройке контура управления на технический оптимум его передаточная функция принимает вид

$$W_{скр\,р}^{ТО}(p) = \frac{1}{2T_\mu p(T_\mu p + 1)}, \tag{3.68}$$

То же для замкнутого контура управления:

$$W_{скр\,з}^{ТО}(p) = \frac{1}{2T_\mu p(T_\mu p + 1) + 1}. \tag{3.69}$$

Для обеспечения настройки на технический оптимум в структурную схему, приведенную на рисунке 3.7, необходимо последовательно с регулятором включить фильтр с передаточной функцией $W_\mu(p)$. Передаточная функция фильтра $W_\mu(p)$ определяется выражением:

$$W_\mu(p) = \frac{1}{T_\mu p + 1}, \tag{3.70}$$

где T_μ – наименьшая некомпенсируемая постоянная времени, c; $T_\mu = 300c$.

Согласно рисунку 3.7 найдем передаточную функцию синтезируемого регулятора температуры $W_к(p)$:

$$W_к(p) = \frac{W_{скр\,р}^{ТО}(p)}{W_\mu(p)W_p(p)} = \frac{(T_\mu p + 1)(T_\theta p + 1)}{2T_\mu p(T_\mu p + 1)k_p} = \frac{(T_\theta p + 1)}{2k_p T_\mu p} =$$
$$= \frac{T_\theta}{2k_p T_\mu} + \frac{1}{2k_p T_\mu p} = \frac{1312}{2 \cdot 1,1339 \cdot 300} + \frac{1}{2 \cdot 1,1339 \cdot 300p} = 1,93 + \frac{1}{680,34p}. \tag{3.71}$$

Полученная передаточная функцию (3.71) регулятора температуры $W_{рт}(p)$ можно получить при параллельном соединение двух звеньев: пропорционального (с постоянным коэффициентом усиления k_y) и интегрального (с постоянной времени интегрирования $T_и$). Значит можно сделать вывод о том, что полученный регулятор температуры АСУТ представляет собой ПИ-регулятор.

Дифференциальное уравнение, связывающее сигнал выхода со входом ПИ-регулятора имеет вид

$$\frac{U_{рег}}{\Delta U_з} = \frac{k_y T_и p + 1}{T_и p} \frac{1}{T_\mu p + 1}; \qquad (3.72)$$
$$U_{рег} T_и p (T_\mu p + 1) = \Delta U_з (k_y T_и p + 1).$$

Перейдем в выражении (3.72) в область времени заменив оператор Лапласа *p* на оператор дифференцирования *d/dt*. Тогда дифференциальное уравнение, связывающие сигналы выхода и входа ПИ-регулятора примет вид:

$$U_{рег} T_и p (T_\mu p + 1) = \Delta U_з (k_y T_и p + 1)$$
$$T_и T_\mu \frac{d^2 U_{рег}}{dt^2} + T_и \frac{dU_{рег}}{dt} = k_y T_и \frac{d\Delta U_з}{dt} + \Delta U_з; \qquad (3.73)$$
$$\frac{d^2 U_{рег}}{dt^2} = \left(\left(k_y T_и \frac{d\Delta U_з}{dt} + \Delta U_з \right) - T_и \frac{dU_{рег}}{dt} \right) / T_и T_\mu.$$

В итоге система уравнений для линеаризованной АСУТ с ПИ-регулятором, описывающая переходный процесс примет вид

$$\begin{cases} \Delta U_з^{'} = \Delta U_з - \Delta U_{иу}, \\ \dfrac{d^2 \Delta U_{рег}}{dt^2} = \left(\left(k_y T_и \dfrac{d\Delta U_з}{dt} + \Delta U_з \right) - T_и \dfrac{d\Delta U_{рег}}{dt} \right) / T_и T_\mu \\ \Delta G_{вз} = k_{ИсУ} \Delta f_1, \\ T_\theta \dfrac{d\Delta\theta}{dt} + \Delta\theta = 156,25 G_{вз} - 248,75, \\ \Delta U_{иу} = k_{иу} \Delta\theta. \end{cases} \qquad (3.74)$$

Решим полученную систему (3.74) с использованием программного пакета Matlab Simulink методом численного интегрирования Адамса-Башворта-

Мултона. График переходного процесса линеаризованной замкнутой АСУТ, полученный в программном пакете Matlab Simulink приведен на рисунке 3.29.

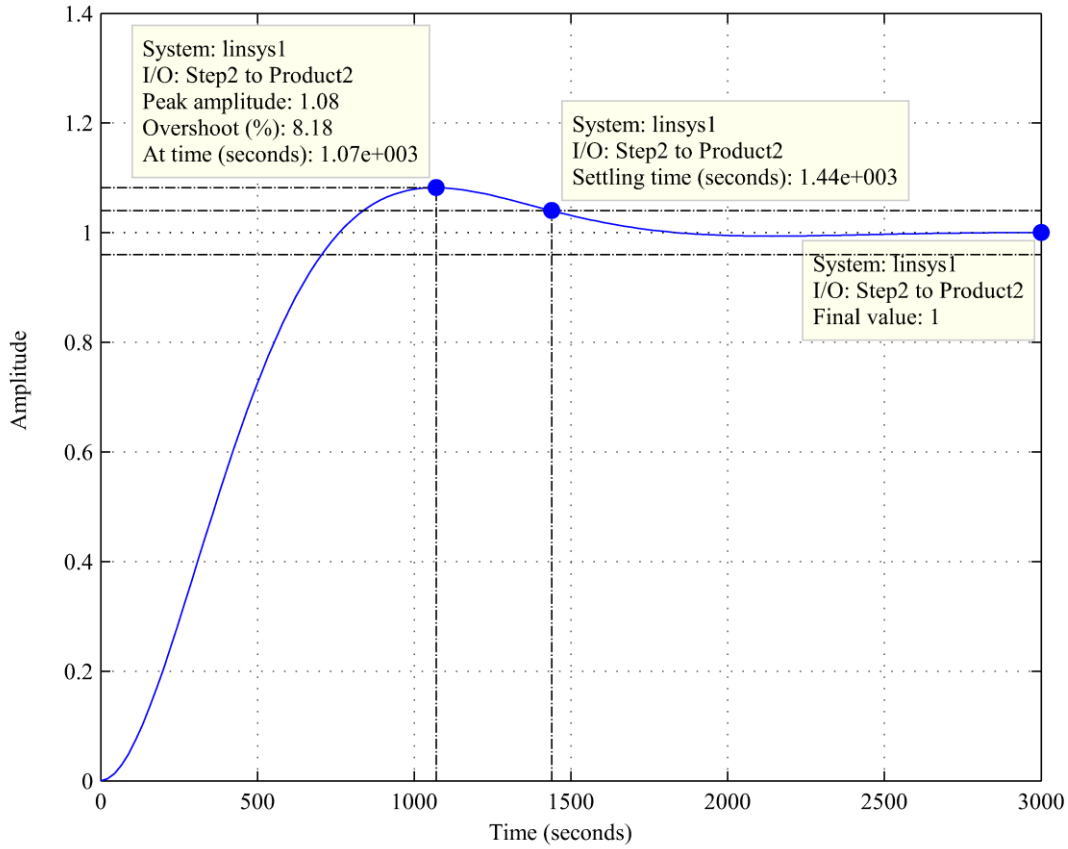


Рисунок 3.29 – График переходного процесса линеаризованной замкнутой АСУТ с ПИ-регулятором

В соответствии с результатами моделирования разработанной АСУТ с ПИ-регулятором, приведенными на рисунке 3.29, показатели качества управления имеют следующие значения:

– характер переходного процесса – апериодический,

– ошибка в установившемся режиме равна 0,

– время управления $t_p = 1440c$ при $\varepsilon = 5\%$,

– перерегулирование $\sigma = 8{,}18\%$,

– крутизна переднего фронта переходной функции составляет $\left[dh(t)/dt\right]_{\max} = 3{,}77 \cdot 10^{-2} {}^{\circ}C \cdot c$,

– колебательность равна 0.

3.3.6 Определение критериев качества процесса управления нелинейной АСУТ, настроенной на технический оптимум

Система уравнений, характеризующих нелинейную АСУТ, настроенную на технический оптимум в соответствии с проведенными в пункте 3.2 исследованиями примет вид:

$$\begin{cases} \Delta U_з = U_з - U_{иу}, \\ U_{БО} = \begin{cases} U_{рег}, \text{при } U_{рег} \le U_{рег}^{\max}, \\ U_{рег}^{\max}, \text{при } U_{рег} > U_{рег}^{\max}. \end{cases} \\ \dfrac{d^2 U_{рег}}{dt^2} = \left(\left(k_у T_и \dfrac{dU_з}{dt} + U_з \right) - T_и \dfrac{dU_{рег}}{dt} \right) / T_и T_\mu \\ G_{вз} = k_{ИсУ} f_1, \\ T_\theta \dfrac{d\theta}{dt} + \theta = 156,25 G_{вз} - 248,75, \\ U_{иу} = k_{иу} \theta. \end{cases} \tag{3.75}$$

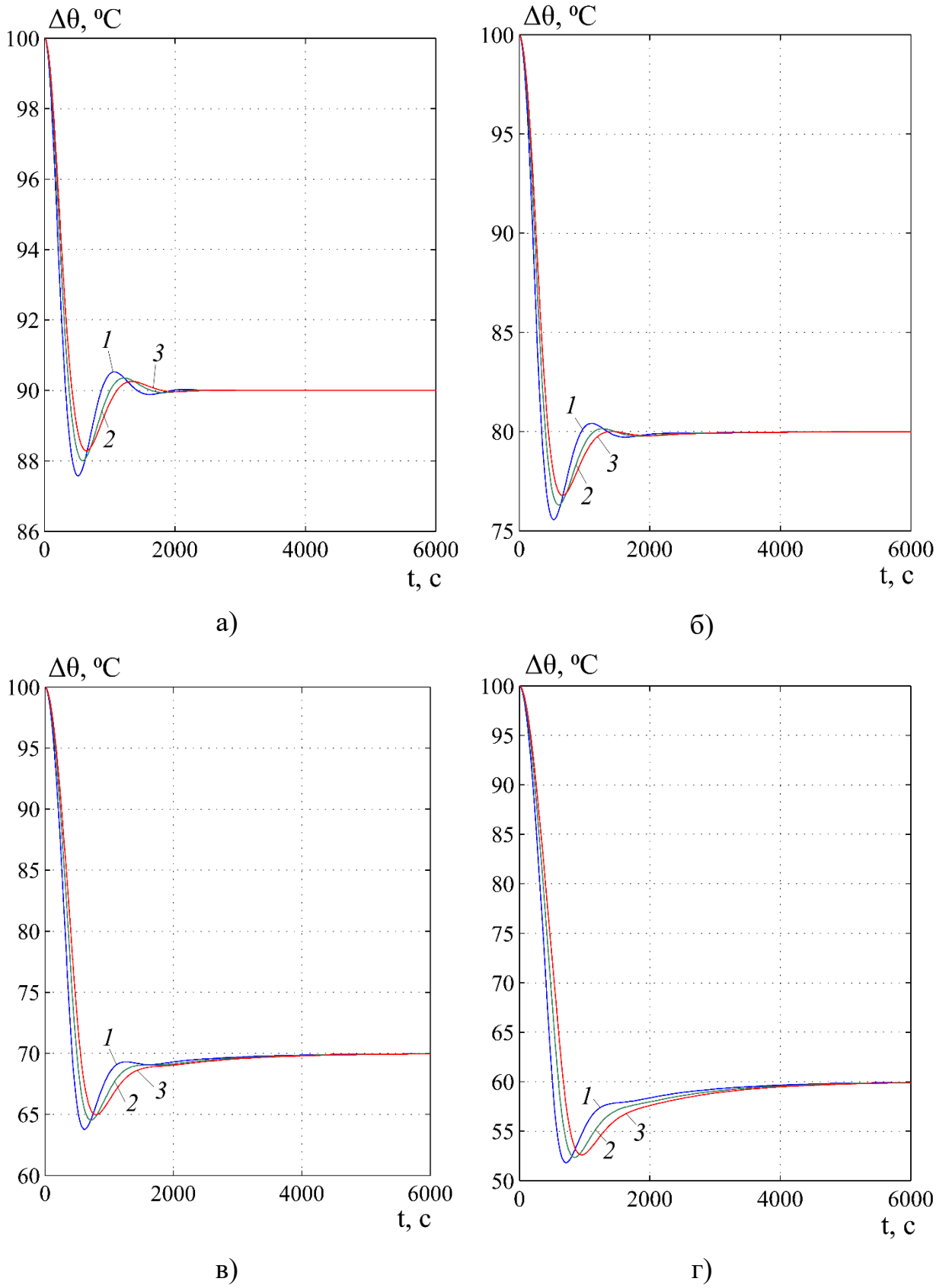
Полученную систему дифференциальных уравнений (3.75) для АСУТ с ПИ-регулятором решим в программном пакете Matlab Simulink методом численного интегрирования Адамса-Башворта-Мултона.

Программа для решения полученной системы дифференциальных уравнений АСУТ приведены в приложении Г.

На рисунках 3.30 – 3.33 приведены результаты моделирования переходных процессов для нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором.

На рисунках 3.34 – 3.36 приведены поверхности, которые отражают зависимость критериев качества процессов управления для нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором при множестве различных начальных условиях, которые полностью определяют динамические качества системы во всем диапазоне рабочих режимов ТАД.

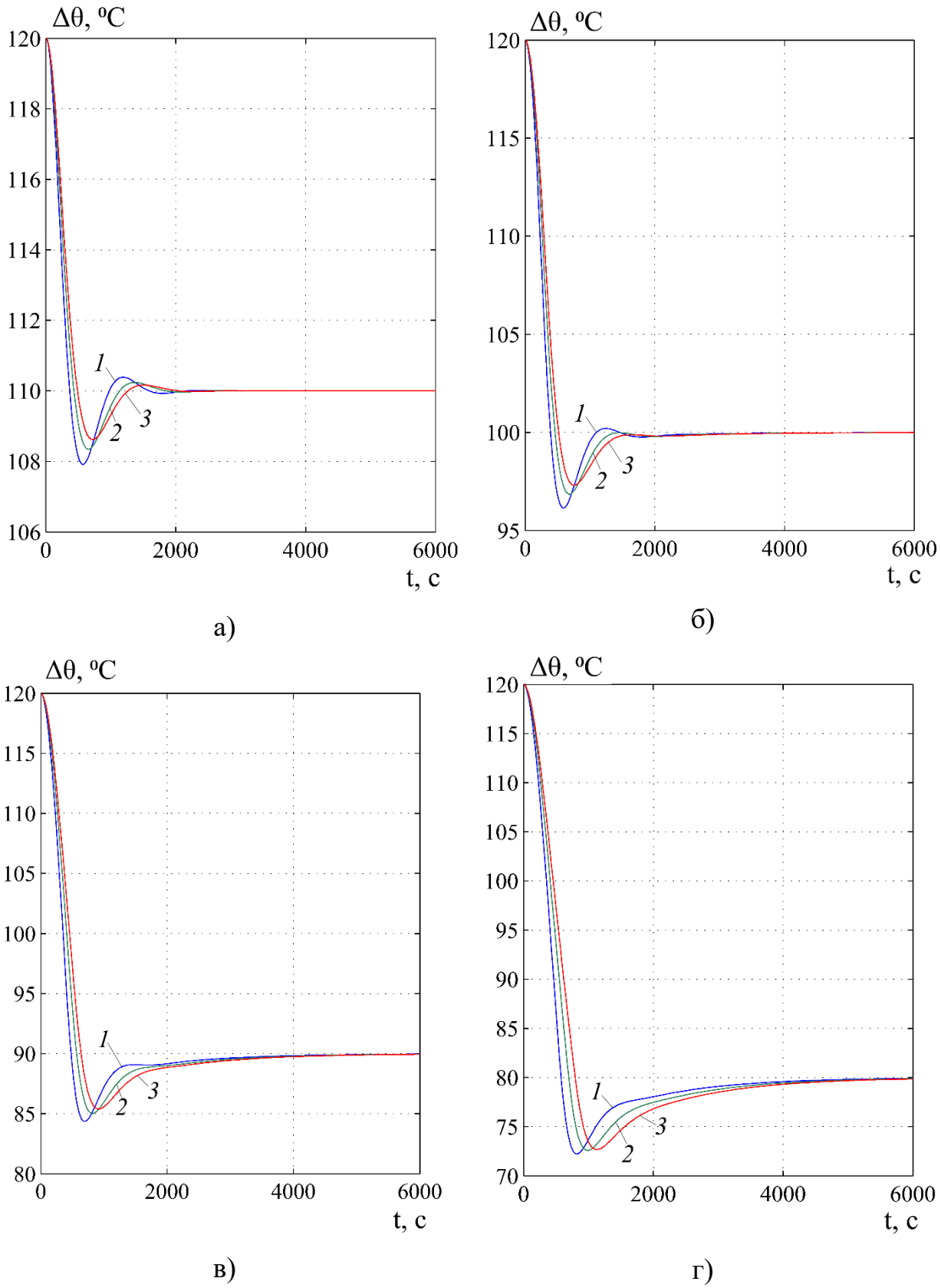
Численные значения каждого из критериев качества АСУТ с ПИ-регулятором приведены в приложении В.



а) $\Delta\theta = 10\,°C$, б) $\Delta\theta = 20\,°C$, в) $\Delta\theta = 30\,°C$, г) $\Delta\theta = 40\,°C$;

$1 - I_s^* = 0{,}5$, $2 - I_s^* = 0{,}8$, $3 - I_s^* = 1{,}0$

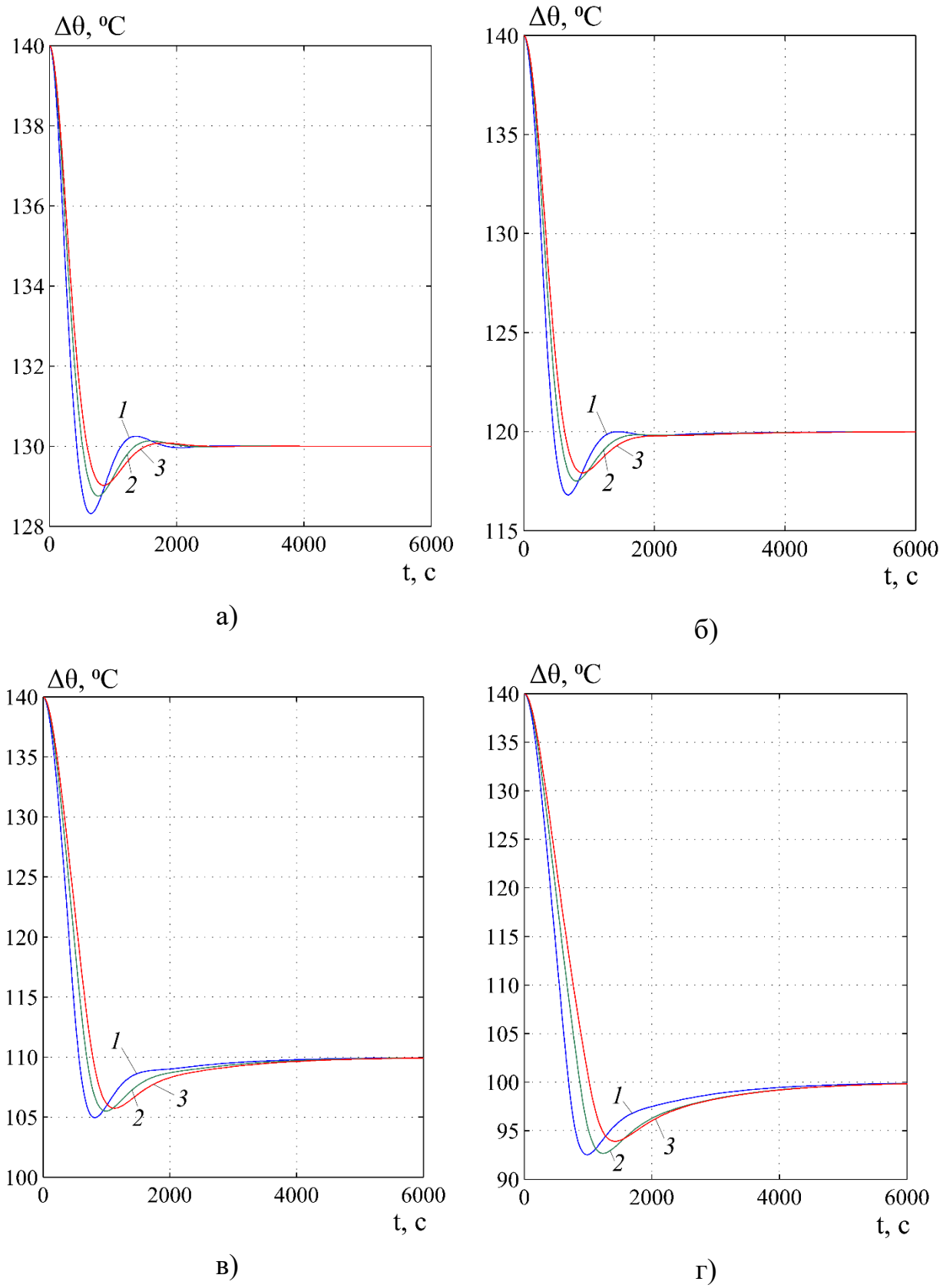
Рисунок 3.30 – Переходные процессы в нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором при $\theta_{нач} = 100°C$



а) $\Delta\theta = 10\,°C$, б) $\Delta\theta = 20\,°C$, в) $\Delta\theta = 30\,°C$, г) $\Delta\theta = 40\,°C$;

$1 - I_s^* = 0{,}5$, $2 - I_s^* = 0{,}8$, $3 - I_s^* = 1{,}0$

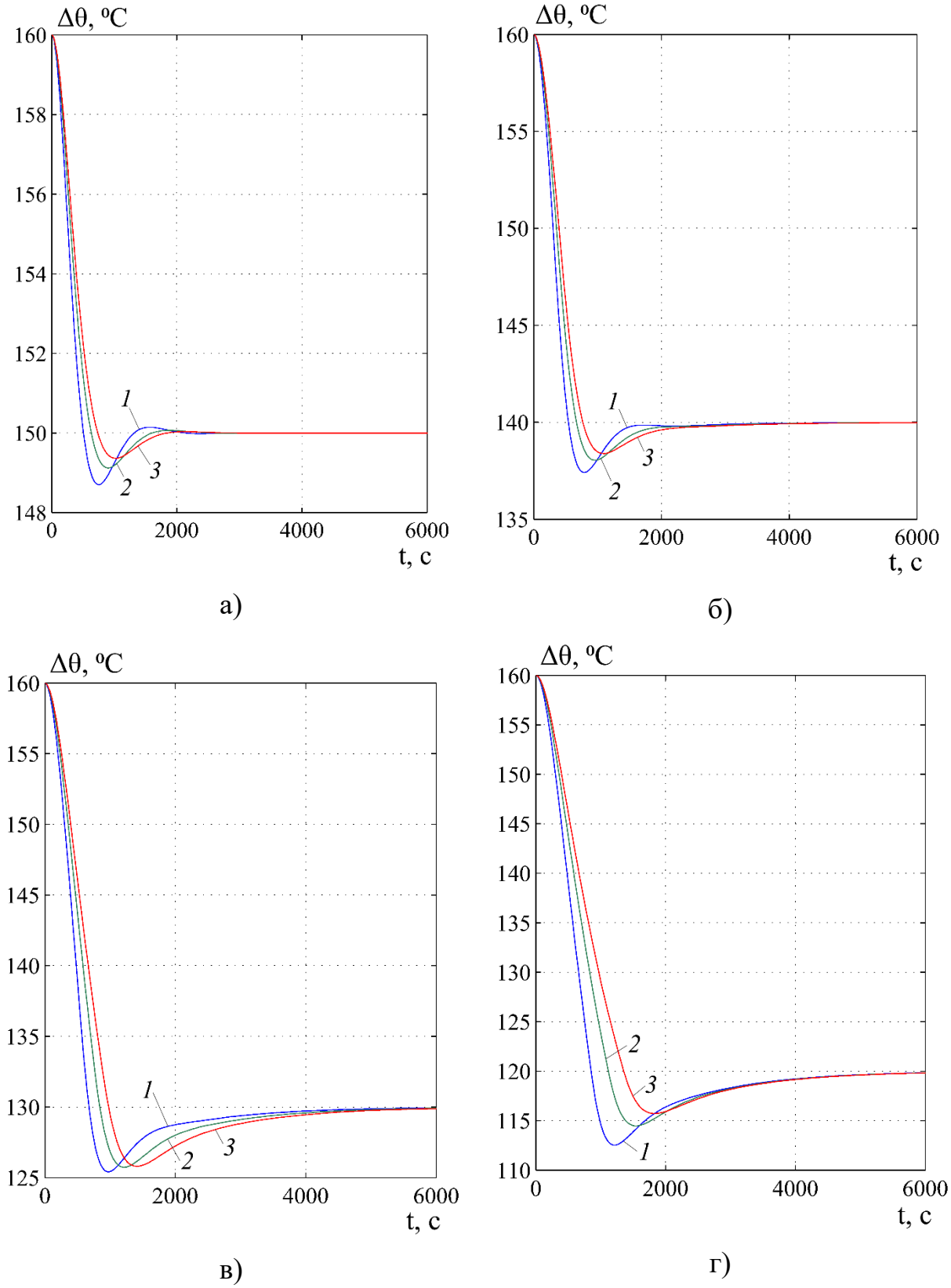
Рисунок 3.31 – Переходные процессы в нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором при $\theta_{нач} = 120°C$



а) $\Delta\theta = 10\,°C$, б) $\Delta\theta = 20\,°C$, в) $\Delta\theta = 30\,°C$, г) $\Delta\theta = 40\,°C$;

$1 - I_s^* = 0{,}5$, $2 - I_s^* = 0{,}8$, $3 - I_s^* = 1{,}0$

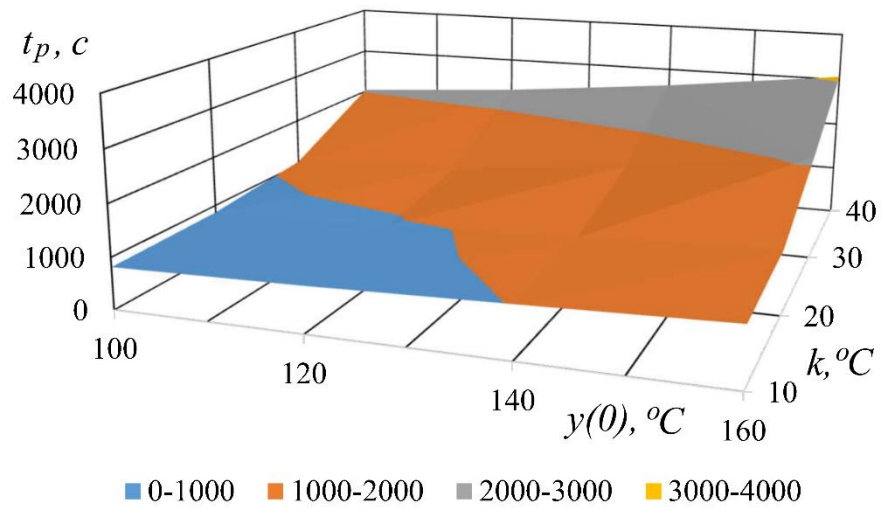
Рисунок 3.32 – Переходные процессы в нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором при $\theta_{нач} = 140°C$



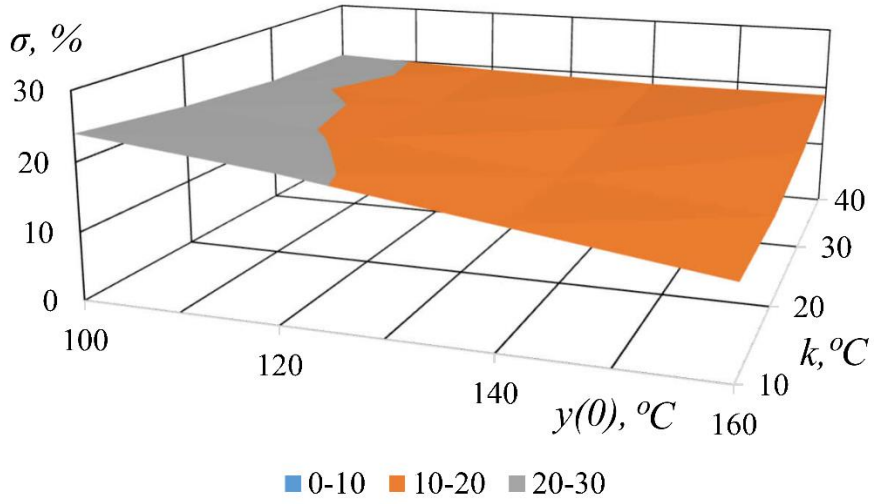
а) $\Delta\theta = 10\,°C$, б) $\Delta\theta = 20\,°C$, в) $\Delta\theta = 30\,°C$, г) $\Delta\theta = 40\,°C$;

$1 - I_s^* = 0{,}5$, $2 - I_s^* = 0{,}8$, $3 - I_s^* = 1{,}0$

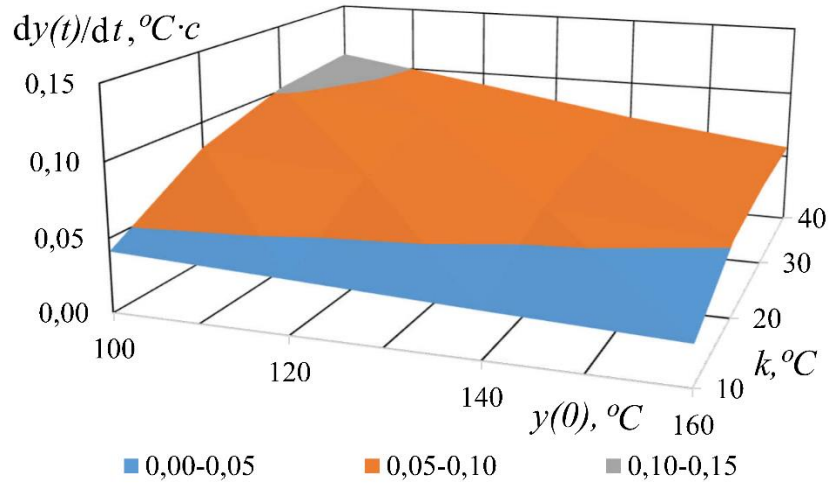
Рисунок 3.33 – Переходные процессы в нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором при $\theta_{нач} = 160°C$



а)



б)

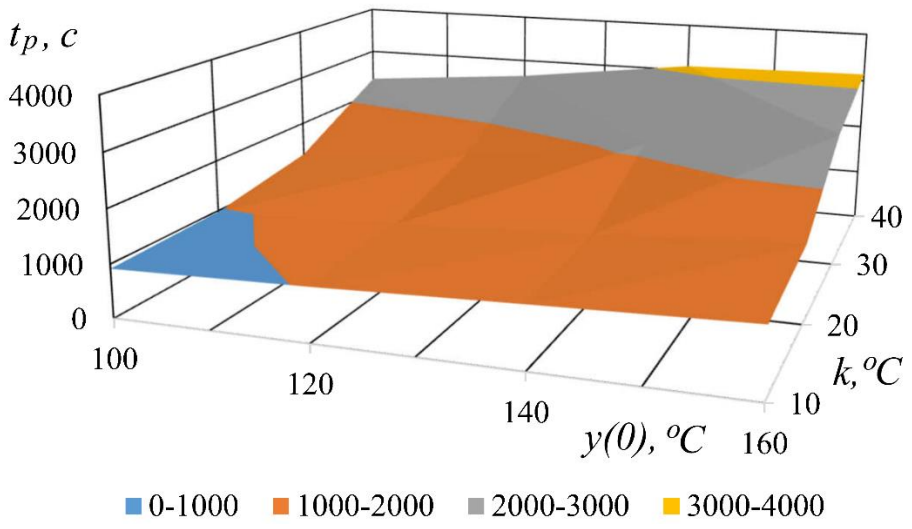


в)

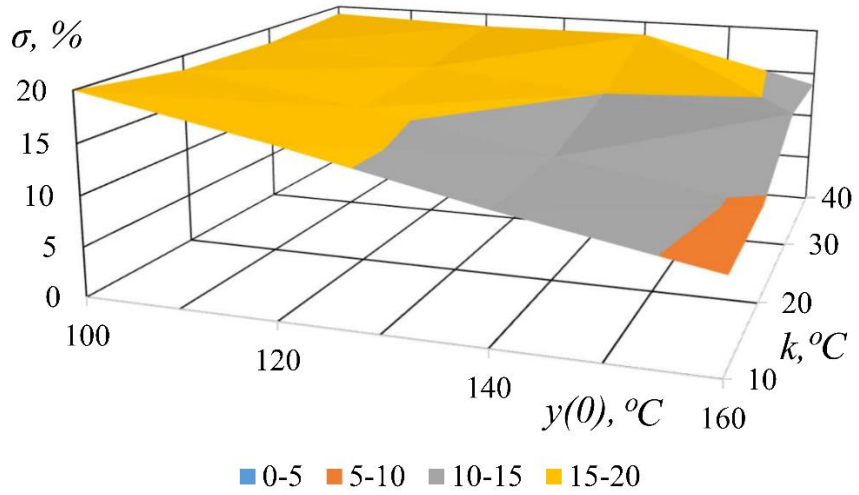
а) время переходного процесса t_p, c; б) перерегулирование σ, %;

в) крутизна переднего фронта $\mathrm{d}y(t)/\mathrm{d}t$, $°C \cdot c$

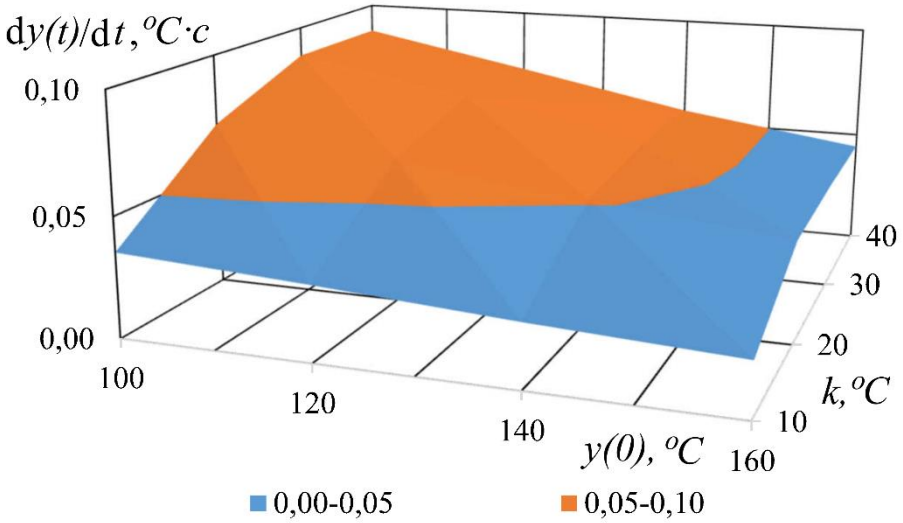
Рисунок 3.34 – Зависимости критериев качества нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором от величины скачка температуры задания k и начальной температуры ТАД $y(0)$ при $I_s^* = 0{,}5$



а)



б)

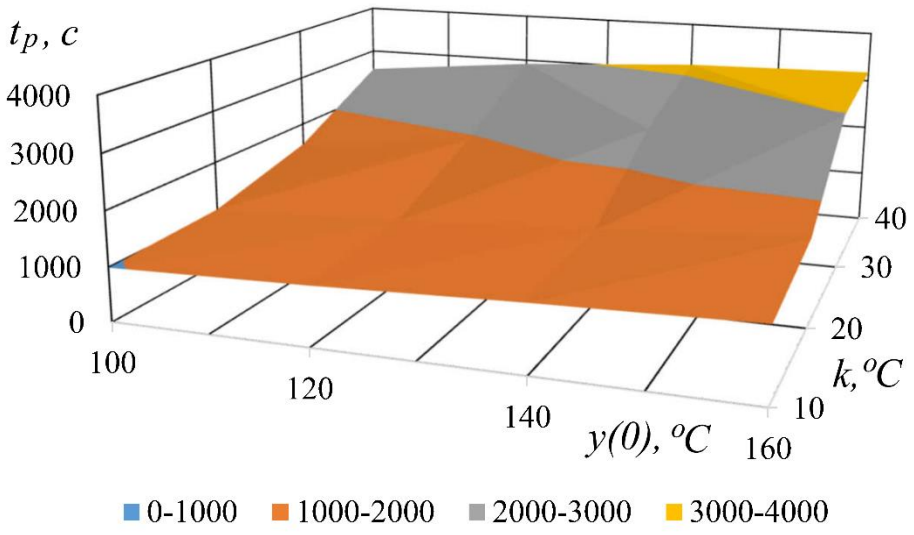


в)

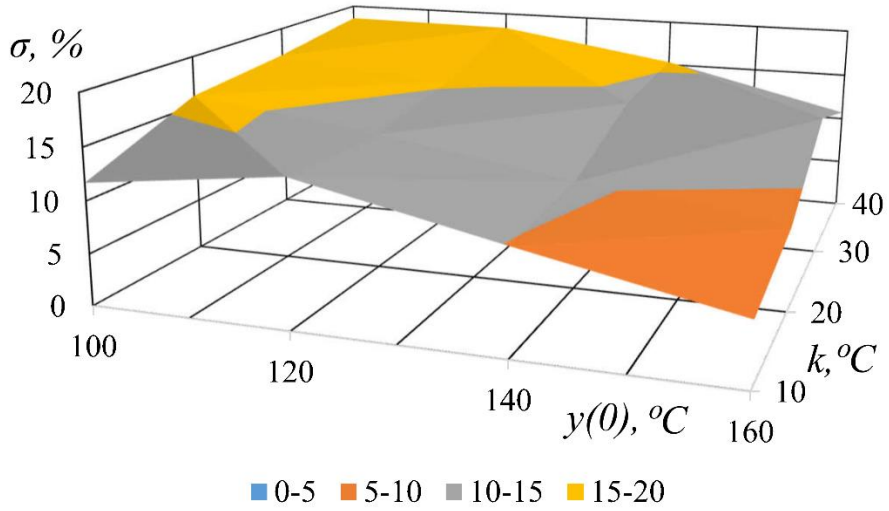
а) время переходного процесса t_p, c; б) перерегулирование σ, %;

в) крутизна переднего фронта $\mathrm{d}y(t)/\mathrm{d}t$, $°C \cdot c$

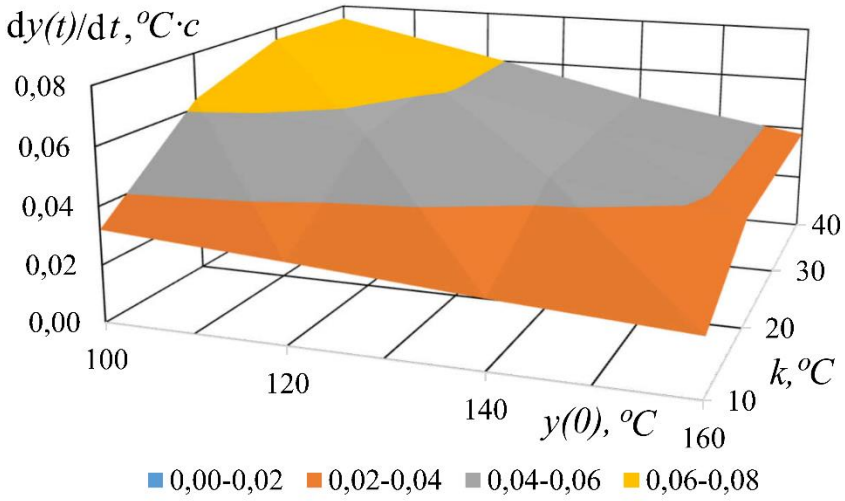
Рисунок 3.35 – Зависимости критериев качества нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором от величины скачка температуры задания k и начальной температуры ТАД $y(0)$ при $I_s^* = 0{,}8$



а)



б)



в)

а) время переходного процесса t_p, c; б) перерегулирование σ, %;

в) крутизна переднего фронта $\mathrm{d}y(t)/\mathrm{d}t$, $°C \cdot c$

Рисунок 3.36 – Зависимости критериев качества нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором от величины скачка температуры задания k и начальной температуры ТАД $y(0)$ при $I_s^* = 1{,}0$

Программа для решения полученной системы дифференциальных уравнений АСУТ приведены в приложении Г.

На рисунках 3.30 – 3.33 приведены результаты моделирования переходных процессов для нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором.

На рисунках 3.34 – 3.36 приведены поверхности, которые отражают зависимость критериев качества процессов управления для нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором при множестве различных начальных условиях, которые полностью определяют динамические качества системы во всем диапазоне рабочих режимов ТАД.

Численные значения каждого из критериев качества АСУТ с ПИ-регулятором приведены в приложении В.

В таблице 3.3 приведены сравнительные параметры качества управления линеаризованной и нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором. Для нелинейной АСУТ приведены максимальные значения соответствующих параметров качества.

Таблица 3.3

Сравнительные параметры качества управления линеаризованной и нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором

Тип АСУТ	Время переходного процесса t_p, с	Перерегулирование σ, %	Крутизна переднего фронта $\mathrm{d}y(t)/\mathrm{d}t$, $°C \cdot c$
Линеаризованная	1440	8,18	$3{,}77 \cdot 10^{-2} °C \cdot c$
Нелинейная	3178	24	$7{,}17 \cdot 10^{-2} °C \cdot c$
Относительная разница, %	220,7	293,4	90,18

Анализ данных приведённых на рисунках 3.30 – 3.36 позволяет сделать вывод об увеличении перерегулирования σ и времени управления t_p в замкнутой АСУТ при использовании ПИ-регулятора с ростом задания на темпе-

ратуру. С ростом начальной температуры $\theta_{нач}$ перерегулирование уменьшается, а время управления растет. Чем выше ток нагрузки I_s ТАД тем меньше перерегулирование и выше время управления.

Выводы

1. На базе синтезированных дифференциальных уравнений и передаточных функций элементов АСУТ ТАД разработаны математические модели нелинейной и линеаризованной САУ, которые обеспечивают требуемые показатели качества управления переходных процессов и позволяют плавно управлять температурой объекта управления в диапазоне 20…180 °С.

2. Преобразователь частоты, асинхронный двигатель и вентилятор охлаждения при разработке АСУТ, представлены усилительными звеньями с постоянными коэффициентами усилениями в связи с большой инерционностью объекта управления.

3. Разработаны два варианта регулятора температуры. В первом варианте применены два изодромных звена, что обеспечивает астатизм второго порядка и регулятора в цепи обратной связи для коррекции динамических свойств АСУТ. Во втором варианте использован ПИ-регулятор, обеспечивающий настройку системы на технический оптимум.

4. Разработанная математическая модель нелинейной АСУТ ТАД учитывает ограничение максимальной частоты вращения вала исполнительного устройства (вентилятора охлаждения) и нелинейную зависимость коэффициента усиления ТАД как объекта управления температурой от расхода охлаждающего воздуха и тока статора ТАД.

5. При применении как комбинированного регулятора так и использовании ПИ-регулятора перерегулирование σ и время управления t_p в замкнутой АСУТ увеличивается с ростом задания на температуру. С ростом начальной температуры $\theta_{нач}$ перерегулирование уменьшается, а время управления растет. С увеличением тока нагрузки I_s ТАД уменьшается перерегулирование и возрастает время управления.

6. Критерии качества процессов управления АСУТ ТАД с комбинированным регулятором в меньшей степени зависят от режимов работы АСУТ чем критерии качества процессов управления АСУТ с ПИ-регулятором. Поэтому рекомендуется при синтезе АСУТ использовать комбинированный регулятор, состоящий из двух последовательно включенных изодромных звеньев и звеньев обратной связи.

4 Экспериментальные исследования электропривода вентилятора с преобразователем частоты как исполнительного устройства и системы охлаждения тягового асинхронного двигателя

4.1 Обоснование и структура физической модели тягового привода

С целью подтверждения достоверности результатов моделирования теплового состояния ТАД, полученных во втором разделе диссертации, и синтезированной АСУТ ТАД с ПИ-регулятором была поставлена задача по разработке стенда для физического моделирования исследуемых процессов.

Полноразмерные стенды ТАД требуют значительных затрат на их реализацию. При этом математические модели, основанные на базе этих стендов, зачастую не позволяют выполнить полный комплекс исследований, связанный с объединенными проблемами динамики и устойчивости тепловой, электрической и механической систем [6, 8]. Поэтому значительный объем работ целесообразно осуществлять на физических моделях таких систем, которые могут быть в разы дешевле при изготовлении чем полноразмерные стенды. Наиболее значимо это в тех случаях, когда исследования сопровождаются значительным количеством экспериментов, связанных с серьезным и дорогостоящим изменением натурного стенда для испытаний.

В результате для экспериментального исследования тепловых режимов ТАД с дальнейшей разработкой АСУТ его обмоток был принят метод физического моделирования.

Теория подобия и основанное на ней моделирование не могут с абсолютной полнотой воспроизводить все стороны и детали изучаемых явлений. Различают три способа моделирования [32]: полное, неполное и приближенное. При полном моделировании и соответственно подобии все основные процессы, характеризующие изучаемые явления, подобно изменяются и во времени и в пространстве. При неполном моделировании протекание всех основных процессов в модели подобно только частично (или только во времени, или только в пространстве).

Приближенное моделирование характеризуется тем, что некоторые факторы, заведомо влияющие, но не оказывающие решающего значения на протекание процесса, моделируются приближенно или совсем не моделируются. Поэтому между некоторыми параметрами модели или некоторыми характеристиками ее режимов работы не существует соотношений подобия. Это вызывает погрешность, которую можно оценить тем или иным способом.

Сложность устройств и систем энергетической цепи тепловоза электрической передачей переменного тока приводит к тому, что при построении модели его тягового привода с частотно-управляемым АД может быть использовано только неполное или приближенное моделирование [26, 32].

С участием автора работы в лаборатории кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета спроектирована и изготовлена физическая модель тягового привода тепловоза с электрической передачей переменного тока [13, 20], которая включает в себя все элементы моделируемого объекта.

На разработанную установку получены патенты на полезную модель [96, 97].

С целью установления критериев подобия физической модели ТАД был использован способ относительных единиц.

4.2 Оценка возможности использования серийных машин промышленного назначения в качестве модели тягового асинхронного двигателя тепловоза

Существует два основных способа для определения критериев подобия в теории моделирования. Первый способ основан на использовании π-теоремы. Суть второго способа заключается в приведении дифференциальных уравнений, которые описывают исследуемый физический процесс, к безразмерной

форме. Существует также еще один дополнительный способ, который основан на применении системы относительных единиц. Характер поставленных задач и физические свойства моделируемого объекта определяют выбор способа определения критериев подобия.

Тяговый асинхронный двигатель тепловоза в диссертации рассматривается как объект тепловой системы, моделирующей возмущающее воздействие. В связи с этим при разработке модели ТАД возможно использование приближенного подобия, а для определения критериев подобия допустимо использовать способ относительных единиц.

Мощность асинхронного двигателя оказывает существенное влияние на его параметры (сопротивления обмоток, номинальные значения частоты и напряжения и т.д.) и характер протекания переходных процессов. Поэтому при использовании двигателей малой мощности в качестве моделей необходимо оценивать погрешность эксперимента с учетом особенностей режимов их работы.

В случае частотно-управляемого двигателя в качестве независимых параметров целесообразно принять ток, потокосцепления и частоту вращения [32]. Тогда критериальная форма записи уравнений, являющихся критериями подобия, примет вид:

$$\frac{I_1}{I_б} = \gamma F_I\,,\ \frac{\Phi}{\Phi_б} = \gamma F_\Phi\,,\ \frac{M}{M_б} = \gamma^2 F_M\,; \tag{4.1}$$

$$F_I = \frac{Z_б}{r_1}\frac{f_{1H}\sqrt{b + c\dfrac{1}{\beta^2}}}{\sqrt{(b + c\alpha^2) + (d + e\alpha^2)\dfrac{1}{\beta^2} + 2\dfrac{\alpha}{\beta}}}\,, \tag{4.2}$$

$$F_\Phi = \frac{\sqrt{\dfrac{x_2^{'2}}{r_1 r_2^{'}} + \dfrac{r_2^{'}}{r_1}\dfrac{1}{\beta^2}}}{\sqrt{(b + c\alpha^2) + (d + e\alpha^2)\dfrac{1}{\beta^2} + 2\dfrac{\alpha}{\beta}}} \tag{4.3}$$

$$F_M = \frac{f_{1H} Z_б}{f_б r_1 \sqrt{(b + c\alpha^2)\beta + (d + e\alpha^2)\frac{1}{\beta} + 2\alpha}}, \tag{4.4}$$

где $b = r_1(1+\tau_2)$; $c = x_0\tau$; $d = \frac{r_1}{x_0}$; $e = 1+\tau_1$; $\tau_1 = \frac{x_1}{x_0}$; $\tau_2 = \frac{x'_2}{x_0}$; $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1\tau_2$.

В выражении (4.4) приняты обозначения: γ – относительное напряжение; β – абсолютное скольжение; α – относительная частота тока статора.

При приближенном подобии критериальная форма записи позволяет произвести оценку погрешности и осуществить пересчет результатов эксперимента, полученных на модели, на натурный образец. Выражение для определения момента двигателя-оригинала через момент двигателя-модели имеет вид:

$$M_O = M_M \frac{M_{бO}\gamma_O^2 F_{MO}}{M_{бM}\gamma_M^2 F_{MM}}. \tag{4.5}$$

В выражении (4.5) индексами «*о*», «*м*» и «б» обозначены величины, относящиеся соответственно к двигателю-оригиналу, двигателю-модели и базовые величины.

В качестве примера оценим величину погрешности, получаемую при приближенном моделировании тягового асинхронного двигателя ЭД-900 двигателем АО-63-4. Оценку произведем по величине момента на валу электродвигателя, поскольку эта величина является наиболее характерной:

$$\Delta M = \left| \frac{M_{дв.о.и} - M_{дв.о.}}{M_{дв.о.и}} \right| \cdot 100\%, \tag{4.6}$$

где $M_{дв.о.}$ – значение момента на валу двигателя ЭД-900;

$M_{дв.о.и}$ – значение момента на валу двигателя АО-63-4, полученное при испытаниях.

Проведенные расчеты [32] показали, что погрешность в определении количественной величины момента в случае несовпадения режимов работы дви-

гателей не превышает 25% (качественная картина процесса пульсаций момента полностью сохраняется), а в случае, когда режимы работы двигателей близки друг к другу погрешность не превышает 14%. В случае совпадения режимов работы погрешность в определении величины пульсаций момента не превышает 13%. Таким образом возможно приближенное моделирование ТАД мощностью ЭД-900 асинхронным мощностью 14 кВт.

4.3 Комплексный стенд для исследования автоматической системы управления температурой тягового асинхронного двигателя

На рисунке 4.4 приведен общий вид стенда, а его функциональная схема представлена на рисунке 4.5.

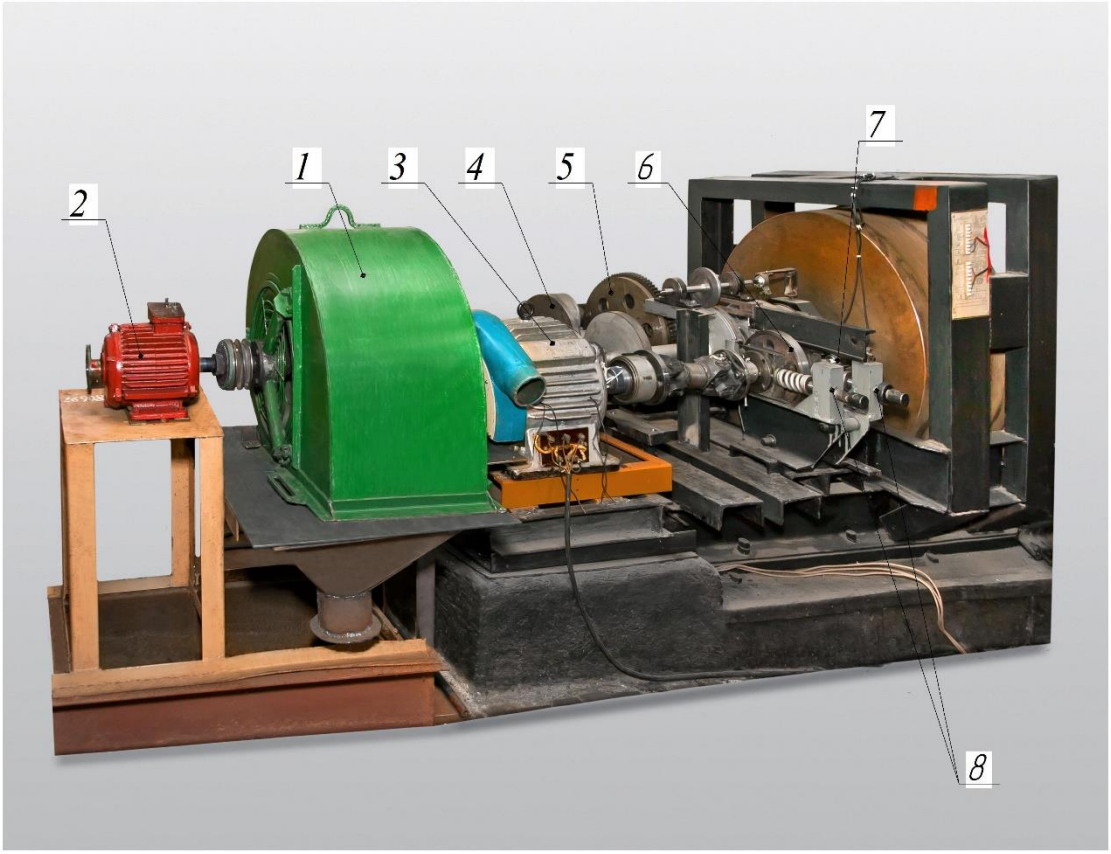


Рисунок 4.4 – Общий вид стенда для исследования автоматической системы управления температурой ТАД

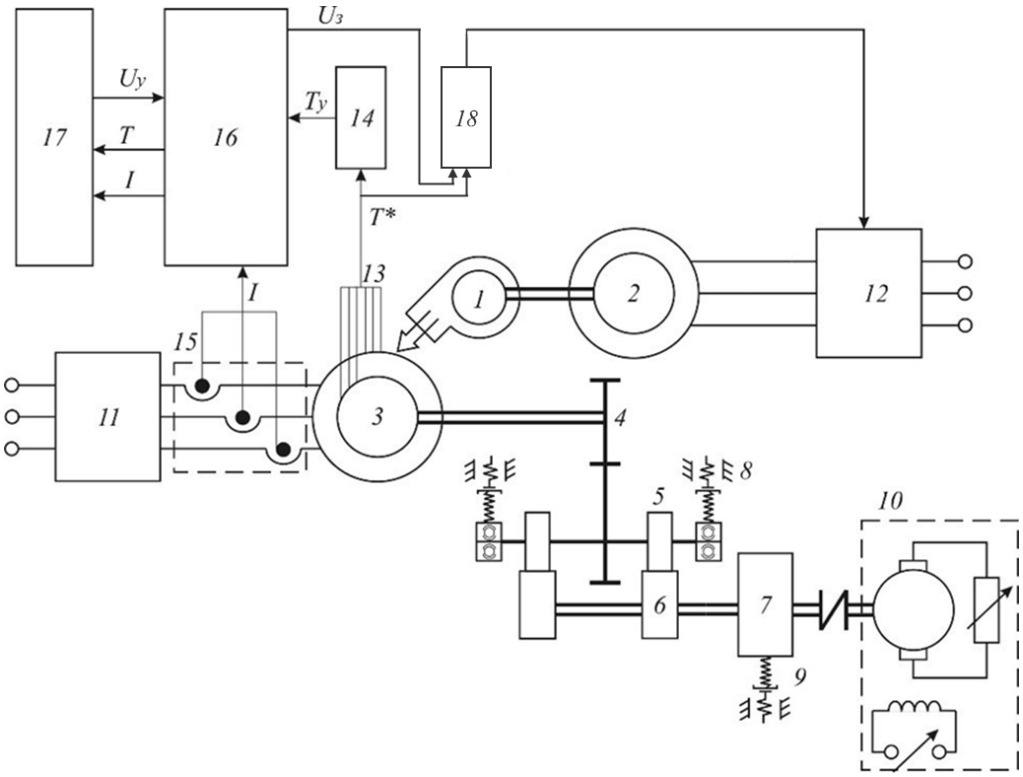


Рисунок 4.5 – Функциональная схема стенда для исследования автоматической системы управления температурой ТАД

Основными элементами стенда являются вентилятор охлаждения 1, который приводится во вращение асинхронным двигателем 2 [5], управляемого преобразователем частоты и охлаждаемый асинхронный двигатель 3 (физическая модель ТАД тепловоза), который управляется преобразователем частоты 11.

В механическую часть установки входят модель колесной пары 4, на которой располагается зубчатое колесо 5; устройство, для имитации связи колесной пары с рельсами, изготовленное в виде двух связанных между собой катков 6; нагрузочного устройства, для моделирования сопротивления движению; маховика 7, которое позволяет моделировать массу поезда. При помощи прижимных винтовых устройств 8 регулируется величина силы нажатия колесной пары 4 на каток 6.

В конструкцию нагрузочного устройства входит фрикционный тормоз 9, а также электрическая машина постоянного тока 10.

При помощи хромель-копелевых термопар 13 регистрируются значения превышения температур в корпусе, обмотках статора и ротора модели ТАД. Они располагаются в статоре в трех сечениях – в лобовых частях обмотки (рисунок 4.6) со стороны подачи охлаждающего воздуха и противоположной стороне, и в его массиве (по 3 термопары в каждом сечении, сдвинутые на 120°), в массиве роторе (рисунок 4.7) – со стороны подачи охлаждающего воздуха и на противоположной стороне (по 2 термопары в каждом сечении, сдвинутые на 180°). Для возможности передачи информации с термопар, расположенных на роторе, на его валу установлен ртутный токосъемник. Для усиления сигнала T^*, поступающего с термопар 13, предусмотрены усилители 14. При помощи датчиков тока 15 модели ACS 712 измеряется действующее значение тока в обмотке статора. На многофункциональную плату аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) 16 производства ЗАО «Руднев-Шиляев» ЛА-2USB-12 [31] поступают сигналы I^* с датчиков тока 15 и Ty с усилителей 14, далее преобразованные в цифровой код I и T, поступают на ЭВМ 17.

Также сигналы с термопар передаются на программируемый регулятор температуры 18 серии DTD4848V0 с возможностью ПИД-регулирования, который объединяет в себе функции сумматора и регулятора, который преобразует их в аналоговый сигнал и передает на вход преобразователя частоты вентилятора охлаждения ТАД.

Датчики тока модели ACS712, которые производятся фирмой «Allegro Microsystems», позволяют измерять значение постоянного и переменного токов вплоть до 50 кГц. Их принцип действия основан на эффекте Холла. Погрешность измерений при регистрации сигналов тока составляет 1,5%.

Значения частоты вращения вала ротора ТАД и маховика регистрируют инкрементальные энкодеры E40S6-1000-6-L-5 DC5V производства фирмы Autonics с разрешающей способностью 1000 импульсов на оборот.

Рисунок 4.6 – Расположение датчика температуры
на лобовой части обмотки статора

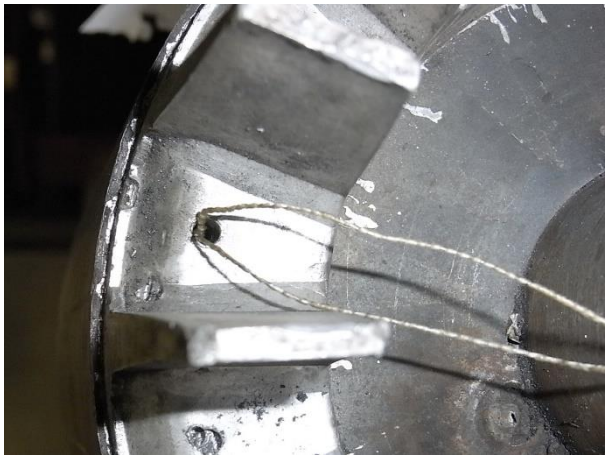


Рисунок 4.7 – Расположение датчика температуры
в массиве ротора

Первый датчик частоты вращения установлен на вал измерительного диска (ролика), прижатого к катку, частота его вращения пропорциональна частоте вращении маховика, то есть он моделирует линейную скорость перемещения массы тепловоза (поезда). Второй датчик частоты вращении установлен на колесе, приводящем в движение каток, следовательно, на нем возможны явления боксования и проскальзывания. Таким образом, по рассогласованию сигналов с датчиков (с учетом масштабирующих коэффициентов) возможно определение режимов срыва сцепления и борьба с этим за счет введения корректирующих сигналов в систему управления.

Из-за неравномерного прохождения воздуха внутри машины, а также в связи с тем, что в процессе теплообмена между нагретыми частями асинхронной машины и охлаждающим воздухом последний нагревается, температура различных элементов машины может существенно отличаться.

В качестве программы необходимой для сбора и хранения данных используется поставляемое в комплекте с многофункциональной платой 16 программное приложение SaverSE. Данное приложение содержит осциллограф для возможности проведения качественной и количественной оценки регистрируемых сигналов, предоставляет возможность выбора каналов для сбора информации, а также имеет функцию, позволяющую изменять частоту выбранных каналов.

Методика проведения экспериментальных исследований заключается в следующем. Для построения статических характеристик определены установившиеся значения величины температуры θ для нескольких значений подачи охлаждающего воздуха $G_{вз}$ при нескольких неизменных значениях тока обмотки статора I_s. В документации [125], определяющей порядок проведения испытаний электрических машин на нагревание, установившимся считается такой процесс изменения температуры, при котором температура изменяется не более чем на 1^0С в час.

Величина подачи охлаждающего воздуха $G_{вз}$ определялась по измеренному среднему значению скорости воздушного потока в воздуховоде $V_{ср}$. При измерении $V_{ср}$ были выполнены следующие условия:

– измерительный участок создает практически ламинарное движение воздушного потока;

– длина измерительного участка в 5–7 раз больше его гидравлического диаметра.

С помощью термоанемометра AZ Instrument 8908 измерялись значения скорости потока. Далее была определена тарировочная зависимость подачи охлаждающего воздуха $G_{вз}$ от скорости потока и, как следствие, частоты вращения вала ротора двигателя вентилятора охлаждения. В ходе экспериментальных исследований для определения величины $G_{вз}$ использовалась эта тарировочная зависимость. Эксперименты по определению статических характеристик повторялись несколько раз, затем полученные результаты усреднялись. Необходимость в этом была вызвана тем, что не всегда удавалось обеспечить условия для поддержания постоянства температуры окружающего воздуха.

Методика исследований динамических свойств системы охлаждения АД как объекта управления температурой включает следующие основные положения [15]:

– переходные временные характеристики системы охлаждения определяются при однократном скачкообразном изменении только одного из воздействий – управляющего или одного из возмущающих – и поддержании постоянными остальных;

– величина однократного скачкообразного воздействия не должна превышать 15% от максимально возможной величины вносимого возмущения;

– однократное скачкообразное воздействие вносится при установившемся температурном режиме системы охлаждения, причем по достижении нового установившегося состояния вносится новое однократное скачкообразное воздействие того же значения, что и предыдущее, но обратного знака.

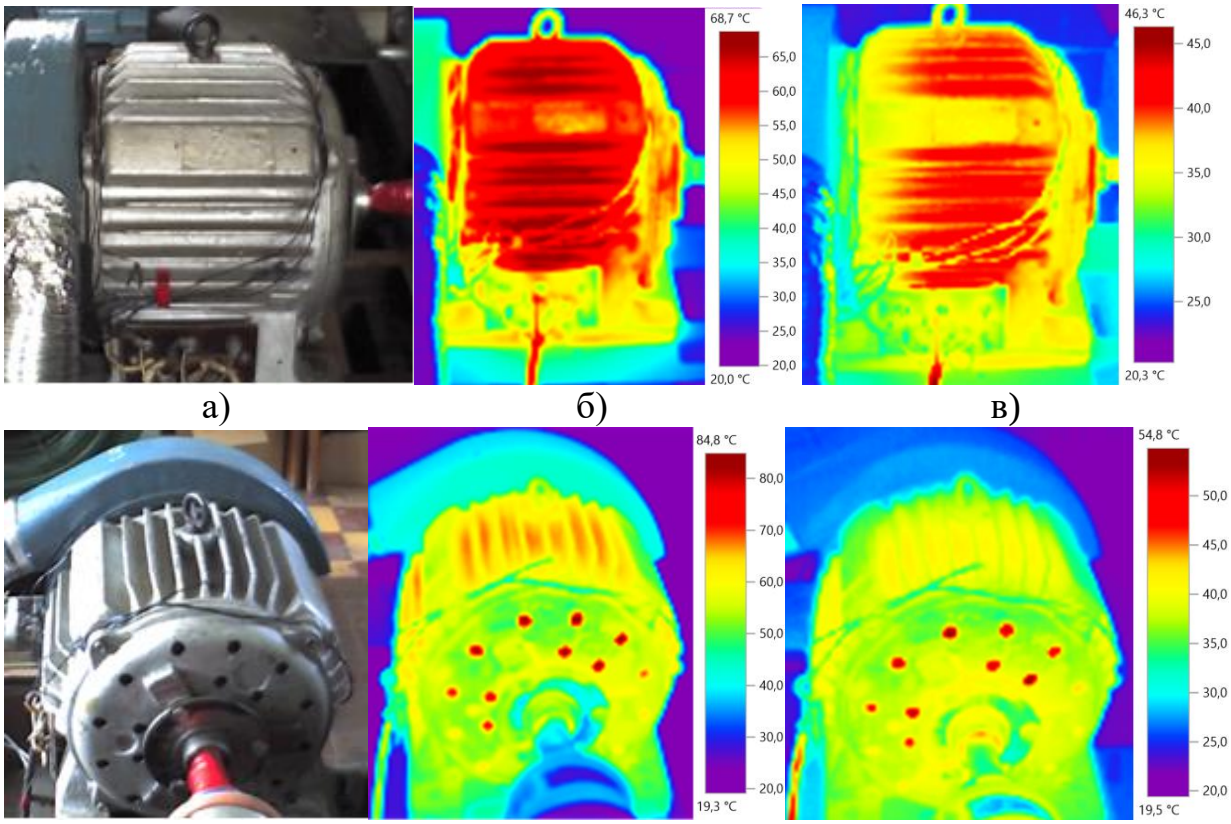
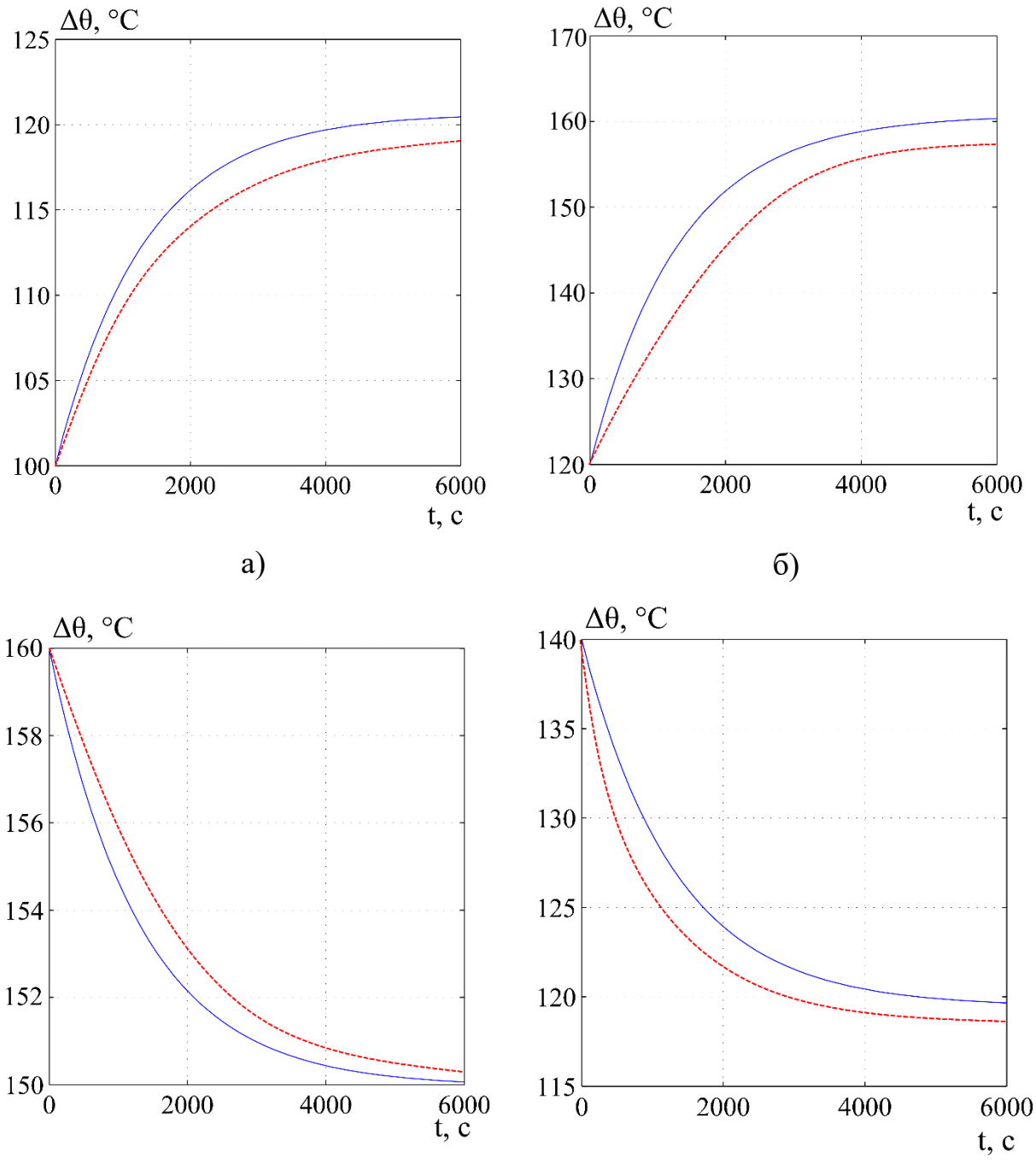


Рисунок 4.8 – Результаты тепловизионной съемки: фотографии двигателя (а, г), термограммы при токе статора I_s = 15 А, частоте тока статора f_1 = 10 Гц, частоте вращения вала ротора n = 272 об/мин без принудительного охлаждения (б, д) и при расходе охлаждающего воздуха $G_{вз}$ = 0,95 м^3/с (в, е)

Результаты тепловизионной съемки АД в установившемся тепловом режиме посредством портативного тепловизора Testo 875i, обладающего температурной чувствительностью 50 мК при 30 °С, приведены на рисунке 4.8. Результаты экспериментальных исследований динамических тепловых режимов работы разработанной разомкнутой АСУТ без регулятора приведены на рисунке 4.9. Результаты экспериментальных исследований при использовании ПИ-регулятора в замкнутой АСУТ приведены на рисунках 4.10 и 4.11.



а) $\Delta\theta = 10\,°C$, б) $\Delta\theta = 20\,°C$, в) $\Delta\theta = 30\,°C$, г) $\Delta\theta = 40\,°C$;

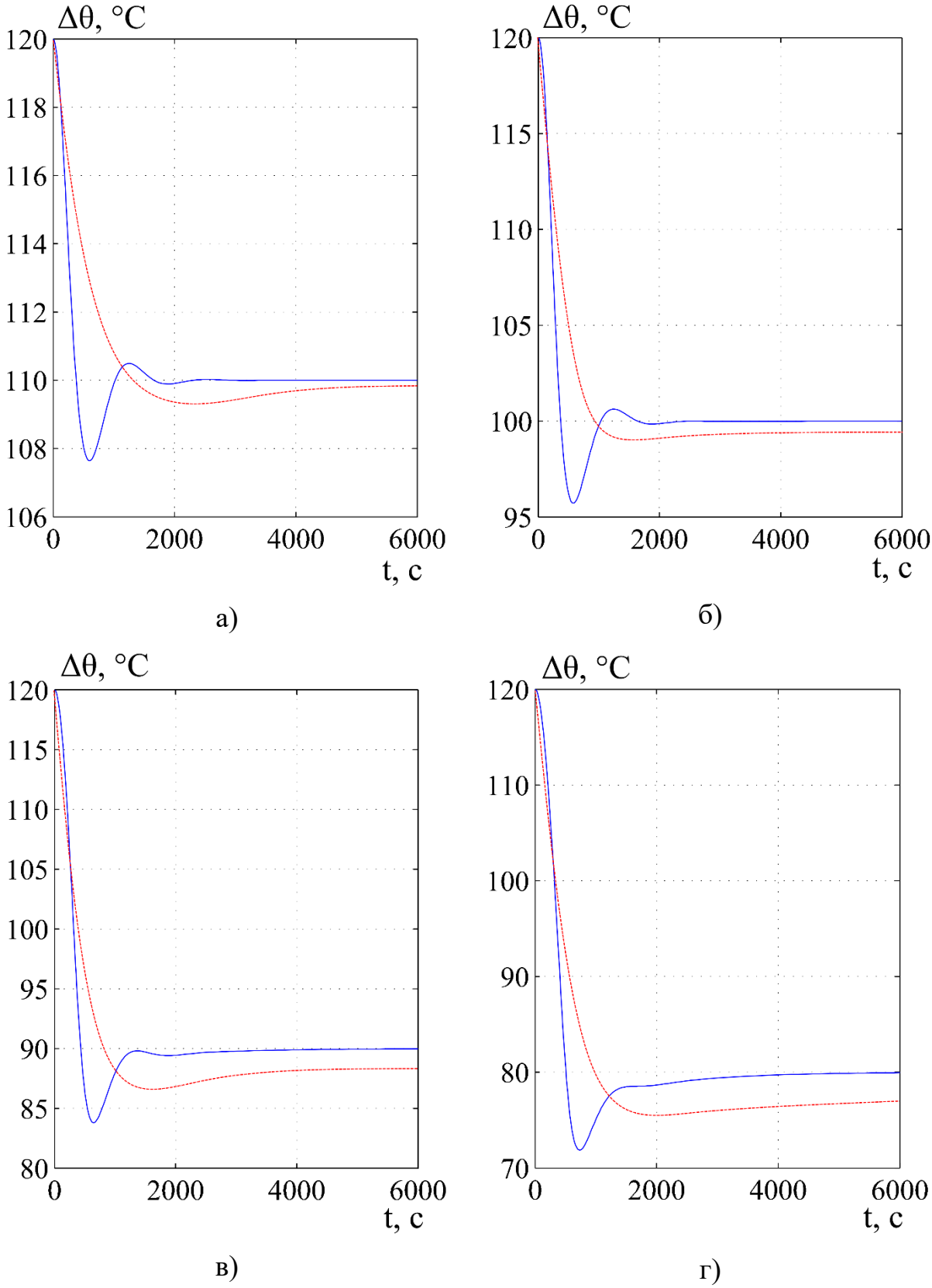
——— – моделирование; ····· – эксперимент

а) – $\theta_{нач} = 100°C$ и $I_s^* = 0{,}7 I_s^{ном}$; б) – $\theta_{нач} = 120°C$ и $I_s^* = 0{,}9 I_s^{ном}$;

в) – $\theta_{нач} = 160°C$, $I_s^* = 0{,}9 I_s^{ном}$ и $G_{вз}^* = 0{,}5 G_{вз}^{ном}$;

г) – $\theta_{нач} = 120°C$, $I_s^* = 0{,}7 I_s^{ном}$ и $G_{вз}^* = 0{,}5 G_{вз}^{ном}$;

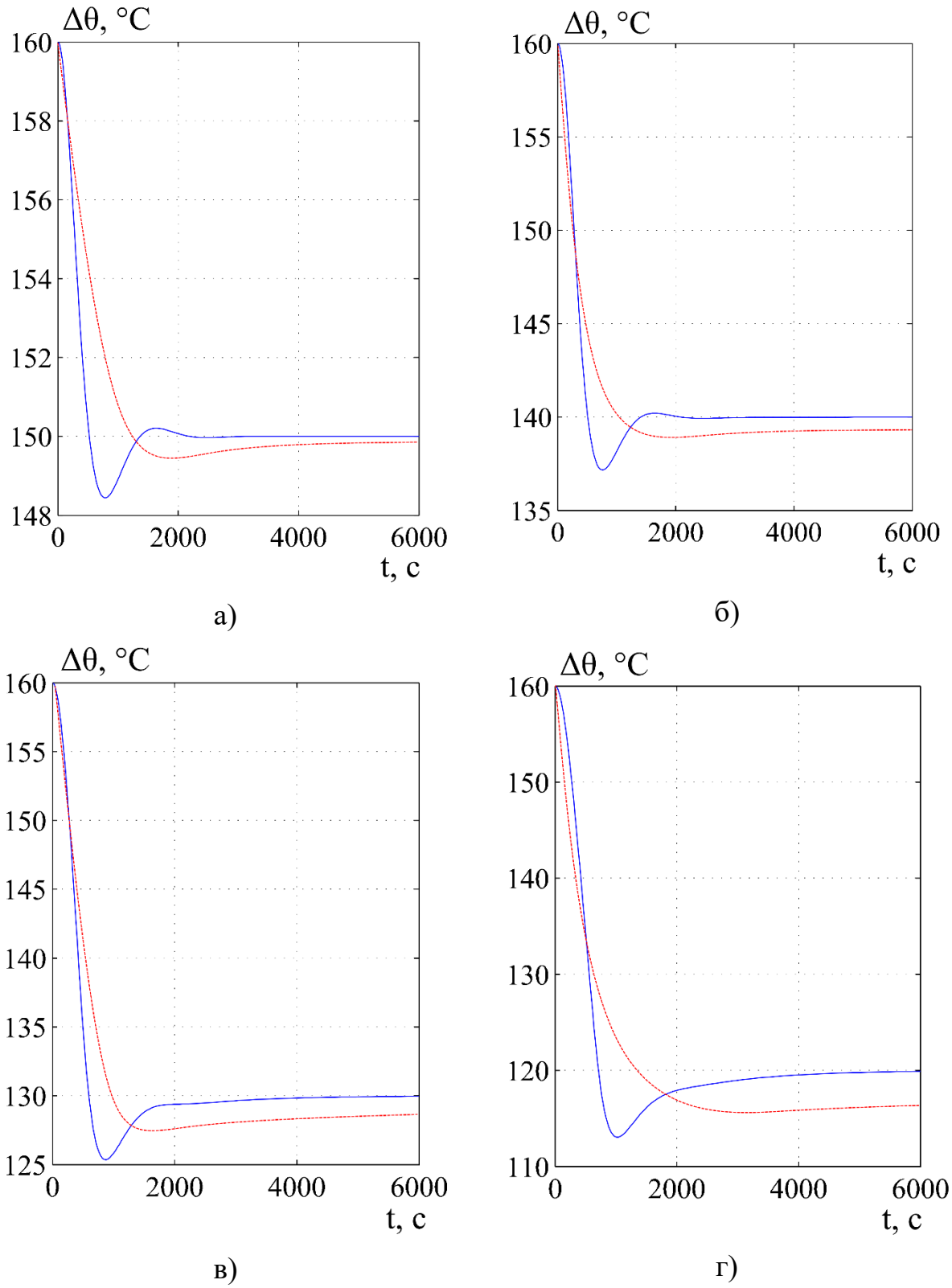
Рисунок 4.9 – Переходные процессы в разомкнутой нелинейной АСУТ без регулятора



а) $\Delta\theta = 10\,°C$, б) $\Delta\theta = 20\,°C$, в) $\Delta\theta = 30\,°C$, г) $\Delta\theta = 40\,°C$;

– моделирование; – эксперимент

Рисунок 4.10 – Переходные процессы в нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором при $\theta_{нач} = 120°C$ и $I_s^* = 0{,}5 I_s$



а) $\Delta\theta = 10\,°C$, б) $\Delta\theta = 20\,°C$, в) $\Delta\theta = 30\,°C$, г) $\Delta\theta = 40\,°C$;

– моделирование; – эксперимент

Рисунок 4.11 – Переходные процессы в нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором при $\theta_{нач} = 160°C$ и $I_s^* = 0{,}5 I_s$

Температура окружающего воздуха во время проведения экспериментов составляла 20…21 ºС. Закон управления АД – u_s/f_1 = const, где u_s – напряжение обмотки статора (с применением *IR*-компенсации).

Следует отметить, что результаты экспериментального исследования распределения температуры АСУТ ТАД без регулятора показали высокую сходимость с результатами теоретических исследований на математической модели, проведенных во втором разделе диссертации. Максимальное расхождение при определении значения температуры ТАД как объекта управления температурой не превышает 4ºС или 10 %; при определении времени переходного процесса 172 с или 3 %.

Выбор низких значений напряжения, частоты тока статора, а следовательно, и частоты вращения вала ротора для проведения эксперимента обусловлен тем, что именно на низких позициях контроллера машиниста тяговый двигатель испытывает наибольшие перегрузки по току, так как только при пуске действует ограничение по максимальному моменту (по току), поэтому значения температуры теплонагруженных узлов двигателя в этих режимах оказывают критическое влияние на работу электропривода в целом.

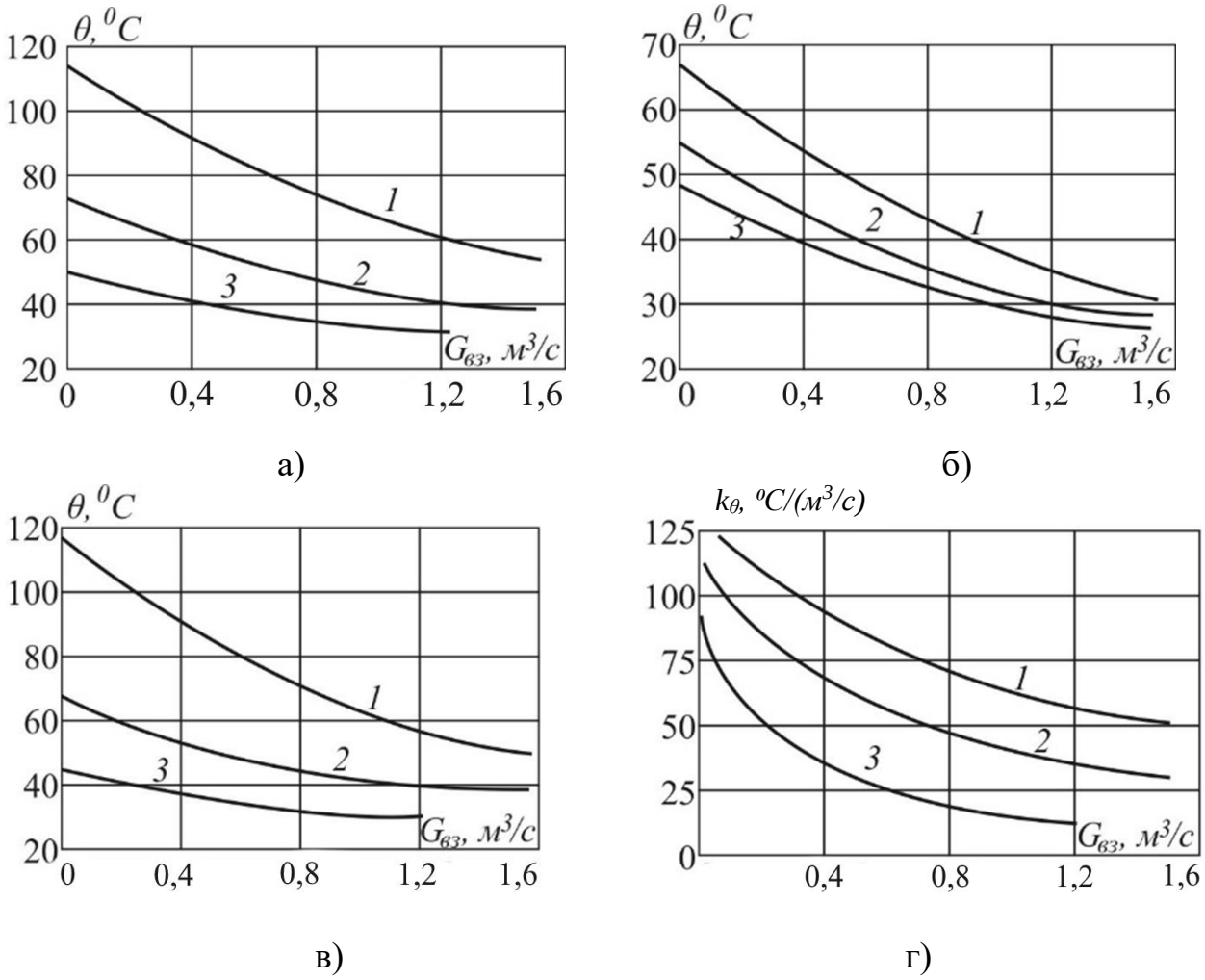
В таблице 4.1 приведены сравнительные максимальные значения параметров качества управления АСУТ с ПИ-регулятором, полученные в ходе компьютерного моделирования и на разработанном экспериментальном стенде.

Таблица 4.1

Сравнительные параметры качества управления АСУТ с ПИ-регулятором, полученные в ходе моделирования и на экспериментальном стенде

Тип АСУТ	Время переходного процесса t_p, с	Перерегулирование σ, %	Крутизна переднего фронта $\mathrm{d}y(t)/\mathrm{d}t$, $°C \cdot c$
Моделирование	3178	24	$7{,}17 \cdot 10^{-2} °C \cdot c$
Эксперимент	3489	11	$5{,}82 \cdot 10^{-2} °C \cdot c$
Относительная разница, %	9,7	13	23,19

Экспериментальные исследования разработанной АСУТ ТАД с ПИ-регулятором подтверждают корректность проведенного синтеза регулятора, выполненного в третьем разделе настоящей работы. Максимальное расхождение между теоретическими и экспериментальными данными при определении значения температуры ТАД как объекта управления температурой не превышает 3°С или 9 %; при определении времени переходного процесса 311 с или 9,7 %; при определении перерегулирования 13%; при определении крутизны переднего фронта $1{,}35 \cdot 10^{-2} °C \cdot c$ или 23,19%.



а) – короткозамкнутое кольцо ротора со стороны, противоположной подаче воздуха при f_1 = 5 Гц; б) – массива статора в среднем сечении при f_1 = 5 Гц; в) – лобовой части обмотки статора со стороны, противоположной подаче воздуха при f_1 = 10 Гц; г) – зависимости коэффициента передачи лобовой части обмотки статора от подачи охлаждающего воздуха при f_1 = 10 Гц (1 – $I_s^* = 0{,}9 I_s$; 2 – $I_s^* = 0{,}7 I_s$; 3 – $I_s^* = 0{,}5 I_s$)

Рисунок 4.12 – Статические характеристики системы охлаждения ТАД

Анализ статических режимов работы (рисунок 4.12) показывает, что при работе на низких, околонулевых значениях частоты тока статора наибольший перегрев испытывает обмотка ротора (при f_1 = 2,5 Гц максимальное превышение температуры колец над лобовой частью обмотки статора составляет 5°С, при f_1 = 2,5 Гц – 2°С). При увеличении частоты тока статора наибольший перегрев испытывает уже обмотка статора, причем чем больше f_1, тем больше разница (при f_1 = 7,5 Гц максимальное превышение температуры лобовой части обмотки статора над кольцами ротора составляет 2°С, при f_1 = 10 Гц – 4°С).

Результаты исследований свидетельствуют о следующем: чем напряженнее режим работы, то есть чем больше ток статора и интенсивнее выделение тепловых потерь, тем значительнее отличаются друг от друга температуры расположенных рядом частей электрической машины. Таким образом, в большем диапазоне рабочих режимов тягового двигателя наиболее теплонагруженным элементом является обмотка статора, что указывает на необходимость использования значения ее температуры как лимитирующего фактора при разработке автоматической системы управления температурой.

Соотношение температур между лобовой частью обмотки статора и ее пазовой частью в данной работе не исследовалось, однако результаты работ [128, 130, 137] показывают, что температура обмотки статора, уложенной в пазы, обычно на 5–10 °С выше, чем в лобовых частях со стороны, противоположной вентиляционному люку.

Выводы

1. Разработанный экспериментальный стенд содержит АД мощностью 14 кВт с нагрузкой, имитирующей механическую часть привода, центробежного вентилятора охлаждения с воздуховодом, приводимого в движение АД мощностью 2,2 кВт и позволяет реализовать полный комплекс экспериментальных исследований разработанной АСУТ ТАД с ПИ-регулятором. На данный стенд получены патенты на полезные модели № 148359 и № 156446.

2. В результате приближенного моделирования было определено, что в качестве модели ТАД может быть использован двигатель небольшой мощности общепромышленного назначения. Определение критериев подобия ТАД произведено методом относительных единиц.

3. Проведенные экспериментальные исследования АСУТ ТАД подтвердили адекватность разработанной математической модели. Максимальное расхождение между теоретическими и экспериментальными данными при определении значения температуры ТАД как объекта управления температурой не превышает 3℃ или 9 %; при определении времени переходного процесса 311 с или 9,7 %; при определении перерегулирования 13%; при определении крутизны переднего фронта $1{,}35 \cdot 10^{-2} {}^{\circ}C \cdot c$ или 23,19%.

5 Расчет технико-экономической эффективности разработанной АСУТ ТАД

Оценка эффективности применения электропривода вентилятора охлаждения с частотно-управляемым асинхронным двигателем проводится по среднеэксплуатационным затратам мощности на привод вентилятора по методике, разработанной во ВНИТИ и приведенной в работах [42, 103, 104].

Исходные данные для расчета технико-экономической оценки эффективности применения разработанного электропривода в системах охлаждения:

– безразмерная зависимость мощности на валу вентилятора $P_{мех*} = \Delta P_{мех}/\Delta P_{ном}$ от величины расхода охлаждающего воздуха (рисунок 5.1) [80];

– распределение температур окружающего воздуха (таблица 5.1) [124];

– распределения режимов работы энергоустановки (таблица 5.2) [124].

Исходные данные для расчета эффективности применения электропривода сведены в таблице 5.3.

Учитывая потери в электроприводе и механическую мощность вентилятора, определены затраты мощности на привод вентилятора при различных значениях относительной мощности энергетической установки и температуры окружающего воздуха:

$$P_{прив} = \Delta P_* + P_{мех*}. \quad (5.1)$$

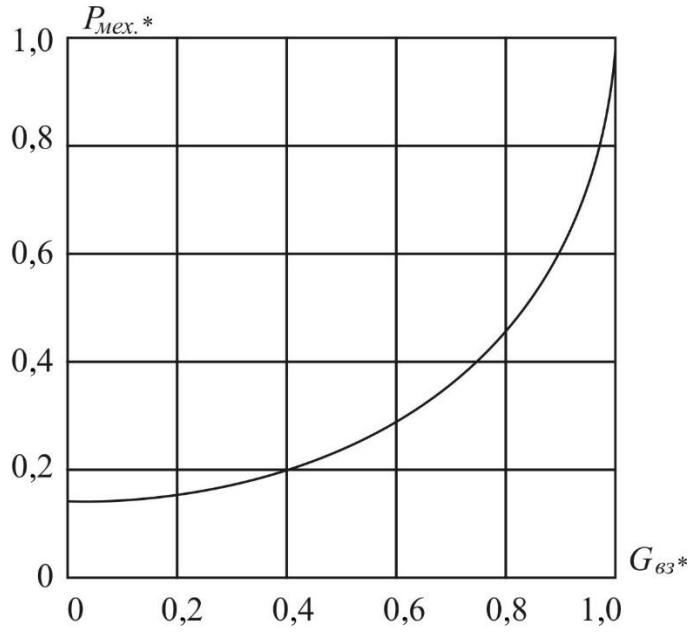


Рис. 5.1. Характеристика вентилятора

Таблица 5.1

Распределение температур наружного воздуха

Интервал температур, °С	-35…-10	-10…10	10…35
Распределение температур	0,13	0,63	0,24

Таблица 5.2

Распределение мощности энергетической установки

Интервал мощности, отн.ед.	0,3 … 0,5	0,5 … 0,7	0,7…0,9	0,9…1,0
Распределение мощности	0,3	0,33	0,25	0,11

Таблица 5.3

Исходные данные для технико-экономической оценки эффективности

Мощность энерго-установки, отн.ед.	Частота напряжения синхрон-ного генератора, отн.ед.	Темпе-ратура, °С	Требуемые обороты венти-лятора, отн.ед.	Мощность на валу вентиля-тора, отн.ед.	Мощность, по-требляемая электроприво-дом, отн.ед.
1,0	$\frac{1}{1}$	-20 0 +20	0,36 0,54 0,77	0,21 0,31 0,49	0,55 0,65 0,83
0,8	$\frac{0,89}{0,75}$	-20 0 +20	0,27 0,44 0,62	0,19 0,26 0,37	0,524 0,594 0,674
0,6	$\frac{0,75}{0,5}$	-20 0 +20	0,13 0,29 0,44	0,16 0,20 0,28	0,488 0,528 0,608
0,4	$\frac{0,61}{0,38}$	-20 0 +20	0,11 0,20 0,31	0,17 0,18 0,21	0,492 0,502 0,43

Расчет эксплуатационной мощности произведен дискретно с учетом действительного распределения температур окружающего воздуха и режимов работы энергоустановки.

При этом учитывается только работа энергоустановки под нагрузкой в диапазоне 0,3 – 1 от номинальной мощности. Общее время работы в рассматриваемом диапазоне принято за единицу.

Среднеэксплуатационная мощность, потребляемая вентилятором охлаждения тягового асинхронного двигателя и приведенная к валу энергоустановки, определяется так:

$$P_{с.э.} = \sum_{k=t_{\min}}^{k=t_{\max}} \cdot \sum_{i=P_{д\min}}^{i=P_{д\max}} P_{прив\,ik} \cdot \tau_k \cdot \tau_i \,, \qquad (5.2)$$

где $P_{прив\ ik}$ – средняя мощность, потребляемая электроприводом от энергоустановки при его работе на i-м режиме нагрузки k-й температуре наружного воздуха;

τ_k – доля времени работы тепловоза при k-й температуре наружного воздуха от общего времени работы тепловоза;

τ_i – доля времени работы автономного локомотива на i-м режиме нагрузки от общего времени работы тепловоза;

$P_{д\,max}, P_{д\,min}$ – максимальная и минимальная мощности энергоустановки;

τ_{max}, τ_{min} – максимальная и минимальная температуры наружного воздуха.

Среднеэксплуатационный расход дизельного топлива на электропривод вентилятора:

$$В_{пр.в.i} = g_e \cdot P_{с.э.}, \qquad (5.3)$$

где g_e – удельный расход топлива дизелем.

В результате расчета установлено, что среднеэксплуатационная мощность, потребляемая электроприводом вентилятора составляет 21,25 % от номинальной мощности электропривода.

В работе [82] показано, что среднеэксплуатационная мощность при релейном управлении, затрачиваемая на электропривод вентиляторов, при питании от синхронного генератора составляет 29,8 кВт. Номинальная мощность мотор-вентилятора составляет 47,8 кВт. Расчет проводился для вентилятора охлаждения тяговых электродвигателей автономного локомотива мощностью 2200 кВт.

При использовании электропривода с частотно-управляемым асинхронным двигателем для охлаждения тяговых электродвигателей магистрального тепловоза той же мощности с применением в качестве приводного двигателя типа 4АН250S6У3 затраты мощности на электропривод составят 11,69 кВт.

Таким образом, использование электропривода с частотно-управляемым асинхронным двигателем по сравнению с релейной системой может дать выигрыш по среднеэксплуатационным потерям 18,11 кВт.

Экономия потребления электроэнергии в этом случае за год работы составит 54330 кВт·ч. При среднем удельном расходе топлива 0,208 кг/кВт·ч экономия топлива в случае применения электропривода с частотно-управляемым асинхронным двигателем 11300 кг в год на систему охлаждения тяговых электродвигателей по сравнению с релейной системой управления.

Заключение

В работе решена актуальная задача научно-технического характера, которая заключается в разработке АСУТ ТАД тепловоза, содержащей электропривод ВО с преобразователем частоты как исполнительное устройство для плавного управления температурой в широком диапазоне. Итоги диссертации дают возможность сформулировать последующие ключевые выводы и результаты:

1. Проведенный анализ конструктивных и схемных решений СО тягового оборудования локомотивов и их технических характеристик позволяет сделать вывод о том, что оптимальным вариантом организации СО ТАД является применение АСУТ, содержащих электропривод ВО с преобразователем частоты как исполнительное устройство.

2. Разработана математическая модель для исследования установившихся и переходных тепловых процессов ТАД. Установлено, что наиболее нагретыми узлами двигателя при отсутствии охлаждения являются лобовая часть обмотки статора и обмотка ротора по всей своей длине. При этом значение температуры обмотки статора в среднем на 5 °С выше температуры обмотки ротора по всей длине двигателя. Наиболее теплонагруженным узлом двигателя при использовании охлаждения является пазовая часть обмотки статора на расстоянии 2/3 его длины со стороны подачи охлаждающего воздуха. Следующим по величине нагрева узлом двигателя является обмотка (стержни) ротора на том же расстоянии; разница в температуре между пазовой частью обмотки статора и стержнями ротора составляет 2…10 °С при отсутствии охлаждения и 1,5…6 °С при номинальном расходе охлаждающего воздуха в диапазоне токов статора 0,5…1,1$I_{ном}$; время переходного процесса для всех узлов ТАД примерно одинаково и отличается не более чем на 5…10%.

3. Синтезированы передаточные функции и рассмотрены статические и динамические характеристики ТАД как объекта управления температурой в структуре АСУТ. Установлено, что ТАД как объект управления температурой

удовлетворительно аппроксимируется апериодическим звеном первого порядка.

4. Синтезирован регулятор температуры, состоящий из изодромных звеньев и звеньев обратной связи, обеспечивающий требуемые значения критериев качества переходного процесса разработанной системы управления температурой тягового асинхронного двигателя, а также ПИ-регулятор, обеспечивающий настройку системы на технический оптимум;

5. Разработана АСУТ ТАД, содержащая АДПЧ с системой скалярного управления по закону u/f^2=const. Предложено использование комбинированного регулятора АСУТ и ПИ-регулятор, обеспечивающего настройку системы на тезнический оптимум. Установлено, что ее применение позволяет плавно управлять температурой в диапазоне 0…180 °С с показателями качества зависящими от температуры ТАД, тока статора ТАД и подачи охлаждающего воздуха.

6. Разработана экспериментальная установка, содержащая АД мощностью 14 кВт с нагрузкой, имитирующей механическую часть тягового привода, центробежный вентилятор охлаждения с воздуховодом, приводимый в движение АД мощностью 2,2 кВт. На данный стенд получены патенты на полезные модели № 148359 и № 156446.

7. Проведены экспериментальные исследования процессов нагрева и охлаждения АД, которые подтвердили адекватность разработанной математической модели. Расхождение результатов при определении времени переходного процесса не превышает 3 %, при определении значения температуры – 10 %.

8. По результатам проведенного расчета технико-экономической эффективности применения разработанной АСУТ ТАД на тепловозе было установлено, что при среднем удельном расходе топлива 0,208 кг/кВт·ч экономия топлива в случае применения электропривода с частотно-управляемым асинхронным двигателем 11300 кг в год на систему охлаждения тяговых электродвигателей по сравнению с релейной системой управления.

Список литературы

1 Алексеев, Е.А. Тяговые электрические машины и преобразователи. / Е.А. Алексеев – Л.: Энергия, 1977. – 444 с.

2 Ануфриев, И.Е. MatLab 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

3 Анучин, А.С. Двухмассовая тепловая модель для энергоэффективного выбора асинхронного двигателя / А.С. Анучин, К.Г. Федорова // Труды VII Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. – Иваново, ГОУ ВПО ИГЭУ, 2012. – №3. – С. 71 – 74.

4 Анучин, А.С. Двухмассовая тепловая модель асинхронного двигателя / А. С. Анучин, К. Г. Федорова // Электротехника. – 2014. – № 2. – С. 21 – 25.

5 Кравчик, А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик [и др.] – М.: Энергия, 1982. – 504 с.

6 Балакирев, В.С. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления / В.С. Балакирев, Е.Г. Дудников, А.М. Цирлин. – М.: Энергия, 1967. – 232 с.

7 Башарин, А.В. Управление электроприводами / А.В. Башарин, А.В. Новиков, Г.Г. Соколовский – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.

8 Балакирев, В.С. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления / В.С. Балакирев, Е.Г. Дудников, А.М. Цирлин – М.: Энергия, 1967. – 132 с.

9 Башук, И.Б. Электропередача для тепловозов и газотурбовозов с синхронным генератором и полупроводниковыми выпрямителями / И.Б. Башук, А.Е. Зорохович. – Тр.. – Трансжелдориздат, 1958. – 175 с.

10 Берштейн, Л.М. Изоляция электрических машин / Л.М. Берштейн – М.: Энергия,1971. – 201 с.

11 Беспалов, В.Я. Математическая модель асинхронного двигателя в обобщенной ортогональной системе координат / В.Я. Беспалов, Ю.А. Мощинский, А.П. Петров // Электричество. – 2002. – № 8. – С. 33 – 38.

12 Беспалов, В.Я. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя / В.Я.

Беспалов, Ю.А. Мощинский, В.И. Цуканов // Электричество. – 2003. – № 4 – С. 20 – 26.

13 Бондаренко, Д.А. Комплексная физическая модель тягового электропривода с асинхронными двигателями / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, А.В. Самотканов, Д.А. Бондаренко // Наука и техника транспорта, МГУПС, 2014. – №3 – С. 31 – 38.

14 Бондаренко, Д.А. Комплексная установка для исследования автоматических систем охлаждения асинхронных тяговых двигателей / Д.А. Бондаренко // Вестник Брянского государственного технического университета, 2015. – №2. – С. 22 – 25.

15 Бондаренко, Д.А. Результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в асинхронном двигателе / А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко // Вестник Брянского государственного технического университета, 2015. – №3. – С. 17 – 23.

16 Бондаренко, Д.А. Математическая модель установившихся тепловых процессов в асинхронном двигателе / В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2015. – №5-2. – С. 221 – 226.

17 Бондаренко, Д.А. Частотно управляемый привод вентилятора охлаждения двигателя внутреннего сгорания / Г.С. Михальченко, В.И. Воробьев, Д.А. Бондаренко // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. – Брянск: БГТУ, 2013. – С. 194 – 199.

18 Бондаренко, Д.А. Минимизация мощности потерь электропривода с асинхронным двигателем / А.А. Пугачев, А.С. Космодамианский, Д.А. Бондаренко // Энерго- и ресурсосбережение XXI век.: материалы XI международной научно-практической интернет-конференции, 01 марта – 30 июня 2013 г., г. Орёл / Под редакцией д-ра техн. наук, проф. В.А. Голенкова, д-ра техн. наук, проф. А.Н. Качанова, д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Степанова. – Орёл: Госуниверситет-УНПК, 2013. – С. 89 – 92.

19 Бондаренко, Д.А. Автоматический комбинированный регулятор температуры энергетической установки транспортного средства. / В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. – Брянск: БГТУ, 2013. – С. 207 – 214.

20 Бондаренко, Д.А. Комплексная установка для моделирования динамических процессов в тяговом приводе локомотива с электропередачей / Д.А. Бондаренко // VII конференция «Будущее машиностроения России». 24–27 сентября, МГТУ им. Баумана, г. Москва – 2014 г., С. 219 – 220.

21 Бондаренко, Д.А. Расчет сопротивлений эквивалентной тепловой схемы замещения асинхронного двигателя / А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. – Брянск: БГТУ, 2015. – 263 с. – С. 205 – 218.

22 Бондаренко, Д.А. Привод вентилятора охлаждения асинхронного двигателя локомотива / Д.А. Бондаренко // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. – Брянск: БГТУ, 2015. – 263 с. – С. 219-224.

23 Бондаренко, Д.А. Результаты расчета тепловых процессов в асинхронном двигателе / А.А. Пугачев, Д.А Бондаренко // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов II Международной (V Всероссийской) научно-технической конференции – Уфа: Издательство УГНТУ, 2015. – С. 220 – 223.

24 Борисенко, А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах / А.И. Борисенко, В.Г. Данько, А.И. Яковлев. – Л.: Энергия, 1974. – 560 с.

25 Борисенко, А.И. Охлаждение промышленных электрических машин / А.И. Борисенко, О.Н. Костиков, А.И. Яковлев – Москва.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.

26 Бочаров, В.И Магистральные электровозы: Общие характеристики. Механическая часть / В.И. Бочаров [и др.]. – М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.

27 Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я. Браславский, З.Н. Ишматов, В.Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 256 с.

28 Браславский, И.Я. Математические модели для определения энергопотребления различными типами асинхронных электроприводов и примеры их использования / И.Я. Браславский, Ю.В. Плотников // Электротехника. – 2005. – № 9. – С. 14 – 16.

29 Веников, В.А. Теория подобия и моделирование / В.А. Веников // М.: Высшая школа, 1976, 479 с.

30 Виноградов, А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А.Б. Виноградов // Электротехника. – 2005. – №5. – С. 57 – 61.

31 Внешнее устройство аналогово-цифрового преобразования для IBM PC/AT – совместимых компьютеров ЛА-2USB. Руководство по эксплуатации.

32 Воробьев, В.И. Исследование динамических процессов в тяговом приводе локомотива с асинхронным двигателем в режимах пуска, разгона и движения с низкими скоростями / В.И. Воробьев // дисс… канд. техн. наук. – Брянск. 1981. – 183 с.

33 Воробьев, В.И. Автоматический комбинированный регулятор температуры энергетической установки / В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. – Брянск.: БГТУ, 2013. – С. 207 – 215.

34 Воробьев, В.И. Энергетические показатели качества электропривода вспомогательных систем тягового подвижного состава / А.А. Пугачев, В.И. Воробьев, А.С. Космодамианский, А.В. Самотканов, Г.С. Михальченко // Мир транспорта и технологических машин, № 4, 2014.

35 Готтер, Г. Нагревание и охлаждение электрических машин / Г. Готтер – Москва.: Госэнергоиздат, 1961. – 480 с.

36 Гуревич, Э.И. Переходные тепловые процессы в электрических машинах / Э.И. Гуревич, Ю.Л. Рыбин – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983, – 216 с.

37 Дорохина, Е.С. Мониторинг теплового состояния асинхронных тяговых электродвигателей / Е.С. Дорохина // дисс. … канд. техн. наук. – Томск, 2015. – 155 с.

38 Дорохина, Е.С. Применение метода конечных разностей для определения распределения температуры в изоляции тяговых электрических машин / Е.С. Дорохина, О.Л. Рапопорт, А.А. Голдовская (Хорошко) // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 6. – С. 29 – 30.

39 Елисеев, Ш.А. Справочник по автоматизированному электроприводу. / под редакцией Е.А. Елисеева, А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

40 Захарченко, Д.Д. Тяговые электрические машины: учебник для вузов ж.д. транспорта / Д.Д. Захарченко, Н.А. Ротанов – М.: Транспорт, 1991. – 343 с.

41 Захарчук, А.С. Исследование и разработка асинхронного мотор-вентилятора с двухслойным ротором для тепловоза / А.С. Захарчук // автореф. дисс… канд. техн. наук. – М. 1977. – 22 с.

42 Захарчук, А.С. Сравнительный анализ фазового и частотного способов регулирования асинхронных мотор-вентиляторов холодильной камеры тепловоза с различной конструкцией роторов / А.С. Захарчук // Производство и конструирование транспортных машин. Вып. 10. – Харьков, 1978. – С. 33 – 38.

43 Иванов-Смоленский, А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование / А.В. Иванов-Смоленский // М.: Энергия, 1969, 303 с.

44 Иоффе, А.Б. Тяговые электрические машины / А.Б. Иоффе – М. – Л.: Энергия, 1965. – 232 с.

45 Ключев, В.И. Теория электропривода: учебник для вузов / В.И. Ключев – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

46 Ключев, В.И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: учебник для вузов / В.И. Ключев, В.М. Терехов – М.: Энергия, 1980. – 360 с.

47 Ковач, К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1966. – 744 с.

48 Ковчин, С.А. Теория электропривода: учебник для вузов / С.А. Ковчин – СПб.: Энергоатомиздат. 2000. – 496 с.

49 Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов – М.: Высш.шк., 2001 – 327 с.

50 Копылов, И. П. Электрические машины: учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М.: Высш. шк.; Логос, 2000. – 607 с.

51 Космодамианский, А.С. Влияние температуры тягового асинхронного двигателя на его режимы работы / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Электротехника. – 2011. – № 8. – С. 50 – 54.

52 Космодамианский, А.С. Измерение и регулирование температуры обмоток тяговых электрических машин локомотивов: монография / А.С. Космодамианский. – М.: РГОТУПС, 2009. – 285 с.

53 Космодамианский, А.С. Экспериментальная установка для исследования и регулирования процессов нагрева и охлаждения асинхронного двигателя / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. Новочеркасск, 2011. № 2 (62). – С. 65 – 76.

54 Космодамианский, А.С. Автоматическая система регулирования температуры тяговых электрических машин локомотивов / А.С. Кос-модамианский [и др.] // Известия ОрелГТУ. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, №3 – 2010. – С. 106 – 111.

55 Космодамианский, А.С. Сравнительная оценка различных способов скалярного управления тяговым асинхронным двигателем с учетом температуры обмоток / А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, №6 – 2011. – С. 129 – 135.

56 Космодамианский, А.С. Сравнительная оценка электроприводов вспомогательных агрегатов подвижного состава / А.С. Космодамианский,

В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, А.Д. Хохлов // Электроника и электрооборудование транспорта, № 1 – 2011. – С. 31 – 34.

57 Космодамианский, А.С. Система управления тягового электропривода с контролем температуры теплонагруженных элементов / А.С, Космодамианский, Л.М, Клячко, В.И. Воробьев, А.А, Пугачев // Электротехника. – 2014. – № 8. – С. 38 – 43.

58 Космодамианский, А.С. Автоматическое регулирование температуры обмоток тяговых электрических машин локомотивов / А.С. Космодамианский. – М.: Маршрут, 2005. – 256 с.

59 Космодамианский, А.С. Теоретические основы и разработка систем регулирования температуры тяговых электрических машин локомотивов / А.С. Космодамианский / Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. – М., 2002. – 285 с.

60 Копылов, И.П. Проектирование электрических машин / под ред. И.П. Копылова. – М.:Энергия, 1980. – 495 с.

61 Кравчик, А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А / А.Э. Кравчик [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.

62 Кривицкий, С.О. Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами / С.О. Кривицкий, И.И. Эпштейн // М.: Энергия, 1970. – 152 с.

63 Кузьмич, В.Д. О возможности регулирования режимов охлаждения тяговых электрических машин тепловозов// Исследование работы узлов и деталей тепловоза и совершенствование их конструкций// Тр. Моск. ин-та инж. ж.-д. трансп. (МИИТ). – М.: Транспорт, 1979. – Вып. 627. – С. 76 – 87.

64 Кузьмич, В.Д. Совершенствование системы охлаждения тяговых электрических машин тепловозов: Автореф. дисс. … докт. техн. наук, – М., 1978. – 33 с.

65 Козлов, Л.Г. Тяговые электрические двигатели / Л.Г. Козлов, В.А. Шаров // Учебное пособие к выполнению курсового проекта. М.: МИИТ, 2011, – 145 с.

66 Курбасов, А.С. Регулируемая система вспомогательных электрических машин электроподвижного состава переменного тока / А.С. Курбасов [и др.] – Труды ЦНИИ МПС, 1975. Вып. 541. – С. 52 – 55.

67 Куликов, Ю.А. Системы охлаждения силовых установок тепловозов. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.

68 Логинова, Е.Ю. Исследование неравномерности нагрева обмоток асинхронного тягового электродвигателя / Е.Ю. Логинова, Ф.В. Тихонов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2007. – № 2 – С. 39 – 42.

69 Луков, Н.М. Автоматизация систем охлаждения тепловозов: учебное пособие / Н.М. Луков – М.: изд. ВЗИИТ, 1974. – 56 с.

70 Луков, Н.М. Автоматизация тепловозов, газотурбовозов и дизель-поездов / Н.М. Луков – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.

71 Луков, Н.М. Автоматические системы управления и регулирования тепловозов: учебное пособие / Н.М. Луков – М.: изд. МИИТ, 1983. – 144 с.

72 Луков, Н.М. Автоматические системы управления локомотивов / Н.М. Луков, А.С. Космодамианский. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 429 с.

73 Луков, Н.М. Автоматическое регулирование температуры двигателей / Н.М. Луков – М.: Машиностроение, 1977. – 224 с.

74 Луков, Н.М. Математическая модель системы охлаждения тяговых электрических машин локомотивов как объекта регулирования температуры / Н.М. Луков, В.М. Попов, А.С. Космодамианский. – М.: РГОТУПС, 1998. – 16 с.

75 Макаров, И.М., Линейные автоматические системы / И.М. Макаров, Б.М. Менский – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.

76 Маковский, В.А. О корректности аппроксимации динамических свойств объектов регулирования передаточной функцией инерционного звена первого порядка с запаздыванием / В.А. Маковский, А.И. Лаврентик // Известия вузов. Энергетика. – 1973. – №10. – С. 87 – 92.

77 Могильников, В.С. Асинхронные электродвигатели с массивными и двухслойными роторами / В.С. Могильников – ВМФ. Севастополь, 1967. – 94 с.

78 Моисеев, В.О. Исследование четырехмассовой термодинамической математической модели асинхронного двигателя / В.О. Моисеев, Е.Я. Омельченко, О.А. Тележкин // ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова. – 2009. №2. – С. 31 – 35.

79 Мощинский, Ю.А. Обобщенная математическая модель частотно-регулируемого асинхронного двигателя с учетом потерь в стали / Ю.А. Мощинский, Аунг Вин Тут // Электричество. – 2007. – № 11. – С. 60 – 66.

80 Мустафин, М.А. Энергосберегающие системы электропривода центробежных насосных агрегатов / М.А. Мустафин // автореф. дисс… докт. техн. наук. – Алматы: КНТУ, 2007. – 43 с.

81 Некрасов, О.А. Вспомогательные машины электровозов переменного тока / О.А. Некрасов, А.М. Рутштейн – М.: Транспорт, 1988. – 223 с.

82 Некрасов, О.А. Взаимосвязь между условиями работы электроподвижного состава и нагреванием обмоток тяговых двигателей / О.А. Некрасов // Труды ВНИИ ж.-д. транспорта. – Вып. 576. – 1977. – С. 47 – 65.

83 Онищенко, Г.Б. Теория электропривода / Г.Б. Онищенко – Высшее образование: Инфра-М, 2015. – 304 с.

84 Орленко, А.И. Энергосбережение в цепях вспомогательных машин электровозов переменного тока на основе ступенчатого управления производительностью вентиляторов / А.И. Орленко // дисс… канд. техн. наук. – Иркутск. 2004. – 196 с.

85 Осташевский, Н.А. Исследование теплового состояния асинхронного частотно-управляемого двигателя с помощью метода конечных элементов / Н.А. Осташевский, В.П. Шайда // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2010. – № 75. – С. 46 – 51.

86 Осташевский, Н.А. Исследование теплового состояния частотно-управляемого асинхронного при изменении нагрузки / Н.А. Осташевский, А.Н. Петренко // Электротехника и электромеханика. – 2010. – №35. – С. 25 – 29.

87 Осташевский, Н.А. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в стационарных режимах

/ Н.А. Осташевский, А.Н. Петренко // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Тематич. вып. науч.-техн. журнала «Электроинформ». – 2009. – С.266 – 271.

88 Осташевский, Н.А. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в нестационарных режимах / Н.А. Осташевский, В.П. Шайда, А.Н. Петренко // Электротехника и электромеханика. – 2011. – № 5. – С. 39 – 42.

89 Осташевский, Н.А. Потери частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования и типах преобразователей частоты / Н.А. Осташевский, В.Н. Иваненко, А.Н. Петренко // Электротехника и электромеханика. – 2009. – №3. – С. 37 – 41.

90 Панов, Н.И. Тепловозы / под ред. Н.И. Панова – М.: Машиностроение, 1976 – 544 с.

91 Пановко, Я. Г. Введение в теорию механических колебаний / Я.Г. Пановко // 2-е изд., перераб. – М.: Наука. Главная ред. физ.-мат. Литературы, 1980. – 272 с.

92 Пономарев, В.М. Основы автоматического управления и регулирования: учеб. пособие / Л.И. Каргу [и др.] // Под. ред. В.М. Пономарева, А.П. Литвинова – М.: Высш. шк., 1974. – 439 с.

93 Патент на изобретение 2262603 РФ, МПК F02N17/047. Автоматическая система регулирования температуры наддувочного воздуха двигателя внутреннего сгорания / Н.М. Луков, О.Н. Ромашкова, А.С. Космодамианский, И.А. Алейников; заявитель и патентообладатель Российский государственный открытый технический университет путей сообщения Министерства путей сообщения Российской Федерации (РГОТУПС). – № 2003132782/06; заявл. 11.11.2003. – 3 с.: ил.

94 Патент на изобретение 2369752 РФ, МПК F01P7/00 (2006.01)F02D45/00 (2006.01). Автоматический комбинированный микропроцессорный регулятор температуры энергетической установки транспортного средства / Н.М. Луков, О.Н. Ромашкова, А.С. Космодамианский, И.А. Алейников; заявитель и патентообладатель Российский государственный открытый

технический университет путей сообщения Министерства путей сообщения Российской Федерации (РГОТУПС). – № 2007143595/06; заявл. 27.11.2007. – 4 с.: ил.

95 Патент на изобретение 2177669 РФ, МПК Н 02 К 9/04. Устройство для автоматического регулирования температуры обмоток тяговой электрической машины постоянного тока / А.С. Космодамианский, Н.М. Луков, В.М. Попов; заявитель и патентообладатель Российский государственный открытый технический университет путей сообщения Министерства путей сообщения Российской Федерации (РГОТУПС). – № 2000105953/09; заявл. 14.03.2000. – 4 с.: ил.

96 Патент на полезную модель 148359 РФ, МПК G01M17/00. Стенд для моделирования динамических процессов в тяговом приводе локомотивов с электропередачей / Космодамианский А.С., Воробьев В.И., Самотканов А.В., Пугачев А.А., Воробьев Д.В., Бондаренко Д.А.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения» МГУПС (МИИТ). – № 2014113138/11; заявл. 04.04.2014. – 4 с.: ил.

97 Патент на полезную модель 156446 РФ, МПК G01M17/08. Стенд для моделирования динамических процессов в тяговом приводе локомотивов с электропередачей / Воробьев В.И., Космодамианский А.С., Антипин Д.Я., Измеров О.В., Пугачев А.А., Бондаренко Д.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет». – № 2015109745/11; заявл. 19.03.2015. – 4 с.: ил.

98 Петрушин, В.С. Особенности тепловых расчетов неустановившихся режимов работы регулируемых асинхронных двигателей / В.С. Петрушин, А.М. Якимец // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2008. – № 71. – С. 47 – 51.

99 Попов, Ю.В. Способы регулирования работы вентилятора охлаждающего устройства тепловоза 2М62 / Ю.В. Попов // ВИНИТИ. Транспорт. Наука, техника, управление. Сборник технической информации. – М., 2005. – № 2. – С. 31 – 32.

100 Попов, Ю.В. Совершенствование исполнительно-регулирующих устройств локомотивных автоматических систем регулирования температуры, содержащих осевые вентиляторы / Ю.В. Попов // дисс… канд. техн. наук. – М. 2007. – 143 с.

101 Постников, И.М. Выбор оптимальных геометрических размеров в электрических машинах / И.М. Постников – М.: ГЭИ., 1952 – 60 с.

102 Прокопенко, С.А. Асинхронные мотор-вентиляторы с двухпакетной конструкцией ротора для мощных магистральных тепловозов / С.А. Прокопенко // Системы и узлы перспективных тепловозов: Сб. науч. тр.: под ред. Ю.А. Куликова – Киев: УМК ВО, 1990. – 212 с. – С. 114 – 118.

103 Пугачев, А.А. Моделирование энергетических процессов в электроприводах с асинхронным двигателем на базе эквивалентной схемы замещения / А.А. Пугачев, В.И. Воробьев, А.С. Космодамианский // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: IV Международная научно-техническая конференция: сборник трудов. – Тольятти, ч. 1, 2012. – С. 208 – 213

104 Пугачев, А.А. Регулируемый электропривод вспомогательных агрегатов подвижного состава с асинхронным двигателем, имеющим поворотный статор / А.А. Пугачев // дисс… канд. техн. наук. – Москва. 2009. – 153 с.

105 Савоськин, А.Н. Автоматизация электроподвижного состава / А.Н. Савоськин // М.:Транспорт, 1990. – 311 с.

106 Савоськин, А.Н. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом: учебник: в 3 ч. Ч. 1: Теория автоматического управления / под ред. Л.А. Баранова, А.Н. Савоськина – изд-во УМЦ ЖДТ (Маршрут), 2014. – 400 с.

107 Самотканов, А.В. Электропривод вентилятора охлаждения локомотивных автоматических систем регулирования температуры / А.В. Самотканов // дисс… канд. техн. наук. – Москва. 2015. – 156 с.

108 Сандлер, А.С. Динамика каскадных асинхронных электроприводов / А.С. Сандлер, Л.М. Тарасенко. – М.; Энергия, 1977. – 200 с.

109 Сечин, В. И. Проектирование асинхронных двигателей / В. И. Сечин, Е. В. Разумных. – Хабаровск: ДВГУПС, 2011. – 132 с.

110 Смирнов, В.П. Непрерывный контроль температуры предельно нагруженного оборудования электровоза; монография / В.П. Смирнов. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2003. – 328 с.

111 Снегирев, Д.А. Асинхронный электродвигатель для частотно-регулируемого электропривода турбомеханизмов / Д.А. Снегирев // дисс… канд. техн. наук. – Воронеж, 2006. – 142 с.

112 Соколов, М.М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов / М.М. Соколов – М.: Энергия, 1976. – 488 с.

113 Соломин, В.А. Пусковые параметры асинхронных двигателей с механически регулируемым сопротивлением обмотки ротора / В.А. Соломин, К.А. Шухмин, В.П, Янов // Электровозостроение Сб. науч. тр. ОАО «Всерос. н.-и. и проектно-конструкт. ин-т электровозостроения» (ОАО «ВЭлНИИ»). – 1997. – т. 37. – С. 55 – 63.

114 Терехов, В.М. Системы управления электроприводов / В.М. Терехов, О.И. Осипов – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.

115 Тихонов, Ф.В. Разработка методов выбора параметров асинхронного тягового двигателя с учетом теплового состояния обмоток / Ф.В. Тихонов // дисс. … канд. техн. наук. – Москва, 2008. – 135 с.

116 Усольцев, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Усольцев // Учебное пособие – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, – 94 с.

117 Чащин, В.В. Повышение эффективности работы асинхронного тягового электродвигателя с учетом его теплового состояния / В.В. Чащин // дисс. … канд. техн. наук. – Москва, 2004. – 179 с.

118 Челомей, В.Н. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т. / В. Н. Челомей // М.: Машиностроение, 1979. – Т. 2. Колебания нелинейных механических систем/ Под ред. И. И. Блехмана. 1979, – 351 с.

119 Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

120 Шрейнер, Р.Т. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления: учебное пособие. / Р.Т. Шрейнер, А.В. Костылев, В.К. Кривовяз, С.И. Шилин // Екатеринбург: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. – 14 с.

121 Шубенко, В.А. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением / В.А. Шубенко, И.Я. Браславский – М.: Энергия, 1972. – 200 с.

122 Широков, О. Г. Тепловые схемы замещения электроэнергетических устройств / О. Г. Широков, Д. И. Зализный // Наукоемкие технологии. – 2008. – № 2. – С. 63 – 67.

123 Щербаков, В.В. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса / В.В. Щербаков, О.Л. Рапопорт, А.Б. Цукублин // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – №7. – С. 156 – 159.

124 Храменков, С.А. Исследование электрических систем плавного регулирования частоты вращения мотор-вентиляторов для новых тепловозов / С.А. Храменков, В.М, Алексеев, В.С. Строков // ВНИТИ. Труды института. Вып. 45. – 1977. – С. 38 – 50.

125 ГОСТ 12259-75. Машины электрические. Методы определения расхода охлаждающего газа.

126 Aissa, K. Vector control using series iron loss model of induction motors and power loss minimization / K. Aissa, K.D. Eddine // World academy of science, engineering, and technology, 52, 2009. – pp. 142 – 148.

127 Appeldaum J. Performance analysis of an induction machine /IEET Power Eng. Soc. Conf. Par // Winter Meet, New-York, N.Y., – 1985, P. 93.

128 Kylander, G. Thermal modeling of small cage induction motors / G. Kylander // Technical report № 265, submitted to the School of Electrical and Computer Engineering Chalmers University of Technology in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Goteborg, 1995. – P. 113.

129 Mahdavi, S. Thermal Modeling as a Tool to Determine the Overload Capability of Electrical Machines / S. Mahdavi / International Conference on

Electrical Machines and Systems. – Oct. 26–29. – 2013. – Busan. – Korea. – pp. 454–458.

130 Mahmoudi, M. Thermal modelling of the Synchronous Reluctance Machine / M. Mahmoudi // Masters' Degree Project. Electrical Machines and Power Electronics School of Electrical Engineering Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2012. – P. 55.

131 Martin, A. The S252 Dual-System AC Electric Locomotive with Three-Phase Drive for Spanish Railways / A. Martin, D. Volker // Electrische Bahnen – №5, – 1990. – pp. 34 – 39.

132 Mezani, S. A combined electromagnetic and thermal analysis of induction motors / S. Mezani, N. Talorabet, B. Laporte // IEEE Trans. Magn. – vol. 41, – 2005. – no. 5. – pp. 1572– 1575.

133 Modest, M. F. Radiative Heat Transfer / M.F. Modest – New York: Academic. 2003. – P. 339.

134 Okoro, O.I. Dynamic and thermal modeling of induction machine with non-linear effect / O.I. Okoro // Kassel university press GmbH, Kassel, 2002. – P. 140.

135 Popova, L. Combined electromagnetic and thermal design platform for totally enclosed induction machines / L. Popova // Master's thesis. Lappeenranta university of technology faculty of technology department of electrical engineering, Lappeenranta, 2010. – P. 76.

136 Pugachev, A.A. Induction motor drives with minimal power losses / A. S. Kosmodamianskii, V. I. Vorob'ev, A. A. Pugachev // Russian Electrical Engineering, December 2012, Volume 83, Issue 12, pp 667 - 671.

137 Staton, D.A. Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models / D.A. Staton, A. Cavagnino // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – Vol. 55. – № 10. – October 2008. – pp. 3509 – 3516.

138 Staton, D. A. Thermal computer aided design advancing the revolution in compact motors / D. A. Staton // in Proc. IEEE IEMDC. – Boston, MA, pp. 858 – 863.

139 Trigeol, J. F. Thermal modeling of an induction machine through the association of two numerical approaches / J. F. Trigeol, Y. Bertin, P. Lagonotte // IEEE Trans. Energy Convers. – vol. 21, – 2006. – no. 2, pp. 314 – 323.

140 Venkataraman, B. Fundamentals of a motor thermal model and its applications in motor protection / B. Venkataraman [etc.] // – p. 41 – 45.

141 Vong, P. K. Coupled electromagnetic–thermal modeling of electrical machines / P.K. Vong, D. Rodger // IEEE Trans.Magn. – vol. 39. – 2003. –no. 3, pp. 1614 – 1617.

142 Wallmark, O. Analysis of Electrical Machines / O. Wallmark. – Royal Institute of Technology Stockholm. – Sweden. – 2012. – P. 76.

143 Pugachev, A.A. Induction motor drives with minimal power losses / A. S. Kosmodamianskii, V. I. Vorob’ev, A. A. Pugachev // Russian Electrical Engineering, December 2012, Volume 83, Issue 12, pp 667-671.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Программа расчета тепловых сопротивлений, теплоемкостей и мощности потерь асинхронного двигателя АО-63-4

```
disp('Расчет тепловых сопротивлений элементов электродвигателя АО-63-4');

disp('Тепловое сопротивление от корпуса к внутреннему воздуху электродвигателя - Rк-вн.в.')
   w=0;                % Частота вращения ротора электродвигателя
   rri=0.0975;                % Наружный эквивалентынй радиус ротора (стержней)
   a1=15+(6.75*w*rri)^0.65;
   rso=0.155;               % Наружный радиус статора
   lsh=0.207*2;                % Длина вала ротора
   lfe=0.15;               % Длина сердечника статора
   A1=pi*(rso^2+rso*(lsh-lfe));
   RIntFrame=(1*0.1)/(a1*A1);
   disp(sprintf('Rк-вн.в = %g К/Вт',RIntFrame));
   R20=RIntFrame;
   R26=RIntFrame;
   R28=RIntFrame;
   R33=RIntFrame;

disp('Тепловое сопротивление от ротора к внутреннему воздуху электродвигателя - Rр-вн.в.')
   a2=(16.4*w*rri)^0.65;
   bfin=0.04;               % Вылет крыльчатки ротора
   hfin=0.025;               % Высота крыльчатки ротора
   nfin=34;               % Количество элементов крыльчатки ротора
   rb=0.098;               % Средний радиус воздушного зазора
   A2=2*0.04*0.025*34+pi*rb^2;
   RIntRotor=(0.1*1)/(a2*A2);
   disp(sprintf('Rр-вн.в = %g К/Вт',RIntRotor));
   R75=RIntRotor;
   R82=RIntRotor;

disp('Тепловое сопротивление от вылета пазовой части обмотки статора к внутреннему воздуху - Rобм.с.-
Rвн.в.');
   a3=6.5+(5.25*w*rri)^0.6;
   rho=0.11;               % Наружный радиус лобовой части обмотки статора
   rhi=0.094;               % Внутренний радиус лобовой части обмотки статора
   lh=0.02;               % Толщина корпуса электродвигателя
   lhs=0.03;               % Расстояние от корпуса электродвигателя до вылета обмотки статора
   %rlk=(rho-rhi)/2;          % Средний радиус лобовой части обмотки статора
   rlk=(rho-rhi)/2;
   Qs=36;               % Число пазов обмотки статора
   F1=pi*(rho^2-rhi^2);
   F2=2*pi*rho*lh;
   F3=2*pi*rhi*lh;
   F4=Qs*2*pi*rlk*lhs;
   F5=F1-Qs*pi*rlk^2;
   A31=F3+F4+F5;
   RIntWStator=(0.1*1)/(a3*A31);
   disp(sprintf('Rобм.с.-Rвн.в. = %g К/Вт',RIntWStator));
   R36=RIntWStator;
   R42=RIntWStator;

disp('Тепловое сопротивление от вылета лобовой части обмотки статора к внутреннему воздуху - Rобм.с.-
Rвн.в.');
   F1=pi*(rho^2-rhi^2);
```

```
   F2=2*pi*rho*lh;
   A32=F1+F2;
   RIntEWStator=(1)/(a3*A32);
   disp(sprintf('Rлоб.обм.с.-Rвн.в. = %g К/Вт',RIntEWStator));
   R35=0.5*RIntEWStator;
   R43=0.5*RIntEWStator;

disp('Тепловое сопротивление от средней части корпуса к окружающему воздуху - Rк2-окр.в.')
   hfr=0.02;                % Высота корпуса электродвигателя
   afr=40;                  % Теплопроводность корпуса электродвигателя (сталь)
  %  RFr2=hfr/(afr*6.28*(rso-hfr));
%RFr2=100*log(0.18/0.155)/(afr*0.27*2*pi);
   RFr2=(9*1)/(1.5*15.09*0.218)
   disp(sprintf('Rк2-окр.в. = %g К/Вт',RFr2));
   R1=RFr2/9;
   R2=RFr2/9;
   R3=RFr2/9;
   R4=RFr2/9;
   R5=RFr2/9;
   R6=RFr2/9;
   R7=RFr2/9;
   R8=RFr2/9;
   R9=RFr2/9;

disp('Радиальное тепловое сопротивление ярма статора электродвигателя к зубцам статора - Rя-з')
   %!!!*5
   rsi=0.11;                % Внутренний радиус статора электродвигателя
   ht=0.028;                % Высота зубца статора
   ayoke=47;                % Теплопроводность ярма статора (сталь)
   Lact=0.15;               % Длина средней части ярма статора
   RYokeR=(log(rso)-log(rsi+ht))/(2*pi*ayoke*Lact);
   disp(sprintf('Rя-з = %g К/Вт',RYokeR));
   R37=RYokeR/5;
   R38=RYokeR/5;
   R39=RYokeR/5;
   R40=RYokeR/5;
   R41=RYokeR/5;

disp('Тепловое сопротивление воздушного зазора между сердечником и корпусом статора - Rвозд.з.статора')
   ge=6e-5;                 % Толщина воздушного между сердечником и корпусом статора зазора в мкм
   aair=0.022;              % Теплопроводность воздушного зазора
   RairgS=(0.8*ge)/(0.04*(aair*2*pi*(ge+rso)));
   disp(sprintf('Rвозд.з.статора = %g К/Вт',RairgS));
   R21=RairgS;
   R22=RairgS;
   R23=RairgS;
   R24=RairgS;
   R25=RairgS;

disp('Тепловое сопротивление зубцов статора - Rзуб.с.')
   %!!!*5*36
   x1=0.009;
   x2=0.005;
   x3=0.007;
   x4=0.012;
   y1=0.003;
   y2=0.008;
   y3=0.016;
   y4=0.005;
   k=(x2-x1)/2*y2;
   Arc=((2*y4)/(x4-x3))*(-pi/2+(k/sqrt(k^2-1))*(tan(1/sqrt(k^2-1))^(-1)));
   RSTeeth=3*(1/(2*Qs*Lact*ayoke))*(2*y1/x1+((2*y2)/(x2-x1))*log(x2/x1)+((2*y3)/(x3-x2))*log(x3/x2)+Arc);
```

```
   %RSTeeth=(1)/(4*pi*(0.11^2-0.0985^2)*40*0.15*0.97*0.003)*(0.11^2+0.0985^2-
((4*0.11^2*0.0985^2*log(0.11/0.0985))/0.11^2-0.0985^2));
   disp(sprintf('Rзуб.с. = %g К/Вт',RSTeeth));
   R62=RSTeeth;
   R63=RSTeeth;
   R64=RSTeeth;
   R65=RSTeeth;
   R66=RSTeeth;


disp('Тепловое сопротивление обмотки статора - Rобм.с.')
   %!!!/6
   di=0.002;
   da=0.001;
   d=di+da;
   xsl2=0.011;
   xsl3=0.013;
   b=(xsl3+xsl2)/2-2*d;
   Aq=0.00036;
   h=((2*Aq)/(xsl3+xsl2)-2*d);
   as=5;                    % Теплопроводность паза обмотки статора
   ai=1;                    % Теплопроводность изоляции паза обмотки статора
   aa=40;                    % Теплопроводность ярма статора (сталь)
   Rx0=b/h*as;
   Ry0=h/b*as;
   Rix=(di/h*ai)+(da/h*aa);
   Riy=(di/b*ai)+(da/b*aa);
   Rx=0.5*(Rix+Rx0/6);
   Ry=0.5*(Riy+Ry0/6);
   L=0.15;
   RWindStator=(1*((Rx*Ry))/(Qs*L*(Rx+Ry)))*(1-((Rx0*Ry0)/(720*Rx*Ry)));
   disp(sprintf('Rобм.с. = %g К/Вт',RWindStator));
   R45=RWindStator/6;
   R46=RWindStator/6;
   R47=RWindStator/6;
   R48=RWindStator/6;
   R49=RWindStator/6;
   R50=RWindStator/6;

disp('Тепловое сопротивление лобовой части обмотки статора - Rлоб.обм.с.')
   tp=0.0106;                    % Полюсный шаг
   lep=0.05;                % Эмпирическая величина для двигателей малой мощности
   acu=401;                 % Теплопроводность меди
   Acu=0.0012;              % Площадь поперечного сечения лобовой обмотки статора
   lav=Lact+1.2*tp+lep;       % Длина половины лобовой части статорной обмотки
   REndWindStator=lav/(acu*Acu*Qs*6);
   disp(sprintf('Rлоб.обм.с. = %g К/Вт',REndWindStator));
   R44=REndWindStator;
   R51=REndWindStator;

%disp('Тепловое сопротивление вала ротора - Rв')
   ash=40;                % Теплопроводность вала ротора (сталь)
   RShaft=lsh/(pi*rri^2*ash);
   disp(sprintf('Rв = %g К/Вт',RShaft));
   R91=RShaft/6;
   R92=RShaft/6;
   R93=RShaft/6;
   R94=RShaft/6;
   R95=RShaft/6;
   R96=RShaft/6;

%disp('Тепловое сопротивление подшипников ротора - Rподш')
   dbearning=0.08;           % Диаметр подшипника
```

```
RBearning=0.45*(0.12-dbearning)*(33-w*dbearning);
disp(sprintf('Rподш = %g К/Вт',RBearning));
R61=RBearning;
R67=RBearning;
R83=0.01;
R89=0.01;

disp('Тепловое сопротивление свободной части корпуса - Rк.св.')
lfe=0.055;              % Длина плоскости лобовой части обмотки статора
RFreeFrame=(lsh-lfe)/(2*afr*pi*((rso+hfr)^2-rso^2))/4;
disp(sprintf('Rк.св. = %g К/Вт',RFreeFrame));
R10=RFreeFrame/10;
R11=RFreeFrame/10;
R12=RFreeFrame/10;
R13=RFreeFrame/10;
R14=RFreeFrame/10;
R15=RFreeFrame/10;
R16=RFreeFrame/10;
R17=RFreeFrame/10;
R18=RFreeFrame/10;
R19=RFreeFrame/10;

disp('Тепловое сопротивление между стержнями ротора - Rр')
r5=0.093;               % Наружный радиус ротора
r8=0.0975;              % Эквивалентный радиус обмотки ротора
aal=237;                % Теплопроводность аллюминия
lr=0.120;               % Длина ротора электродвигателя
Rr=((-1*600)/(4*pi*(r5^2-r8^2)*aal*lr)*((r5^2+r8^2)-((4*r5^2*r8^2*log(r5/r8)/(r5^2-r8^2)))));
disp(sprintf('Rр = %g К/Вт',Rr));
R76=Rr/6;
R77=Rr/6;
R78=Rr/6;
R79=Rr/6;
R80=Rr/6;
R81=Rr/6;

disp('Тепловое сопротивление между стержнями ротора и воздушным зазором - Rр-возд.заз.')
%!!!*6
% RrVozZ=(-1/(2*pi*aal*lr))*(1-((2*r8^2*log(r5/r8))/(r5^2-r8^2)));
b11=0.002;
h11=(2*aair)/(2*b11);
RrVozZ=(0.1*6*10)/(2*pi*rb*0.15*h11)
disp(sprintf('Rр-возд.заз. = %g К/Вт',RrVozZ));
R69=RrVozZ/6;
R70=RrVozZ/6;
R71=RrVozZ/6;
R72=RrVozZ/6;
R73=RrVozZ/6;

disp('Тепловое сопротивление ярма статора - Rярма')
rnar=0.155;             % Наружный радиус статора
rvn=0.11;               % Наружный радиус зубцов статора
a1r=39;                 % Теплопроводность шихтованных листов сердечника статора
l1=0.15;                % Длина активной части ярма статора
s1=0.97;                % ????
Rradyoke=((1)/(4*pi*(rnar^2-rvn^2)*a1r*l1*s1)*((rnar^2+rvn^2)-((4*rnar^2*rvn^2*log(rnar/rvn)/(rnar^2-
rvn^2)))));
disp(sprintf('Rярма = %g К/Вт',Rradyoke));
R29=Rr/5;
R30=Rr/5;
R31=Rr/5;
R32=Rr/5;
```

```
disp('Тепловое сопротивление от зубцов статора к пазовой части обмотки - Rз-обм.')
   %!!!*10
   tau=0.017;            % Шаг зубцов статора
   bt=0.003;             % ???
   n=36;                 % Количество зубцов
   RtW=3*(pi*bt*(rnar^2-rvn^2))/(a1r*(rnar^2-rvn^2)^2*n*tau*s1*l1);
   disp(sprintf('Rз-обм. = %g К/Вт',RtW));
   R52=RtW/5;
   R53=RtW/5;
   R54=RtW/5;
   R55=RtW/5;
   R56=RtW/5;

%disp('Тепловое сопротивление зубцов статора в осевом напралении - Rз.осев.')
   RtAxial=((1)/(4*pi*(rnar^2-rvn^2)*a1r*l1*s1*bt)*((rnar^2+rvn^2)-((4*rnar^2*rvn^2*log(rnar/rvn)/(rnar^2-
rvn^2)))));
   disp(sprintf('Rз-обм. = %g К/Вт',RtAxial));
   R57=RtAxial;
   R58=RtAxial;
   R59=RtAxial;
   R60=RtAxial;

disp('Тепловое сопротивление между валом ротора и стержнями - Rв-ст.') % Согласовать схему по сердеч-
нику и валу ротора - усложнить?
   %!!!*5
   r9=0.03       % Наружный радиус вала ротора
   RVSt=(1*70/(2*pi*a1r*l1*s1)*(((-2*r9^2*log(r8/r9))/(r8^2-r9^2)))+1);
   disp(sprintf('Rв-ст. = %g К/Вт',RVSt));
   R84=RVSt/5;
   R85=RVSt/5;
   R86=RVSt/5;
   R87=RVSt/5;
   R88=RVSt/5;

disp('Тепловые сопротивления правой и левой торцевых крышек корпуса - Rтор.кор.')
   r1torc=0.155       % Наружный радиус торцевой крышки корпуса
   r2torc=0.03       % Внутренний радиус торцевой крышки корпуса
   htorc=0.01      % Толщина торцевой крышки корпуса
   RTorc=(160*htorc)/(afr*pi*(r1torc^2-r2torc^2));
   disp(sprintf('Rтор.кор. = %g К/Вт',RTorc));
   R27=RTorc;
   R34=RTorc;

disp('Тепловые сопротивления торца вала двигателя - Rтор.в.')
   r1torcval=0.03       % Наружный радиус торцевой крышки корпуса
   htorcval=0.05      % Толщина торцевой крышки корпуса
   RTorcVal=htorcval/(afr*4*pi*r1torcval^2);
   disp(sprintf('Rтор.в. = %g К/Вт',RTorcVal));
   R90=RTorcVal;
   R97=RTorcVal;

disp('Тепловые сопротивления остальных частей корпуса - Rк.ост.')
  % R27=0.6;
  % R34=0.6;
  % R90=0.1;
  % R97=0.1;
   R68=0.2;
   R74=0.2;

disp('Теплоемкости узлов электродвигателя АО-63-4')
   CFrame1=13120/11;
   C1=CFrame1;
   disp(sprintf('C1 = %g К/Вт',C1));
```

```
C2=CFrame1;
disp(sprintf('C2 = %g К/Вт',C2));
C3=CFrame1;
disp(sprintf('C3 = %g К/Вт',C3));
C4=CFrame1;
disp(sprintf('C4 = %g К/Вт',C4));
C5=CFrame1;
disp(sprintf('C5 = %g К/Вт',C5));
C6=CFrame1;
disp(sprintf('C6 = %g К/Вт',C6));
C7=CFrame1;
disp(sprintf('C7 = %g К/Вт',C7));
C8=CFrame1;
disp(sprintf('C8 = %g К/Вт',C8));
C9=CFrame1;
disp(sprintf('C9 = %g К/Вт',C9));
C10=CFrame1;
disp(sprintf('C10 = %g К/Вт',C10));

C11=500;
disp(sprintf('C11 = %g К/Вт',C11));

CYoke1=15548/5;
C12=CYoke1;
disp(sprintf('C12 = %g К/Вт',C12));
C13=CYoke1;
disp(sprintf('C13 = %g К/Вт',C13));
C14=CYoke1;
disp(sprintf('C14 = %g К/Вт',C14));
C15=CYoke1;
disp(sprintf('C15 = %g К/Вт',C15));
C16=CYoke1;
disp(sprintf('C16 = %g К/Вт',C16));

C17=500;
disp(sprintf('C17 = %g К/Вт',C17));

C18=CFrame1;
disp(sprintf('C18 = %g К/Вт',C18));



CWinding1=6230/7;
C20=CWinding1;
disp(sprintf('C20 = %g К/Вт',C20));
C21=CWinding1;
disp(sprintf('C21 = %g К/Вт',C21));
C22=CWinding1;
disp(sprintf('C22 = %g К/Вт',C22));
C23=CWinding1;
disp(sprintf('C23 = %g К/Вт',C23));
C24=CWinding1;
disp(sprintf('C24 = %g К/Вт',C24));
C25=CWinding1;
disp(sprintf('C25 = %g К/Вт',C25));
C26=CWinding1;
disp(sprintf('C26 = %g К/Вт',C26));

CEndWinding1=9959/2;
C27=CEndWinding1;
disp(sprintf('C27 = %g К/Вт',C27));
```

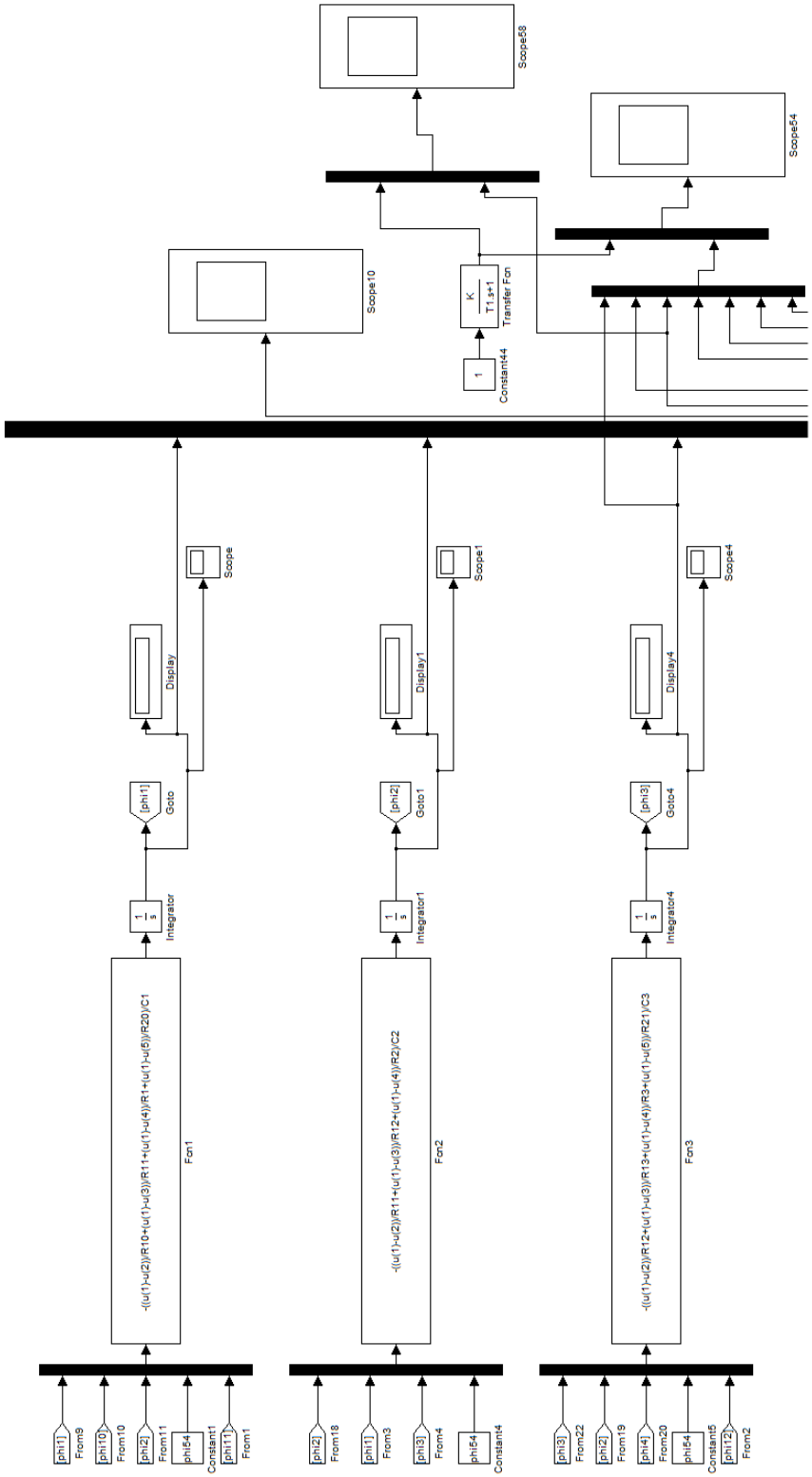
```
C19=CEndWinding1;
disp(sprintf('C19 = %g К/Вт',C19));

CTeeth1=3608/5;
C28=CTeeth1;
disp(sprintf('C28 = %g К/Вт',C28));
C29=CTeeth1;
disp(sprintf('C29 = %g К/Вт',C29));
C30=CTeeth1;
disp(sprintf('C30 = %g К/Вт',C30));
C31=CTeeth1;
disp(sprintf('C31 = %g К/Вт',C31));
C32=CTeeth1;
disp(sprintf('C32 = %g К/Вт',C32));

C33=100;
disp(sprintf('C33 = %g К/Вт',C33));
C34=100;
disp(sprintf('C34 = %g К/Вт',C34));
C35=100;
disp(sprintf('C35 = %g К/Вт',C35));
C36=100;
disp(sprintf('C36 = %g К/Вт',C36));
C37=100;
disp(sprintf('C37 = %g К/Вт',C37));

C38=1000;
disp(sprintf('C38 = %g К/Вт',C38));
C39=1000;
disp(sprintf('C39 = %g К/Вт',C39));

CRotor1=15912/6;
C40=CRotor1;
disp(sprintf('C40 = %g К/Вт',C40));
C41=CRotor1;
disp(sprintf('C41 = %g К/Вт',C41));
C42=CRotor1;
disp(sprintf('C42 = %g К/Вт',C42));
C43=CRotor1;
disp(sprintf('C43 = %g К/Вт',C43));
C44=CRotor1;
disp(sprintf('C44 = %g К/Вт',C44));
C45=CRotor1;
disp(sprintf('C45 = %g К/Вт',C45));
C46=CRotor1;
disp(sprintf('C46 = %g К/Вт',C46));

C47=100;
disp(sprintf('C47 = %g К/Вт',C47));

CShaft1=3386/5;
C48=CShaft1;
disp(sprintf('C48 = %g К/Вт',C48));
C49=CShaft1;
disp(sprintf('C49 = %g К/Вт',C49));
C50=CShaft1;
disp(sprintf('C50 = %g К/Вт',C50));
C51=CShaft1;
disp(sprintf('C51 = %g К/Вт',C51));
C52=CShaft1;
disp(sprintf('C52 = %g К/Вт',C52));

C53=100;
```

```
    disp(sprintf('C53 = %g К/Вт',C53));

disp('Мощность потерь узлов электродвигателя АО-63-4 (Р MathCAD)')
    PYoke=33*3.5/5;
    P1=PYoke;
    disp(sprintf('P1 = %g Вт',P1));
    P2=PYoke;
    disp(sprintf('P2 = %g Вт',P2));
    P3=PYoke;
    disp(sprintf('P3 = %g Вт',P3));
    P4=PYoke;
    disp(sprintf('P4 = %g Вт',P4));
    P5=PYoke;
    disp(sprintf('P5 = %g Вт',P5));

    PEndWind=255.06*3.5/2;
    P6=PEndWind;
    disp(sprintf('P6 = %g Вт',P6));

    PWind=253.44*3.5/7;
    P7=PWind;
    disp(sprintf('P7 = %g Вт',P7));
    P8=PWind;
    disp(sprintf('P8 = %g Вт',P8));
    P9=PWind;
    disp(sprintf('P9 = %g Вт',P9));
    P10=PWind;
    disp(sprintf('P10 = %g Вт',P10));
    P11=PWind;
    disp(sprintf('P11 = %g Вт',P11));
    P12=PWind;
    disp(sprintf('P12 = %g Вт',P12));
    P13=PWind;
    disp(sprintf('P13 = %g Вт',P13));

    P14=PEndWind;
    disp(sprintf('P14 = %g Вт',P14));

    PTeeth=56.5*3.5/10;
    P15=PTeeth;
    disp(sprintf('P15 = %g Вт',P15));
    P16=PTeeth;
    disp(sprintf('P16 = %g Вт',P16));
    P17=PTeeth;
    disp(sprintf('P17 = %g Вт',P17));
    P18=PTeeth;
    disp(sprintf('P18 = %g Вт',P18));
    P19=PTeeth;
    disp(sprintf('P19 = %g Вт',P19));

    P20=PTeeth;
    disp(sprintf('P20 = %g Вт',P20));
    P21=PTeeth;
    disp(sprintf('P21 = %g Вт',P21));
    P22=PTeeth;
    disp(sprintf('P22 = %g Вт',P22));
    P23=PTeeth;
    disp(sprintf('P23 = %g Вт',P23));
    P24=PTeeth;
    disp(sprintf('P24 = %g Вт',P24));

    PRotor=352*3.5/7;
    P25=PRotor;
```

```
disp(sprintf('P25 = %g Вт',P25));
P26=PRotor;
disp(sprintf('P26 = %g Вт',P26));
P27=PRotor;
disp(sprintf('P27 = %g Вт',P27));
P28=PRotor;
disp(sprintf('P28 = %g Вт',P28));
P29=PRotor;
disp(sprintf('P29 = %g Вт',P29));
P30=PRotor;
disp(sprintf('P30 = %g Вт',P30));
P31=PRotor;
disp(sprintf('P31 = %g Вт',P31));


phi54=0;
```

Приложение Б

Фрагмент модели Simulink исследования теплового состояния асинхронного двигателя АО-63-4



Приложение В

Таблица 1

Значения критериев качества для нелинейной АСУТ с комбинированным регулятором при различных начальных условиях

$\Delta\theta, °C$	t_p, с	σ, %	$dy(t)/dt$, $°C \cdot c$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 100°C$ и $I_s^* = 0,5$.			
10	738	9,8	$5,68 \cdot 10^{-3}$
20	772	7,5	$1,23 \cdot 10^{-3}$
30	1192	7,3	$1,6 \cdot 10^{-3}$
40	1772	8,95	$1,62 \cdot 10^{-3}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 120°C$ и $I_s^* = 0,5$.			
10	1223	8,3	$5 \cdot 10^{-3}$
20	1217	6,4	$1,07 \cdot 10^{-3}$
30	1657	7,6	$1,3 \cdot 10^{-3}$
40	2167	11,13	$1,35 \cdot 10^{-3}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 140°C$ и $I_s^* = 0,5$.			
10	1798	7,2	$4,22 \cdot 10^{-3}$
20	1760	6,2	$9,16 \cdot 10^{-3}$
30	2189	8,6	$1,06 \cdot 10^{-3}$
40	2621	13,8	$1,06 \cdot 10^{-3}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 160°C$ и $I_s^* = 0,5$.			
10	2373	7,6	$3,57 \cdot 10^{-3}$
20	2327	6,9	$7,74 \cdot 10^{-3}$
30	2693	10,8	$8,4 \cdot 10^{-3}$
40	3084	18,2	$8,59 \cdot 10^{-3}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 100°C$ и $I_s^* = 0,8$.			
10	1360	8	$4,85 \cdot 10^{-3}$
20	1313	6,2	$1,05 \cdot 10^{-3}$
30	1761	7,4	$1,27 \cdot 10^{-3}$
40	2247	11,3	$1,26 \cdot 10^{-3}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 120°C$ и $I_s^* = 0,8$.			
10	1820	7,2	$-4,23 \cdot 10^{-3}$
20	1782	6,1	$-9,16 \cdot 10^{-3}$
30	2208	8,7	$-1,03 \cdot 10^{-3}$
40	2632	13,8	$-1,06 \cdot 10^{-3}$

Продолжение таблицы 1

$\Delta\theta, °C$	t_p, с	σ, %	$dy(t)/dt$, $°C \cdot c$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 140°C$ и $I_s^* = 0{,}8$.			
10	2443	7,3	$3{,}51 \cdot 10^{-3}$
20	2403	7	$7{,}6 \cdot 10^{-3}$
30	2757	11	$8{,}1 \cdot 10^{-3}$
40	3134	18,7	$8{,}2 \cdot 10^{-3}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 160°C$ и $I_s^* = 0{,}8$.			
10	3034	8,6	$2{,}94 \cdot 10^{-3}$
20	3027	8,4	$6{,}08 \cdot 10^{-3}$
30	3266	14,7	$6{,}35 \cdot 10^{-3}$
40	3680	18,5	$6{,}54 \cdot 10^{-3}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 100°C$ и $I_s^* = 1$.			
10	1745	7,2	$4{,}35 \cdot 10^{-3}$
20	1694	6	$9{,}43 \cdot 10^{-3}$
30	2120	8,3	$1{,}07 \cdot 10^{-3}$
40	2553	13,1	$1{,}11 \cdot 10^{-3}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 120°C$ и $I_s^* = 1$.			
10	2217	7,3	$3{,}77 \cdot 10^{-3}$
20	2171	6,6	$8{,}19 \cdot 10^{-3}$
30	2552	10	$9{,}01 \cdot 10^{-3}$
40	2941	16,2	$9{,}18 \cdot 10^{-3}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 140°C$ и $I_s^* = 1$.			
10	2846	8,2	$3{,}12 \cdot 10^{-3}$
20	2809	7,9	$6{,}62 \cdot 10^{-3}$
30	3097	13	$6{,}93 \cdot 10^{-3}$
40	3482	19,1	$7{,}13 \cdot 10^{-3}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 160°C$ и $I_s^* = 1$.			
10	3451	9,4	$2{,}6 \cdot 10^{-3}$
20	3409	9,2	$5{,}25 \cdot 10^{-3}$
30	3614	17,7	$5{,}39 \cdot 10^{-3}$
40	4189	19,3	$5{,}57 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2

Значения критериев качества для нелинейной АСУТ с ПИ-регулятором при различных начальных условиях

$\Delta\theta, °C$	t_p, с	σ, %	$dy(t)/dt$, $°C \cdot c$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 100°C$ и $I_s^* = 0,5$.			
10	817	24	$4,13 \cdot 10^{-2}$
20	856	22	$8,19 \cdot 10^{-2}$
30	1060	20,7	$1,02 \cdot 10^{-2}$
40	2033	20,5	$1,09 \cdot 10^{-2}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 120°C$ и $I_s^* = 0,5$.			
10	893	21	$3,65 \cdot 10^{-2}$
20	954	19,3	$7,22 \cdot 10^{-2}$
30	1250	18,8	$8,79 \cdot 10^{-2}$
40	2279	19,4	$9,08 \cdot 10^{-2}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 140°C$ и $I_s^* = 0,5$.			
10	1004	17	$3,14 \cdot 10^{-2}$
20	1087	16	$6,16 \cdot 10^{-2}$
30	1606	17	$7,18 \cdot 10^{-2}$
40	2630	18,7	$7,2 \cdot 10^{-2}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 160°C$ и $I_s^* = 0,5$.			
10	1125	13	$2,68 \cdot 10^{-2}$
20	1250	13	$5,21 \cdot 10^{-2}$
30	2100	15,3	$5,72 \cdot 10^{-2}$
40	3063	18,7	$5,72 \cdot 10^{-2}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 100°C$ и $I_s^* = 0,8$.			
10	915	20	$3,55 \cdot 10^{-2}$
20	977	18,5	$7,01 \cdot 10^{-2}$
30	1311	18,3	$8,69 \cdot 10^{-2}$
40	2340	19,1	$8,69 \cdot 10^{-2}$

Продолжение таблицы 3.3

$\Delta\theta, °C$	t_p, с	σ, %	$dy(t)/dt$, $°C \cdot c$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 120°C$ и $I_s^* = 0{,}8$.			
10	1008	16,5	$3{,}13 \cdot 10^{-2}$
20	1091	15,9	$6{,}15 \cdot 10^{-2}$
30	1631	16,7	$7{,}23 \cdot 10^{-2}$
40	2643	18,5	$7{,}17 \cdot 10^{-2}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 140°C$ и $I_s^* = 0{,}8$.			
10	1138	12,5	$2{,}64 \cdot 10^{-2}$
20	1261	12,5	$5{,}12 \cdot 10^{-2}$
30	2130	15	$5{,}61 \cdot 10^{-2}$
40	3092	18,5	$5{,}6 \cdot 10^{-2}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 160°C$ и $I_s^* = 0{,}8$.			
10	1259	9	$2{,}24 \cdot 10^{-2}$
20	1460	9,5	$4{,}26 \cdot 10^{-2}$
30	2600	14,2	$4{,}42 \cdot 10^{-2}$
40	3138	13,7	$4{,}42 \cdot 10^{-2}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 100°C$ и $I_s^* = 1$.			
10	990	11,7	$3{,}21 \cdot 10^{-2}$
20	1067	16	$6{,}32 \cdot 10^{-2}$
30	1562	17	$7{,}52 \cdot 10^{-2}$
40	2573	18,5	$7{,}46 \cdot 10^{-2}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 120°C$ и $I_s^* = 1$.			
10	1087	14	$2{,}81 \cdot 10^{-2}$
20	1196	13,5	$5{,}5 \cdot 10^{-2}$
30	1947	15,3	$6{,}2 \cdot 10^{-2}$
40	2917	18,3	$6{,}16 \cdot 10^{-2}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 140°C$ и $I_s^* = 1$.			
10	1221	9,9	$2{,}36 \cdot 10^{-2}$
20	1387	10,5	$4{,}55 \cdot 10^{-2}$
30	2443	14,2	$4{,}8 \cdot 10^{-2}$
40	3120	15,3	$4{,}8 \cdot 10^{-2}$
Начальные условия: $\theta_{нач} = 160°C$ и $I_s^* = 1$.			
10	1323	8	$1{,}99 \cdot 10^{-2}$
20	1612	8,3	$3{,}76 \cdot 10^{-2}$
30	2990	14	$3{,}77 \cdot 10^{-2}$
40	3178	10,7	$3{,}77 \cdot 10^{-2}$

Приложение Г

Код функции программы для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений АСУТ с комбинированным регулятором

```
function f=threepointKombNL2(t,x)

%Постоянная времени ТАД как объекта управления температурой
Ttad=1312;

%Коэффициенты усиления устройства управления, исполнительного
% и измерительного устройств
kph=5; kad=3.14; kvo=0.01; kos=10/180;

%Значения постоянной времени изодрома, коэффициента усиления
%изодрома, постоянной времени T1 и T2 и коэффициента усиления
%обратной связи,
Tiz=10, kiz=2.656e-4; T1=3125; T2=76.923; kos=0.1;

%Произведение коэффициентов усиления устройства управления,
%исполнительного и измерительного устройств
kpost=kph*kad*kvo*kos;

%Значение Uзад
Uz=-40;

%Значение первой производной Uзад
dUz=0;

%Значение второй производной Uзад
ddUz=0;

%Условие, определяющее максимальное значение Uк, которое
%соответствует максимальной частоте вращения вала
%исполнительного устройства (вентилятора-охлаждения)
ydt2 = (kpost*x(3)-x(2))/Tm;
if x(2)+ydt2 < -0.436
   ydt2 = -0.436 - x(2);
end;

%Значения коэффициентов полинома, аппроксимирующего
%нелинейность kphi от подачи охлаждающего воздуха
phi2=1.4063; phi1=-0.2488; phi0=0.0134;
```

```
%Выражение полинома, аппроксимирующего нелинейность kphi от подачи охлаждающего воздуха
ktad=phi2*ydt2^2+phi1*ydt2+phi0;
%Дифференциальные уравнения, описывающие переходные
%процессы, протекающие в нелинейной АСУТ
%с комбинированным регулятором
f=[(kiz^2*(Tiz^2*ddUz+2*Tiz*dUz+Uz-Tiz^2*x(1)-2*Tiz*x(3)-x(3)))/Tiz^2;...
   ((phi2*ydt2+phi1*ydt+phi0)*kiy-x(2))/Tphi;...
   (kos*(T2^2*x(2)+2*T2*(1)+x(3)-T2^2*x(2)-2*T2*x(1)-x(3)))/T1];
```

Код основной функции для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений АСУТ с комбинированным регулятором

```
function dynpointCombNL2()

%Задание функции решения, временного отрезка и начальных условий системы нелинейных дифференциальных уравнений
[t,y]=ode45(@threepointCombNL2,[0 12000],[0,0,2.72*-40]);

%Построение зависимости Uиу от времени t
plot(t,y(:,1));

%Включение сетки на графическом окне зависимости Uиу от времени t
grid on;

%Название окна зависимости Uиу от времени t
title('Решение ДУ для нелинейной АСУТ с ПИ');

%Название оси абсцисс
xlabel('Время t');

%Название оси ординат
ylabel('Значение для U в В');

%Создание легенды зависимости Uиу от времени t
legend('y_1 - U_и');
```

Код функции программы для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений АСУТ с ПИ-регулятором

```
function f=threepointPiNL2(t,x)

%Постоянная времени ТАД как объекта управления температурой
Ttad=1312;

%Коэффициенты усиления устройства управления, исполнительного
% и измерительного устройств
kph=5; kad=3.14; kvo=0.01; kos=10/180;

%Произведение коэффициентов усиления устройства управления,
%исполнительного и измерительного устройств
kpost=kph*kad*kvo*kos;

%Значение Uзад
Uz=-40;

%Значение первой производной Uзад
dUz=0;

%Значение второй производной Uзад
ddUz=0;

%Условие, определяющее максимальное значение Uк, которое
%соответствует максимальной частоте вращения вала
%исполнительного устройства (вентилятора-охлаждения)
ydt2 = (kpost*x(3)-x(2))/Tm;
if x(2)+ydt2 < -0.436
   ydt2 = -0.436 - x(2);
end;

%Значения коэффициентов полинома, аппроксимирующего
%нелинейность kphi от подачи охлаждающего воздуха
phi2=1.4063; phi1=-0.2488; phi0=0.0134;

%Выражение полинома, аппроксимирующего нелинейность kphi от по-
дачи охлаждающего воздуха
ktad=phi2*ydt2^2+phi1*ydt2+phi0;
%Дифференциальные уравнения, описывающие переходные
%процессы, протекающие в нелинейной АСУТ
%с комбинированным регулятором
f=[(ktad*x(2)-x(1))/Ttad;...
    (ydt2);...
    (kpi*Tpi*(dUz-((ktad*x(2)-x(1))/Ttad))+Uz-x(1))/Tpi];
```

Код основной функции для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений АСУТ с ПИ-регулятором

```
function dynpointPiNL2()

%Задание функции решения, временного отрезка и начальных
%условий системы нелинейных дифференциальных уравнений
[t,y]=ode45(@threepointPiNL2,[0 12000],[0,0,2.72*-40]);

%Построение зависимости Uиу от времени t
plot(t,y(:,1));

%Включение сетки на графическом окне зависимости Uиу от времени t
grid on;

%Название окна зависимости Uиу от времени t
title('Решение ДУ для нелинейной АСУТ с ПИ');

%Название оси абсцисс
xlabel('Время t');

%Название оси ординат
ylabel('Значение для U в В');

%Создание легенды зависимости Uиу от времени t
legend('y_1 - U_и')
```

Приложение Д

Патент на полезную модель №156446

30.03.2015 Полезная модель №148359

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) 148359 (13) U1

(51) МПК
G01M17/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

Статус: по данным на 27.03.2015 - действует
Пошлина: учтена за 1 год с 04.04.2014 по 04.04.2015

(21), (22) Заявка: **2014113138/11, 04.04.2014**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.04.2014

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **04.04.2014**

(45) Опубликовано: **10.12.2014**

Адрес для переписки:
127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, МИИТ

(72) Автор(ы):
Космодамианский Андрей Сергеевич (RU),
Воробьев Владимир Иванович (RU),
Самотканов Александр Васильевич (RU),
Пугачев Александр Анатольевич (RU),
Воробьев Дмитрий Владимирович (RU),
Бондаренко Денис Андреевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет путей сообщения" МГУПС (МИИТ) (RU)

(54) **СТЕНД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВОМ ПРИВОДЕ ЛОКОМОТИВОВ С ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ**

(57) Реферат:

Полезная модель относится к области транспортного машиностроения и может быть использовано для исследования динамических процессов в тяговом приводе. Стенд для моделирования динамических процессов в тяговом приводе локомотива с электропередачей, содержащий дизель-генераторную установку с преобразователем частоты, электродвигатель, характеристика которого аналогична характеристике тягового электродвигателя локомотива, вал якоря которого фрикционно связан с валом несущим маховик, имитирующим массу поезда, посредством колесной пары с колесами различных диаметров, электрическую нагрузочную машину, вал якоря которой связан с валом несущим маховик, который снабжен лентой из фрикционного материала, охватывающей внешнюю поверхность маховика, связанную с якорем электромагнита нагружающего устройства, управление которым осуществляется системой, состоящей из датчиков моментов электродвигателя и сопротивления, сравнивающего устройства, исполнительного устройства, переключателя, задатчика времени, источника тока, токовой уставки. Изменение момента сопротивления вращению маховика приводит к изменению режима работы привода, возможностей появления срыва сцепления колес с катком, имитирующим рельс, возникновению боксования и, как следствие, автоколебательным процессам. Задаваясь различными моментами сопротивления и частотами вращения тягового электродвигателя, можно определять области боксования и режимов автоколебаний при имитации работы на различных профилях железнодорожного пути. Технический эффект заключается в расширении функциональных возможностей стенда, приближения условий моделирования к эксплуатационным путем создания переменного динамического момента сопротивления движению локомотива для имитации работы на различных профилях железнодорожного пути при обеспечении ускоренных испытаний с одновременным снижением материальных и энергетических затрат.

Полезная модель относится к области транспортного машиностроения и может быть использована для исследования динамических процессов в тяговом приводе.

Известен стенд для моделирования динамических процессов в тяговом приводе локомотива с электропередачей, содержащий по крайней мере один электродвигатель, характеристика которого аналогична характеристике тягового электродвигателя локомотива, а вал якоря фрикционно связан с установленным в подшипниковых опорах валом, несущим маховик, имитирующий массу поезда, и электрическую нагрузочную машину, имитирующую тяговою нагрузку, вал якоря которой связан с упомянутым валом, несущим маховик [1].

Недостатком указанного стенда является то, что на нем невозможно имитировать процессы боксования и автоколебаний, возникающих в тяговом приводе локомотива при его совместной работе с колесными парами.

Известен стенд для моделирования динамических процессов в тяговом приводе локомотива с электропередачей, содержащий дизель-генераторную установку, электрически связанную с двигателем колесной пары, ось которой посредством цилиндрического редуктора связана с выходным валом тягового электродвигателя, катки, каждый из которых связан с соответствующим колесом колесной пары, смонтированный на оси катков маховик, имитирующий массу поезда, и электрическую нагрузочную машину, имитирующую тяговую нагрузку [2].

Недостатком данного стенда является то, что он не в полной мере воспроизводит эксплуатационные условия, в частности, не обеспечивает проскальзывание и потерю сцепления одним из колес колесной пары и не позволяет получить режимы автоколебаний в тяговом приводе.

В качестве прототипа заявленной полезной модели заявлен стенд для моделирования динамических процессов в тяговом приводе локомотива с электропередачей, содержащий дизель-генераторную установку с преобразователем частоты, электродвигатель, характеристика которого аналогична характеристике тягового электродвигателя локомотива, а вал якоря электродвигателя фрикционно связан с валом, несущим маховик, имитирующим массу поезда, посредством колесной пары с колесами различных диаметров, и электрическую нагрузочную машину, имитирующую тяговую нагрузку, вал якоря которой связан с упомянутым валом, несущим маховик [3].

Недостатком указанного стенда является то, что он не в полной мере воспроизводит эксплуатационные условия, то есть не обеспечивает в процессе работы изменение момента сопротивления движению при трогании с места и движению с малыми скоростями на подъеме, где наиболее часто происходят процессы боксования и автоколебаний в тяговом привод.

Известно, что локомотив (состав) движется по железнодорожному пути различного профиля. Трогание и движение с малыми скоростями может происходить на разных по величине и продолжительности подъемах. Возможен переход с горизонтального профиля на подъем. Все эти режимы определяются изменением момента сопротивления движению. В режимах пуска и движения с малыми скоростями электрическая нагрузочная машина не может обеспечить создания необходимых динамических моментов сопротивления.

Техническим результатом является расширение функциональных возможностей стенда и приближения условий моделирования к эксплуатационным. Эта цель достигается путем создания управляемого внешнего динамического момента сопротивления движению локомотива.

Технический результат достигается тем, что маховик снабжен лентой из фрикционного материала, охватывающей внешнюю поверхность маховика, и связанную с якорем электромагнита нагружающего устройства, управление которым осуществляется системой, состоящей из датчиков моментов электродвигателя и сопротивления, сравнивающего устройства, исполнительного устройства, переключателя, задатчика времени, источника тока, токовой уставки, датчика вращения.

Сущность заявленной полезной модели поясняется чертежами, где изображены на фиг. 1 блочно-принципиальная схема стенда; фиг. 2 блок-схема управления стендом.

Стенд состоит из дизель-генераторной установки 1 (фиг. 1), управляемой дистанционно от контроллера машиниста 2, имеет статический преобразователь частоты со звеном постоянного тока 3, от которого переменное напряжение с регулируемой частотой поступает на электродвигатель 4, якорь которого через тяговый редуктор 5 связан с колесной парой 6. Колесная пара 6 посредством колес 7 и 8 опирается на каток 9, связанный валом с маховиком 10, имитирующим массу поезда, и нагрузочной машины 11. Нажимное устройство 12 имитирует сцепной вес испытуемого тягового привода.

Маховик 10 охвачен фрикционной лентой 13, нижний конец которой соединен с неподвижной шарнирной опорой 16, а верхний конец ленты 13 соединен с входным концом якоря 14 электромагнита 15. Выходной конец якоря 14 связан с возвратной пружиной 17 (фиг. 2).

Система управления стендом (фиг. 2) состоит из датчика момента сопротивления 18, датчика момента сопротивления 19, сравнивающего устройства 20, исполнительного устройства 21, задатчика момента сопротивления 22, переключателя 23, задатчика времени 24, источника 25, токовой уставки 26.

При исследовании работы привода на переходе с горизонтального профиля пути на заданный подъем стенд работает следующим образом. Электродвигатель 4 получает питание от дизель-генераторной установки 1 через преобразователь частоты 3 и начинает вращать маховик 10. На сравнивающее устройство 20 поступает сигнал от датчика 18 момента электродвигателя Мд и датчика 19 момента сопротивления Мс, определяемого моментами инерции редуктора 5, колесной пары 6, маховика 10 и якоря нагрузочной машины 11.

В момент равенства этих сигналов, что соответствует равновесному режиму движения (Мд=Мс), на исполнительное устройство 21 поступают сигналы от сравнивающего устройства 20 и задатчика момента сопротивления Мз 22, соответствующего заданному значению профиля пути.

Сигнал с исполнительного устройства 21 поступает через переключатель 23 на источник тока 25, подающего питание на электромагнит 15 нагружающего устройства. Длительность прохождения сигнала через переключатель 23 регулируется временной уставкой Т, реализуемой задатчиком времени 24. Якорь 14 электромагнита 15, связанный с фрикционной лентой 13, перемещаясь, прижимает ленту 13 к маховику 10, увеличивая момент сопротивления вращению, соответствующий заданному подъему профиля пути.

Величина тока, проходящего через обмотку электромагнита 15, а следовательно, и силы натяжения ленты (момента сопротивления вращению) задается токовой уставкой 26, сигнал от которой поступает на источник тока 25 (фиг. 2)

После проведения эксперимента, длительность которого определяется задатчиком времени 24, переключатель 23 отключает источник тока 25 и возвратная пружина 17 переводит фрикционную ленту 13 в исходное положение. Изменение момента сопротивления вращения маховика 10 приводит к изменению режима работы привода, возможности появления срыва сцепления колес с катком 9, имитирующего рельс, возникновению боксования и, как следствие, автоколебательным процессам.

Задаваясь различными моментами сопротивления и начальными частотами питания электродвигателя определяются области боксования и режимы автоколебаний на различных подъемах железнодорожного пути. Результаты можно использовать при разработке и создании противобуксовочных устройств и их систем с последующей отработкой на стенде.

Технический эффект предлагаемой полезной модели заключаются в расширении функциональных возможностей стенда, приближения условий моделирования к эксплуатационным, путем создания переменного динамического момента сопротивления движению локомотива для имитации работы на различных профилях железнодорожного пути при обеспечении ускоренных испытаний с одновременным снижением материальных и энергетических затрат.

Источники информации, принятые во внимание при составлении описания полезной модели

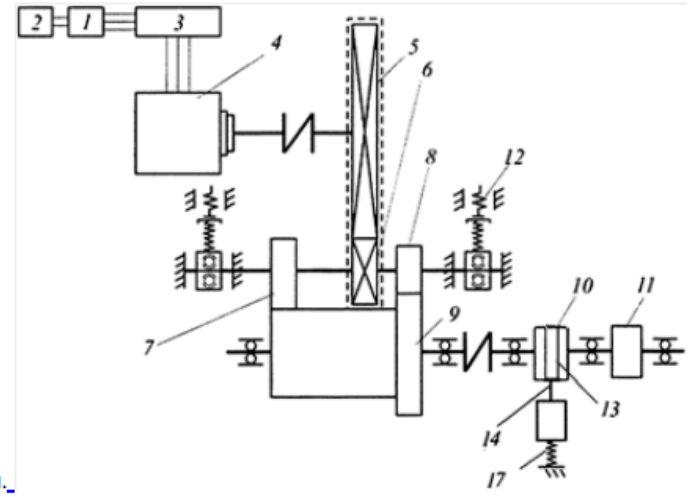
1. Авторское свидетельство СССР № 677786, кл. G01M 17/00, 1944.

2. Челноков Н.Н., и др. Стенды для испытаний подвижного состава железных дорог. М., НИИ Информтяжмаш, 1966, 11-66-4, с. 19.

3. Авторское свидетельство СССР № 712726, кл. G01M 17/00, 1978, опубл. Б.Н, - 30.01.80 № 4.

Формула полезной модели

Стенд для моделирования динамических процессов в тяговом приводе локомотива с электропередачей, содержащий дизель-генераторную установку с преобразователем частоты, электродвигатель, характеристика которого аналогична характеристике тягового электродвигателя локомотива, вал якоря которого фрикционно связан с валом, несущим маховик, имитирующим массу поезда, посредством колесной пары с колесами различных диаметров, электрическую нагрузочную машину, вал якоря которой связан с валом, несущим маховик, отличающийся тем, что маховик снабжен лентой из фрикционного материала, охватывающей внешнюю поверхность маховика, связанную с якорем электромагнита нагружающего устройства, управление которым осуществляется системой, состоящей из датчиков моментов электродвигателя и сопротивления, сравнивающего устройства, исполнительного устройства, переключателя, задатчика времени, источника тока, токовой



уставки.

РИСУНКИ

Патент на полезную модель №156446

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 156446

СТЕНД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВОМ ПРИВОДЕ ЛОКОМОТИВА С ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ

Патентообладатель(ли): ***ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ "Брянский государственный технический университет" (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2015109745**

Приоритет полезной модели **19 марта 2015 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации ***13 октября 2015 г.***

Срок действия патента истекает **19 марта 2025 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Автор(ы): ***Воробьев Владимир Иванович (RU), Космодамианский Андрей Сергеевич (RU), Антипин Дмитрий Яковлевич (RU), Измеров Олег Васильевич (RU), Пугачев Александр Анатольевич (RU), Бондаренко Денис Андреевич (RU)***

RU 156446 U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **156 446** (13) **U1**

(51) МПК
G01M 17/08 (2006.01)
B61C 9/24 (2006.01)
B60L 11/02 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2015109745/11, 19.03.2015**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
19.03.2015

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **19.03.2015**

(45) Опубликовано: **10.11.2015** Бюл. № **31**

Адрес для переписки:
241035, г. Брянск, б-р 50-летия Октября, 7, ГОУ ВПО "Брянский государственный технический университет", патентная группа

(72) Автор(ы):
Воробьев Владимир Иванович (RU),
Космодамианский Андрей Сергеевич (RU),
Антипин Дмитрий Яковлевич (RU),
Измеров Олег Васильевич (RU),
Пугачев Александр Анатольевич (RU),
Бондаренко Денис Андреевич (RU)

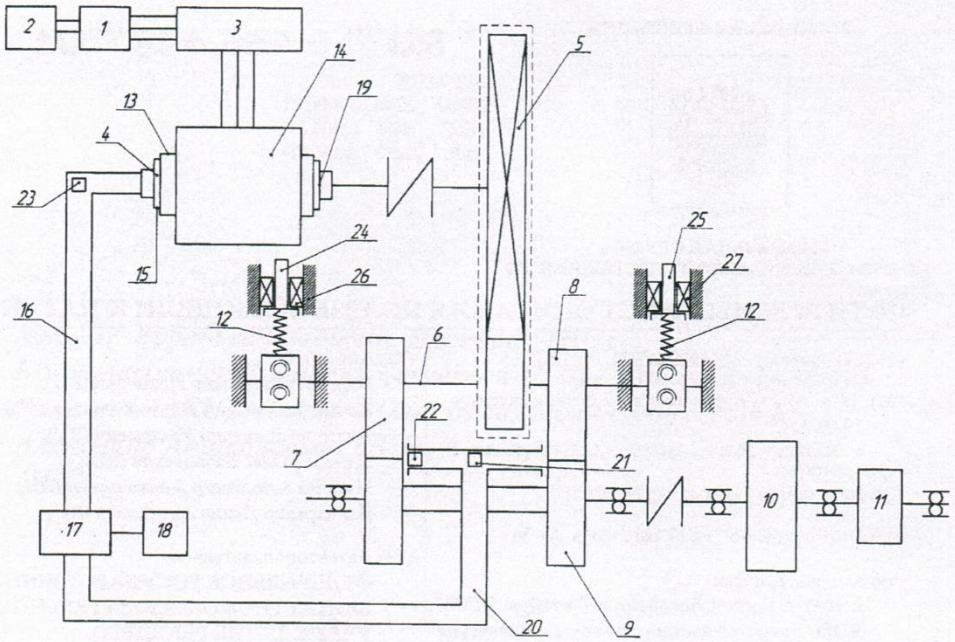
(73) Патентообладатель(и):
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ "Брянский государственный технический университет" (RU)

(54) СТЕНД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВОМ ПРИВОДЕ ЛОКОМОТИВА С ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧЕЙ

(57) Формула полезной модели

Стенд для моделирования динамических процессов в тяговом приводе локомотива с электропередачей, содержащий дизель-генераторную установку, регулируемую дистанционно от контроллера машиниста и соединенную через статический преобразователь частоты со звеном постоянного тока с электродвигателем, якорь которого соединен через тяговый редуктор с колесной парой, колеса которой опираются на каток, связанный с маховиком и электрической нагрузочной машиной, нагрузочные устройства, на статор тягового электродвигателя установлен индукционный нагреватель, охватывающий статор, закрытый теплоизоляционным материалом, а к тяговому электродвигателю подсоединены система контроля температуры его обмоток и система обдува тягового электродвигателя, состоящая из воздухопровода, мотор-вентилятора с системой управления им, отличающийся тем, что колеса колесной пары имеют одинаковый диаметр, в зоне контакта колес с катком установлен воздуховод, содержащий полупроводниковый термоэлектрический охладитель и датчик температуры и подсоединенный к мотор-вентилятору, нагрузочные устройства содержат электромагниты, на валу двигателя установлен датчик частоты вращения, в воздухопроводе системы обдува двигателя установлен полупроводниковый термоэлектрический охладитель, а система управления содержит блок задания частоты вращения вала двигателя, блок сравнения, блок управления, блоки задания нагрузки на колесные пары, регуляторы тока обмоток сердечников электромагнитов нагрузочных устройств.

RU 156446 U1



RU 156446 U1

Приложение Е

Акт о внедрении

УТВЕРЖДАЮ
проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Брянский государственный
технический университет»
_____ к.т.н., доц. В.М. Сканцев

АКТ о внедрении

Настоящим подтверждаем, что материалы диссертации соискателя по кафедре «Подвижной состав железных дорог» Д.А. Бондаренко «Автоматическая система управления температурой тягового асинхронного двигателя тепловоза» внедрены в учебный процесс на кафедре «Подвижной состав железных дорог».

Результаты теоретических и экспериментальных исследований тепловых и электромеханических процессов, происходящих в электроприводе с асинхронным двигателем; разработанная и изготовленная экспериментальная установка для исследования электропривода с асинхронным двигателем, входящего в состав системы охлаждения двигателя АО-63-4; экспериментальная установка, содержащая физическую модель механической части локомотива, используются при изучении дисциплин «Теория и конструкция локомотивов», «Электрические машины» и «Общий курс железнодорожного транспорта» и опубликованы в учебном пособии «Тяговые приводы локомотивов. Поиск и выбор инновационных решений». Материалы диссертации также использовались для выполнения научно-исследовательской госбюджетной работы (номер государственной регистрации НИР: 1.02.09 (06/47)) «Разработка конструкций, математическое моделирование и испытания узлов транспортных машин», раздел 2 «Разработка и испытания конструкций и систем тепловозов, повышающих его тяговые свойства».

Зав. кафедрой «ПСЖД»
ФГБОУ ВО «Брянский государственный
технический университет»
_____ к.т.н., доц. Д.Я. Антипин