

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ДИЗАЙНА И ТЕХНОЛОГИИ»**

На правах рукописи

Филимонова Екатерина Михайловна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ
СИСТЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.**

Специальность: 05.13.06 – «Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами
(легкая промышленность)»

**Диссертация на соискание учетной степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель
доктор технических наук
профессор Поляков А.Е.**

Москва – 2014

Оглавление

Введение	4
Глава 1 Разработка модернизированной системы управления нелинейным динамическим объектом с транспортирующими и наматывающими механизмами.....	13
1.1 Краткая характеристика перспективных направлений энергосбережения при эксплуатации управляемых электротехнических комплексов технологического оборудования.....	13
1.2 Особенности технологического процесса транспортирования и наматывания нитей на партионной сновальной машине (СМ).....	21
1.3 Исследование физико-механических свойств текстильных нитей, наработанных на сновальной машине.....	25
1.4 Исследование динамических режимов управляемого электротехнического комплекса сновальной машиной.....	28
1.5 Разработка модернизированного способа автоматического управления сложной электромеханической системы сновальной машины, с целью обеспечения энергосберегающих режимов.....	41
Выводы	52
Глава 2 Повышение эффективности эксплуатации сложных динамических объектов за счет управления и оптимизации скоростных режимов электро-механических систем с крутильно-мотальными механизмами (на примере рогульчатой ровничной машины)	54
2.1 Исследование физико-механических свойств и определение требований к процессам формирования, транспортирования и наматывания гребенной ровницы.....	54
2.2 Определение параметров прогнозирующего устройства, обеспечивающего управление скоростными режимами приемного вала крутильно-мотального механизма	61
2.3 Постановка и решение задачи оптимального управления электротехническим комплексом с крутильно-мотальным механизмом	67
Выводы	74
Глава 3 Энергосбережение за счет оптимизации скоростных режимов управляемых электромеханических систем технологического оборудования.....	75
3.1.1 Постановка задачи исследования	75
3.1.2 Исследование влияния изменения напряжения на энергетические показатели асинхронного двигателя, работающего при переменной нагрузке.....	79
3.1.3 Расчет энергетических показателей асинхронного двигателя при изменении напряжения питания и меняющейся нагрузке на валу двигателя.....	83
3.1.4 Устойчивость работы асинхронного двигателя при полученных алгоритмах регулирования	88

3.2 Оптимизация режимов работы электромеханических систем технологического оборудования циклического действия (на примерах угароочищающей УО-Ш и смесовой С12-М машин)	91
3.2.1 Разработка энергосберегающего варианта электропривода циклического действия	91
3.3 Влияние качества электроэнергии на работу технологического оборудования	98
Выводы	109
Глава 4 Применение интеллектуальных методов и технологий для исследования сложных электромеханических систем технологического оборудования	112
4.1 Применение технологии нейронных сетей для разработки и исследования управляемого электротехнического комплекса с крутильно-мотальным механизмом	112
4.2 Исследование системы автоматического регулирования электромеханического комплекса с крутильно-мотальными механизмами с использованием технологии нейронных сетей	117
4.2.1 Постановка задачи исследования	117
4.2.2 Модель ДПТ независимого возбуждения	120
4.2.3 Нейронная сеть, обученная на данных установившегося режима	127
4.2.4 Нейронная сеть, обученная на данных пускового режима с изменяющимся напряжением	130
4.3 Моделирование и анализ качества переходных процессов в нечеткой системе управления электроприводом сновальной машины	133
4.4 Применение нечетких когнитивных карт для управления энергосберегающими режимами ЭМС с транспортирующими и наматывающими механизмами	137
4.5 Основные положения методики анализа, расчета и проектирования транспортирующих, наматывающих и крутильно-мотальных механизмов	143
Выводы	147
Основные результаты и выводы	149
Список литературы	152
Приложения	161

Общая характеристика работы.

Технологическое оборудование производств легкой и текстильной промышленности обладает рядом особенностей, сказывающихся на постановке и методах решения задач повышения эффективности энергоресурсосбережения и их реализации за счет управления скоростными режимами. Вследствие этого важнейшей эксплуатационной характеристикой управляемых электротехнических комплексов (УЭТК) является соответствие между фактическими и конструктивно заданными законами движения рабочих органов.

Повышение производительности оборудования путем увеличения рабочих скоростей и мощности передаваемых потоков волокнистого материала, повышение качества изделий – все это требует повышения точности управления электро-механическими системами, часто в условиях возрастающих возмущающих воздействий как со стороны силовых механизмов, так и со стороны питающей электрической сети.

Нестационарность работы электроприводов как объектов управления процессом формирования, транспортирования и наматывания волокнистого материала зависит как от способа управления, так и от свойств механизмов в процессе эксплуатации. Изменение режимных показателей электроприводов происходит вследствие изменения параметров электромагнитных контуров в цепи «преобразователь-двигатель», передаточных коэффициентов преобразователей, потока возбуждения двигателей, моментов инерции механизмов, частот упругих механических колебаний, параметров гибких передач, взаимного изменения механических параметров в многосвязных многодвигательных электромеханических системах (ЭМС). Кроме того, могут наблюдаться значительные изменения по спектральному составу и интенсивности возмущающих и управляющих воздействий, что может приводить к существенному увеличению динамических ошибок системы и к необходимости коррекции параметров регулирования для минимизации этих ошибок.

В связи с этим необходима разработка основных принципов построения управляемых электромеханических систем с транспортирующими, наматывающими и крутильно-мотальными механизмами в свете современного состояния теории и методов математического описания систем управления, где выбору оптимального процесса формирования, транспортирования и наматывания волокнистого материала должно предшествовать технологическое исследование управляемого процесса с целью установления наиболее выгодного скоростного режима.

Для реализации данной задачи необходимо иметь аналитический аппарат разработки методики анализа, расчета и проектирования транспортирующих, наматывающих и крутильно-мотальных механизмов, способных формировать изделия с заданными технологическими свойствами. Практическая реализация данной проблемы имеет важное значение для экономии и рационального использования материальных и энергетических ресурсов в производствах текстильной и легкой промышленности.

Цели и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка научных методов анализа, расчета и повышения эффективности управляемых электротехнических комплексов и систем технологического оборудования с транспортирующими, наматывающими и крутильно-мотальными механизмами, позволяющих согласовать и оптимизировать скоростные режимы, используя при этом интеллектуальные алгоритмы, обеспечивающие инвариантность регуляторов к изменению параметров динамического объекта.

Для достижения поставленной цели решены следующие научные и технические задачи:

- Предложена научная концепция разработки и исследования методов и систем энергосберегающего управления энергоемким технологическим оборудованием текстильного производства (рис. 1).
- Установлена взаимосвязь технологических параметров с энергетическими характеристиками, в частности со скоростными режимами оборудования, с целью повышения производительности, рационального использования электроэнергии, улучшения качественных показателей волокнистых материалов путем совершен-

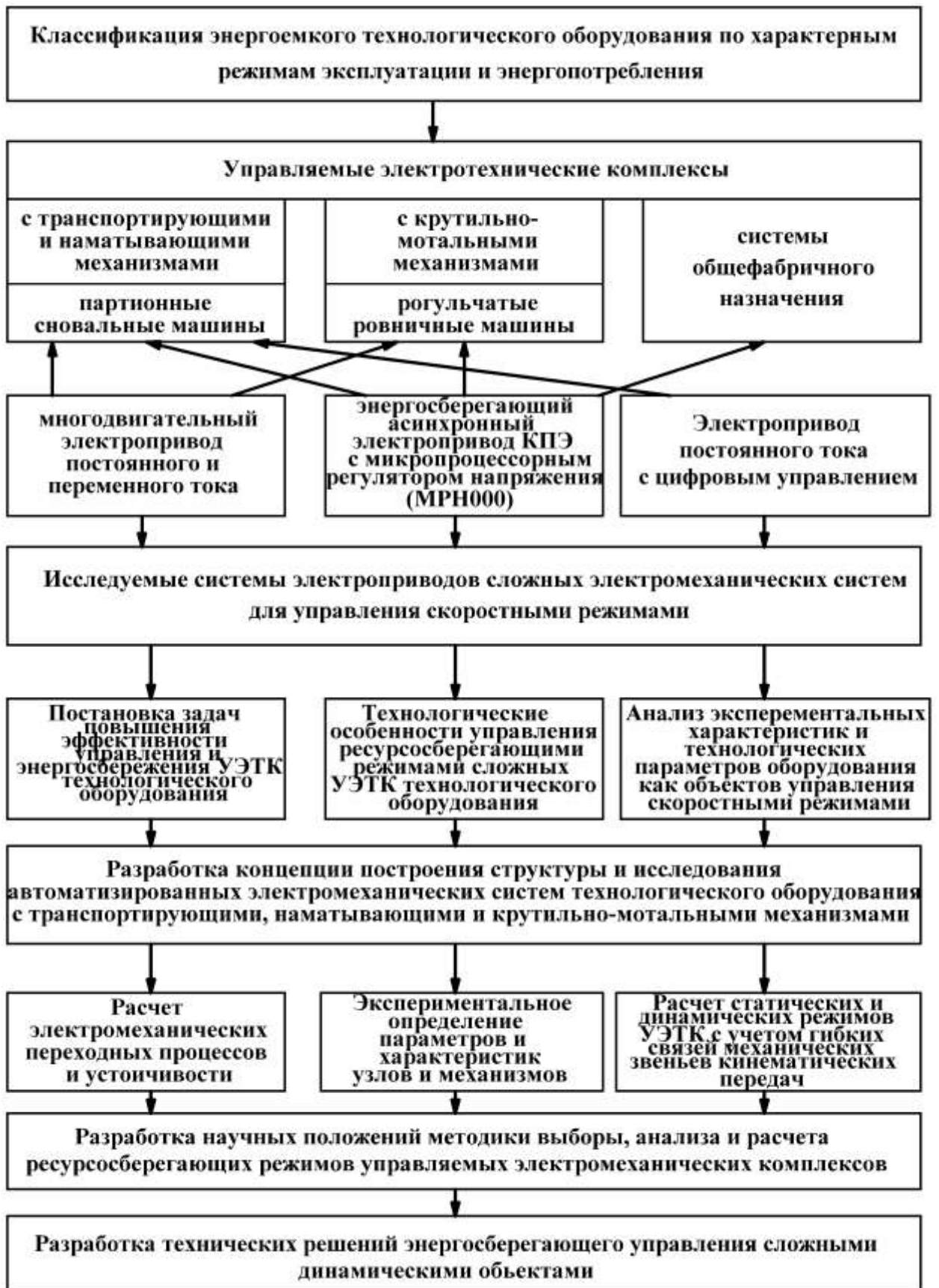


Рисунок 1 – Концепция построения структуры и исследования автоматизированных электромеханических систем технологического оборудования с транспортирующими, наматывающими и крутильно-мотальными механизмами.

ствования управляемых электротехнических комплексов и режимов обработки полуфабрикатов и конечной продукции.

– Определены способы повышения эффективности работы управляемого электротехнического комплекса с транспортирующими и наматывающими механизмами (на примере партионной сновальной машины) на основе современных систем управления энергосберегающих электроприводов постоянного и переменного тока с микропроцессорным управлением.

– Разработаны основные принципы построения, расчета и проектирования управляемых электромеханических систем с транспортирующими, наматывающими и крутильно-мотальными механизмами, предусматривающие применение интеллектуальных методов управления, а также определения этапов оптимизации.

– Определены направления и технические средства энергосбережения за счет оптимизации режимов эксплуатации электромеханических систем, включающие в себя теоретические и экспериментальные исследования технологических параметров, энергетических характеристик и показателей асинхронных двигателей с микропроцессорным регулятором напряжения с учетом влияния качества электроэнергии на эксплуатационные показатели оборудования.

– Предложены и исследованы алгоритмы управления сложными динамическими объектами с транспортирующими, наматывающими и крутильно-мотальными механизмами (КММ) на базе искусственных нейронных сетей и нечеткой логики, основанные на нелинейной теории управления.

– Разработаны функциональные и структурные схемы модернизированных систем управления процессами наматывания нитей на сновальной машине и кручения и наматывания ровницы на рогульчатой ровничной машине, обеспечивающих внедрение интеллектуальных технологий и повышение качества выпускаемой продукции.

– Проведен анализ характеристик специальных режимов энергоемкого технологического оборудования, экспериментальные исследования которого, подтвердили целесообразность использования многофункционального микропроцессорного регулятора напряжения МРН000 для управления энергосберегающими и

скоростными режимами сновальных и ровничных машин, оснащенных асинхронными параметрическими электроприводами типа КПЭ.

– Проведены экспериментальные исследования по определению разрывной нагрузки и компонентов деформации снующихся нитей и крученой ровницы при их нагружении, а также осуществлена реализация скоростной диаграммы наматывания ровницы на лабораторном стенде.

– Разработаны технические решения по частичной модернизации управляемых электротехнических комплексов исследуемого технологического оборудования, а также положения и рекомендации анализа и расчета их ресурсосберегающих режимов.

– Разработаны научные положения метода анализа, расчета и повышения эффективности эксплуатации электромеханических систем с транспортирующими, наматывающими и крутильно-мотальными механизмами.

На защиту выносятся:

1. Концепция повышения эффективности эксплуатации сложных динамических систем технологического оборудования за счет применения интеллектуальных систем управления.
2. Цели и задачи интеллектуального управления, а также целесообразность построения и применения интеллектуальных систем управления сложными энергоемкими динамическими объектами технологического оборудования.
3. Усовершенствованные энергосберегающие методы управления сложными электромеханическими системами с транспортирующими, наматывающими и крутильно-мотальными механизмами.
4. Структурные и функциональные схемы управляемых многодвигательных электротехнических систем с транспортирующими, наматывающими и крутильно-мотальными механизмами.
5. Комплекс математических моделей, описывающих статические и динамические режимы исследуемых электромеханических систем, с учетом энергетических характеристик и технологических параметров.

6. Алгоритмы управления и интеллектуализации при решении задач адаптации исследуемых электромеханических систем к изменяющимся параметрам объекта.
7. Научные положения методики выбора, анализа и расчета энергосберегающих режимов управляемых электротехнических систем.
8. Технические решения энергосберегающего управления и их возможность реализации в производственных условиях.

Методы исследования. В работе использованы современные математические и инструментальные методы исследований. Теоретические исследования основывались на классических методах теории автоматического управления, теории автоматизированного электропривода, теории импульсных и дискретных систем, теории синтеза систем управления для линейных объектов с конечномерным пространством состояний, используя известные принципы постановки физического эксперимента и статистической обработки его результатов. При построении математических моделей динамических процессов применялись методы экспериментальной идентификации технологических параметров с использованием нейронных сетей, нечеткой логики и нечетких когнитивных карт.

Моделирование и обработка данных исследований, расчеты при анализе и синтезе систем управления производились с использованием современных информационных и компьютерных технологий. Использованы пакеты современной версии системы Matlab (Simulink, Neural Network Toolbox, Fuzzy Logic Toolbox) и программа для моделирования электрических схем Multisim.

Расчеты проводились по стандартным и разработанным автором программам математической среды Matlab. Графическая обработка результатов выполнена средствами MS Excel, Matlab и стандартными средствами Windows.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые выполнен комплексный анализ статических и динамических режимов электромеханических систем транспортирования и наматывания нитей на сновальной машине и формирование, кручение и наматывание ровницы на ровничной машине для гребенного прядения шерсти.

2. Предложено математическое описание динамики управляемых электромеханических систем с транспортирующими, наматывающими и крутильно-мотальными механизмами с учетом влияния физико-механических свойств волокнистого продукта, гибких деформируемых связей, электромеханических процессов в электроприводах и качества электрической энергии.
3. Разработана система научных положений методики выбора, анализа и расчета электромеханических систем технологического оборудования, обеспечивающих программное управление, соответствующее технологическому регламенту, заданным нормам потребления электроэнергии, сырья и качества продукции.
4. Предложены принципы построения интеллектуальных автоматизированных систем управления технологическими процессами для объектов с повышенной интенсивностью эксплуатации.
5. Проведен сравнительный анализ применения классических и интеллектуальных методов для исследования энергосберегающих режимов сложных управляемых электротехнических комплексов технологического оборудования.
6. Разработаны функциональные и структурные схемы компьютерных систем управления процессами формирования, транспортирования и наматывания волокнистых материалов.
7. Разработан метод анализа, расчета и проектирования сложных электротехнических комплексов на примере партионной сновальной машины и рогульчатой ровничной машины для гребенного прядения шерсти, базирующийся на применении классических, современных и интеллектуальных технологий.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, основана на удовлетворительном совпадении аналитических и численных расчетов с результатами эксперимента, на использовании информационных технологий и современных методов и средств проведения исследований. Теоретические положения и экспериментальные выводы многократно

уточнялись и проверялись. При проверке использовались методы лабораторных испытаний волокнистых материалов и макет модернизированной части управляемого электротехнического комплекса ровничной машины, а также методы математического моделирования.

Практическая ценность работы. Предложенные в работе алгоритмы управления и схемные решения использованы при разработке компьютерной системы автоматического управления процессом формирования, транспортирования и наматывания волокнистого продукта на сновальных и ровничных машинах. Разработанные методы управления обеспечивают быстродействие, точность синхронизации частот вращения рабочих органов ЭМС, а также коррекцию пусковых и тормозных режимов. Модернизация управляемых электротехнических комплексов выполнена на базе комплектных электроприводов постоянного и переменного тока с микропроцессорным управлением энергосберегающими режимами. С целью повышения эффективности управления процессами транспортирования и наматывания нитей на партионной сновальной машине предложена частичная модернизация ЭМС за счет установки регулируемого электропривода переменного тока на линии транспортирования нитей в свободной зоне. Для ровничной машины предложена двухконтурная система управления процессом кручения и наматывания ровницы на паковки.

На основании конкретных производственных данных проведены расчеты оптимальных скоростных режимов, обеспечивающих повышение производительности, улучшения качественных показателей волокнистых продуктов, рационального использования сырья и электроэнергии.

Представленные алгоритмы управления и идентификации подтверждаются схемами Simulink, которые могут стать основой для аппаратной реализации и дальнейших исследований.

Разработанные технические решения усовершенствованных способов управления процессами формирования, транспортирования и наматывания волокнистых материалов могут быть рекомендованы для частичной модернизации эксплуатируемого технологического оборудования.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на международной научно-технической конференции «Современные технологии и оборудование текстильной промышленности» (Текстиль-2012, МГТУ, Москва); международной научно-технической конференции «Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности» (Прогресс-2012, ИГТА, Иваново); межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов «Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности» (ПОИСК-2010, 2013, 2014 ИГТА, Иваново); межвузовской научно-технической конференции «Студенты и молодые ученые КГТУ - производству» (2011, 2012, 2013, КГТУ, Кострома); всероссийской научно-технической конференции «Современные тенденции развития информационных технологий в текстильной науке и практике» (2012, ДИТИ НИЯ-УМИФИ, Димитровград); всероссийской научной конференции «Инновации молодежной науки» (2011, 2012, СПГУТД, Санкт-Петербург); всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов (Дни науки-2010, СПГУТД, Санкт-Петербург); всероссийском конкурсе НИР студентов и аспирантов в области технических наук (2012, Политехнический университет, Санкт-Петербург).

Публикации. По материалам диссертационной работы получен патент РФ, опубликованы в соавторстве монография, 23 научно-технические статьи, в том числе, из них 7 – в рецензируемых журналах из списка ВАК; 4 – в отраслевых журналах и сборниках; 1 – в иностранном журнале; 10 – в виде тезисов докладов в сборниках материалов конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 173 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка используемой литературы из 80 наименований, 76 иллюстраций, 12 таблиц. Приложения составляют 13 страниц.

Глава 1 Разработка модернизированной системы управления нелинейным динамическим объектом с транспортирующими и наматывающими механизмами.

1.1. Краткая характеристика перспективных направлений энергосбережения при эксплуатации управляемых электротехнических комплексов технологического оборудования

Важным резервом энергосбережения является оптимальное управление динамическими объектами по минимуму затрат энергии в условиях реальной эксплуатации, т.е. когда меняются параметры объектов, режимы работы, ограничения, задание на конечное состояние. Применение регулируемого электропривода в управляемых электротехнических комплексах (УЭТК) обеспечивает энергосбережение и позволяет получать новые качества систем и объектов. Значительная экономия электроэнергии обеспечивается за счет регулирования технологических параметров (натяжения, вытяжки, линейной плотности). Автоматизация производства текстильных материалов выдвинула ряд проблем, связанных с улучшением качества управления электромеханическими системами технологического оборудования, основным видом регулируемого электропривода которого служат комплектные системы постоянного и переменного тока. Высокие требования технологического регламента к процессу формирования, транспортирования и наматывания волокнистого материала тесно связаны со скоростными режимами и точностью их реализации, обеспечивающими синхронизацию движений рабочих органов машин и аппаратов при оптимальных энерготехнологических показателях и заданных ограничениях. Автоматизация электромеханических систем технологического оборудования для производства текстильных материалов требует расширения и усложнения функций управления в связи с необходимостью осуществлять обмен информацией с устройствами управления различных уровней, обеспечивать непрерывный контроль и диагностику состояния, а также надежную защиту от нарушений нормального режима эксплуатации [1].

Имеется большое количество оборудования, в котором требуется создать определенный оптимальный скоростной режим при осуществлении технологических процессов. В одних случаях необходимы поддержание или синхронизация скоростей вращения узлов и механизмов, в других - изменение частоты вращения по заданному закону или регулирование ее в широких пределах.

В текстильной отрасли для общефабричного оборудования преимущественное применение находят нерегулируемые асинхронные короткозамкнутые двигатели как наиболее простые по конструкции, экономичные и надежные в работе.

Снижение потерь электроэнергии как в самих асинхронных двигателях (АД), так и в питающих сетях можно достичь путем: 1. оптимального проектирования и улучшения технологии при изготовлении АД; 2. применения комплектных электронных и микропроцессорных устройств для управления АД; 3. рационального (оптимального) выбора электропривода для конкретной электро-механической системы.

Первые два способа снижения потерь электроэнергии требуют исследований и конструкторских разработок. Появление и развитие третьего способа обусловлено тем, что эксплуатационные режимы асинхронных приводов характеризуются отклонением реальной нагрузки АД от нагрузки, на которую рассчитан двигатель и которой соответствуют оптимальные значения его энергетических показателей. Существование таких режимов определяется выбором завышенного по мощности двигателя, а также переменным по времени характером нагрузки АД. Использование завышенного по мощности АД для привода объясняется, с одной стороны, несовершенством методик выбора двигателей, с другой - запасом по надежности с учетом тяжелых динамических режимов работы электро-механических систем технологического оборудования. Переменный во времени характер нагрузки диктуется особенностями технологического цикла машин, аппаратов и механизмов, использующих АД. Указанные эксплуатационные режимы асинхронного привода характеризуются низкими значениями его энергетических показателей - коэффициента мощности ($\cos\varphi$) и коэффициента полезного действия (КПД).

При примерно одинаковой установленной мощности двигателей потребление электроэнергии в США вдвое меньше, чем в РФ, что объясняется весьма низким коэффициентом использования оборудования. Так, для АД мощностью 0,75-100 кВт средняя годовая наработка составляет в России - 1044 ч, в США - 2020 ч. Кроме того, в России в настоящее время наблюдается тенденция к снижению коэффициента использования оборудования. При доведении уровня годовой наработки электродвигателей в России до ее уровня в США потребность в АД должна снизиться в 1,5-2 раза [2].

Снижение энергозатрат при эксплуатации сложных динамических систем технологического оборудования достигается выбором рациональных (в отдельных случаях оптимальных) скоростных режимов его электромеханических систем, определяемых энергетическими показателями и требованиями к технологическим процессам.

Основной задачей энергохозяйств по производству текстильных материалов является обеспечение надежной и бесперебойной работы технологического оборудования. Последнее может быть достигнуто как за счет реализации малозатратных технических решений, так и за счет частичной модернизации энерготехнологического оборудования.

Исследования автора по вопросам повышения эффективности эксплуатации сложных управляемых электромеханических систем технологического и общепромышленного оборудования проводилось по следующим основным направлениям.

Первым направлением является разработка и внедрение на технологическом и вспомогательном оборудовании специальных технических средств, обеспечивающих в электроприводе минимизацию влияния отклонения нагрузки и качественных показателей электроэнергии от номинальных значений на энергетические показатели [3]. Для реализации данного направления предложена методика внедрения микропроцессорных регуляторов напряжения МРН000 для низковольтных АД, которые кроме выполнения функций энергосбережения управляют режимами пуска, торможения, в отдельных случаях в небольших диапазонах регулируют частоту и момент вращения, а также осуществляют защиту и диагностику, т.е. по-

вышают технический уровень привода в целом, увеличивают его надежность. С учетом multifunctionality применения МРН000 такое решение оказывается экономически целесообразным для электромеханических систем с переменной нагрузкой даже при относительно высокой цене энергосберегающего устройства.

Вторым направлением энергосбережения является переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому для отдельных видов технологического оборудования с транспортирующими (ТМ), наматывающим (НМ) и крутильно-мотальными (КММ) механизмами [4]. Этот объективный процесс, обусловленный повышением технического уровня технологического оборудования, в котором используется автоматизированный электропривод, часто ставит задачу рационального и (или) оптимального управления скоростными режимами.

Как правило, при переходе к регулируемому электроприводу экономия энергии достигается как за счет применения самого автоматизированного привода, так и за счет совершенствования технологического процесса, который привод обслуживает.

Технологическое оборудование производства текстильных материалов обладает рядом особенностей, сказывающихся на постановке и методах решения задач повышения эффективности энергоресурсосбережения и их реализации за счет управления скоростными режимами. Поэтому важнейшей эксплуатационной характеристикой машин и механизмов является соответствие между фактическими и конструктивно заданными законами движения рабочих органов.

В качестве управляемых признаков при этом выступают перемещения, линейные скорости и частоты вращения рабочих органов, ускорения отдельных элементов машин, а также перечень показателей систем автоматического регулирования (САР), характеризующих статические и динамические свойства электромеханических систем (ЭМС).

Для эффективного использования перечисленных признаков необходимо осуществить кинематический и динамический анализ функционирования ЭМС технологического оборудования по технологическим и энергетическим параметрам.

Типичным, наиболее употребительным средством теоретического исследования являются математические модели машин и их узлов, описываемые системами дифференциальных уравнений. Несмотря на вводимые упрощения при составлении математической модели реального объекта, системы дифференциальных уравнений отличаются большой сложностью, связанной с учетом нелинейностей характеристик, переменности параметров и т.п. Решение таких уравнений представляет собой самостоятельную, но тесно связанную с проблемой анализа и расчета ресурсосберегающих режимов ЭМС, задачу.

Повышение производительности оборудования путем увеличения рабочих скоростей и мощности передаваемых потоков материала, улучшение качества изделий – все это требует совершенствования способов и систем управления электромеханическими системами, часто в условиях возрастающих возмущающих воздействий как со стороны силовых механизмов, так и со стороны питающей электрической сети.

Компьютерные технологии в настоящее время располагают методами и средствами, составляющими резерв повышения точности управления процессом транспортирования и наматывания волокнистого материала. За счет усложнения структуры САР при компенсации возмущений может быть не только повышена точность управления, но и снижена сложность цепей обратной связи.

Формирование, транспортирование и наматывание волокнистых материалов представляет собой один из сложнейших технологических процессов как из-за разнообразия состава волокон, так из-за сильного влияния программы и точности управления натяжением на прочность волокнистого продукта [5].

Важнейшим является вопрос о закономерностях управления процессом формирования, транспортирования и наматывания волокнистого продукта с целью получения тел наматывания с заданными свойствами. Основной проблемой при разработке таких САР является обеспечение согласования линейных скоростей рабочих органов УЭТК.

Нестационарность работы электроприводов как объектов САР технологическими процессами зависит от способов управления электродвигателями постоян-

ного и переменного тока и от свойств механизмов в процессе эксплуатации. Изменение режимных показателей автоматизированных электроприводов происходит вследствие изменения параметров электрической сети, электромагнитных контуров в цепи «преобразователь-двигатель», передаточных коэффициентов преобразователей, потока возбуждения двигателей, моментов инерции механизмов, частот упругих механических колебаний, параметров гибких передач, взаимного изменения механических параметров в многосвязных системах многодвигательных ЭМС. Кроме того, могут наблюдаться значительные изменения по спектральному составу и интенсивности возмущающих и управляющих воздействий, что может приводить к существенному увеличению динамических ошибок системы и к необходимости коррекции параметров регулирования для минимизации этих ошибок.

При проектировании САР сложных ЭМС важно осуществить анализ и классификацию возмущающих воздействий на привод со стороны внешних факторов, вызывающих отклонение частоты вращения электропривода от заданной программы и тем самым нарушающих нормальное течение технологического процесса.

Традиционно возмущения условно разделены на статические и динамические. К статическим возмущениям относятся воздействия, возникающие при изменении моментов сопротивления ТМ, НМ и КММ по мере наработки волокнистого продукта, а также колебания напряжения сети, которые оказывают влияние на реализацию оптимального скоростного режима УЭТК в целом. К динамическим воздействиям относятся воздействия, вызывающие изменение параметров передаточной функции электропривода и, следовательно, влияющие на точность процесса наматывания волокнистых материалов. К этим возмущениям следует отнести изменения моментов инерции и моментов сопротивления ТМ, НМ и КММ в процессе наработки волокнистого материала. Если динамика электропривода описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, то к динамическим возмущениям следует отнести изменение частоты вращения при пере-

ходе к наматыванию очередного слоя волокнистого продукта, что приводит к изменению электромеханической постоянной времени.

Для управляемых ЭМС с ТМ, НМ и КММ характерны и значимы режимы пуска, торможения и регулирования частоты вращения в зависимости от диаметра наматывания, а также стабилизация скоростного режима в процессе его транспортирования через силовые узлы и механизм согласно скоростной диаграммы.

Для транспортирующих механизмов электромеханических систем производств текстильных материалов рекомендуется параметрическая оптимизация - когда при заданной структуре и функциональных воздействиях на систему определены значения параметров, при которых наилучшим образом удовлетворяются заданные показатели качества.

При проектировании УЭТК и его практической реализации используется, как правило, модульный принцип, при котором конструируется система управления, удовлетворяющая заданным критериям качества и техническим условиям, из типовых модулей (блоков). Это включает в себя необходимость разработки способов коррекции системы, когда при известном математическом описании системы определяется структура и параметры дополнительных корректирующих устройств, обеспечивающих ее заданные качественные показатели в статических и динамических режимах.

В диссертации автором разработаны научные основы методики, выбора и расчета сложных динамических объектов, в которой излагаются основные принципы анализа, разработки и исследования управляемых электромеханических комплексов с транспортирующими, наматывающим и крутильно-мотальными механизмами в свете современного состояния теории и методов математического описания систем управления.

Выбору скоростной диаграммы процессов формирования, транспортирования и наматывания волокнистого материала должно предшествовать технологическое исследование управляемого процесса с целью установления наиболее рационального скоростного режима.

В настоящее время отсутствуют управляющие комплексы и системы способные решать в реальном времени задачи синтеза оптимального энергосберегающего управления на множестве состояний функционирования.

По существу такие управляющие устройства должны представлять собой интеллектуальные системы, обладающие возможностями на основе вводимых исходных данных оперативно определять вид функции оптимального управления, рассчитывать её параметры, выбирать наилучшую стратегию управления.

Третьим перспективным направлением энергосбережения является разработка и применение интеллектуальных систем и, в первую очередь, создание для них математического и программного обеспечения, что возможно лишь на базе современных информационных технологий, позволяющих в полном объеме использовать базу знаний экспертной системы.

В последние годы наиболее перспективным направлением признаны технологии искусственного интеллекта в системах управления электроприводами, где находят применение так называемые нечеткие алгоритмы регулирования [6]. Нечеткое управление (на основе методов теории нечетких множеств) используется при недостаточном знании объекта управления, наличии опыта управления им, в нелинейных системах, идентификация которых слишком трудоемка, а также в случаях, когда по условию задачи необходимо использовать знания эксперта. Регуляторы, построенные на базе этой инновационной концепции, в ряде случаев способны обеспечить наиболее высокие показатели качества переходных процессов по сравнению с классическими регуляторами. Кроме того, используя технологию синтеза нечетких алгоритмов управления, возможно провести оптимизацию сложных контуров регулирования без проведения всесторонних математических исследований. Широкому распространению fuzzy-систем управления способствует программная система Matlab, в составе которой имеется пакет программ по fuzzy-логике. Fuzzy Logic Toolbox позволяет создавать и редактировать fuzzy-системы управления с нечеткой логикой, называемые в терминах программной системы Matlab – Fuzzy Inference System или FIS. Эти системы можно создавать используя как графические инструменты так и команды рабочего окна Matlab.

Кроме того, указанная система включает в себя пакет моделирования динамических систем Simulink, который в свою очередь позволяет при помощи стандартных блоков, входящих в библиотеку, сформировать одноконтурную или многоконтурную систему управления с аналоговым или fuzzy-регулятором [7].

1.2. Особенности технологического процесса транспортирования и наматывания нитей на партионной сновальной машине (СМ)

Производительность технологического оборудования и качество выпускаемой продукции в текстильной промышленности существенно зависят от интенсивности эксплуатации технологического оборудования приготовительного цеха ткацкого производства. Анализ технической литературы показал, что качество готовых тканей и уровень производительности ткацкого оборудования определяются во многом процессом снования основных нитей. Для снижения обрывности нитей и повышения качества тканей необходимо строгое соблюдение технологического режима процесса снования. Значение данной операции возрастает также в связи с внедрением быстроходных ткацких станков.

В ткацком производстве практикуются четыре способа снования: партионный, ленточный, секционный и полный. Снование по каждому из этих способов может быть прерывным и непрерывным. Наиболее распространенным способом снования является партионный способ, обеспечивающий наибольшую производительность при сновании нитей из любых видов волокон. Исследования и опыт работы предприятий показывают, что более распространенным является прерывный вид снования. При таком способе снования натяжение нитей более равномерное, т.к. сматывание происходит с бобин одинакового размера.

При партионном сновании нити основы навиваются на сновальный вал частями с определенным числом нитей, которые образуют партию с общим числом нитей, равным числу нитей на ткацком навое. Наиболее широко партионное сно-

вание применяется в хлопчатобумажном, льняном, шерстяном и шелковом производствах.

Основным технологическим требованием процесса снования является соблюдение условий синхронизации частот вращения рабочих органов, обеспечивающих при прочих равных условиях постоянство натяжения нитей и равномерную плотность наматывания. При формировании сновального вала непрерывно изменяется диаметр наматывания. Радиус наматывания (без учета эластичной деформации и сжатия слоев) может быть определен из следующего соотношения [8]:

$$R(t) = R_0 + \frac{h}{2\pi} \int_0^t \omega_2 dt, \quad (1.1)$$

где $R_0 = 0,24$ м – начальное значение радиуса наматывания, равное радиусу сновального вала, на который наматывается нить; t – время, с; $h = 1-18$ мкм – диаметр нити; ω_2 – угловая скорость вращения сновального вала, с⁻¹.

Анализ выражения (1.1) позволяет сделать следующий вывод: при увеличении диаметра наматывания необходимо непрерывно и плавно уменьшать угловую скорость вращения сновального вала для поддержания натяжения нити постоянным.

Управляемый электротехнический комплекс (УЭК) сновальной машины должен [9]:

- обеспечивать стабильность линейной скорости снования согласно технологическому регламенту и сохранять её постоянной в течение всего времени наматывания сновального вала независимо от внешних воздействий (колебания напряжения в электросети, изменения нагрузки, изменения моментов сопротивления и инерции);

- реализовывать пуско-тормозные режимы согласно заданному закону без колебаний и перерегулирования за минимальное время, что существенно улучшает силовое воздействие на нити, сокращает обрывность как в процессе снования, так и в дальнейших операциях шлихтования и ткачества, а также обеспечивать заданную длину основных нитей в процессе их транспортирования;

- обладать быстродействием при компенсации возмущений, вызванных колебаниями натяжения нитей основы;
- реализовывать оптимальные скоростные режимы, высокую производительность, скорость наматывания в диапазоне от 150 м/мин до 1500 м/мин за счет применения современных систем энергосберегающих электроприводов;
- формировать постоянную плотность наматывания нитей на сновальный вал и цилиндрическую форму без завалов и наплывов у фланцев сновального вала, при этом все нити по ширине паковки должны быть равномерно распределенными.

Высокоскоростные сновальные машины с плавным регулированием частоты вращения производятся как российскими машиностроительными фирмами, так и зарубежными: «СП-140» (Россия), «Франц-Мюллер» (Германия), «Бенингер» (Швейцария), «Барбер-Кольман» (США), «Ково» (Чехия), «Хакоба» (Польша).

В электротехнических комплексах указанных машин, как правило, используются следующие системы автоматизированных электроприводов:

1. постоянного тока, питание которых осуществляется от управляемых тиристорных преобразователей;
2. на базе коллекторных двигателей переменного тока, в которых регулирование скорости снования осуществляется в функции изменения диаметра наматывания нитей на сновальный вал;
3. выполненные по системе «асинхронный двигатель – преобразователь частоты» (АД – ПЧ), обеспечивающие заданное быстродействие, пуско-тормозные и регулировочные режимы при переменной нагрузке и возмущающих воздействиях.

Главной задачей управляемого электротехнического комплекса сновальной машины является обеспечение стабильности натяжения основных нитей при их транспортировании и наматывании во времени и по ширине сновального вала, что является основным условием получения качественной ткани с одинаковыми свойствами по всей ширине полотна. Правильно подготовленный и реализованный

процесс снования повышает производительность ткацких станков и улучшает качество готовой продукции в целом.

Наличие в основах дефектов, перечисленных в таблице 1.1, затрудняет прокладывание уточной нити на бесчелночных ткацких станках различного типа, что приводит к увеличению числа остановов станка, снижению качества ткани из-за недолетов утка, пусковых полос и обрывности нитей основы. Кроме того, приведенные дефекты значительно ухудшают такие технико-экономические показатели, как коэффициент полезного времени (КПВ), производительность труда, повышает расход сырья и электроэнергии.

Таблица 1.1 – Дефекты, возникающие в процессе снования

№ п/п	Дефекты	Причина возникновения	Предлагаемый способ ликвидации дефекта
1	Обрыв основных нитей	Чрезмерное натяжение нитей при сновании из-за неправильного согласования скоростей электродвигателей	Согласование скоростей электродвигателей сновальной машины с целью поддержания заданного натяжения нитей. Обеспечение заданной интенсивности пусковых и тормозных режимов.
2	Переплетение основных нитей между собой	Слабое натяжение отдельных нитей	
3	Образование петель сверху или снизу полотна	Перекручивание нитей при неравномерном натяжении	
4	Провисание слабо натянутых нитей	Слабое натяжение отдельных нитей	

Исследования, проведенные в работах [10, 11, 12, 13, 14, 15], показали, что основной причиной неудовлетворительного качества подготовки основ является неравномерность и нестабильность натяжения нитей в процессе снования. Одним из способов повышения эффективности работы управляемого электротехнического комплекса сновальной машины является частичная модернизация системы управления процессом транспортирования и наматывания нитей на сновальный вал. При проектировании УЭК актуально использование интеллектуальных систем управления и современных энергосберегающих электроприводов постоянного и переменного тока с микропроцессорным управлением.

1.3. Исследование физико-механических свойств текстильных нитей,

наработанных на сновальной машине

Как отмечено в параграфе 1.2, в процессе снования основных нитей на сновальной машине необходимо поддерживать натяжение нитей на заданном уровне. Нестабильность натяжения в процессе снования приводит к неисправимым дефектам конечного продукта. Для решения задач оптимизации скоростных режимов УЭК сновальной машиной необходимо иметь информацию о характере и величине деформации нитей в процессе транспортирования в свободной зоне и в зоне наматывания на сновальный вал.

Главным показателем качества текстильных нитей является их способность к восприятию растягивающих нагрузок при транспортировании и наматывании без разрушения. Для этого вводятся показатели разрывной нагрузки и удлинения при разрыве.

На кафедре текстильного материаловедения ФГБОУ ВПО «МГУДТ» проведено исследование паковок из синтетических, хлопчатобумажных и шерстяных нитей. Определение разрывной нагрузки нитей и удлинения при разрыве проводилось на универсальной испытательной системе «Инстрон» с микропроцессорным управлением. Данная система позволяет проводить испытания различных волокон, нитей и полотен благодаря наличию сменных механических зажимов, а информацию об изменении показателей разрывной нагрузки и удлинения при разрыве фиксировать с монитора компьютерной системы. Для эксперимента были отобраны 10 пробных образцов трех видов нитей. Разрывные характеристики определялись в соответствии с ГОСТ 6611.2-73 «Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве» и ГОСТ 28890-90 «Нити текстильные. Методы определения компонентов полного удлинения при растяжении нитей нагрузкой меньше разрывной» [16, 17].

Для определения допустимых и предельных значений прочности основных нитей были получены разрывные характеристики «нагрузка – удлинение (деформация)» (рис. 1.1) для шерстяной, хлопчатобумажной и синтетической нитей. Определены следующие значения максимальной нагрузки, которую способен вы-

держивать образец: для хлопчатобумажной нити – 4,4 Н, для шерстяной – 5,6 Н, для синтетической – 7,2 Н.

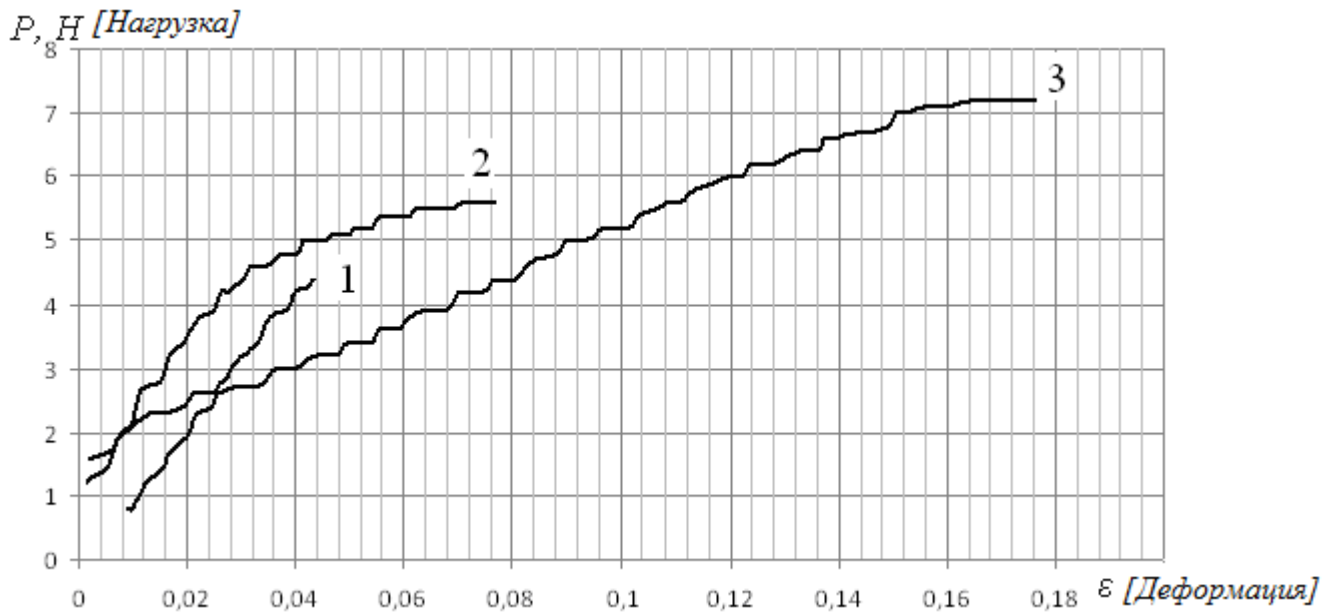


Рисунок 1.1 – Диаграмма растяжения текстильных нитей: хлопчатобумажной (1), шерстяной (2) и синтетической (3) нитей

Для решения задачи оптимизации скоростных режимов сновальной машины необходима информация о характере и величине деформаций основных нитей в зоне транспортирования и наматывания на сновальный вал.

Представим полную деформацию ε , возникающую при растяжении под действием нагрузок (меньше разрывной), как сумму упругой (быстро обратимой, исчезающей после действия нагрузки), эластической (медленно обратимой, исчезающей после снятия нагрузки) и пластической (необратимой, не исчезающей после действия нагрузки) деформаций [18]:

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_{эл} + \varepsilon_{пл},$$

где ε_y , $\varepsilon_{эл}$, $\varepsilon_{пл}$ – соответственно упругая, эластическая и пластическая составляющие деформации.

Составные части деформации определены в процессе цикла «нагрузка – разгрузка – отдых» на релаксметре типа «стойка». На основе полученных экспериментальных данных (табл. 1.2) было проведено моделирование одноцикловых

диаграмм в операционной системе Matlab (рис. 1.2), используя следующую передаточную функцию:

$$W_n = \frac{\varepsilon(p)}{F(p)} = \frac{Tp^2 + p}{K_1Tp^2 + p(K_1 + K_2 + K_3T) + K_3}, \quad (1.2)$$

где F – натяжение нити K_1, K_2, K_3 – соответственно коэффициенты упругой, эластической и пластической деформаций; T – постоянная времени упругой деформации; p – оператор дифференцирования.

Таблица 1.2 – Экспериментальные значения составных частей деформации для различных видов нитей

Тип нитей	Составляющие деформации			ε
	ε_y	$\varepsilon_{эл}$	$\varepsilon_{пл}$	
Хлопчатобумажная	0,0398	0,0176	0,01912	0,0765
Шерстяная	0,1596	0,019	0,0114	0,19
Синтетическая	0,2618	0,0571	0,0211	0,34

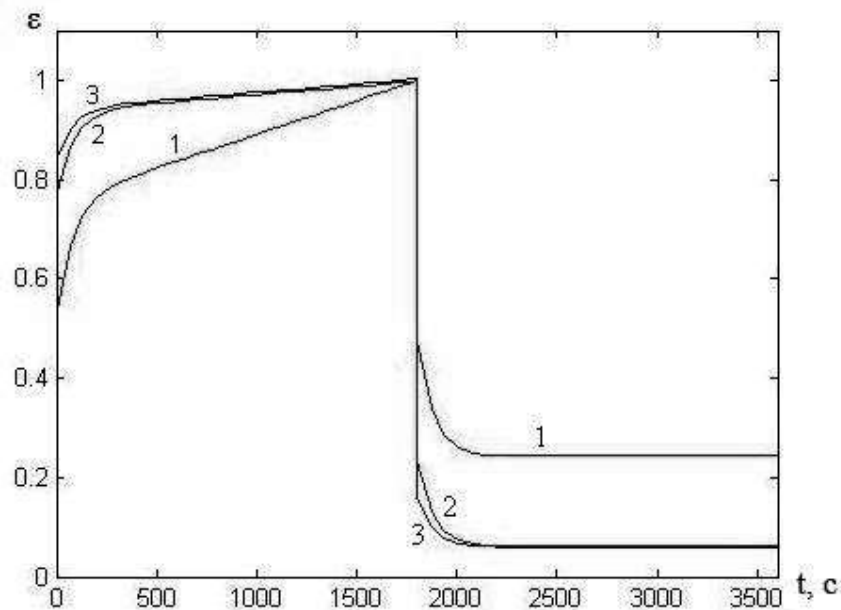


Рисунок 1.2 – Одноцикловые диаграммы для хлопчатобумажной (кривая 1), шерстяной (кривая 2) и синтетической (кривая 3) нитей, полученные при нагрузке, близкой к разрывной (0,2 Н)

Значения коэффициентов модели, используемых при моделировании, приведены в таблице 1.3.

Ориентируясь на минимальное значение относительной деформации нитей 0,04, т.е. на значение, когда имеет место только вытягивание первого рода, можно

сделать следующий вывод. При проектировании САР натяжения исследуемых нитей относительная деформация ε и вытяжка E должны составлять [19]:

$$\varepsilon = \frac{v_2 - v_1}{v_2} \leq 0,04;$$

$$E = \frac{v_2}{v_1} \leq 1,04,$$

где v_1 , v_2 – соответственно линейные скорости выпуска нитей из направляющих валиков и наматывания их на сновальный вал.

Таблица 1.3 – Коэффициенты передаточной функции нити

Тип нитей	K_1	K_2	K_3	T
Хлопчатобумажная	0,02	0,01	$3,17 \cdot 10^{-6}$	80
Шерстяная	0,08	0,009	$4,167 \cdot 10^{-6}$	80
Синтетическая	0,13	0,029	$6,167 \cdot 10^{-6}$	80

Таким образом, в процессе исследования физико-механических свойств различных видов нитей были установлены максимальные разрывные нагрузки, составляющие деформации, получены передаточные функции для трех видов нитей, а также определены требования к САР процессом транспортирования и наматывания нитей на сновальный вал.

1.4. Исследование динамических режимов управляемого электротехнического комплекса сновальной машины

Исследуется структурная схема системы автоматического управления (САУ) сновальной машины СП-140 (рис. 1.3) [20]. На схеме приняты следующие обозначения: K_u и K_d – коэффициенты передачи усилителя мощности (УМ) и двигателя постоянного тока (ДПТ); K_u , K_i , K_v – коэффициенты передачи звеньев обратной связи соответственно по напряжению (U) на выходе усилителя мощности, тока якоря (I_a) двигателя, линейной скорости снования (v_2); T_u , T_a , T и T_m – постоянные времени усилителя мощности, якорной цепи двигателя, обратной связи по напряжению, электромеханическая постоянная времени привода; R_a – сопротив-

ление якоря ДПТ; R_0 и r – соответственно радиусы ствола сновального и мерильного валов; M_c – момент сопротивления привода сновального вала; i – передаточное отношение от двигателя к сновальному валу; e_3 , e_v , e_i – сигналы задания и обратных связей по линейной скорости и току.

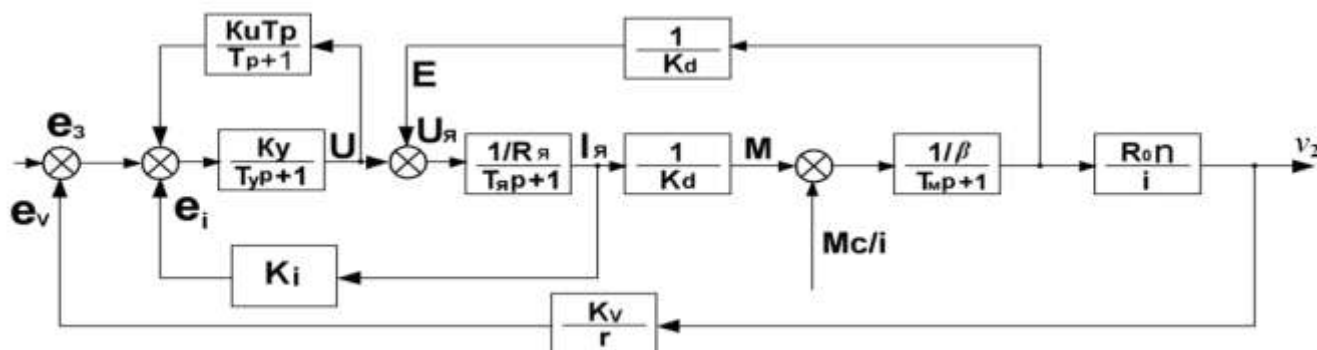


Рисунок 1.3 – Структурная схема САУ сновальной машины

Обратная связь по линейной скорости снования принята жесткой. Электропривод работает на участке механической характеристики с постоянной жесткостью β .

На основании приведенной структурной схемы САУ сновальной машины составлена структурная схема в операционной системе Matlab. Расчеты проведены при значениях параметров, указанных в табл. 1.4.

Таблица 1.4 – Параметры САУ сновальной машиной

Параметры	Значения	Параметры	Значения	Параметры	Значения
K_v	15	K_i	0,5	K_u	0,041
K_d	5	K_v	3	T, c	0,0041
$T_{я}, c$	0,014	T_{v}, c	0,0038	$T_{м}, c$	0,0054
$R_{я}, Ом$	0,6	$R_0, м$	0,24	$r, м$	0,1
i	10	$M_c, Н·м$	57	$\beta, Н·м·с$	0,55

Исследование устойчивости системы автоматического управления сновальной машиной проведено по логарифмическим амплитудно-фазовым частотным характеристикам (ЛАФЧХ) (рис. 1.4, а, б), на которых показан запас устойчивости по амплитуде (а) и по фазе (б).

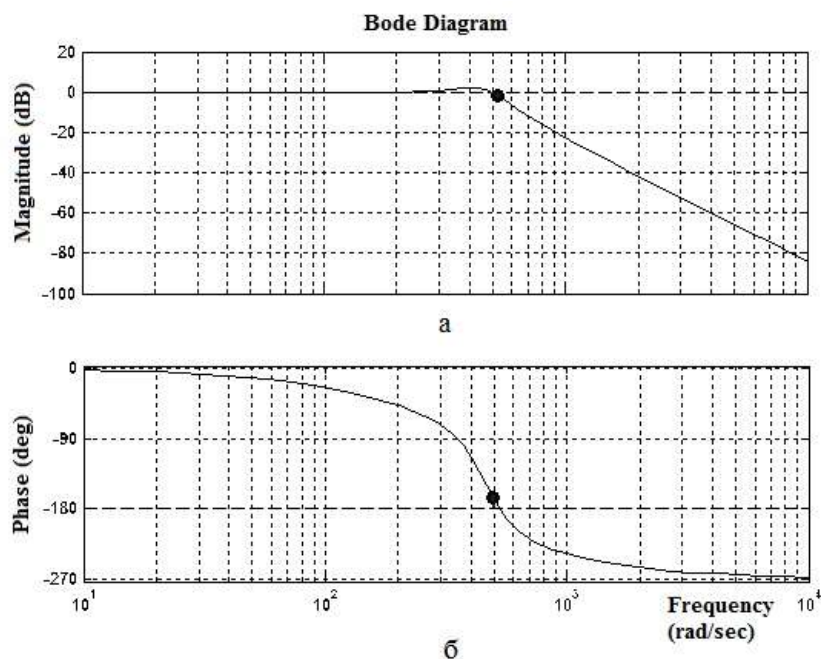


Рисунок 1.4 – ЛАФЧХ замкнутой САР сновальной машины

Система исследована также корневым методом (рис. 1.5), основанным на определении границ области расположения корней характеристического уравнения на комплексной полуплоскости. Так как все корни характеристического уравнения имеют отрицательные вещественные части и находятся в левой полуплоскости, то система является устойчивой.

Распределение корней на комплексной полуплоскости характеризуется действительной a и мнимой b частями комплексных корней характеристического уравнения системы (рис. 1.5). Колебательность системы определяется величиной

$$m = \frac{b}{a} = \frac{447}{106} = 4,22.$$

Чем меньше m , тем система наиболее склонна к колебаниям. Величина a характеризует время регулирования: чем больше величина a , тем меньше время регулирования. Удаление ближайшего корня от мнимой оси и, следовательно, увеличение величины a будет соответствовать увеличению быстродействия системы и уменьшению времени переходного процесса. В случае если один из корней или пара сопряженных корней расположены на мнимой оси, то система находится на границе устойчивости.

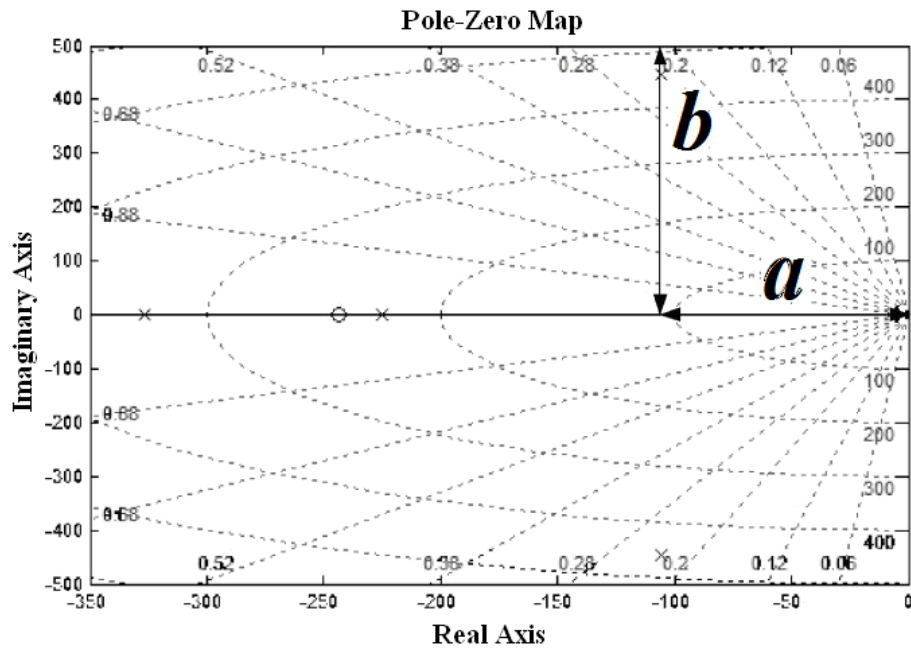


Рисунок 1.5 – Карта нулей и полюсов

Качество переходного процесса системы автоматического регулирования сновальной машины исследовалось при подаче ступенчатого управляющего воздействия (рис. 1.6). Характеристика имеет колебательный характер, перерегулирование составляет 16,8%. Установившийся процесс осуществляется за 0,032 с.

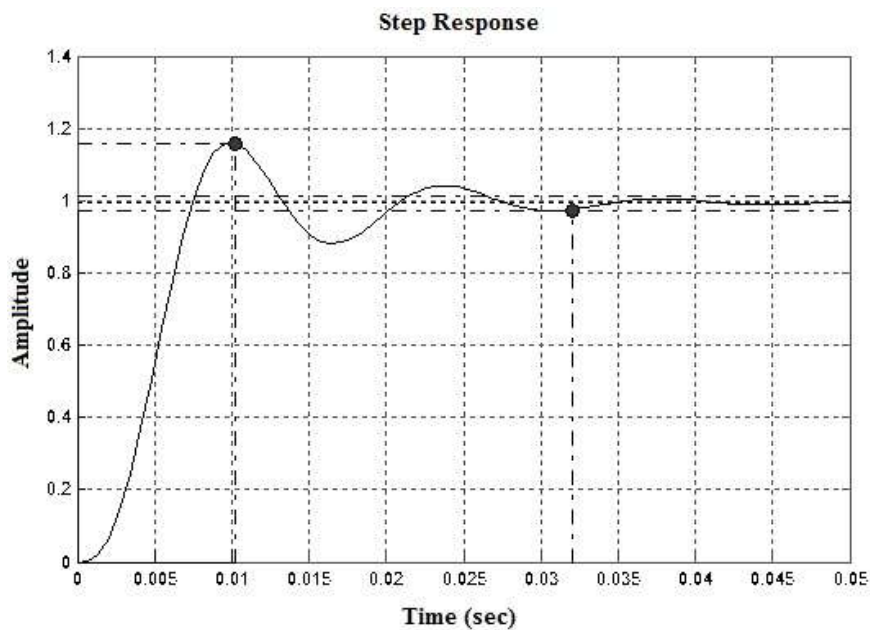


Рисунок 1.6 – Переходная функция контура управления

Качественные показатели системы автоматического регулирования определены по ЛАФЧХ и приведены ниже:

Время регулирования, с.....	0,032
Запас устойчивости по амплитуде, дБ.....	1,87
Запас устойчивости по фазе, град.....	15,1
Число колебаний.....	2

Показатели качества регулирования характеризуют систему автоматического управления скоростными режимами сновальной машины как устойчивую, но запас устойчивости по амплитуде и по фазе не соответствует оптимальным параметрам [21].

Предлагается ввести коррекцию скоростных режимов сновальной машины, связанной с определением алгоритма изменения момента сопротивления по мере формирования сновального вала. Существующие системы косвенного регулирования натяжения нитей путем стабилизации линейной скорости не позволяют в полной мере обеспечить заданную производительность из-за наличия высокой обрывности нитей. Введение коррекции в функцию изменяющегося момента сопротивления привода сновального вала (M_c) позволяет уменьшить обрывность как в установившемся режиме снования, так и в режимах пуска и торможения.

Для введения коррекции по возмущающему воздействию со стороны меняющейся нагрузки на валу приводного двигателя проведен анализ факторов, влияющих на момент сопротивления. С учетом распределения силовых воздействий со стороны сновального вала, представленных на рисунке 1.7, суммарный момент сопротивления может быть представлен в следующем виде [22]:

$$M_c = M_F + M_P + M_Q + M_S; \quad (1.3)$$

$$M_F = F \cdot R_0 \cdot n; \quad (1.4)$$

$$M_P = P \cdot f \cdot R_0 \cdot n; \quad (1.5)$$

$$M_Q = Q(n) \cdot \mu \cdot r_u; \quad (1.6)$$

$$M_S = S \cdot \mu \cdot r_n, \quad (1.7)$$

где M_F , M_p , M_Q , M_s – соответственно моменты, создаваемые суммарным натяжением снующихся нитей, усилием прижима нитей к сновальному валу, силой сопротивления в опорах сновального вала, силой зажима вала в пинолях; F , P , $Q(n)$, S – соответственно суммарное натяжение снующихся нитей, усилие прижима нитей к сновальному валу; сила сопротивления в опорах сновального вала; сила зажима вала в пинолях; n – относительное изменение радиуса наматывания ($n=R(t)/R_0$); f , μ , r_u , r_n – соответственно коэффициенты трения качения, трения скольжения, радиусы цапфы и подшипника.

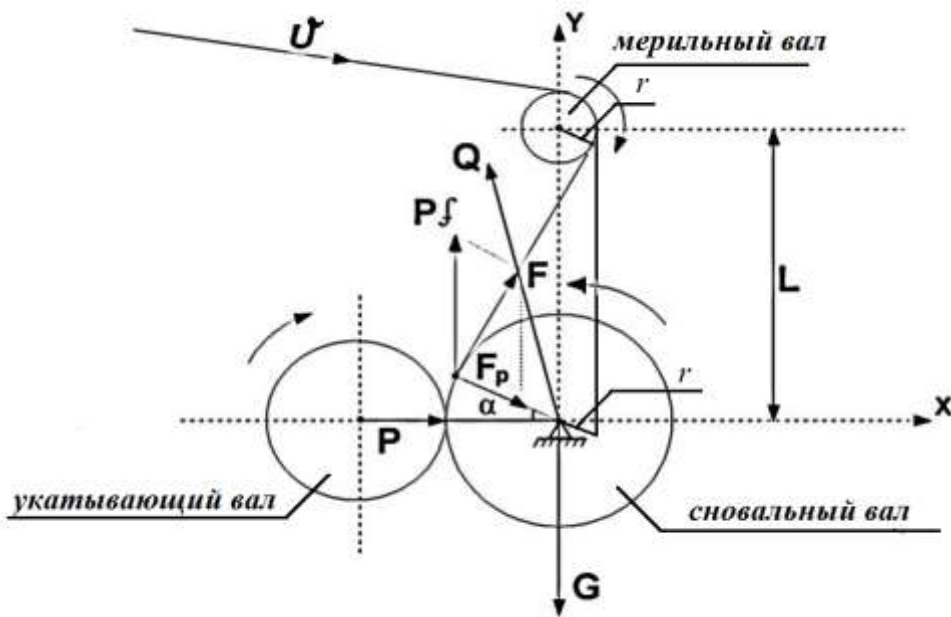


Рисунок 1.7 – Расчетная схема для оценки влияния силовых воздействий на сновальный вал: $\bar{F} = \bar{F}_p + \bar{P}f$ – результирующее натяжение снующихся нитей, состоящее из силы давления нити на сновальный вал и вертикальной силы

Момент сопротивления в опорах сновального вала (M_Q) существенно зависит от текущего радиуса наматывания. Рассмотрим зависимость изменения силы сопротивления в опорах сновального вала от радиуса наматывания $Q = Q(n)$. Из рисунка 1.7 суммарный вектор момента сопротивления в опорах имеет вид:

$$Q = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}, \quad (1.8)$$

$$\text{где } Q_x = P + F \sin \alpha; \quad Q_y = Pf + F \cos \alpha - G(n); \quad \sin \alpha = \frac{R_0 n + r}{L};$$

$$\cos \alpha = \frac{\sqrt{L^2 - (R_0 n + r)^2}}{L}; \quad G - \text{вес сновального вала, } L - \text{расстояние между осями}$$

мерильного и сновального валов.

Одним из факторов, влияющих на силу сопротивления в опорах сновального вала, является его вес. Исходя из этого, определим зависимость веса сновального вала от радиуса наматывания:

$$G(n) = G_0 + G_n(n), \quad (1.9)$$

где $G_0 = g \cdot \gamma_0 \cdot \pi \cdot H \cdot R_0^2 \cdot [2\delta(\lambda^2 - \xi^2) + (1 - \xi^2)]$ – начальный вес сновального вала; $G_n(n) = g \cdot \gamma \cdot \pi \cdot H \cdot R_0^2 \cdot (n^2 - 1)$ – вес тела наматывания; γ, γ_0 – соответственно удельная плотность тела наматывания и материала сновального вала; H – ширина рассадки фланцев сновального вала; δ, λ, ξ – соответственно отношение ширины рассадки фланцев к ширине фланца; отношение радиуса фланца к внешнему радиусу ствола сновального вала; отношение внешнего радиуса ствола к внутреннему; g – ускорение свободного падения.

Из уравнения (1.9) имеем:

$$\frac{G(n)}{G_0} = 1 + \rho(n^2 - 1), \quad (1.10)$$

где постоянные параметры обозначены коэффициентом

$$\rho = \frac{\gamma}{\gamma_0} \cdot \frac{1}{2\delta(\lambda^2 - \xi^2) + (1 - \xi^2)}.$$

Подставляя выражение (1.10) в выражение (1.8) при $P = \text{const}$ и $F = \text{const}$ получим зависимость силы сопротивления в опорах сновального вала от его веса в следующем виде:

$$Q(n) = \sqrt{\left[P + \frac{F(R_0 n + r_u)}{L} \right]^2 + \left[Pf + \frac{\sqrt{L^2 - (R_0 n + r_u)^2}}{L} - G_0(1 + \rho(n^2 - 1)) \right]^2}. \quad (1.11)$$

Учитывая выражения (1.3) - (1.7) и (1.11), получим графики зависимостей $M_Q(n)$ и $M_c(n)$, приведенные на рисунке 1.8, при следующих исходных данных: $P = 1225$ Н; $F = 185$ Н; $S = 3920$ Н; $G_0 = 382$ Н; $f = \mu = 0,05$, $r_u = 0,12$ м; $r_n = 0,0325$ м; $R_0 = 0,24$ м; $L = 1$ м; $\rho = 1,8$.

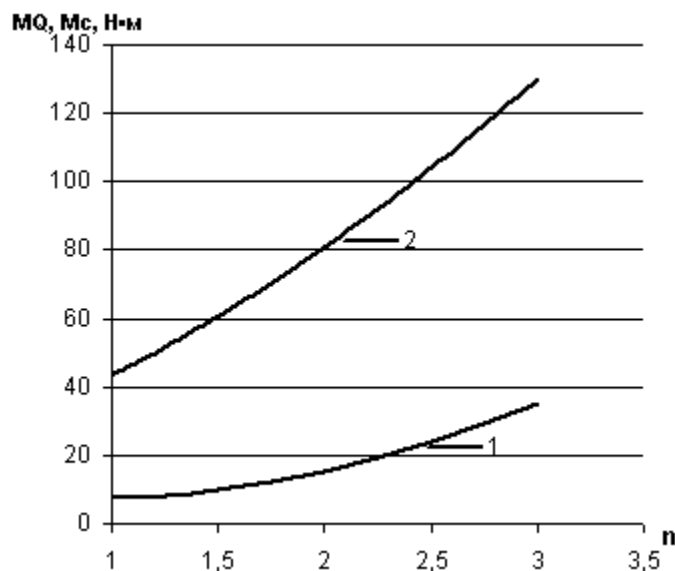


Рисунок 1.8 – Зависимость момента сопротивления в опорах (кривая 1) и суммарного момента сопротивления (кривая 2) от относительного изменения радиуса наматывания сновального вала

В безразмерной форме изменение момента сопротивления в процессе наматывания представлено в виде аппроксимирующего многочлена:

$$\mu(n) = \frac{M_c}{M_c^0} = a_0 + a_1 n + a_2 n^2, \quad (1.12)$$

где M_c^0 – номинальный момент приводного двигателя.

Используя метод наименьших квадратов, определены следующие коэффициенты: $a_0 = 0,45$, $a_1 = 0,46$, $a_2 = 0,1$.

Полученная информация о моменте сопротивления $M_c(n)$ далее используется для выполнения условия инвариантности САУ по возмущению [23]. Прямое измерение момента сопротивления затруднительно, а косвенное измерение по величине тока якоря двигателя приведет к возникновению положительной обратной связи по току якоря и, как следствие, к ухудшению динамических характеристик САУ.

Предложенный автором косвенный способ измерения момента сопротивления, использующий технологию нейронных сетей, рассмотрен в четвертой главе.

Проанализируем возможность осуществить коррекцию по возмущению, аппаратно реализовав математическую модель вида (1.12) с помощью дополнительного блока измерения радиуса наматывания n . Вариант структурной схемы САУ с предложенной коррекцией представлен на рисунке 1.9. Используемые передаточные функции приведены в таблице 1.5.

Обеспечить коррекцию натяжения за счет управления скоростными режимами возможно с помощью управляемого ЭТК на базе двигателя постоянного тока.

Из момента сопротивления сновального вала выделим составляющую натяжения. Уравнение равновесия моментов представим в виде

$$M_{2эм} = M_F + M_c = \frac{1}{i} (FR_0 n + \mu M_c^0) = \frac{1}{i} \left[FR_0 n + (a_0 + a_1 n + a_2 n^2) M_c^0 \right],$$

где $M_F = \frac{1}{i} (FR_0 n)$; $\mu = \frac{1}{i} (a_0 + a_1 n + a_2 n^2)$; $M_{2эм} = \frac{I_{я}}{K_d}$.

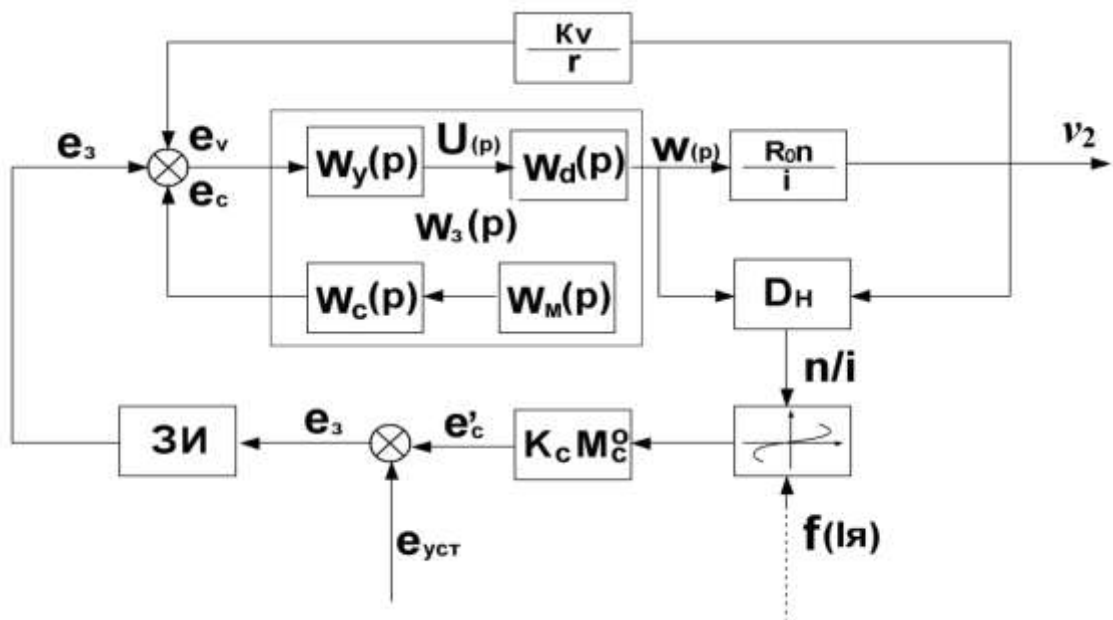


Рисунок 1.9 – Структурная схема САУ скоростным режимом электропривода сновального вала с коррекцией по возмущению

Относительно электромагнитного момента получим следующее выражение:

$$\frac{I_{я}}{K_d} = \frac{1}{i} \left[FR_0 n + (a_0 + a_1 n + a_2 n^2) M_c^0 \right].$$

Таблица 1.5 – Передаточные функции САУ

Переда- точная функция	Вид передаточной функции	Параметр	Значение
Усилителя мощности $W_y(p)$	$K'_y \cdot \frac{T_p + 1}{T_y p + 1};$ $K'_y = K_y \cdot \frac{r_{\text{я}}}{r_{\text{я}} + K_y \cdot K_i};$ $T_{\text{э}} = T \cdot \frac{r_{\text{я}} \cdot (1 + K_y \cdot K_u) + K_y \cdot K_i}{r_{\text{я}} + K_y \cdot K_i}.$	K'_y	1,11
		$T_{\text{э}}, \text{с}$	0,05
		$T, \text{с}$	0,004
		$R_{\text{я}}$	0,6
		K_y	15
		K_i	0,5
		K_u	0,041
ДПТ $W_d(p)$	$\frac{K_d}{T_m p + 1}.$	K_d	5
		$T_m, \text{с}$	0,0054
обратных связей $W_c(p)$	$K_c \cdot \frac{T_{\text{э}} p + 1}{T_p + 1};$ $K_c = \frac{K_d \cdot (r_{\text{я}} + K_y \cdot K_i)}{K_y}.$	K_c	2,7
по возму- щению $M_c/i W_m(p)$	$\frac{K_M n}{1 + K_1 n} \cdot \frac{T_{\text{э}} p + 1}{T_2^2 p + T_1 p + 1};$ $K_M = \frac{R_0}{i\beta}.$	K_M	3,64

Структурная схема САУ сновальной машиной (см. рис. 1.9) с учетом стабилизации натяжения за счет управления скоростными режимами примет вид, представленный на рисунке 1.10, где $W_3(p)$ – передаточная функция по заданию; $W_{\text{нн}}(p)$ – передаточная функция нитенатажителя, ЗИ – задатчик интенсивности; D_n - датчик диаметра наматывания; k_F – коэффициент пропорциональности по натяжению; $F_{\text{уст}}$, ΔF – соответственно установившееся значение и сигнал ошибки натяжения.

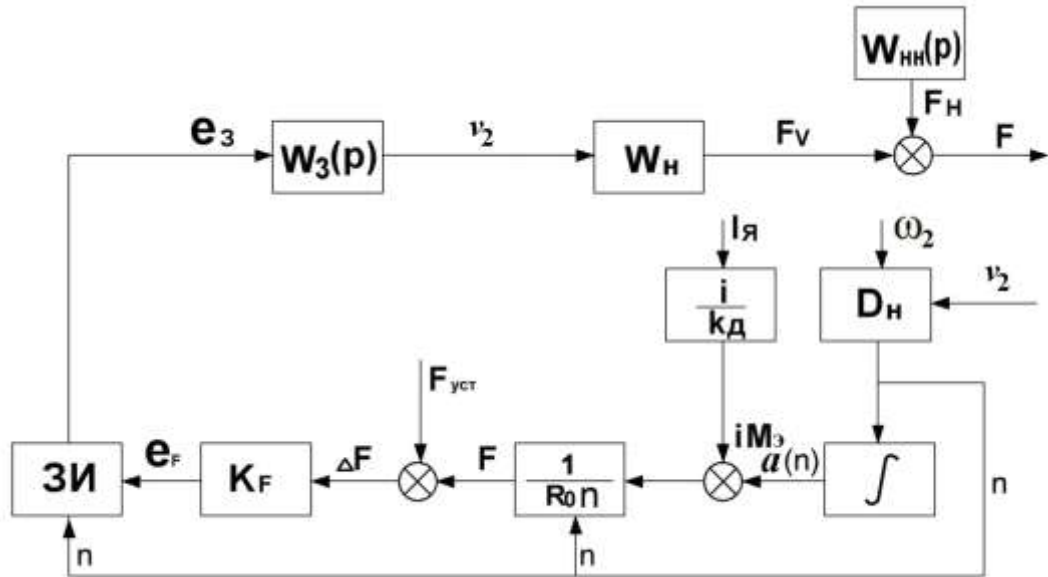


Рисунок 1.10 – Структурная схема САУ с учетом стабилизации натяжения

Для полученной схемы алгоритм, описывающий сигнал коррекции по натяжению e_F , имеет вид:

$$e_F = K_F \left\{ F_{уст} - \frac{1}{R_0 n} \left[\frac{I_я i}{K_d} - M_c^0 (a_0 + a_1 n + a_2 n^2) \right] \right\}. \quad (1.13)$$

Для аппаратной реализации алгоритмов (1.12) и (1.13) необходимо иметь сигнал о величине текущего радиуса наматывания. Рассмотрим возможность измерения текущего радиуса наматывания, позволяющего простыми техническими средствами получить информацию о величине $R(t)$ в форме, удобной для обработки на ПЭВМ. Для этой цели используются датчики, выполненные по принципу полых роликов с размещенными внутри дискретной оптопарой и обтюратором (рис. 1.11). Для простоты иллюстрации метода датчик 1 прижимается к валу, а датчик 2 расположен на фланце сновального вала. Величина текущего радиуса наматывания определяется выражением

$$R(t) = \frac{\omega_{01}}{\omega_{02}} \cdot r_\phi \frac{r_{01}}{r_{02}},$$

где ω_{01} и ω_{02} – соответственно частоты вращения первого и второго датчиков; r_ϕ – радиус фланца; r_{01} и r_{02} – радиусы роликов.

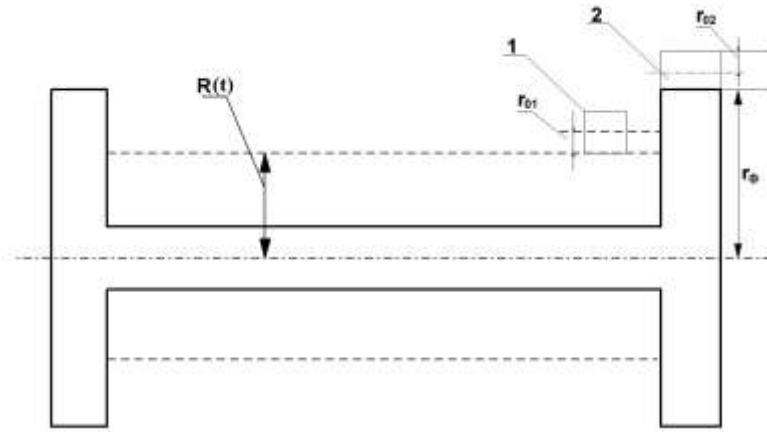


Рисунок 1.11 – Оптические датчики, расположенные на сновальном валу

Принимая во внимание, что частоты вращения датчиков пропорциональны углу поворота сновального вала $\Delta\alpha$ за определенный период времени, получим

$$R(t) = \frac{\Delta\alpha_1 r_{01}}{\Delta\alpha_2 r_{02}} r_\phi, \quad (1.14)$$

где $\Delta\alpha_1$, $\Delta\alpha_2$ – соответственно углы поворота роликов первого и второго датчиков.

Задано, что $\Delta\alpha_2$ соответствует одному обороту сновального вала. Тогда

$$\Delta\alpha_2 = 2\pi N, \quad (1.15)$$

где $N = \frac{r_\phi}{r_{02}}$.

Отсюда

$$\Delta\alpha_1 = K_n \cdot 2\pi / m_1, \quad (1.16)$$

где K_n – количество импульсов датчика 1 за время, соответствующее одному обороту сновального вала; m_1 – степень дискретизации датчика 1.

Подставляя выражения (1.15), (1.16) в выражение (1.14), получим

$$R(t) = K_n r_{01} / m_1.$$

Поскольку измерение текущего радиуса наматывания сводится к измерению количества долей радиуса датчика, то предпочтительно иметь максимальную степень дискретизации и минимальный радиус датчика 1. Датчик 2 может быть выполнен любым другим образом, так как его задача сводится к фиксации одного

оборота сновального вала. Такой сигнал можно выделить, например, из сигнала датчика частоты вращения двигателя.

Изменение текущего радиуса наматывания приводит к изменению пусковых ускорений в процессе наматывания в диапазоне 2:1, что ведет к повышенной обрывности нити в начале цикла наматывания [24]. Наибольший эффект применения задатчиков интенсивности проявляется в создании режима предварительного натяжения при пуске машины. Один из вариантов схемного решения задатчика интенсивности переменной структуры приведен на рисунке 1.12.

Режим предварительного натяжения реализуется путем применения двух источников опорного напряжения 1 и 2, управляемых коммутатором 3 в зависимости от величины скорости снования V . Источники опорного напряжения 1 и 2 поочередно управляют при пуске источником тока 4, который задает интенсивность нарастания напряжения в накопителе 5 и в выходном каскаде 6. Узлы 7 и 8 определяют соответственно величины скорости задания и интенсивность пускового момента. Переключение источников опорного напряжения обеспечивает требуемый перепад интенсивности нарастания скорости при пуске машины.

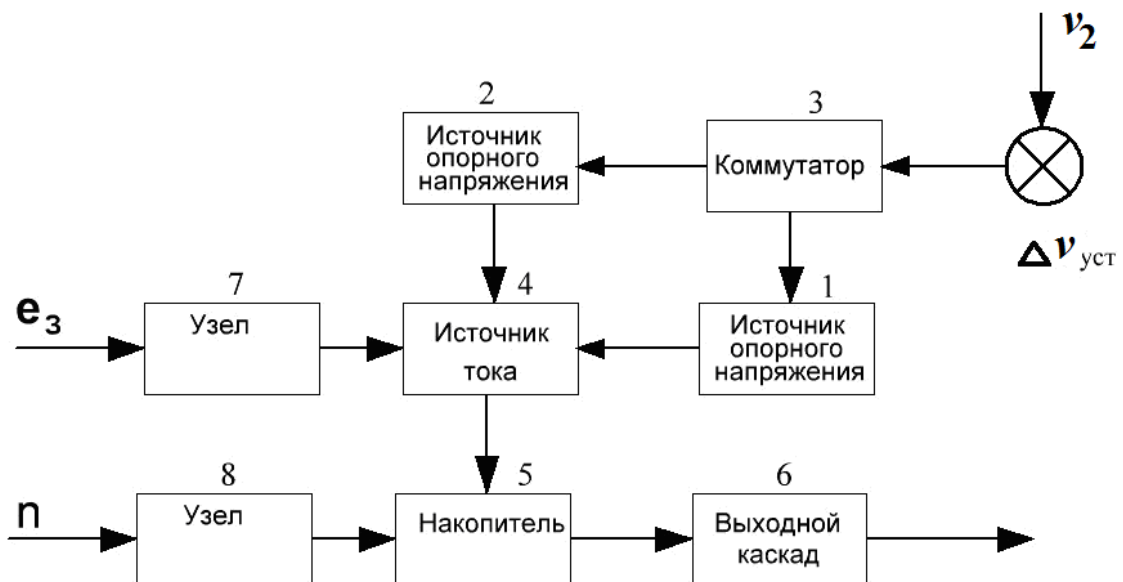


Рисунок 1.12 – Схемное решение задатчика интенсивности переменной структуры

Аналитически установлено, что система косвенного регулирования натяжения нитей на сновальной машине путем стабилизации линейной скорости не позволяет обеспечить высокую производительность ввиду большой обрывности ни-

ти. Предложена система управления, связанная с определением алгоритма изменения момента сопротивления в процессе наматывания нитей. Осуществлено введение коррекции в функции изменяющегося момента сопротивления, позволяющей уменьшить обрывность нитей как в установившемся режиме снования, так и в режиме пуска, торможения и заправки машины.

1.5. Разработка модернизированного способа автоматического управления сложной электромеханической системы сновальной машины, с целью обеспечения энергосберегающих режимов

С учетом приведенного выше анализа традиционных систем управления сновальными машинами, автором разработана функциональная схема модернизированного автоматизированного электропривода транспортирующих и наматывающего устройств (рис. 1.13). Транспортирование нити на сновальной машине осуществляется следующим образом.

Нити с бобин, расположенных на сновальной рамке 1, проходят между направляющими прутками 2 и двумя направляющими валиками 3, которые кинематически связаны через редуктор 4 с асинхронным электродвигателем АД 5, энергосберегающими режимами которого управляет микропроцессорный регулятор напряжения МРН000 6, подключенный к управляемой микроЭВМ 7. Далее нити проходят через гребенку 8, направляющие ролики с компенсатором 9 и навиваются на сновальный вал 10.

Функция гребенки 8 состоит в обеспечении рассеивания витков пряжи на сновальном валу для предотвращения врезания их в нижние слои и получения правильной цилиндрической формы тела наматывания.

Направляющие валики приводятся в движение от асинхронного двигателя АД через редуктор 4. Сновальный вал 10 приводится в движение от электродвигателя постоянного тока ДПТ 11 через клиноременную передачу 12 редуктор 13 и управляется от микроЭВМ 7 через усилитель мощности УМ 14, на вход которого

поступает сигнал задания частоты вращения сновального вала 10. Уплотнение основных нитей осуществляется укатывающим валом 15, который получает движение, благодаря трению о сновальный вал 10.

Работа функциональной схемы модернизированной партионной машины происходит следующим образом. Перед пуском приводов напряжение от сети подается на микроЭВМ, МРН000, УМ, ДДН. Привод переменного тока (АД) оставался неподвижным, в результате чего на выходе ДЧ1 16, установленного на валу АД, и на выходе ДЧ2 17, установленного на валу ДПТ, напряжение равно нулю и двигатели оставались неподвижными. При включении АД его частота вращения начинает увеличиваться на выходе ДЧ1 16 появляется напряжение, которое в виде сигнала поступает в микроЭВМ, которая и направляет управляющие импульсы в систему управления ДПТ, вал которого начинается вращаться и его частота вращения изменяется согласованно в соответствии с изменением частоты вращения АД до установившегося значения. Слежение за частотой вращения ДПТ осуществляется датчиком частоты вращения ДЧ2 17 и датчиком диаметра наматывания ДДН 18, сигналы управления с которых также поступают в микроЭВМ. Таким образом обеспечивается синхронный пуск двухдвигательной системы управления процессом наматывания нитей на сновальной машине.

В моменты перехода к наматыванию очередного слоя нитей на сновальный вал изменяется натяжение нитей, которое фиксируется угловым датчиком положения (УДП) 19, сигнал с которого поступает в микроЭВМ, в которой происходит обработка сигналов задания, соответствующих программе наматывания, и сигналов корректирующих изменение натяжения нитей. В систему управления ДПТ поступает сигнал с микроЭВМ на снижение частоты вращения ДПТ при соблюдении условия равенства линейных скоростей выпуска нитей (v_1) из направляющих валиков 3 и наматывания их на сновальный вал 10 (v_2). Интенсивность пусковых и тормозных режимов УЭТК может корректироваться микроЭВМ по каналу МРН000 – АД.

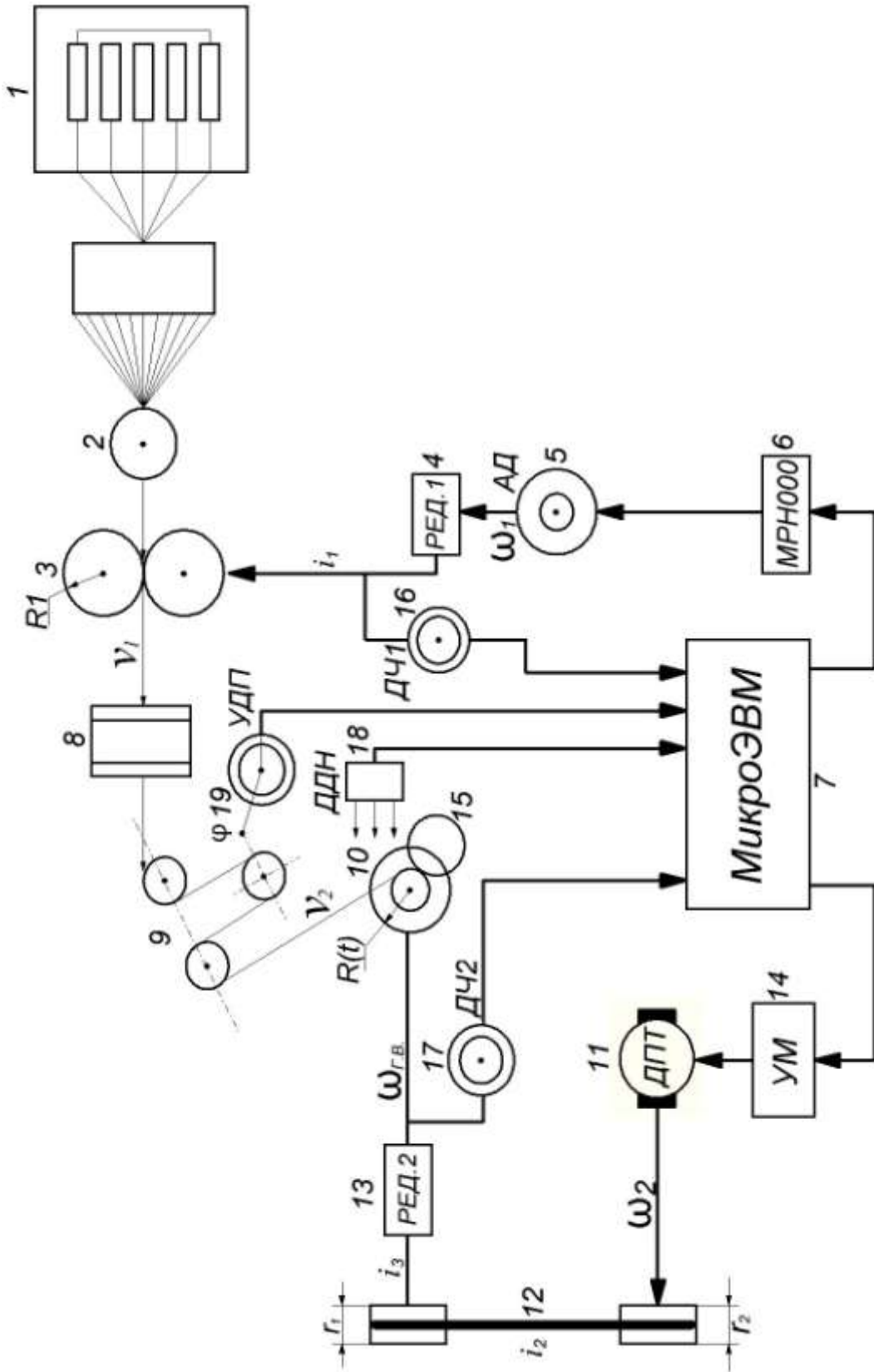


Рисунок 1.13 – Функциональная схема модернизированной партионной сновальной машины

Для функциональной схемы модернизированной партионной сновальной машины получена нелинейная система дифференциальных и алгебраических уравнений, позволяющая исследовать сложную замкнутую электромеханическую систему с транспортирующими и наматывающим механизмами в различных статических и динамических режимах [25], представленных в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Система дифференциальных и алгебраических уравнений для исследования САУ сновальной машины

$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{J_1} (M_{1эм} - M_{c1});$	Уравнения динамики движения транспортирующих и наматывающего механизмов	(1.17)
$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2} (M_{2эм} - r_1 E' S' n' (\varepsilon_1 - \varepsilon_2));$		(1.18)
$\frac{d\omega_{ГВ}}{dt} = A_{11} [r_1 E' S' n' (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - M_{c2}];$		(1.19)
$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{1}{L^*} \left(\frac{\omega_2 r_2}{1 + \varepsilon_2} - \frac{\omega_{ГВ} r_1}{1 + \varepsilon_1} \right);$	Уравнения, определяющие влияние гибкой связи между ДПТ и главным валом (ГВ)	(1.20)
$\frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{1}{L^*} \left(\frac{\omega_{ГВ} r_1}{1 + \varepsilon_1} - \frac{\omega_2 r_2}{1 + \varepsilon_2} \right);$		(1.21)
$M_{1эм} = \frac{2M_{кр} (1 + \varepsilon^*)}{\left(\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + 2\varepsilon^* \right) i_1};$	Уравнения, определяющие электромагнитные моменты АД и ДПТ	(1.22)
$M_{2эм} = C_M \Phi I_\lambda;$		(1.23)
$v_1 = \omega_1 \frac{R_1}{i_1};$	Алгебраические уравнения для расчета линейных скоростей выпуска нитей из направляющих валиков (v_1) и наматывания их на сновальный вал (v_2)	(1.24)
$v_2 = \omega_2 \frac{R(t)}{i_2 i_3};$		(1.25)
$\varepsilon = \frac{v_2 - v_1}{v_1};$	Уравнение для расчета относительной деформации нитей.	(1.26)
$\varepsilon = \frac{T_\kappa d\varepsilon_\kappa}{dt} + \varepsilon_\kappa;$	Уравнение для расчета относительной деформации с учетом инерционности компенсатора.	(1.27)

$T_k = \frac{L'}{v_2} \left(1 + \frac{4C_n}{C_{np}} \right);$	Уравнение для определения постоянной времени прохождения нитей от направляющих валиков до сновального вала.	(1.28)
$F = \varepsilon_k \cdot W_n(p).$	Уравнение, определяющее натяжение нитей после прохождения компенсатора	(1.29)

где $\omega_1, \omega_2, \omega_{GB}$ – соответственно частоты вращения ротора АД, ДПТ и главного вала; $M_{1эм}, M_{2эм}, M_{кр}$ – соответственно электромагнитные моменты АД и ДПТ и критический момент АД; M_{c1}, M_{c2} – соответственно моменты сопротивления на валу АД и ДПТ; $L^*, \varepsilon_1, \varepsilon_2, S', n', E'$ – соответственно длина ветви гибкой передачи, деформация свободных участков набегающей и ниспадающей ветвей гибкой передачи, площадь и количество ветвей гибкой передачи, модуль упругости Юнга; $A_{11}, J_1, J_2, r_1, r_2$ – соответственно коэффициент, характеризующий приведенный к сновальному валу момент инерции, моменты инерции роторов АД и ДПТ, радиусы шкивов, установленных на валах АД и ДПТ; $S, S_{кр}, \varepsilon^*$ – соответственно величины текущего и критического скольжения, параметр, определяющий форму механической характеристики АД; C_m, Φ – соответственно механическая постоянная, зависящая от конструктивных особенностей, и основной магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения ДПТ; R_1, ε_k – соответственно радиус направляющих валиков и деформация нитей при прохождении через компенсатор; $v_1, v_2, T_k, C_n, C_{np}$ – соответственно линейные скорости выпуска нитей из направляющих валиков и наматывания их на сновальный вал, постоянная времени компенсатора, жесткости упругой нити и пружины; $W_n(p)$ – передаточная функция нити; i_1, i_2, i_3 – соответственно передаточное отношение между валом АД а направляющими валиками, между валом ДПТ и редуктором 2, между редуктором 2 и главным валом.

Для разработанной системы привода управляемого электротехнического комплекса сновальной машины определены параметры основных её звеньев при условии, что тиристорный регулятор мощности работает в области непрерывных токов, так как момент сопротивления у ДПТ в диапазоне частот вращения от нуля

до максимального рабочего уровня не ниже 30% от номинального значения. Это позволило аппроксимировать динамические свойства преобразователей апериодическим звеном с некомпенсируемой постоянной времени и коэффициентом передачи усилителя мощности.

Для инженерных расчетов возможно определение $M_{1эм}$ по статической механической характеристике в соответствии с уравнением Клосса (1.22).

Полученная система уравнений (1.17 – 1.29) может быть проинтегрирована методом Рунге-Кутты для режимов пуска и естественного торможения, при которых возможно отклонение технологических параметров качеств от заданных.

В соответствии с функциональной схемой СМ (рис. 1.13) и системой уравнений (1.17 – 1.29), описывающих динамические режимы двухдвигательного электропривода, автором составлена структурная схема САУ (рис. 1.14), позволяющая осуществить оперативное моделирование в операционной среде Matlab.

В данной структурной схеме блок УМ-ДПТ реализован в виде электропривода постоянного тока с последовательной коррекцией по току, напряжению и скорости (рис. 1.3). В процессе оптимизации в пакете Matlab использован линейно нарастающий сигнал возмущения, произведена настройка коэффициентов обратных связей K_u , K_i , K_v и заданы следующие параметры ограничений: время моделирования 10 с; время нарастания 0,3 с; время регулирования 0,6 с; перерегулирование 1%.

Блок МРН – АД представлен передаточной функцией асинхронного электропривода, управляемого изменением напряжения [26]:

$$W_M(p) = \frac{M_{1эм}(p)}{U_{АД}(p)} = \frac{k_M}{(T_2 p + 1)(T_0^2 p^2 + 2\gamma T_0 p + 1)}, \quad (1.29)$$

где $M_{1эм}$ – электромагнитный момент АД; $U_{АД}$ – фазное напряжение, подводимое от МРН000; k_M – коэффициент передачи АД по моменту; $T_0 = 1/\omega_c$ – постоянная времени затухания периодической составляющей, определяемой частотой питающей сети (ω_c); T_2 – постоянная времени, характеризующая апериодическую

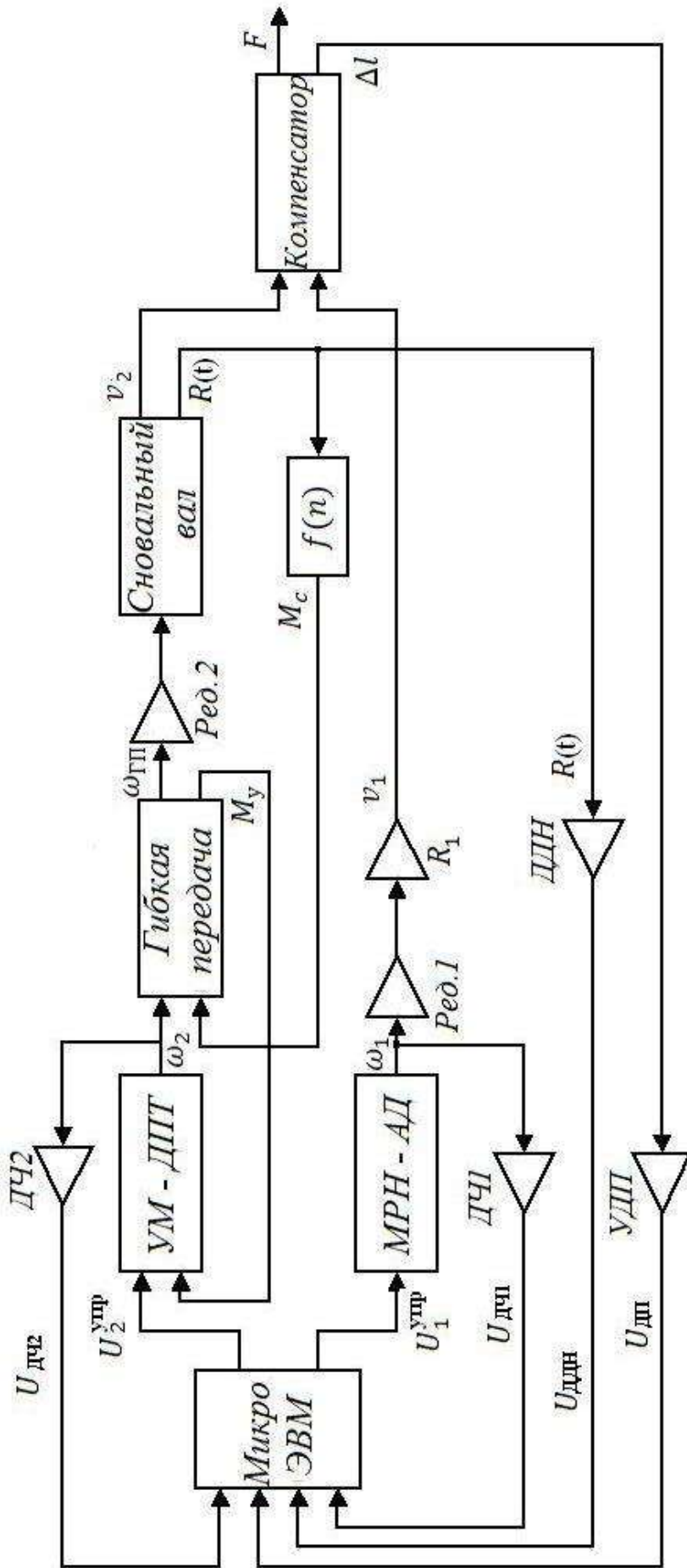


Рисунок 1.14 – Структурная схема модернизированной партионной сновальной машины

составляющую момента и определяемая параметрами схемы замещения АД; γ – коэффициент затухания свободных составляющих двигателя.

Учитывая нелинейную зависимость между напряжением ($U_{АД}$) и электромагнитным моментом ($M_{1эм}$), коэффициент передачи определяется из следующего выражения [27]:

$$k_M = \frac{M_{1эм}}{U_{АД}^2} = \frac{3pR_2'}{\omega_c \cdot s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(X_1 + X_2' \right)^2 \right]},$$

где p – число пар полюсов; R_1, R_2' – соответственно активное сопротивление статора и приведенное активное сопротивление ротора; X_1, X_2' – соответственно реактивное сопротивление статора и приведенное реактивное сопротивление ротора; s – скольжение.

Текущий радиус наматывания нитей на сновальный вал определяется из выражения (1.1).

Блоком, определяющим качество работы системы, является пружинный компенсатор, выходными параметрами которого являются натяжение нитей F и изменение длины пружины Δl (рис. 1.15). В качестве компенсатора в схеме использован пружинный датчик натяжения, который изменяет постоянную времени транспортирования. В результате установки механического компенсатора длина нити в зоне между направляющими роликами 9 становится величиной переменной, которая изменяется в зависимости от деформации пружины компенсатора Δl и равна $\Delta L = 2\Delta l$, причем сила натяжения пружины $F_{np} = 2F$. Изменение деформации нити при прохождении через компенсатор определяется следующей передаточной функцией [28]:

$$W_\varepsilon(p) = \frac{\varepsilon_\kappa(p)}{(v_2(p) - v_1(p)) / v_1(p)} = \frac{1}{T_\kappa p + 1}. \quad (1.30)$$

Постоянная времени T_κ в выражении (1.30) может быть выражена через жесткость упругой пружины $C_{np} = F_{np}/\Delta l$ и жесткость упругой нити $C_n = F/\Delta L$. С уче-

том относительного удлинения нити в зоне от направляющих валиков 3 до сновального вала 10 длиной L' (рис. 1.13), получим постоянную времени для уравнения (1.30):

$$T_{\kappa} = \frac{L'}{v_2(p)} \left(1 + \frac{4C_{\text{н}}}{C_{\text{нр}}} \right).$$

Таким образом, компенсатор обеспечивает одновременное изменение натяжения и фильтрацию переменных нагрузок на нить.

Упругие свойства наматываемой нити представлены передаточной функцией модуля упругости, рассчитанной по одноцикловым характеристикам (рис. 1.2):

$$W_{\text{н}}(p) = \frac{F(p)}{\varepsilon_{\kappa}(p)} = \frac{80p^2 + p}{0,08p^2 + 0,009p + 4,167 \cdot 10^{-6}}. \quad (1.31)$$

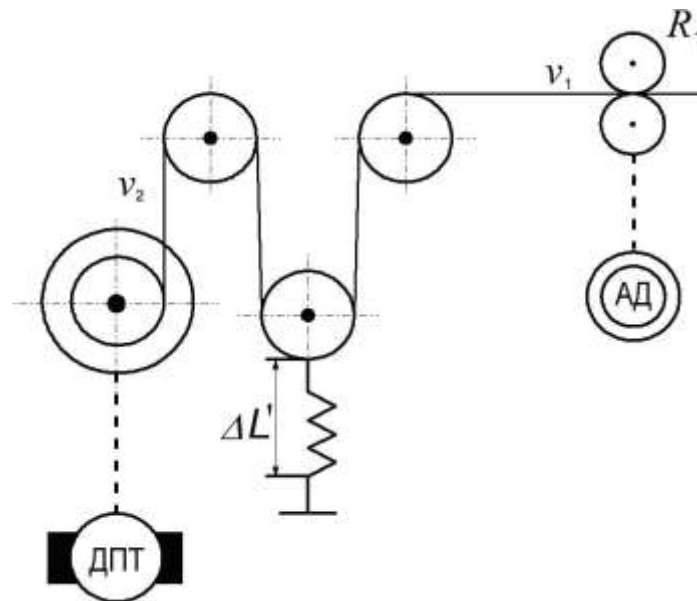


Рисунок 1.15 – Упрощенная модель пружинного компенсатора

Управление АД с помощью МРН000 характеризуется низкой эффективностью при глубоком регулировании. Однако для исследуемой САУ сновальной машины ставится задача синхронизации и коррекции скоростных режимов рабочих ЭМС при пуске и торможении управляемого комплекса.

Роль дополнительного асинхронного двигателя состоит в снижении динамических нагрузок на сматываемые нити и обеспечении согласования линейных скоростей выпуска и наматывания нитей.

Алгоритм работы микроЭВМ представлен в виде следующих функций [29]:

$$U_1^{ynp}(t) = v_2^{zad} - k_\varepsilon (\varepsilon_{zad} - \varepsilon(t));$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\omega_2(t) \cdot R(t)}{\omega_1(t) \cdot R_1} - 1;$$

$$U_2^{ynp}(t) = U_v^{ynp}(t) + U_\varphi^{ynp}(t) = k_v v'_2 + k_\varphi (\varphi_{zad} - \varphi(t));$$

$$v'_2 = \frac{v_1(t) \cdot R_1}{R(t)},$$

где U_1^{ynp} – управляющий сигнал для АД; v_2^{zad} – заданная линейная скорость снования; k_ε , k_v , k_φ – соответственно коэффициенты обратной связи по деформации, регулятора скорости АД, положения компенсатора; ε_{zad} , $\varepsilon(t)$ – соответственно сигналы заданной и текущей деформаций; ω_1 и ω_2 – соответственно угловые скорости АД и ДПТ; U_2^{ynp} , U_v^{ynp} , U_φ^{ynp} – управляющие сигналы соответственно для ДПТ, по линейной скорости транспортирования нитей и по положению компенсатора; φ_{zad} , $\varphi(t)$ – соответственно сигналы заданного и текущего углов датчика положения.

При этом входными сигналами являются напряжения с датчиков частоты вращения (ДЧ1 и ДЧ2), углового датчика положения (УДП), датчика диаметра наматывания (ДДН), а выходными – напряжения заданий для электроприводов $U_1^{ynp}(t)$, $U_2^{ynp}(t)$. Реализуя представленный алгоритм, микроЭВМ обеспечивает постоянство натяжения нитей, скорости снования и относительной деформации.

В алгоритме микроЭВМ предусмотрено ограничение сигнала задания для МРН000 на интервале (0,65; 1,2) с тем, чтобы сохранить устойчивость работы асинхронного двигателя. Временные зависимости изменения управляющих воздействий представлены графически на рисунке 1.16, где видно, что за счет настройки коэффициентов обратных связей сигнал управления по натяжению U_F стремится к нулю. Величина данного сигнала в момент пуска оказывается достаточно большой, поэтому для $U_2^{ynp}(t)$ введено ограничение по верхнему уровню.

Изменения основных выходных параметров, характеризующих режим пуска, показаны на рисунке 1.17. Моделирование системы на продолжительном от-

резке времени показало устойчивое сохранение заданного уровня натяжения при изменении радиуса наматывания и момента статического сопротивления на валу ДПТ.

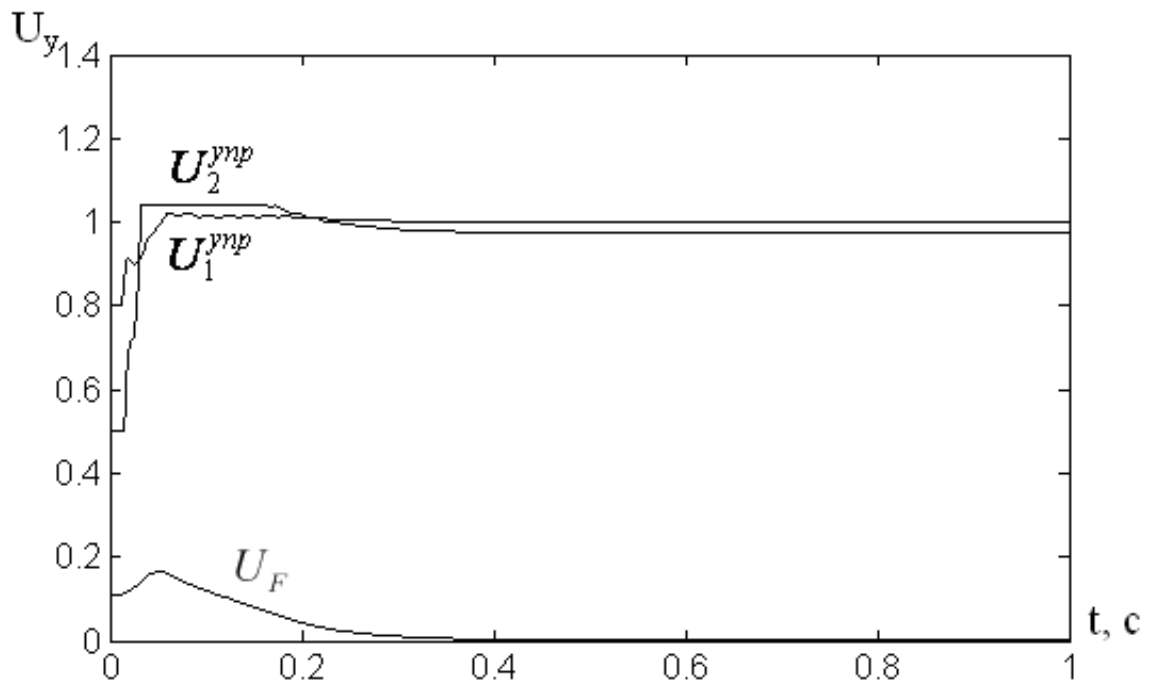


Рисунок 1.16 – Изменения управляющих воздействий при пуске

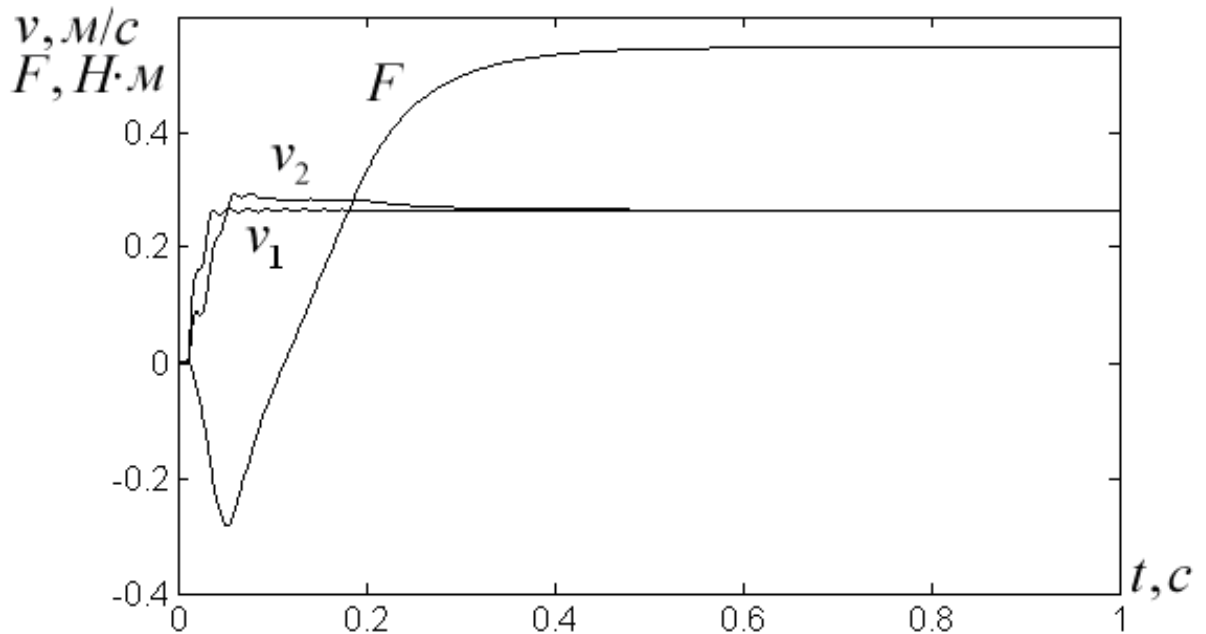


Рисунок 1.17 – Изменение основных выходных параметров при пуске

Устойчивость предложенного алгоритма оценена с помощью ЛАФЧХ (рис. 1.18, а, б), построенной для величины v_2 .

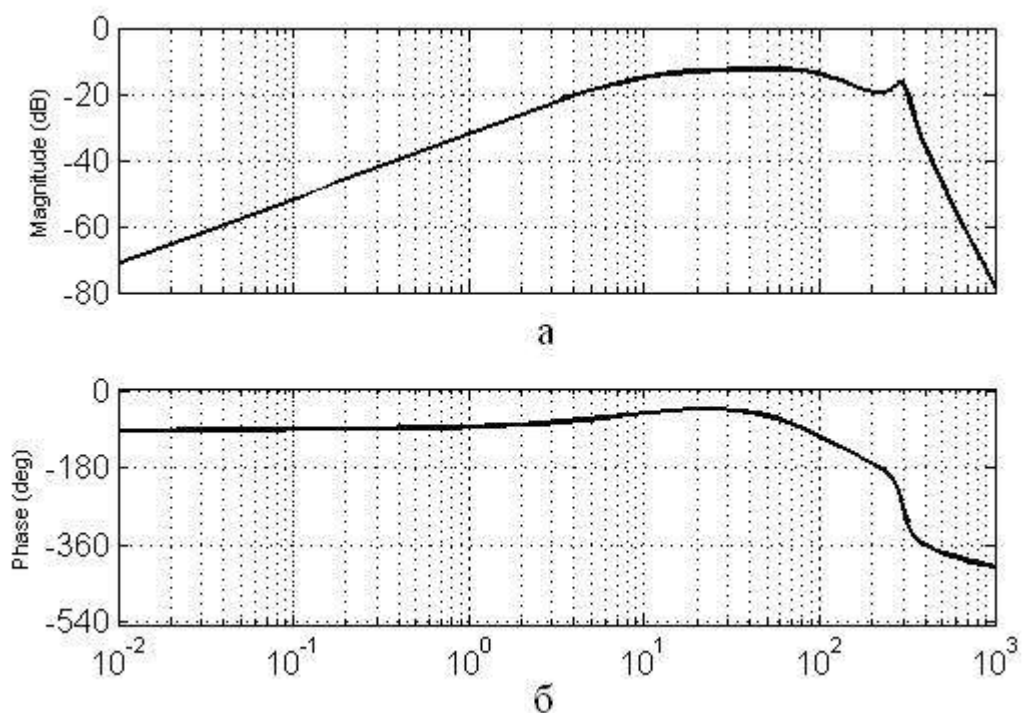


Рисунок 1.18 – ЛАФЧХ модернизированной системы

При сравнении ЛАФЧХ на рисунках 1.4, 1.18 установлено повышение запаса устойчивости по амплитуде (а) и по фазе (б), что позволяет утверждать, что предложенная система управления имеет улучшенные динамические характеристики.

Выводы

1. Выделены три основных перспективных направления энергосбережения при эксплуатации УЭТК технологического оборудования и дана их краткая характеристика. В ходе анализа направлений обозначено наиболее перспективное, основанное на разработке и применении интеллектуальных систем управления на базе современных информационных технологий.

2. Определены основные требования к процессу партионного снования и способы повышения эффективности работы УЭК за счет применения современных систем энергосберегающих электроприводов постоянного и переменного тока с микропроцессорным управлением.

3. На основе экспериментальных данных и полученных математических моделей определены силовые ограничения внешних воздействий на снующиеся нити со стороны транспортирующих и наматывающего механизмов. Определены максимальные значения нагрузки, при которой исключаются необратимые деформации для различных видов нитей.

4. Проведено исследование динамических режимов традиционной системы автоматического управления сновальной машиной, в результате которого было выявлено, что показатели качества системы не отвечают оптимальным параметрам. Предложено ввести коррекцию скоростных режимов, связанную с определением изменяющегося момента сопротивления наматывающего устройства по мере формирования сновального вала.

5. Проанализировав составляющие силовых воздействий на сновальный вал, оценено влияние структуры механической части системы на натяжение нитей.

6. Разработано схемное решение задатчика интенсивности переменной структуры с целью создания режима предварительного натяжения при пуске машины, позволяющего снизить обрывность нитей.

7. Предложены функциональная и структурная схемы САУ модернизированной сновальной машины, позволяющие осуществлять: заданные режимы пуска, торможения, плавную синхронизацию скоростей рабочих органов, а также поддержание натяжения снующихся нитей на заданном уровне при увеличении диаметра наматывания и момента сопротивления на валу ДПТ.

8. Проведено исследование динамических режимов модернизированной электромеханической системы. В результате выявлено повышение запаса устойчивости системы по амплитуде и по фазе, что указывает на улучшение динамических характеристик по сравнению с традиционной системой.

Глава 2 Повышение эффективности эксплуатации сложных динамических объектов за счет управления и оптимизации скоростных режимов электромеханических систем с крутильно-мотальными механизмами (на примере рогульчатой ровничной машины)

2.1 Исследование физико-механических свойств и определение требований к процессам формирования, транспортирования и наматывания гребенной ровницы

К системам автоматического регулирования процессами формирования и наматывания волокнистого материала предъявляют требования жесткой стабилизации технологических параметров в отношении поддержания заданных скоростных режимов и степени вытяжки волокнистого продукта. Стабильность этих величин определяют физико-механические свойства волокнистого продукта.

Физико-механические свойства ровницы - прочность, удлинение, коэффициент заполнения объема, плотность наматывания, распределение крутки по длине, а также упругие, эластичные и пластические деформации при вытягивании и кручении исследованы недостаточно.

Для проектирования вытяжных, крутильных и мотальных механизмов текстильных машин указанные параметры имеют практическое значение. Литературные сведения о физико-механических свойствах волокнистых материалов носят в основном эмпирико-описательный характер, отражающий постановку опытов с определенным видом волокон при переработке их на конкретном оборудовании. Эти данные нельзя использовать для проектирования и управления крутильно-мотальными механизмами (КММ) с программным управлением процесса наматывания и определения дополнительной неровноты, возникающей в зонах формирования и наматывания при рассогласовании линейных скоростей рабочих органов КММ, так как они характеризуют в основном готовый полупродукт с окончательно сформированными физико-механическими свойствами, а не продукт, находящийся в процессе формирования [30].

Исследован волокнистый материал, наработанный на рогульчатой ровничной машине (РМ) Р-260-3, установленной на предприятии ООО «Пехорский текстиль».

Для определения допустимых значений вытяжки ровницы, при которых вытягивание 1-ого рода переходит в вытягивание 2-ого рода, были получены полуцикловые разрывные характеристики нагрузка-удлинение (деформация) для ровницы из химических волокон.

На кафедре материаловедения текстильного института им. А.Н. Косыгина ФГБОУ ВПО «МГУДТ» с помощью прибора «Инстрон» были сняты кривые растяжения для 10 образцов ровницы из искусственных волокон (рис. 2.1).

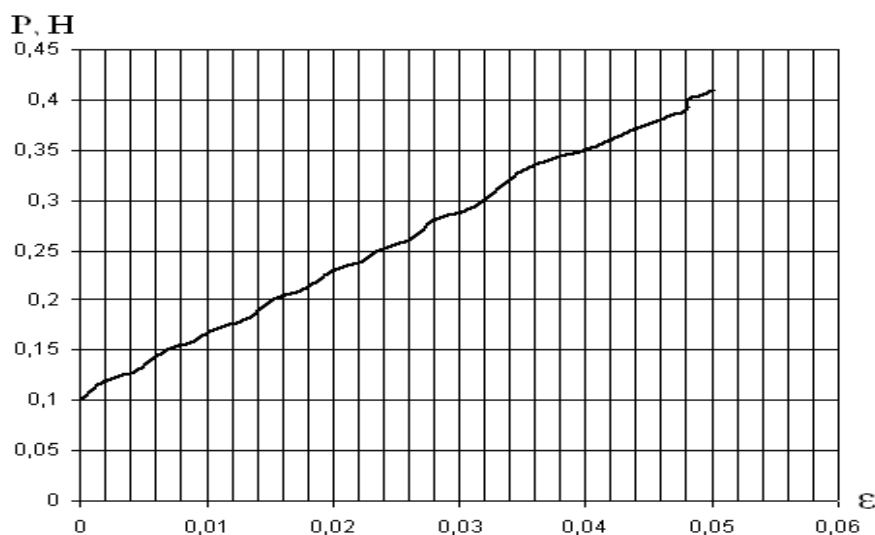


Рисунок 2.1 – Диаграмма растяжения ровницы

Для выявления составных частей деформации были сняты одноцикловые характеристики (рис. 2.2), на релаксметре типа «Стойка» при длине образца 50 мм и начальной нагрузке 100 г для ровницы из искусственных волокон, анализ которых показал, что упругая составляющая деформации, исчезающая после снятия нагрузки, равна соответственно 4,3 % общей деформации, эластичная 3,7% и пластическая 5,7 %. Как видно из приведенных данных, величина эластичной составляющей не является определяющей, поэтому она практически не может проявить себя за время прохождения ровницей зоны кручения. Необратимая пластическая деформация сохраняется в волокнистом продукте и может быть причиной возникновения дополнительной неровноты по линейной плотности.

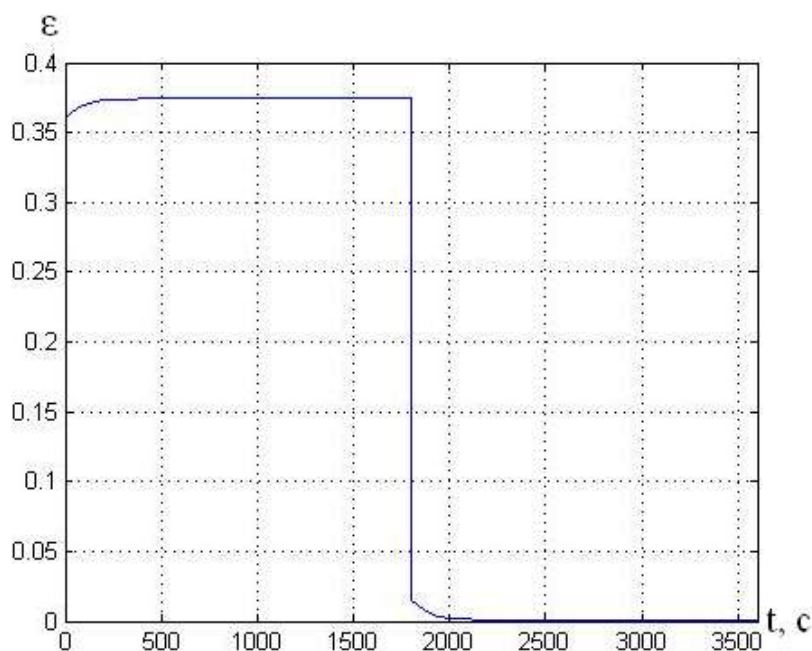


Рисунок 2.2 – Одноцикловая диаграмма ровницы, выработанной на Р-260-3.

Ориентируясь на минимальное значение упругой деформации ровницы (4,3%, вытягивание 1-ого рода), необходимо обеспечить скоростные режимы крутильно-мотального механизма с отклонением вытяжки не более 4,3 %.

Наряду с деформацией растяжения ровница подвергается деформациям кручения. При этом волокнистый продукт уплотняется и упрочняется, происходит уменьшение его поперечного сечения и укрутка. При кручении ровницы возникает противодействующий крутящий момент, зависящий от ее линейной плотности и крутки, и он тем больше, чем больше величина линейной плотности и крутки ровницы. Имеющиеся данные об изменении перечисленных выше физико-механических свойств ровницы при кручении относятся в основном к волокну хлопка. Поэтому для учета упругой деформации ровницы необходимо проводить соответствующие эксперименты по выявлению влияния скоростных режимов рабочих органов ровничной машины на качество волокнистого продукта. Такая необходимость возникает при определении радиуса (R) наматывания паковки при увеличении числа намотанных на нее слоев ровницы (m), так как по характеру изменения радиуса наматывания осуществляется проектирование скоростных диаграмм и системы управления электроприводом рабочих органов КММ.

Изменение скоростных режимов в зависимости от радиуса наматывания можно определить при условии, когда будет известна закономерность изменения толщины текущего слоя ровницы от параметров перерабатываемого сырья (тонны, длины, упругих свойств, степени распрямления и уплотнения волокон в ровнице и др.) и заправочных данных РМ (натяжения, крутки, угла подъема витков, частоты вращения паковки и т.д.). Теоретически такую зависимость получить сложно, так как вопросы теории деформаций волокнистого материала при его сложном нагружении к настоящему времени в должной мере не разработаны, поэтому поставленную задачу можно решить лишь на основе выделения значимых факторов, постановки экспериментов и статистической обработки опытных данных.

Наибольшее влияние на толщину ровницы в слое при наработке ее на паковку оказывают следующие факторы [31]:

- вытяжка (E) ровницы, зависящая от соотношения скоростей выпуска ее из вытяжных приборов (ВП) и наматывания на катушки (КТ) и определяющая величину ее продольной деформации и натяжения;
- крутка (K), обусловленная соотношением частот вращения веретен (ВР) и линейной скорости выпуска продукта из ВП и определяющая степень её уплотнения;
- шаг витков h в слое, зависящий от соотношения линейных скоростей каретки (КР) и выпуска ровницы из ВП и определяющий степень уплотнения волокнистого материала в каждом слое паковки;
- число наработанных прослойков (m) ровницы на паковку.

Перечисленные факторы, находящиеся в зависимости от условий заправки машины, являются общими для любого волокнистого продукта, перерабатываемого на ровничной машине.

Выделять факторы, характеризующие свойства волокон, нецелесообразно ввиду их большого разнообразия. Более правильно указанные выше соотношения скоростных режимов и радиуса наматывания определять для каждого вида волокон или их конкретных смесей.

В работе [32] определен характер зависимости толщины текущего слоя ровницы $\delta = \delta(E, K, h)$ в соответствии с математическими методами оптимального планирования эксперимента. Получено соотношение для определения текущего диаметра наматывания паковки, учитывающее заправочные данные РМ:

$$d_{КТ} = d_0 + m(2,013 + 3,087E + 0,0414K + 126,049h - 0,0549EK - 233,644Eh + 2,396Kh).$$

Из уравнения видно, что параметры заправки РМ - вытяжка, крутка, шаг наматывания витков оказывают существенное влияние на толщину ровницы и диаметр наматывания ее на паковку. Поэтому их необходимо учитывать при расчете и проектировании задающих программных устройств крутильно-мотальных механизмов РМ в случае изменения ассортимента перерабатываемой ровницы или параметров заправки машины.

Традиционная система управления процессом наматывания ровницы на паковки обеспечивает ступенчатое изменение частоты вращения катушек ($n_{КТ}$), при этом высота ступеньки при наматывании очередного слоя должна уменьшаться на одну и ту же величину при условии одинакового приращения толщины наматываемых слоев.

В учебно-производственных мастерских ФГБОУ ВПО «МГУДТ» на рогульчатой ровничной машине Р-192ИМ проводилась наработка ровницы из смеси мериносовой шерсти (64^K , 50%) и нитрона (50%) с замерами диаметра наматывания ($d_{КТ}$) на каждом слое. Частоты вращения катушек и веретен ($n_{ВР}$) замерялись с помощью частотных датчиков типа КВД-3-24. В соответствии с кинематической схемой рассчитывались линейные скорости выпуска ровницы из вытяжных приборов (v_1), линейная скорость наматывания ровницы на паковки (v_2), вытяжка волокнистого материала (E) в свободной зоне [33].

По стандартной программе методом наименьших квадратов были аппроксимированы функциональные зависимости $n_{КТ}(d_{КТ})$, $d_{КТ}(m)$ для которых подобраны аппроксимирующие многочлены и определены их коэффициенты (рис. 2.3, 2.4).

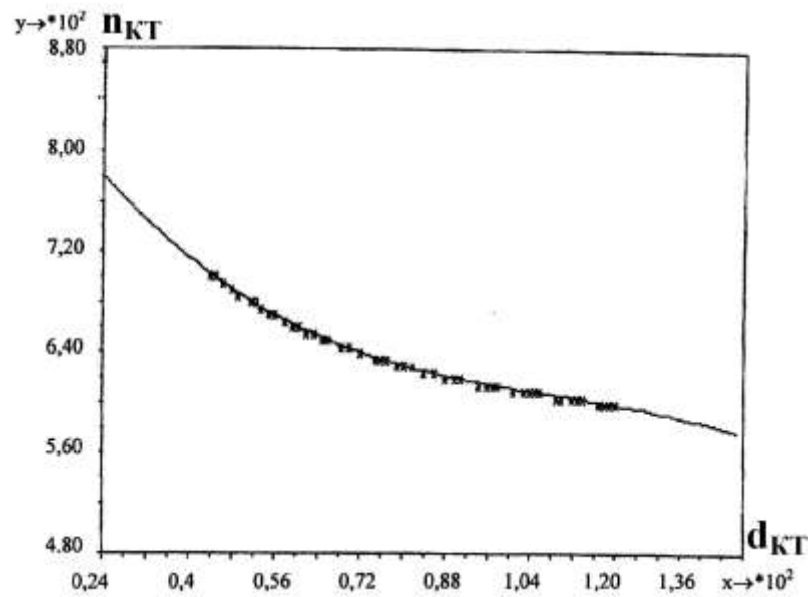


Рисунок 2.3 – Зависимость частоты вращения катушек от диаметра наматывания

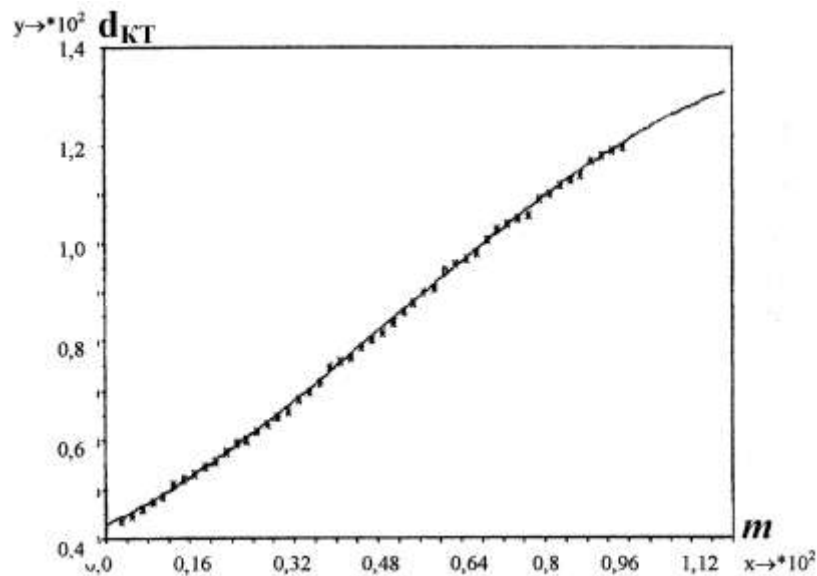


Рисунок 2.4 – Зависимость диаметра паковки от номера наматываемого слоя волокнистого материала

На рис. 2.3 представлена экспериментальная аппроксимированная кривая, которая отличается от теоретической зависимости, полученной при условии $v_1=v_2$ (рис.2.5). Экспериментально полученная зависимость $E(d_{KT})$ имеет колебательный

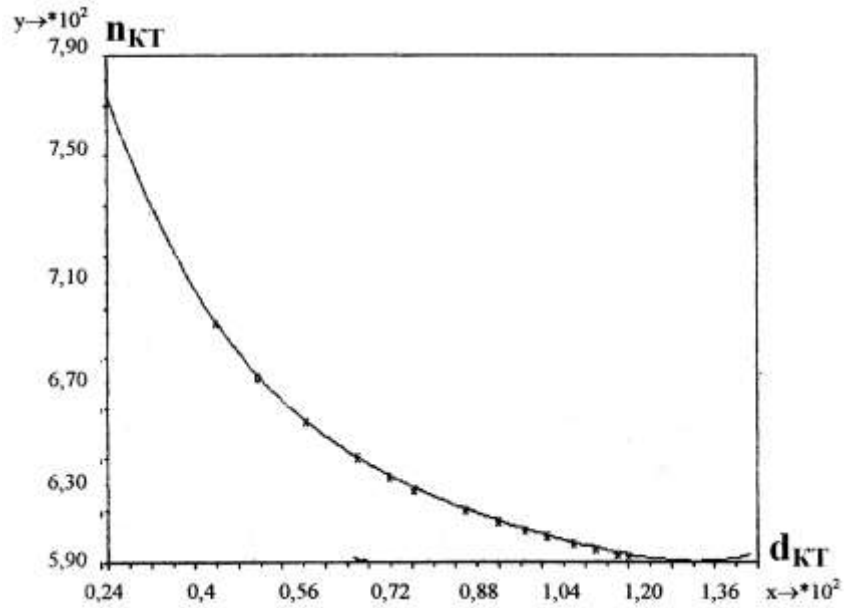


Рисунок 2.5 – Теоретическая зависимость частоты вращения катушек от диаметра наматывания при равенстве линейных скоростей выпуска (v_1) и наматывания (v_2) волокнистого материала.

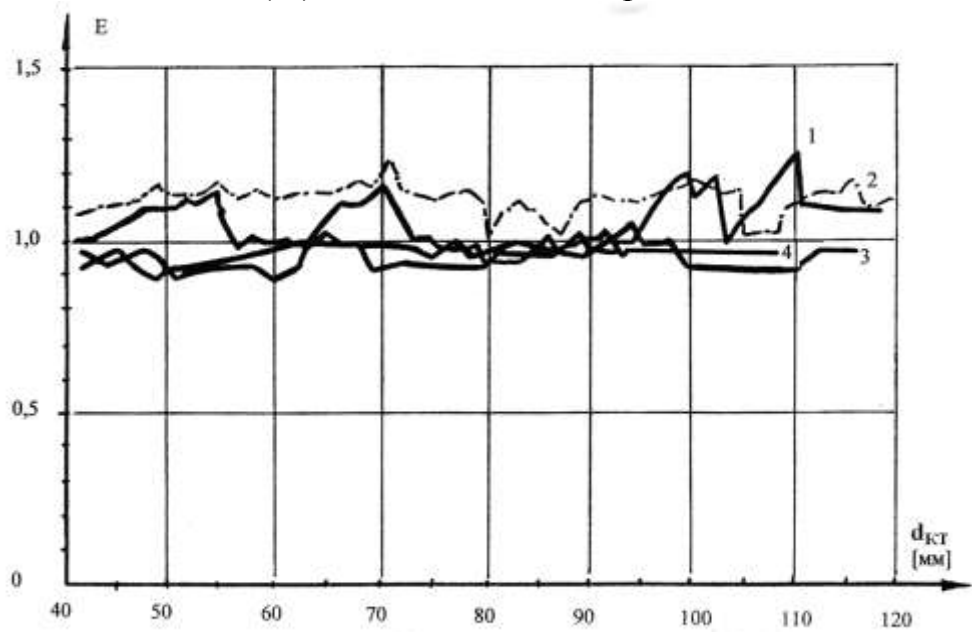


Рисунок 2.6 – Экспериментальные зависимости изменения вытяжки ровницы в свободной зоне при наработке паковки

характер, который определяет или появление скрытой вытяжки или снижение натяжения, приводящее к утолщению или провисанию ровницы в свободной зоне ровничной машины (см. рис.2.6).

2.2. Определение параметров прогнозирующего устройства, обеспечивающего управление скоростными режимами приемного вала крутильно-мотального механизма

При проектировании системы автоматического управления приемным валом крутильно-мотального механизма ставится задача стабилизации скоростного режима и управления объектом по заданной скоростной траектории. Должны быть обеспечены заданные степень вытяжки и физико-механические свойства волокнистого продукта. При этом алгоритм управления должен строиться на основании сигналов, характеризующих прогнозируемый скоростной режим в точках скоростной диаграммы.

Рассматривается задача проектирования прогнозирующего устройства, следящего за снижением частоты вращения катушек на ровничной машине и стабилизацией вытяжки в пределах $E = 1.02 \div 1.05$ за счет обеспечения равенства линейных скоростей выпуска ровницы из вытяжных приборов v_1 и наматывания ее на катушки v_2 .

Построение прогнозирующего устройства осуществляется на основании технического приложения задачи упреждения Н. Винера [34].

Задача прогнозирования положения расчетной точки на скоростной диаграмме $n_{КТ} = f(d_{КТ})$ или на диаграмме зависимости $E = f(d_{КТ})$ состоит в том, чтобы по заданным или вычисляемым в процессе работы вероятностным характеристикам и текущим значениям координат, определяющих ее движение, определить структуру и параметры динамической прогнозирующей системы, которые могли обеспечить получение на выходе этой системы функции, удовлетворяющей одному из нижеследующих условий:

1. минимум вероятности того, что разность между действительной функцией $x(t)$ и спрогнозированной $y(t)$ превышает по абсолютной величине некоторое заданное значение (ε_0)

$$P(|x(t) - y(t)| > \varepsilon_0) = \min;$$

2. минимум математического ожидания абсолютной величины ошибки

$$M(|x(t) - y(t)|) = \min;$$

3. минимум математического ожидания квадрата ошибки

$$M[(x(t) - y(t))^2] = \min.$$

Несмотря на различную математическую формулировку оптимального приближения функций $x(t)$ и $y(t)$ физически все эти условия близки между собой и при реализации дают соизмеримые результаты. Это позволяет выбрать наиболее простой критерий минимума среднеквадратического отклонения, тем более что для случая, когда функции $x(t)$ и $y(t)$ являются нормальными, а $M(x(t) - y(t)) = 0$, выполнение последнего условия гарантирует одновременное выполнение и первых двух условий.

В рассматриваемой задаче упреждения заданными являются значения ординат реализации случайной функции, характеризующие горизонтальные или вертикальные перемещения расчетной точки, а искомым – значение ординат случайной функции в момент времени $(t + t_0)$ при $t_0 > 0$. Таким образом, требуется определить передаточную функцию прогнозирующего устройства, обеспечивающего выполнение условия

$$M[(y(t) - x(t + t_0))^2] = \min,$$

где t_0 – время упреждения.

Поставленная задача решается в классе линейных динамических систем при условии стационарности случайных процессов, отсутствия помех и достаточного интервала времени статистической обработки.

Так как спектральные плотности определяются экспериментально, то полученные выражения и корреляционные функции могут быть аппроксимированы практически с одинаковой точностью различными аналитическими выражениями. В данном случае зависимости $n_{KT}(d_{KT})$ и $E(d_{KT})$ аппроксимированы с использованием метода наименьших квадратов (см. §2.1 рис.2.3, 2.6).

Вид оптимальной передаточной функции прогнозирующего устройства существенно зависит от вида спектральной плотности входного сигнала, ошибка прогнозирования зависит от точности исходных данных в значительно меньшей степени, т.е. отклонения от оптимальной системы, возникающие вследствие неточного знания характеристик случайных функций, поступающих на вход системы, мало влияют на качество системы.

Предположим, что корреляционная функция и спектральная плотность колебаний расчетной точки аппроксимируется выражениями

$$R(\tau) = \sigma_x^2 e^{-\alpha|\tau|} (\cos \beta\tau + (\alpha / \beta) \sin \beta|\tau|); \quad (2.1)$$

$$S_x(\omega) = \frac{2\alpha\sigma_x^2}{\pi} \cdot \frac{\alpha^2 + \beta^2}{(\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2)^2 - 4\beta^2\omega^2}, \quad (2.2)$$

где σ_x^2 – дисперсия случайной величины x ; α – параметр, характеризующий быстроту убывания корреляционной функции; α/β – степень нерегулярности процесса.

Из работы [35] следует, что выражение для амплитудно-фазовой частотной характеристики прогнозирующего устройства, обеспечивающего минимальную среднеквадратическую ошибку упреждения, имеет вид

$$\Phi(j\omega) = \frac{1}{2\pi\psi(j\omega)} \int_0^{\infty} e^{-j\omega t} dt \int_{-\infty}^{\infty} \psi(j\omega) e^{j\omega(t+t_0)} d\omega. \quad (2.3)$$

При этом решение задачи синтеза прогнозирующего устройства состоит из шести операций.

1. Определяется вспомогательная функция $\psi(j\omega)$, ограниченная в верхней полуплоскости,

$$\psi(j\omega) \cdot \psi^*(j\omega) = |\psi(j\omega)|^2 = S_x(\omega). \quad (2.4)$$

Для случая, когда все нули и полюса функции $S_x(\omega)$ простые,

$$\psi(j\omega) = \sum_{i=1}^v \frac{a_i}{\omega - \lambda_i};$$

$$a_i = [(\omega - \lambda_i)\psi(j\omega)]_{\omega=\lambda_i},$$

где λ_i – полюса, лежащие в верхней полуплоскости.

На рис. 2.7, а, б приведены в качестве примера графики нормированных характеристик $S_x^*(\omega)$ и $R_x^*(\tau)$ вертикальных колебаний расчетной точки скоростной зависимости $n_{КТ}(d_{КТ})$:

$$S_x^*(\omega) = 1 / \sigma_x^2 = 0,384 / [(\omega^2 + 0,58)^2 - 2,13\omega^2] = A / B(\omega); \quad (2.5)$$

$$R_x^*(\tau) = (1 / \tau_x^2) \cdot 1,98^2 \cdot e^{-0,21\tau} (\cos 0,74\tau + 0,27 \sin 0,72\tau). \quad (2.6)$$

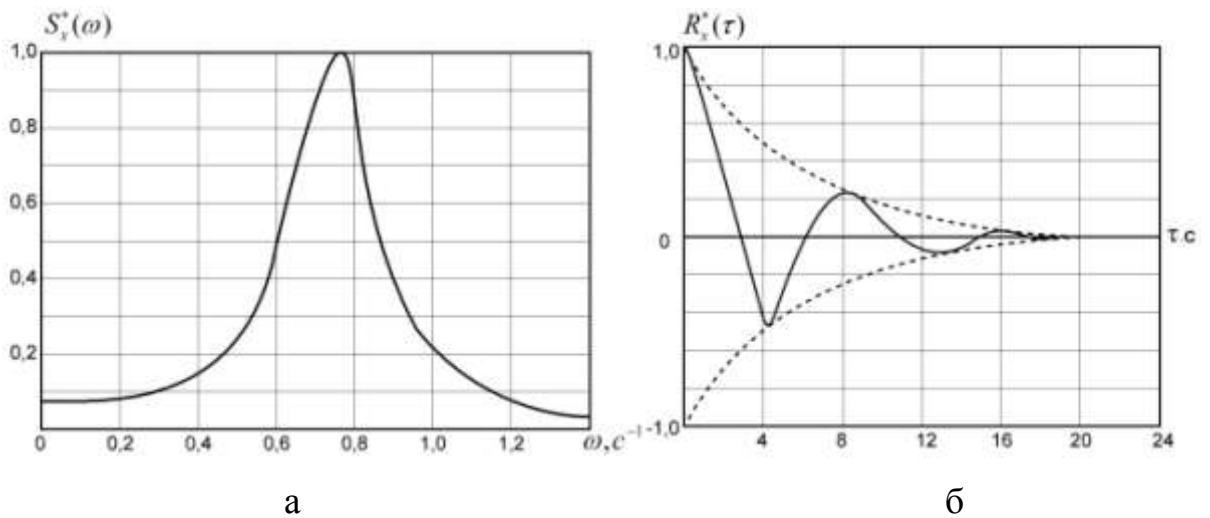


Рисунок 2.7 - Графики характеристик прогнозирующего устройства:
а – приведенная спектральная плотность колебаний расчетной точки;
б – приведенная корреляционная функция колебаний расчетной точки

На основании выражения (2.5) произведем разложение функции (2.2), определив полюса функции (2.2), лежащие в верхней полуплоскости. Таким образом, функция $\psi(j\omega)$, ограниченная в верхней полуплоскости, будет иметь полюса $\lambda_1 = \beta + j\alpha$ и $\lambda_3 = -\beta + j\alpha$ и на основании выражений (2.5) и (2.6)

$$a_1 = -a_3 = \frac{\sqrt{A}}{\lambda_1 - \lambda_3} = \frac{\sqrt{A}}{2\beta};$$

$$\psi(j\omega) = \frac{a_1}{\omega - \lambda_1} + \frac{a_3}{\omega - \lambda_3} = \frac{\sqrt{A}}{2\beta} \cdot \left(\frac{1}{\omega - (\beta + j\alpha)} - \frac{1}{\omega - (-\beta + j\alpha)} \right).$$

2. Вычисляется промежуточная функция

$$\gamma(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(j\omega) e^{-j\omega t} d\omega = j \sum_{i=1}^v a_i e^{j\lambda_i t}. \quad (2.7)$$

В рассматриваемом примере

$$\gamma(t) = j \left(\frac{\sqrt{A}}{2\beta} e^{j(\beta+j\alpha)t} - \frac{\sqrt{A}}{2\beta} e^{j(-\beta+j\alpha)t} \right) = -\frac{\sqrt{A}}{\beta} e^{-\alpha t} \sin \beta t. \quad (2.8)$$

3. С учетом условия физической реализуемости [36] вычисляется смещенная на время прогнозирования t_0 функция:

$$\begin{cases} \beta(t) = \gamma(t + t_0) & \text{при } t > 0; \\ \beta(t) = 0 & \text{при } t < 0, \end{cases} \quad (2.9)$$

т.е. на основании (2.7-2.9) получим

$$\beta(t) = j \sum_{i=1}^v a_i e^{\lambda_i(t+t_0)} = -\frac{\sqrt{A}}{\beta} e^{-\alpha(t+t_0)} \sin \beta(t + t_0).$$

4. Находится преобразование Фурье для функции $\beta(t)$:

$$B(j\omega) = \int_0^{\infty} \gamma(t + t_0) e^{-j\omega t} dt = \sum_{i=1}^v \frac{a_i}{\omega - \lambda_i} e^{j\lambda_i t_0}.$$

5. Определяется оптимальная амплитудно-фазовая частотная характеристика прогнозирующего устройства, которая для случая простых полюсов имеет вид

$$\Phi(j\omega) = \frac{B(j\omega)}{\psi(j\omega)} = \frac{\sum_{i=1}^v a_i e^{j\lambda_i t_0} / (\omega - \lambda_i)}{\sum_{i=1}^v a_i / (\omega - \lambda_i)}.$$

В рассматриваемом случае

$$\Phi(j\omega) = \left[(\omega - \lambda_3) e^{j\lambda_3 t_0} + (\omega - \lambda_1) e^{j\lambda_1 t_0} \right] / (2\beta)$$

или после преобразований с использованием формул Эйлера

$$\Phi(j\omega) = e^{-\alpha t_0} / \beta (\beta \cos \beta t_0 + \alpha \sin \beta t_0 + j\omega \sin \beta t_0),$$

$$\text{т.е. } \Phi(j\omega)_{onm} = c(t_0)[A(t_0) + j\omega B(t_0)].$$

Таким образом, при выбранной аппроксимации оптимальная передаточная функция прогнозирующего устройства есть передаточная функция форсирующего звена, параметры которого зависят от параметров принятой аппроксимации вероятностных характеристик случайного процесса и времени прогнозирования:

$$\Phi(p)_{onm} = k(t_0)_{onm} + k_1(t_0)_{onm} p; \quad (2.10)$$

$$k(t)_{onm} = e^{-\alpha t_0} (\cos \beta t_0 + (\alpha / \beta) \sin \beta t_0); \quad (2.11)$$

$$k_1(t)_{onm} = (1 / \beta) e^{-\alpha t_0} \sin \beta t_0. \quad (2.12)$$

Анализ выражений (2.6-2.8) показывает, что при

$$R_x(\tau) = dR_x(\tau) / dt = -\sigma_x^2 e^{-\alpha t_0} [(\alpha^2 + \beta^2) / \beta] \sin \beta t;$$

$$R_{x1}(\tau) = -\sigma_x^2 [(\alpha^2 + \beta^2) / \beta] (\alpha e^{-\alpha t_0} \sin \beta t + \beta e^{-\alpha t_0} \cos \beta t);$$

$$R_x(0) = -\sigma_x^2 (\alpha^2 + \beta^2),$$

коэффициенты передаточной функции прогнозирующего устройства имеют вид:

$$k(t_0)_{onm} = R_x(\tau) / \sigma_x^2 \Big|_{\tau=t_0}; \quad (2.13)$$

$$k_1(t_0)_{onm} = -R_{x1}(\tau) / \sigma_x^2 \Big|_{\tau=t_0}. \quad (2.14)$$

Таким образом, выражения (2.3), (2.10) – (2.14) позволяют вычислить коэффициенты как по заданным значениям α , β и t_0 , так и по ординатам корреляционных функций $R_x(\tau)$ и $R_{x1}(\tau)$.

Производится вычисление среднеквадратической ошибки прогнозирования, соответствующей оптимальной передаточной функции (2.6) прогнозирующего устройства [37]:

$$\overline{\varepsilon_{\min}^2} = \int_0^{t_0} \gamma^2(t) dt. \quad (2.15)$$

На рис. 2.8, а, б приведены зависимости от времени прогнозирования вычисленных для рассматриваемого случая значений коэффициентов оптимального фильтра (2.8, а) и минимальной среднеквадратичной ошибки прогнозирования

(2.8, б), позволяющие оценить эффективность включения прогнозирующего устройства в систему автоматического регулирования.

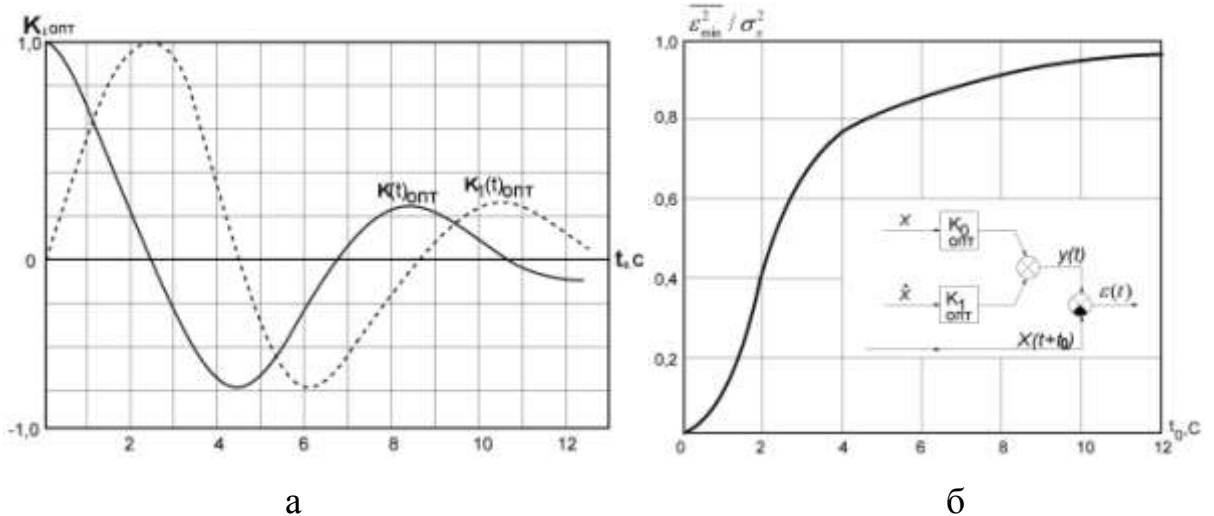


Рисунок 2.8 - Зависимость коэффициентов оптимального фильтра (а) и оптимальной среднеквадратической ошибки прогнозирования (б) от времени прогнозирования прогнозирующего устройства

Следует отметить, что точность прогнозирования изменения случайной величины в случае оптимального прогнозирующего устройства всегда будет не ниже точности в любой реальной системе. Поэтому результат, полученный для оптимального случая, представляет определенный интерес как оценка предельной точности, которая может быть достигнута при реализации систем автоматического управления транспортирующими и крутильно-мотальными механизмами.

2.3 Постановка и решение задачи оптимального управления электротехническим комплексом с крутильно-мотальным механизмом

При исследовании сложных динамических объектов текстильной и легкой промышленности наибольший интерес представляют задачи по определению оптимальных законов управления скоростными режимами рабочих органов машин прядильного производства при изменении во времени технологических параметров, определяющих основные показатели качества вырабатываемой продукции

[38]. Такие задачи возникают при выборе рациональных законов управления крутильно-мотальными устройствами прядильных машин для получения синтетических нитей при изменении условий формирования волокна или при выборе рациональных законов управления скоростными режимами рабочих органов КММ РМ при изменении радиуса наматывания паковок во время наработки каждого нового прослойка, а также при пуске и торможении машины. В этих случаях задачи оптимизации можно рассматривать как задачи динамической оптимизации скоростных режимов рабочих органов управляемых технологических комплексов [39].

На кафедре автоматики и промышленной электроники МГУДТ под руководством профессора А.Е. Полякова разработан усовершенствованный вариант функциональной схемы управляемого электротехнического комплекса (УЭК) с крутильно-мотальным механизмом [39].

Наиболее целесообразным способом улучшения статических и динамических свойств электромеханической системы (ЭМС) явилась модернизация электропривода КММ, в котором один двигатель является регулируемым асинхронным, другой – постоянного тока с тиристорным управлением (рис. 2.9) [40].

При проектировании САУ использованы комплектные тиристорные электроприводы постоянного и переменного тока российского производства, которые обладают высокой стабильностью частоты вращения, хорошими динамическими свойствами, широкими возможностями в удовлетворении высоких технологических требований.

Исследована модель кинематической схемы управляемого электротехнического комплекса (УЭК) РМ с цифро-аналоговым электроприводом приемного вала КММ [41]. На рис. 2.9 даны следующие обозначения: АД, ДПТ₂, ИП, ДЧ₁, ДЧ₂ - соответственно асинхронный двигатель, управляемый микропроцессорным регулятором напряжения (МРН); двигатель постоянного тока (ДПТ₂) с усилителем мощности (УМ₂); измерительный преобразователь (ИП); датчик частоты вращения, установленный на валу АД (ДЧ₁) датчик частоты вращения, установленный на валу ДПТ₂ (ДЧ₂); ДЛП, ДДН – соответственно датчики линейной плотности и

диаметра наматывания; ГВ, ПВ - главный вал, приемный вал; ГП - гибкая передача между валом АД и ГВ; ВП, КТ, ВР, КР, ДФ, ХМ - соответственно вытяжные приборы, катушки, веретена, каретка, дифференциал, храповой механизм; $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7$ - передаточные отношения, определяемые соотношениями соответствующих чисел зубьев веретен.

По разработанной функциональной схеме рис. 2.9 автором предложена и исследована структурная схема УЭК РМ (рис. 2.10).

С реализацией предложенной системы управления процессом наматывания связано решение следующих задач: повышение скоростных режимов формирования и наматывания волокнистого материала; обеспечение точной настройки и быстродействия системы управления; снижение неровноты по линейной плотности за счет программного управления процессом наматывания; формирования оптимальных законов управления электромеханической системы в зависимости от ассортимента перерабатываемого материала.

Проведен анализ динамики согласованного вращения двигателей КММ. Поскольку в реальных условиях изменение входных величин носит случайный характер, используются следующие типовые входные функции [42]:

4. ступенчатая функция времени, изменяющаяся в начальный момент времени скачком от нуля до постоянного значения;
5. синусоидальная функция времени, выражаемая в вещественной или в комплексной форме.

При анализе динамики процесса наматывания ровницы на паковки срабатывание управляющего механического устройства храпового механизма замка (ХМ) при наматывании очередного слоя ровницы можно имитировать ступенчатой функцией. Закономерность изменения выходной величины, которая определяет вытяжку (E) волокнистого продукта в свободной зоне, при ступенчатом изменении входной, выражается переходной функцией системы. В отличие от ступенчатого входного воздействия, с которым связан анализ переходного процесса, синусоидальный во времени входной сигнал, приложенный к системе, позволяет изучить установившейся процесс на выходе в виде частного решения неоднородного

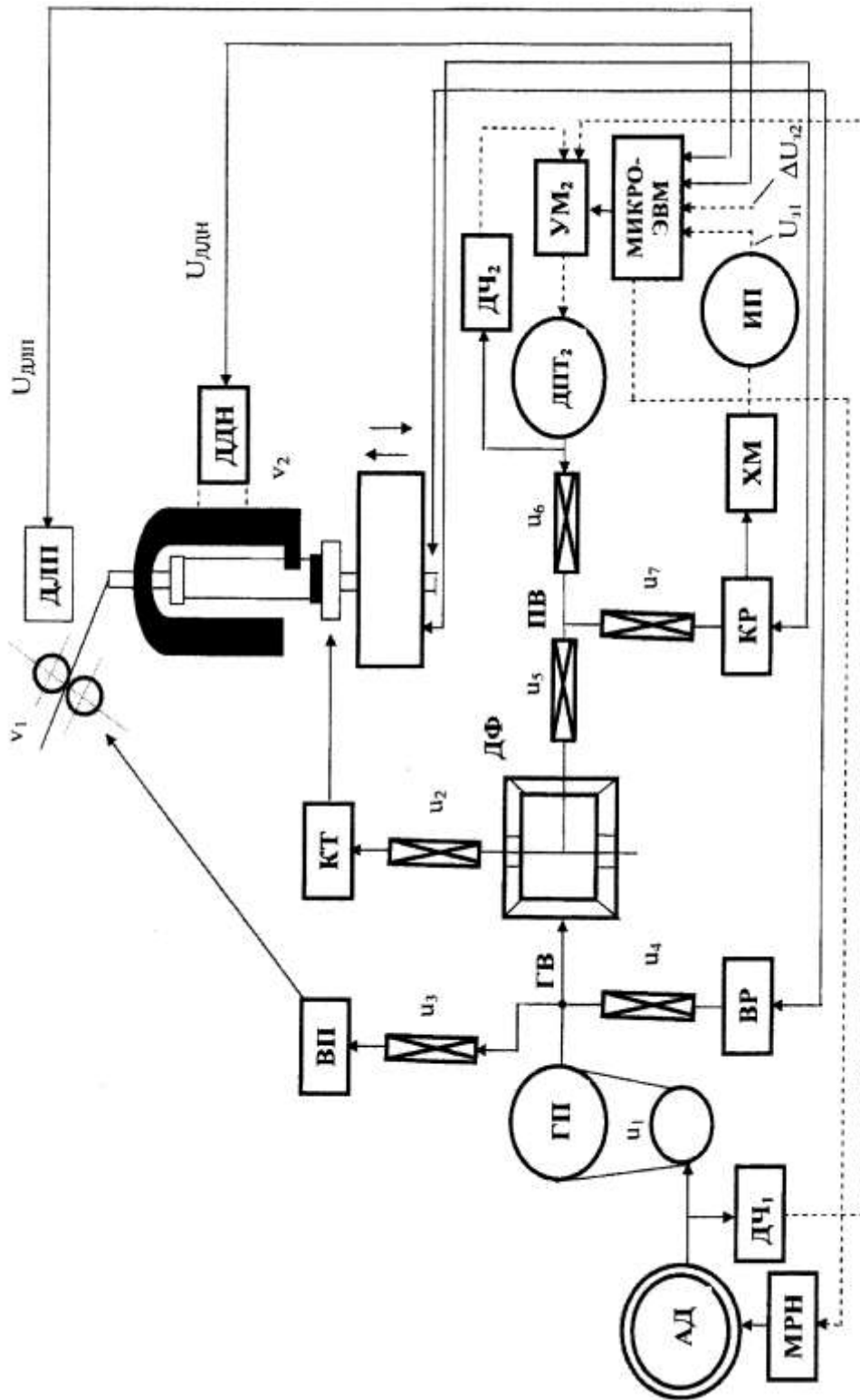


Рисунок 2.9 – Модернизированная функциональная схема сложного динамического объекта с крутильно-моторным механизмом.

уравнения, например, при изменении момента статического сопротивления и момента инерции крутильно-мотального механизма по мере увеличения диаметра паковки.

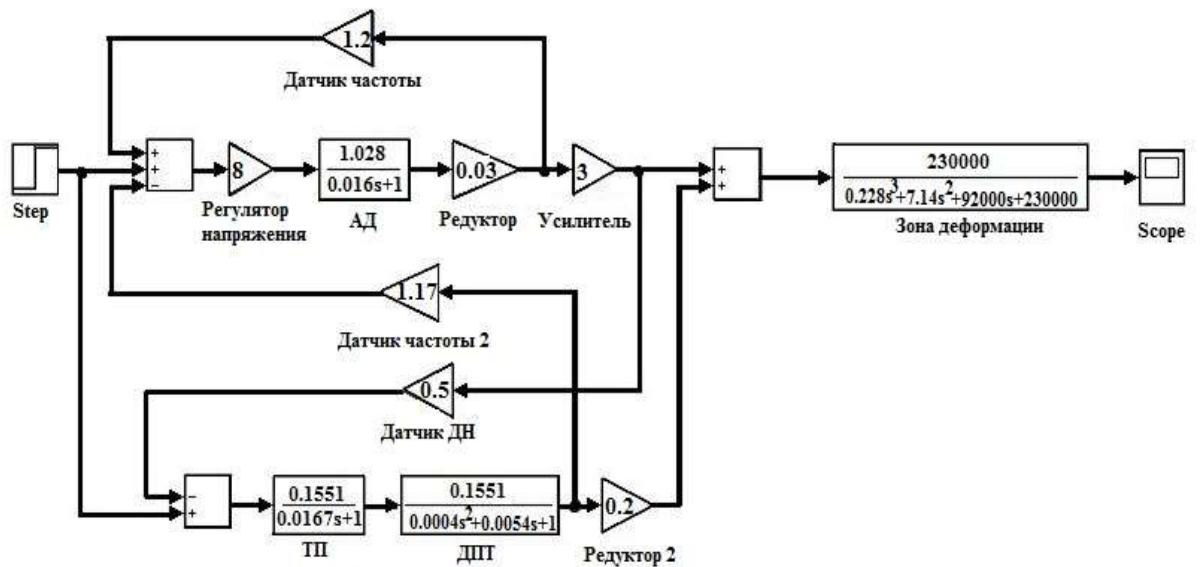


Рисунок 2.10 – Структурная схема модернизированного варианта УЭК с крутильно-мотальным механизмом.

Исследование устойчивости замкнутой и разомкнутой систем управления процессом наматывания волокнистого материала проведено по логарифмическим амплитудным и фазовым частотным характеристикам (ЛАФЧХ) (рис. 2.11).

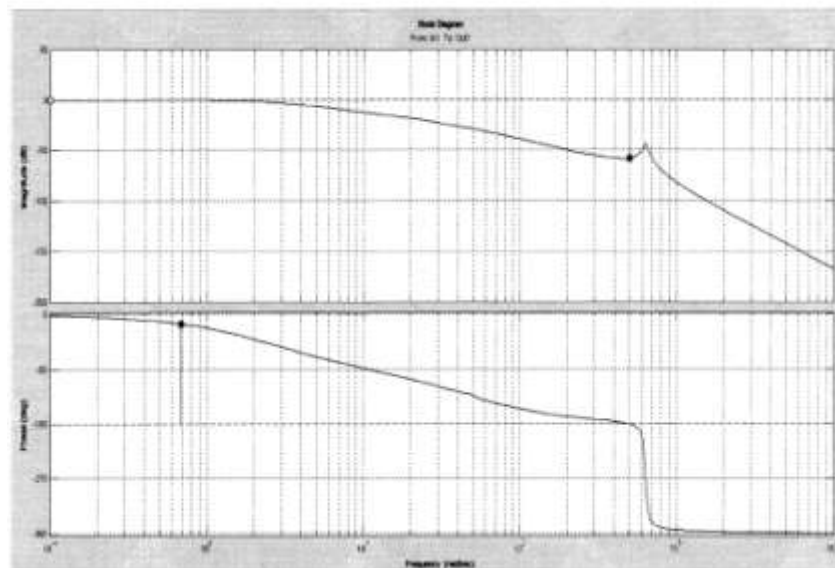


Рисунок 2.11 – Логарифмическая амплитудная и фазовая частотная характеристика замкнутой системы автоматического регулирования УЭК с крутильно-мотальным механизмом.

Полученные ЛАФЧХ контура управления КММ характеризуют его устойчивое состояние.

Расположение корней на комплексной полуплоскости нулей и полюсов передаточной функции замкнутой системы полностью определяет динамические свойства последней (рис. 2.12).

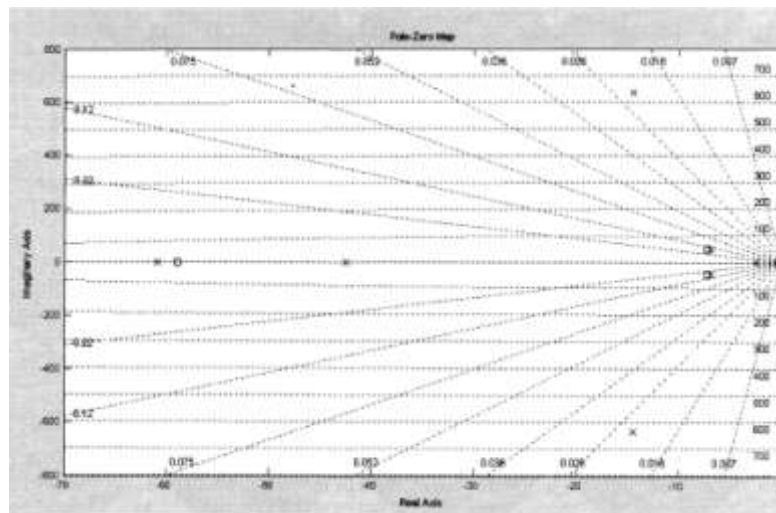


Рисунок 2.12 – Карта нулей и полюсов передаточной функции контура управления.

Качество переходного процесса формирования и наматывания слоя ровницы на паковку при срабатывании храпового механизма замка исследовались при подаче и снятии ступенчатого управляющего воздействия. Характеристика имеет плавный характер, перерегулирование практически отсутствует (рис. 2.13).

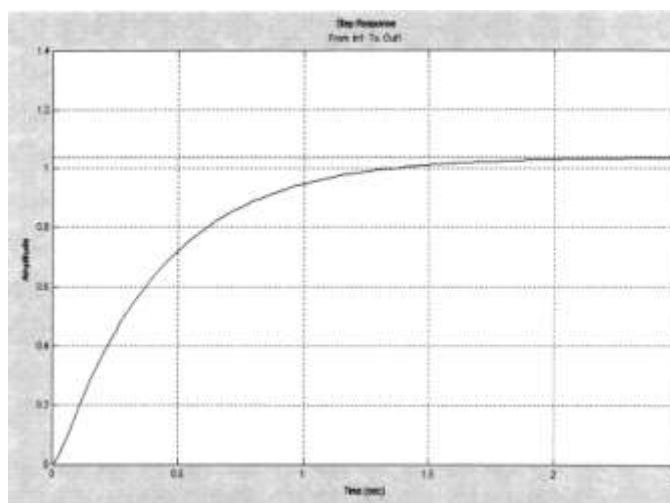


Рисунок 2.13 – Переходная функция контура управления приемным валом КММ.

Установившийся процесс осуществляется не более чем за 2,5-3 с, что соответствует технологическому регламенту.

Качественные показатели САР, определенные по ЛАФЧХ, приведены в таблице 2.1.

Время регулирования переходного процесса (t_p), с	Запас устойчивости по амплитуде (ΔL), дБ	Запас устойчивости по фазе ($\Delta\phi$), град.	Число колебаний (μ)
2,5	58,4	164	0

На рис. 2.14 представлен годограф Найквиста системы автоматического регулирования КММ. Из рассмотрения годографа разомкнутой системы видно, что критическая точка $(-1 j0)$ не охватывается характеристикой, следовательно, анализируемая САР является устойчивой.

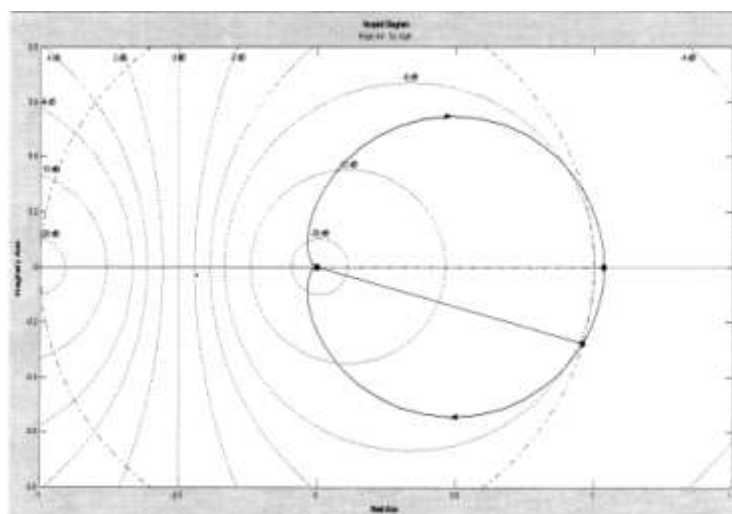


Рисунок 2.14 – Диаграмма Найквиста

Для того, чтобы система была устойчива, необходимо, чтобы все корни характеристического уравнения имели отрицательные вещественные части или, иначе говоря, лежали в левой комплексной полуплоскости, как показано на карте нулей и полюсов (рис. 2.12).

ВЫВОДЫ

1. Исследованы физико-механические свойства ровницы, выработанной на рогульчатой ровничной машине. Определены ограничения скоростных режимов крутильно-мотального механизма. Приведены факторы, в большей степени, влияющие на толщину ровницы.
2. Определены параметры прогнозирующего устройства, обеспечивающего управление скоростными режимами приемного вала КММ. Получены зависимости от времени прогнозирования коэффициентов оптимального фильтра и оптимальной среднеквадратичной ошибки.
3. Разработана модернизированная функциональная и структурная схемы сложного динамического объекта с крутильно-мотальными механизмами. Проведено исследование устойчивости замкнутой и разомкнутой систем управления процессом наматывания волокнистого материала по логарифмическим амплитудным и фазовым частотным характеристикам.

Глава 3 Энергосбережение за счет оптимизации скоростных режимов управляемых электромеханических систем технологического оборудования

В данном разделе объектом исследования являются параметрические асинхронные электроприводы, работающие при переменной нагрузке и управляемые от энергосберегающего микропроцессорного регулятора напряжения.

Цель исследований – определение направлений повышения энергетических показателей управляемых электротехнических комплексов технологического оборудования, использующих асинхронные электроприводы, работающие в условиях жесткой эксплуатации [43].

В процессе работы проводились теоретические и экспериментальные исследования влияния изменения нагрузки асинхронного двигателя на его энергетические показатели. Был определен оптимальный алгоритм изменения напряжения питания асинхронных двигателей, при котором его энергетические показатели максимальны. Рассмотрено влияние изменения питающего напряжения на потери в асинхронных двигателях. Проведен расчет ожидаемой экономии электроэнергии от внедрения регулятора напряжения. Даны рекомендации по разработке и применению микропроцессорных регуляторов напряжения для трехфазных асинхронных двигателей.

3.1.1 Постановка задачи исследования

На предприятиях текстильной промышленности имеются неиспользованные возможности экономии электроэнергии. Эти возможности в значительной степени связаны со спецификой работы электроприводов текстильных машин [44, 45].

Первая из указанных специфических особенностей состоит в том, что непосредственно на обработку сырья или волокнистого продукта затрачивается отно-

нительно небольшая доля потребляемой энергии. Большая её часть расходуется на преодоление трения в машинах, динамических усилий и моментов при пуске и торможении. Благодаря этому переход от переработки одного сырья или продукта к переработки другого мало сказывается на установившемся рабочем режиме привода. [46, 47].

Вторая особенность состоит в наличии больших маховых масс в текстильных машинах, что вынуждает завышать установленную мощность электропривода для обеспечения режима пуска и разгона машины в соответствии с технологическими требованиями производства. Исследования показали, что почти у всех текстильных машин установленная мощность завышена на 20-30% [48].

Третья важная особенность связана с обрывностью нитей и полуфабрикатов. Для отдельных видов технологического оборудования ликвидация обрывности связана с остановом машин и аппаратов, что в большинстве случаев осуществляется посредством муфты сцепления, соединяющей АД и приводные механизмы, и перевода АД в режим холостого хода. В отделах ткацкого производства (ткацкие станки, машины приготовительно-ткацкого отдела) время работы электропривода на холостом ходу составляет от 10 до 25% всего рабочего времени [49].

Недогрузка асинхронного привода и его работа на холостом ходу приводят к снижению его основных энергетических показателей: КПД и коэффициента мощности ($\cos\varphi$). Путем регулирования величины питающего привода напряжения можно в значительной степени устранить связанные с этим потери. Учитывая высокий коэффициент сменности, а также наличие большого числа маломощных электроприводов (до 3кВт), энергетические показатели которых сравнительно невысоки, можно ожидать значительной экономии электроэнергии от внедрения регуляторов напряжения. Анализ парка асинхронных машин и коэффициентов загрузки в текстильной промышленности показал, что внедрение таких регуляторов позволит сэкономить около 200 миллионов киловатт-часов электроэнергии [50].

В учебно-производственных мастерских ФГБОУВПО «МГУДТ» на ткацком оборудовании был испытан комплектный асинхронный электропривод КПЭ с

микропроцессорным регулятором напряжения МРН000, разработанным ВНИИ Электроэнергетики и изменяющим напряжение питания двигателя таким образом, чтобы обеспечить постоянство коэффициента мощности АД и равенство его номинальному значению [51]. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили целесообразность проведения работ по внедрению указанных регуляторов напряжения на различных электромеханических системах текстильного оборудования.

Регулятор напряжения состоит из силовой части системы и системы управления. Силовую часть составляют три управляющих полупроводниковых вентиля, включенных последовательно в каждую фазу сети, которая питает электродвигатель и защитные RC-цепочки.

В основу построения регулятора положен принцип стабилизации коэффициента мощности двигателя, т.е. регулирование производится не по принципу автоматического поиска минимума потребления энергии для конкретной нагрузки, а по принципу стабилизации одного параметра - $\cos\varphi$. При этом измеряется и стабилизируется угол рассогласования между моментом перехода через ноль фазы питающего напряжения и тока. Структурная блок-схема регулятора представлена на рис. 3.1, где ДТ – датчик тока; АД – асинхронный двигатель; C_1, C_2, C_3 – семисторы в цепи питания АД; БП – блок питания системы управления; ВК – выходные каналы семисторов; комп 1, 2, 3 – компараторы; И, ИЛИ – логическое устройство, выделяющее в каждый полупериод сигнал рассогласования между заданным моментом спада тока с реальным; ГПН – генератор пилообразного напряжения; ИНТ- интегратор; УУ – установка угла сдвига заднего фронта тока двигателя относительно напряжения.

Регулирование осуществляется следующим образом. Датчики напряжения и тока вместе с двуполярными компараторами 1, 2, 3 преобразуют напряжение сети и тока электродвигателя в прямоугольные импульсы соответствующей длительности и фазы. Для выделения угла рассогласования дискретные сигналы обрабатываются логическим устройством, состоящим из двух элементов И и элемента ИЛИ.

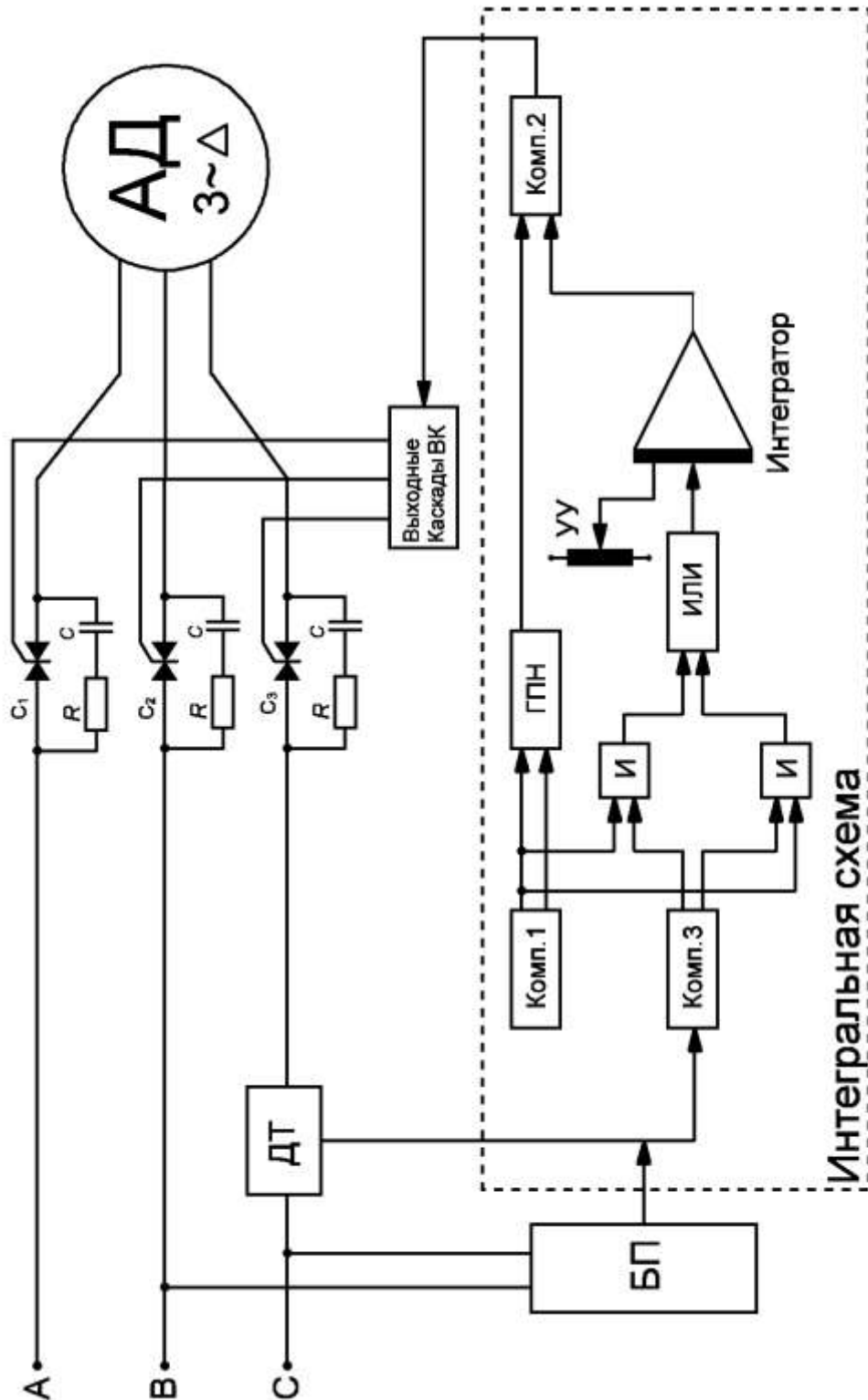


Рисунок 3.1 – Блок-схема трехфазного регулятора напряжения

Сигнал рассогласования сравнивается с заданным сигналом и интегрируется. Сигналы с выходов интеграторов и ГПН сравниваются, подаются на выход компаратора, где формируются сигнал управления. При увеличении нагрузки на

валу электродвигателя момент спадания тока смещается влево. Это приводит к уменьшению сигнала, формированию сигнала на выходе интегратора и более раннему открытию вентилей.

Сигнал управления вентиля смещается влево до тех пор, пока рассогласование заданного и действительного углов не будет сведено к нулю (система астатическая). При уменьшении нагрузки на валу двигателя изменения тока и реакция системы для достижения той же цели будут направлены в обратном направлении.

3.1.2 Исследование влияния изменения напряжения на энергетические показатели асинхронного двигателя, работающего при переменной нагрузке

Экспериментальные исследования проведены на лабораторной установке (рис. 3.2), основу которой составил двигатель-генераторный агрегат типа «ДГ-28». При проведении испытаний определены зависимости тока нагрузки двигателя I , активной мощности P , полной мощности S , КПД η , коэффициента мощности $\cos\varphi$ от величины питающего АД напряжения для различных значений мощности (нагрузки) на выходе генератора (Г). В установке использованы тип АД: $U=380/220$ В, $I=1,8/3$ А, $f_1=50$ Гц, $P=0,51$ кВт, $n=3000$ мин⁻¹; тип Г: $U=120$ В, $I=2,9$ А, $f_1=500$ Гц.

Постоянство мощности на выходе генератора поддерживалось за счет регулирования тока возбуждения генератора и контролировалось по приборам (Р) измерительного комплекса К-505.

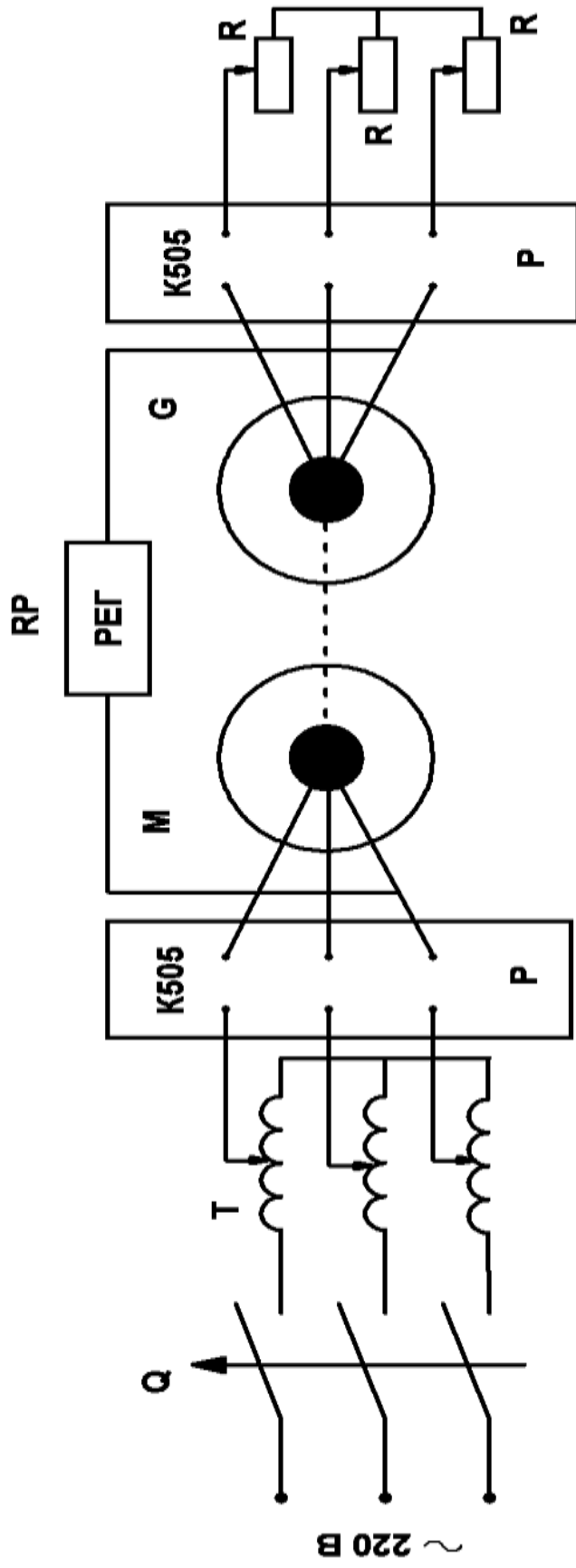


Рисунок 3.2 – Схема экспериментальной установки: Q – автоматический выключатель; T – трансформатор; RP – потенциометр; R – резисторы.

P – прибор измерительный K-505; M - асинхронный двигатель; G – синхронный генератор;

RP – потенциометр; R - резисторы.

Результаты испытаний представлены в виде кривых зависимостей энергетических характеристик АД от уровня питающего напряжения (рис. 3.3). Пунктирная линия определяет режим при минимальном потреблении тока из сети. На рис. 3.4 приведены диаграммы потребляемой активной и полной мощности АД для номинального U_H и оптимального $U_{опт}$ питающих напряжений.

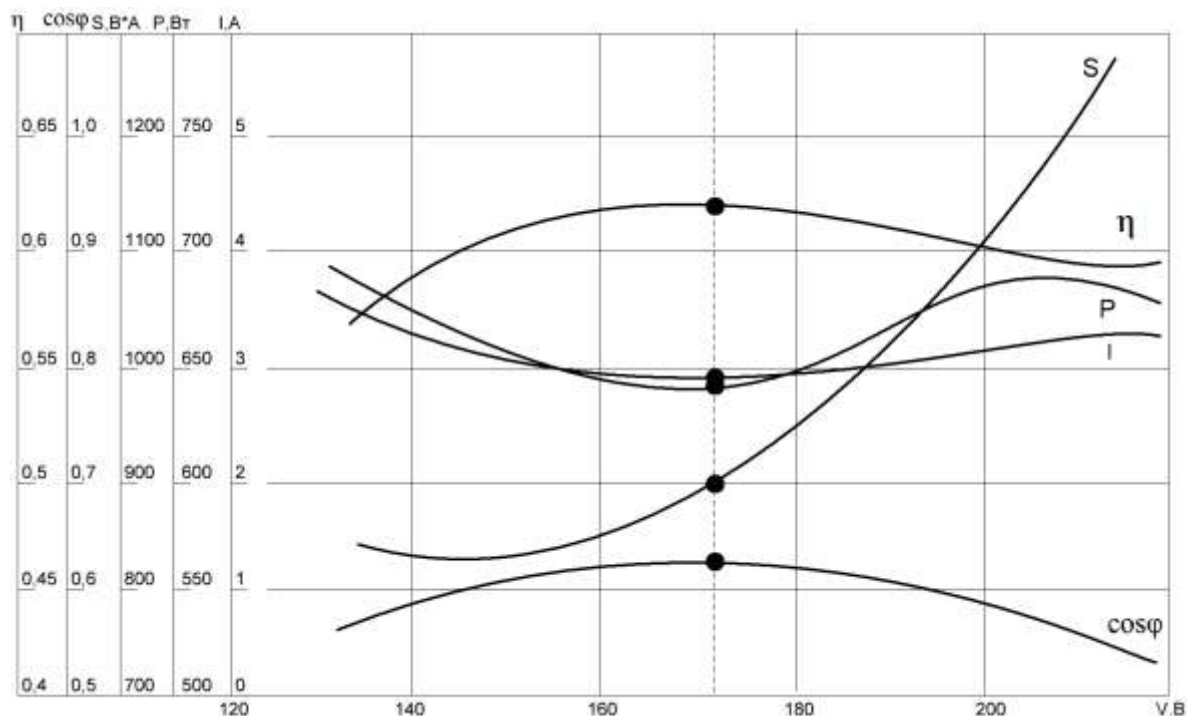


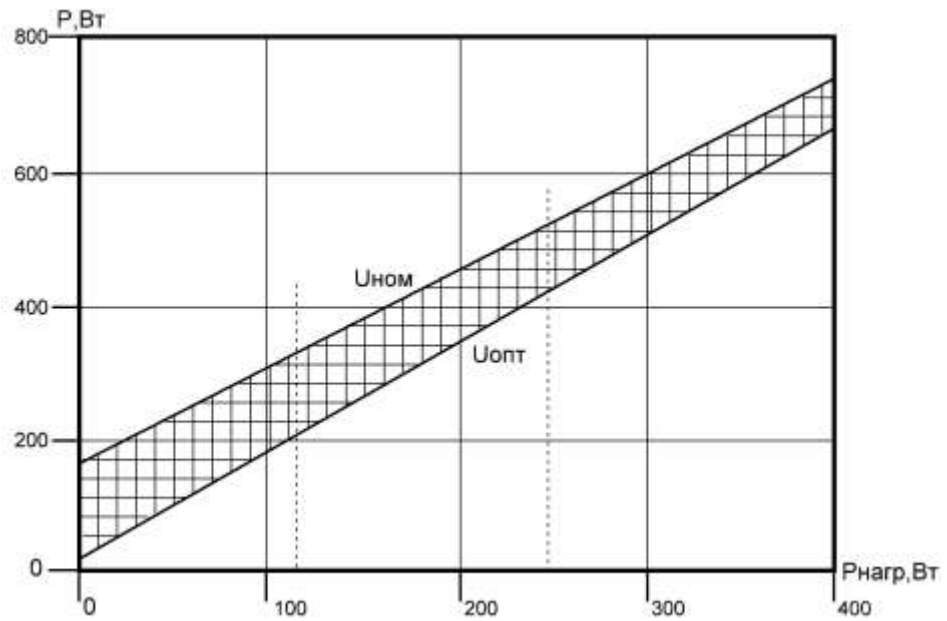
Рисунок 3.3 – Энергетические показатели АД при изменении напряжения при нагрузке на валу $P_H=400$ Вт

Анализ кривых показывает, что понижение питающего напряжения улучшает энергетические показатели двигателя и снижает потребление активной мощности из сети. При этом эффект возрастает с уменьшением нагрузки двигателя P_H . Изменение энергетических показателей двигателя при 50%-ной нагрузке для оптимального режима при $U_{опт} = 121$ В и для режима, близком к холостому ходу, при $U=86$ В, приведены в таблице 3.1.

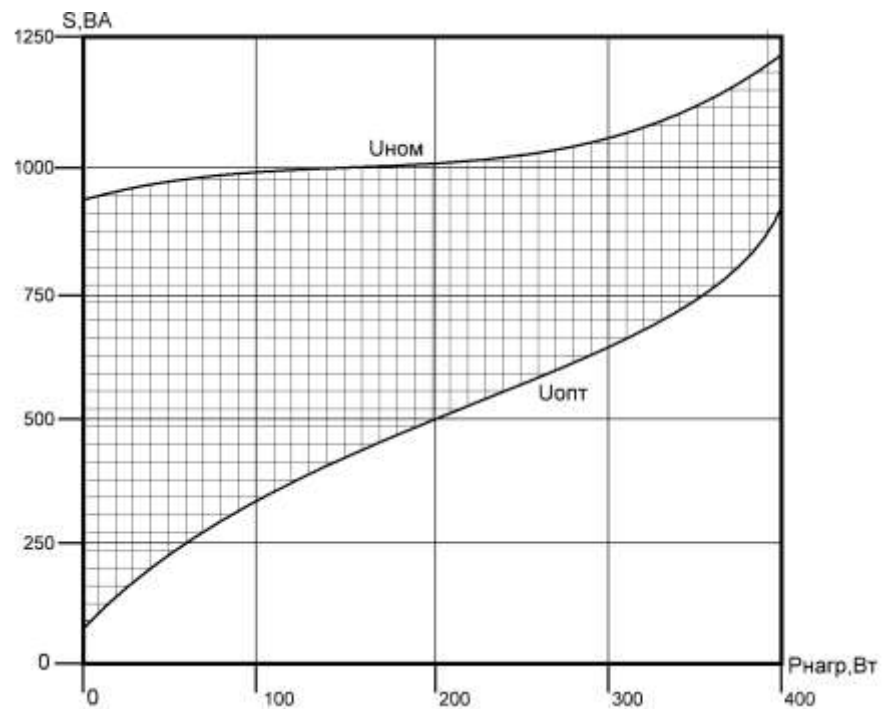
Эффект K снижения напряжения оценивался по формуле

$$K = \frac{P_H - P_p}{P_H} \cdot 100\%,$$

где P_H – значение параметра при номинальном напряжении; P_p – значение параметра при пониженном напряжении.



а



б

Рисунок 3.4 – Диаграммы потребления мощности в зависимости от нагрузки на валу двигателя: а – активная мощность; б – полная мощность.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают необходимость изучения влияния снижения напряжения на энергетические показатели АД, выбора оптимального запаса регулирования и оценки нагрузки АД, при которых регулирование становится целесообразным.

Таблица 3.1 – Энергетические характеристики АД

Параметры	U_H	$U_{\text{опт}}$	$K, \%$
Оптимальный режим			
$S, (B \cdot A)$	1188,3	461,8	61,0
$P, (Bт)$	2,8	360,0	25,0
$I, (A)$	3,12	2,2	29,5
$\cos\varphi$	0,4	0,77	85,0
$\eta, \%$	0,41	0,55	34,0
Режим холостого хода			
$S, (B \cdot A)$	1100,0	170,0	84,5
$P, (Bт)$	210,0	93,0	56,0
$I, (A)$	2,9	1,15	60,0
$\cos\varphi$	0,19	0,55	189,0
$\eta, \%$	0,2	0,45	125,0

3.1.3 Расчет энергетических показателей асинхронного двигателя при изменении напряжения питания и меняющейся нагрузки на валу

Энергетические показатели АД (КПД и $\cos\varphi$) в значительной степени зависят от величины нагрузки. При работе двигателя с нагрузкой, меньше номинальной, понижение напряжения питания приводит к снижению пускового момента, потерь в стали и уменьшению намагничивающего тока.

Расчет энергетических показателей (КПД и $\cos\varphi$) выполним согласно выражениям, полученным в работе [52]:

$$\eta = 1 / \left[\left(1 + \frac{1}{C \cdot P_{2H} \cdot m_c} \right) \cdot \frac{P_{сн} \cdot K_u^4 + m_c^2 \cdot P_{MH} + C \cdot P_{мех} \cdot (K_u^2 - S_H \cdot m_c)}{K_u^2 - S_H \cdot m_c} \right]; \quad (3.1)$$

$$\cos\varphi = \frac{I_{1a}}{|I_1|} = \frac{I_{1a}}{\sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}} = \frac{I_{0H} \cdot K_u + \frac{I'_{2H} \cdot m_c^2}{2m_k K_u^3}}{\sqrt{\left(I_{0H} \cdot K_u + \frac{I'_{2H} \cdot m_c^2}{2m_k \cdot K_u^3} \right)^2 + \left(\frac{I'_{2H} \cdot m_c}{K_u} \right)^2}}, \quad (3.2)$$

где $C = 1/(1 - S_H)$; P_{2H} , $P_{сн}$, $P_{мн}$, $P_{мех}$ - соответственно мощность на валу АД, потери мощности в стали, меди и механические при номинальном режиме;

I_1 - ток статора; I_{1a} , I_{1p} - активная и реактивная составляющие тока статора; I'_{2H} , I'_{0H} - приведенный ток ротора и ток холостого хода при номинальном режиме эксплуатации; m_c , m_k - коэффициент загрузки и кратность максимального момента; K_u - коэффициент регулирования; S_H - номинальное скольжение АД.

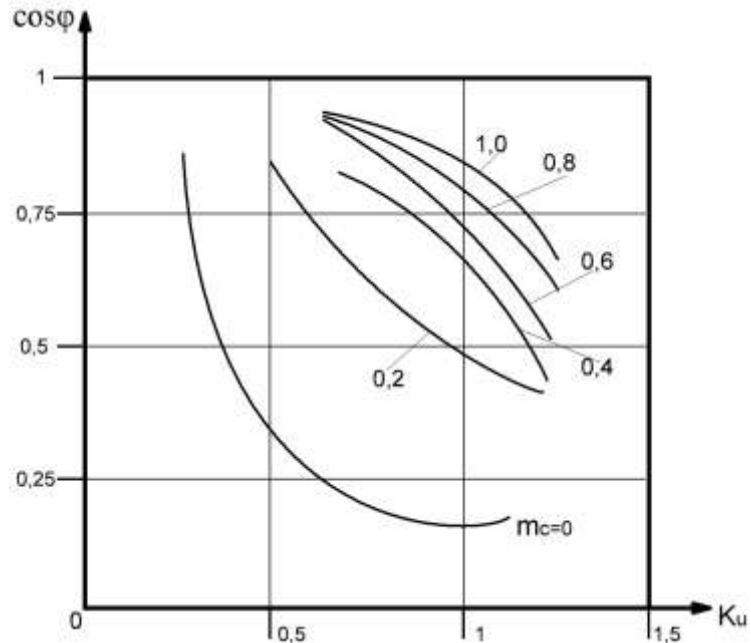
Приведенные уравнения (3.1) и (3.2) позволяют определить энергетические показатели АД при любых темпах изменения нагрузки и питающего напряжения.

На рис. 3.5 приведены экспериментальные зависимости коэффициента мощности (а) и КПД (б) от коэффициента регулирования для двигателя 4А90L4 при различных значениях коэффициента загрузки. Рабочие характеристики АД приведены в приложении А. Как видно из кривых, изменение коэффициента регулирования в пределах от 0,5 до 1,0 оказывает более существенное влияние на изменение коэффициента мощности, чем на изменение коэффициента мощности, чем на изменение КПД при одних и тех же значениях коэффициента загрузки.

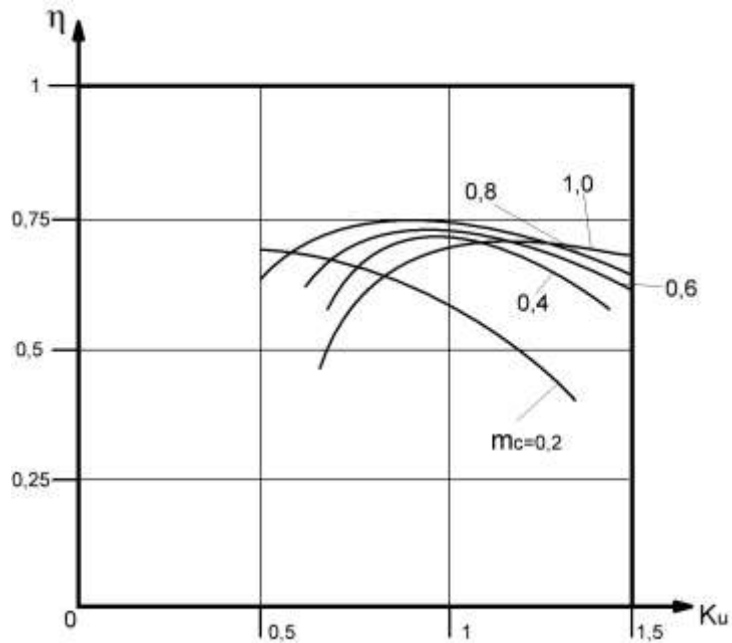
Наиболее целесообразно при изменении нагрузки на валу АД регулировать напряжение питания двигателя таким образом, чтобы получить: максимальное значение КПД и (или) $\cos\varphi$; заданное значение $\cos\varphi$, минимальный ток статора.

Ниже осуществлен анализ различных алгоритмов управления изменения напряжения при медленно меняющейся нагрузке на валу двигателя.

1. Для получения максимального значения КПД при изменении нагрузки приравниваем к нулю первую производную выражения (3.1) по коэффициенту регулирования



а



б

Рисунок 3.5 – Экспериментальные зависимости коэффициента регулирования для двигателя 4А90L4 при различных значениях коэффициента загрузки: а – коэффициент мощности; б – КПД.

$$\frac{d\eta}{dK_u} = \frac{(4P_{сн} K_u^3 + 2CP_{мех} K_u) [2CP_{2н} m_c (S_H m_c - K_u^2)]}{[P_{сн} K_u^4 + P_{мн} m_c^2 - (S_H m_c - K_u^2)(CP_{мех} + CP_{2н} m_c)]^2} + \frac{2K_u [P_{сн} K_u^4 + P_{мн} m_c^2 - CP_{мех} (S_H m_c - K_u^2)]}{[P_{сн} K_u^4 + P_{мн} m_c^2 - (S_H m_c - K_u^2)(CP_{мех} + CP_{2н} m_c)]^2} = 0.$$

Из полученного выражения определяем коэффициент регулирования

$$K_u = \frac{U_1}{U_{1H}} = \sqrt{S_H m_c + \sqrt{(S_H \cdot m_c)^2 + P_{MH}/P_{CH} \cdot m_c^2}},$$

где U_1, U_{1H} - регулируемое и номинальное питающее напряжение.

Величина $S_H m_c$ много меньше остальных слагаемых и этим произведением пренебрегаем, тогда

$$K_u = \sqrt[4]{P_{MH} \cdot m_c^2 / P_{CH}} = \sqrt{m_c} \sqrt[4]{P_{MH} / P_{CH}}. \quad (3.3)$$

Так как вторая производная отрицательна, то, следовательно, полученное выражение соответствует максимальному значению КПД.

- Для получения максимального коэффициента мощности при изменении нагрузки приравняем к нулю первую производную выражения (3.2) по коэффициенту регулирования напряжения

$$\frac{d \cos \varphi}{d K_u} = \frac{2I_{0H} m_k I_{2H}'^2 K_u m_c^2 - I_{2H}'^3 m_c^4}{m_k \sqrt{\left(\frac{4I_{0H}'^2 K_u^4 m_k^2 + 4I_{0H}' I_{2H}' m_c^2 m_k + 4I_{2H}'^2 m_c^2 m_k^2 + \frac{I_{2H}'^2 m_c^4}{K_u^4}}{4K_u^2 m_k^2} \right)^3}} = 0.$$

Так как вторая производная выражения (3.2) по коэффициенту регулирования отрицательна, то получим выражение соответствующее максимальному значению коэффициента мощности.

Из последнего выражения определяем коэффициент регулирования:

$$K_u = \sqrt[4]{\frac{I_{2H}' m_c^2}{2I_{0H}' m_k}} = \sqrt{m_c} \sqrt[4]{\frac{I_{2H}'}{2I_{0H}' m_k}}. \quad (3.4)$$

- Для получения заданного значения коэффициента мощности приравняем выражение (3.2) к его номинальному значению - $\cos \varphi_H$, в итоге получим

$$\cos \varphi_{\text{H}} = \frac{I_{0\text{H}} + \frac{I'_{2\text{H}}}{2m_{\text{k}}}}{\sqrt{\left(I_{0\text{H}} + \frac{I'_{2\text{H}}}{2m_{\text{k}}}\right)^2 + (I'_{2\text{H}})^2}}.$$

Решая полученное уравнение относительно K_{u} определим:

$$K_{\text{u}} = \sqrt{m_{\text{c}}}. \quad (3.5)$$

Полученная зависимость является универсальной для всех АД независимо от их параметров.

4. Для получения максимального тока статора при изменении нагрузки приравняем к нулю первую производную тока статора по K_{u} . Ток статора определяется по T-образной схеме замещения (рис. 3.6) из выражения:

$$I_1 = \sqrt{\left(I_{0\text{H}} K_{\text{u}} + \frac{I'_{2\text{H}} m_{\text{c}}}{2m_{\text{k}} K_{\text{u}}^3}\right)^2 + \left(\frac{I'_{2\text{H}} m_{\text{c}}}{K_{\text{u}}}\right)^2}. \quad (3.6)$$

После математических преобразований окончательно получим

$$K_{\text{u}} = \sqrt{m_{\text{c}}} \cdot 4 \sqrt{\frac{I'_{2\text{H}}}{2I_{0\text{H}}^2 m_{\text{k}}} \left(I'_{2\text{H}} m_{\text{k}} + I_{0\text{H}} + \sqrt{(I_{0\text{H}} + I'_{2\text{H}} m_{\text{k}})^2 + 3I_{0\text{H}}^2} \right)}. \quad (3.7)$$

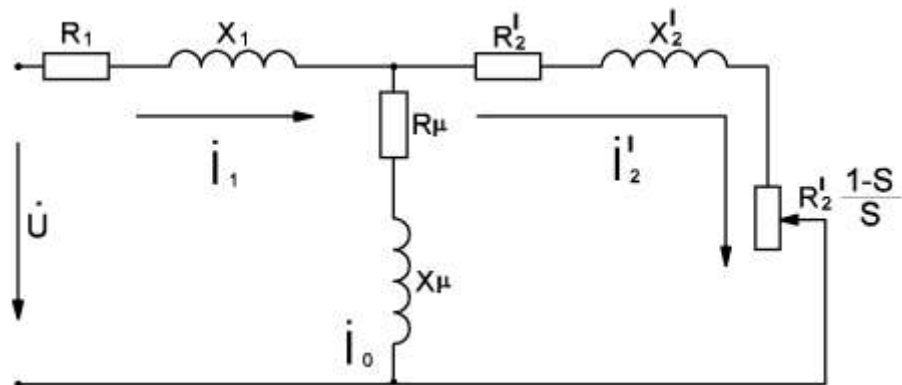


Рисунок 3.6 – Схема замещения асинхронного двигателя: R_1 , R_2' , R_{μ} – соответственно активные сопротивления рассеивания обмоток статора, ротора и ветви намагничивания; x_1 , x_2' , x_{μ} – соответственно индуктивные сопротивления рассеивания обмоток статора, ротора и ветви намагничивания; i_1 , i_2' , i_0 – соответственно токи статора, ротора и ветви намагничивания

3.1.4 Устойчивость работы двигателя при полученных алгоритмах регулирования

При снижении напряжения в зажимах питания двигателя максимальный развиваемый момент (M'_{\max}) определяется из следующего выражения:

$$M'_{\max} = M_{\max} \cdot K_u^2, \quad (3.8)$$

где M_{\max} - максимальный момент при номинальном напряжении питания.

При не соблюдении условия $M_{\max}/M_c \gg 1$ двигатель переходит в неустойчивый режим и затормаживается (явление «опрокидывания»).

Устойчивость АД определяли путем подстановки в уравнение (3.8) значений K_u , соответствующих конкретному закону регулирования (3.3), (3.4), (3.5), (3.7).

В итоге, максимальное значение КПД равно

$$M'_{\max} = M_{\max} \left(\sqrt{M_c/M_H} \sqrt{4P_{MH}/P_{CH}} \right)^2 = M_{\max}/M_H \cdot M_c \sqrt{P_{MH}/P_{CH}};$$

$$\frac{M_{\max}}{M_c} = m_k \sqrt{P_{MH}/P_{CH}}, \quad (3.9)$$

где $m_k \gg 1$, M_H , M_c - соответственно момент номинальный и момент сопротивления.

При соблюдении условия $P_{MH}/P_{CH} \gg 1$ работа АД будет устойчивой для данного закона регулирования во всем диапазоне нагрузки.

Для получения $\cos\varphi = \cos\varphi_{\max}$

$$M'_{\max} = M_{\max} \left(\sqrt{M_c/M_H} \sqrt{I'_{2H}/(2I_{0H} m_k)} \right)^2 = M_{\max}/M_H \cdot M_c \sqrt{I'_{2H}/2I_{0H} m_k} \quad (3.10)$$

откуда

$$\frac{M'_{\max}}{M_c} = m_k \sqrt{I'_{2H}/(2I_{0H} m_k)} = \sqrt{m_k} \sqrt{I'_{2H}/2I_{0H}}.$$

При соблюдении условия $I'_{2H}/(2I_{0H}) \gg 1$ работа АД будет устойчивой для данного закона регулирования во всем диапазоне изменения нагрузки.

При соблюдении условия $\cos \varphi = \cos \varphi_n$

$$M'_{\max} = M_{\max} \left(\sqrt{\frac{M_c}{M_H}} \right)^2 = \frac{M_{\max}}{M_H \cdot M_c}, \quad (3.11)$$

$$\frac{M_{\max}}{M_c} = m_k > 1.$$

Для данного алгоритма регулирования АД устойчиво работает во всем диапазоне изменения нагрузки.

При поддержании максимального тока статора условие $\frac{M_{\max}}{M_c} > 1$ будет соблюдаться в случае

$$\frac{1}{I_{0H} \sqrt{\frac{1}{2} I'_{2H} m_k (I_{0H} + I'_{2H} m_k) + \sqrt{(I_{0H} + I'_{2H} m_k)^2 + 3I_{0H}^2}}} > 1. \quad (3.12)$$

Все приведенные уравнения были включены в алгоритм расчета энергетических параметров АД. Использование данных выражений позволило рассчитать энергетические показатели регулирования напряжения по приведенным алгоритмам управления с учетом условий «опрокидывания» двигателя при различных режимах работы.

На рис. 3.7 приведены зависимости, с помощью которых можно сравнить алгоритмы регулирования напряжения при изменении нагрузки на валу двигателя. Кривая (1), отражающая зависимость напряжения для получения максимального КПД практически совпадает с кривой (4), характеризующей изменение напряжения с целью получения максимального тока статора.

На рис. 3.8 приведены расчетные зависимости коэффициента мощности $\cos \varphi$ (кривые 1-4) и КПД (кривые 5-8) от коэффициента загрузки при отсутствии регулирования и при регулировании напряжения по различным законам. Наиболее целесообразными являются алгоритмы регулирования напряжения, поддерживающие максимальные КПД (5) и $\cos \varphi$ (2). Оптимальные алгоритмы регулирования АД приведены в табл. 3.2.

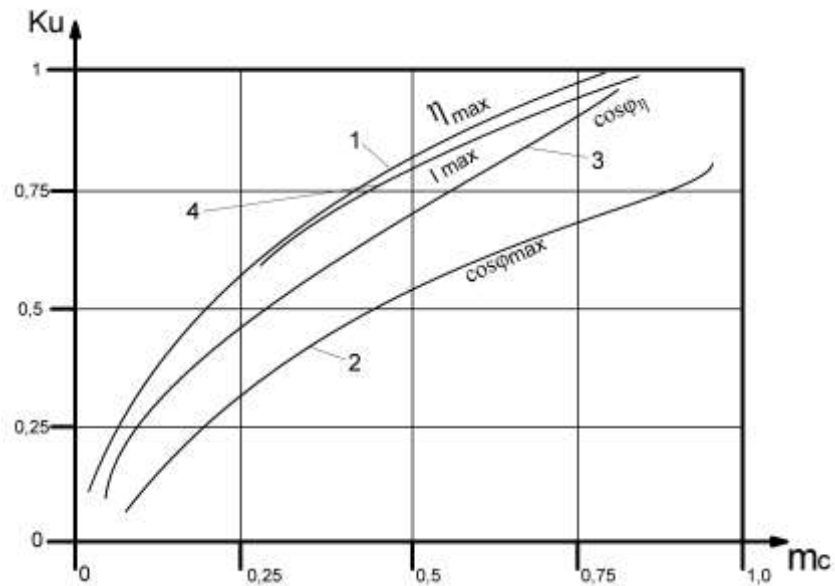


Рисунок 3.7 – Расчетные зависимости коэффициента регулирования напряжения от нагрузки для двигателя 4A90L4 при алгоритмах определяемых по формулам: (3.3)-1, (3.4)-2, (3.5)-3, (3.7)-4.

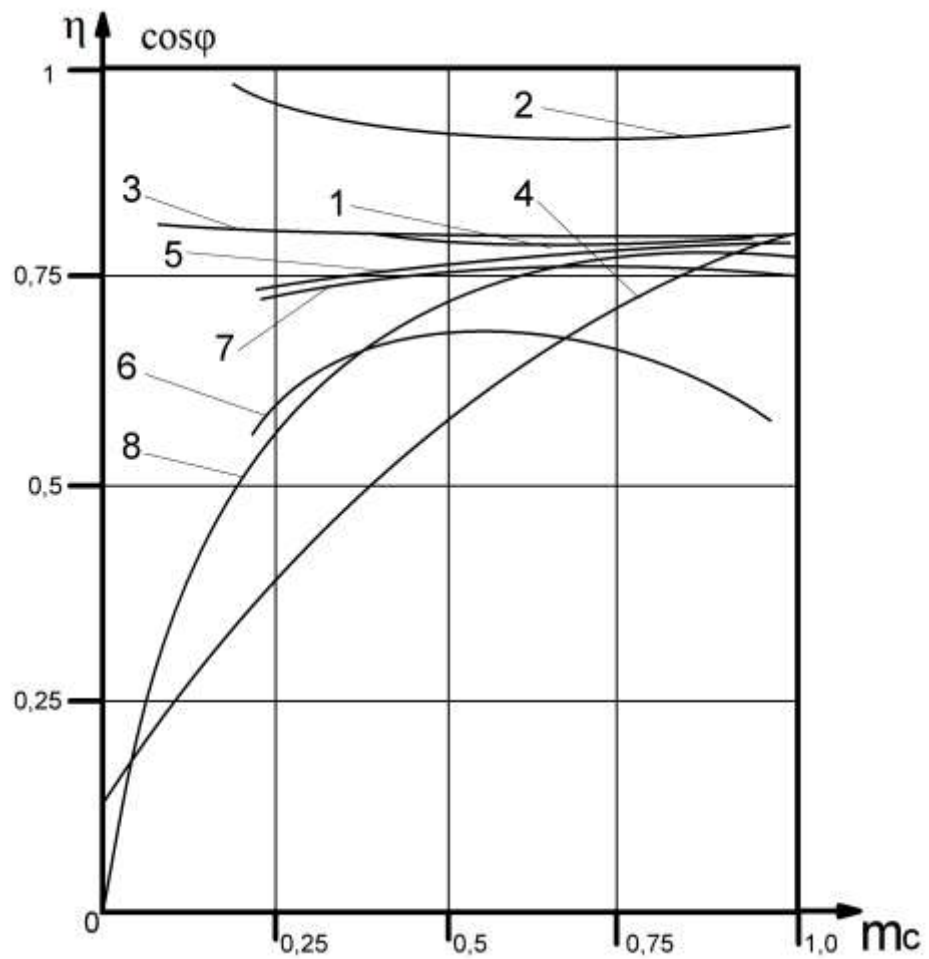


Рисунок 3.8 – Расчетные зависимости КПД и коэффициента мощности от нагрузки при алгоритмах определяемых по формулам: (3.3) - 1 и 5; (3.4) – 2 и 6; (3.5) – 3 и 7; при отсутствии регулирования 4 и 8.

Таблица 3.2 – Зависимости полученные при реализации оптимальных алгоритмов регулирования АД.

Зависимость	Оптимизирующий параметр	Алгоритм регулирования	Формула
1	$\cos \varphi$	КПД=max	3.2-3.3
2	$\cos \varphi$	$\cos \varphi = \max$	3.2-3.4
3	$\cos \varphi$	$\cos \varphi = \cos \varphi_n$	3.2-3.5
4	$\cos \varphi$	Регулирование отсутствует	3.2
5	КПД	КПД=max	3.1-3.3
6	КПД	$\cos \varphi = \max$	3.1-3.4
7	КПД	$\cos \varphi = \cos \varphi_n$	3.1-3.5
8	КПД	Регулирование отсутствует	3.1

При регулировании напряжения по максимальному коэффициенту (2) мощности КПД (6) значительно ниже, чем при других алгоритмах регулирования, однако в некоторых случаях, например для ряда автономных систем электроснабжения, такой алгоритм может оказаться выгодным.

Проверка на «опрокидывание» подтвердила, что наиболее целесообразно реализовывать алгоритм регулирования, поддерживающий $\cos \varphi = \cos \varphi_n$ (см. формулу (3.5)).

3.2 Оптимизация режимов работы электромеханических систем технологического оборудования циклического действия (на примерах угароочищающей УО-Ш и смесовой С12-М машин)

3.2.1 Разработка энергосберегающего варианта электропривода циклического действия.

В приложении В определены энергетические параметры и характеристики угароочищающей УО-Ш и смесовой С-12М машин циклического действия, необходимые для определения оптимальных режимов и обоснованных норм расхода электроэнергии.

Оптимизация режимов работы электроприводов позволяет снизить потребляемую мощность и габариты двигателя, всей системы электропривода в целом. Вопросы энергосбережения в электроприводах механизмов продолжительного и повторно-кратковременного режимов работы рассмотрены в [53]. В общем виде поставлена задача проектирования электропривода механизмов циклического действия, решение которой, в частности, может быть связано с оптимизацией его энергетических показателей.

Наиболее перспективным вариантом электропривода циклического действия является электропривод на основе асинхронного двигателя с фазовым управлением. Экономичные законы управления в пуско-тормозных режимах в сочетании с лучшими характеристиками асинхронного двигателя делают такой привод более эффективным, чем традиционные системы постоянного тока.

Разработанная теория электропривода механизмов циклического действия [54] ориентирована в основном на системы постоянного тока и поэтому в целом не может быть использована для электроприводом переменного тока. В частности, для оценки нагрева двигателя в цикле используется метод эквивалентного (среднеквадратичного) момента, который применим только при постоянстве магнитного потока машины. При фазном управлении в энергосберегающих режимах это условие не соблюдается, напротив, регулирование потока является способом оптимизации работы асинхронного двигателя. Кроме того, предложенная методика не позволяет учитывать явление ухудшения теплоотдачи двигателя в переходных процессах и при паузе, и поэтому её применение правомерно только для двигателей постоянного тока с принудительной вентиляцией и недопустимо для самовентилируемых асинхронных двигателей.

За основу предлагаемой методики проектирования и оптимизации асинхронного управляемого электропривода механизмов циклического действия приняты следующие положения:

1. в качестве варианта силового преобразователя рассматривается схема с шестью тиристорами, включенными встречно-параллельно в статорные цепи; фор-

мирование переходных режимов разгона и торможения осуществляется с использованием вертикального принципа управления по минимуму тока статора;

2. скоростная диаграмма движения рабочего вала механизма содержит участки пуска, установившегося движения, торможения и паузы. При этом величины времени цикла, работы и паузы известны. Момент сил статического сопротивления и момент инерции на входном валу механизма постоянны и не зависят от пути перемещения рабочего органа механизма. Механизм не содержит упругих связей. Моменты движущих сил, развиваемые двигателем на участках пуска и торможения, постоянны;

3. система «двигатель-редуктор-скоростная диаграмма» характеризуется относительными величинами (обобщенными координатами), используемыми в [55].

Теоретические исследования по построению методики выбора вариантов электропривода определены тремя этапами [56].

На первом этапе из уравнения движения электропривода получены уравнения, связывающие обобщенные координаты электропривода заданной производительности, из которых получены выражения для кратностей пускового и тормозного моментов двигателя.

При равенстве пускового и тормозного моментов:

$$k_{\Pi}=k_{T}=\frac{\left(v^2(1+j^2)+\sqrt{v^4(1+j^2)^2+4\tau_p^4(2v-1)^2\mu_c^2}\right)a^{0.5}}{2\tau_p^2(2v-1)j}=F(v,j)a^{0.5}.$$

При неравенстве пускового и тормозного моментов:

$$\begin{cases} k_{\Pi}=a^{0.5}/j\left(\frac{F(j,v)}{k_f+\mu_c}\right); \\ k_{T}=a^{0.5}/j\left(\frac{F(j,v)}{(1-k_f)-\mu_c}\right); \end{cases} \quad (3.13)$$

$$F(j,v)=\frac{v^2(1+j^2)}{2\tau_p^2(2v-1)},$$

где j , v - обобщенные координаты электропривода; μ_c - относительный момент сил статического сопротивления; τ_p - относительное время работы двигателя

ля; k_f - коэффициент формы скоростной диаграммы, равный отношению длительности пуска к общей длительности пуска и торможения:

$$k_f = \frac{\tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{п}} + \tau_{\text{т}}}.$$

На втором этапе из множества вариантов электропривода заданной производительности выделено подмножество, в котором двигатель полностью использован по нагреву.

При этом применялось известное уравнение теплового баланса в двигателе [35]:

$$\Delta P_{\text{н}} [k_a(t_{\text{п}} + t_{\text{т}}) + k_y t_y + k_b t_0] = Q_{\text{п}} + Q_y + Q_{\text{т}}, \quad (3.14)$$

где $\Delta P_{\text{н}}$ - мощность потерь в номинальном режиме; $t_{\text{п}}$, $t_{\text{т}}$, t_y , t_0 - соответственно длительности пуска, торможения установившегося движения и паузы; k_a , k_y , k_b - коэффициенты ухудшения теплоотдачи (по сравнению с номинальным режимом) при пуске (торможении), установившемся режиме и паузе; $Q_{\text{п}}$, $Q_{\text{т}}$, Q_y - потери энергии при пуске, торможении, установившемся режиме.

Потери энергии в двигателе на каждом участке представляются в виде произведения длительности промежутка времени соответствующего участка на мощность потерь (среднюю мощность потерь), которая в свою очередь выражается через кратность момента, развиваемого двигателем на данном участке.

На участках пуска и торможения АД, управляемого в соответствии с законом минимума тока, средняя мощность потерь может быть представлена:

$$\Delta P_{\text{п(т),средн.}} = \Delta P_{\text{н}} (k_1 k_{\text{п(т)}}^2 + k_2 |k_{\text{п(т)}}|), \quad (3.15)$$

где k_1 , k_2 - конструктивные постоянные двигателей серии 4А диапазона мощностей 10-100 кВт ($k_1=0,02$, $k_2=0,53$).

На участке установившегося движения принято допущение о постоянстве КПД машины в рассматриваемом диапазоне изменения частот и нагрузок, из которых следует, что потери:

$$\Delta P_y = \Delta P_{\text{п}} k'_c a, \quad (3.16)$$

где k'_c - кратность приведенного момента сил статического сопротивления, a – напряжение статора в относительных единицах.

Принимая, что значение коэффициента теплоотдачи изменяется линейно от k_b при $a=0$ до 1 при $a=1$, определяются значения данного коэффициента: при установившемся движении; среднее при пуске (торможении):

$$k_y = k_b + (1 - k_b)a, \quad (3.17)$$

$$k_\alpha = \frac{k_b + k_y}{2} = \frac{k_b + (1 - k_b)a}{2}. \quad (3.18)$$

Подставляя (3.29)-(3.32) в (3.28) и переходя к относительным единицам, а также учитывая (3.27), получим уравнения, связывающие обобщенные координаты системы (j, v) относительно, напряжение (a) и коэффициент формы скоростной диаграммы (k_f) электропривода заданной производительности, в котором двигатель полностью использован по нагреву:

1. при равенстве пускового и тормозного моментов:

$$\frac{k_b v}{\tau_p} + 0,5(1 - k_b)a = (1 - v)\mu_c a^{0,5} \frac{a}{j} + (2v - 1)(k_1 j^2 (v, j)a) + k_2 F(v, j)a^{0,5}, \quad (3.19)$$

2. при неравенстве пускового и тормозного моментов:

$$\frac{k_b v}{\tau_p} + 0,5(1 - k_b)a = (1 - v)\mu_c a^{0,5} \frac{a}{j} + (2v - 1) \times \left\{ \frac{k_2}{j^2} \left(\frac{F(v, j)}{(1/k_f^2) + \mu^2} \right) a + \frac{k_2 F(v, j)}{j} + k_f \mu_c + |F(v, j) - (1 - k_f)\mu_c| a^{0,5} \right\}. \quad (3.20)$$

Уравнения (3.33), (3.34) преобразуются к виду

$$a = f(v, j, \{k_f\}, \tau_p, \mu_c). \quad (3.21)$$

Выражение (3.35) определяет множество возможных вариантов электропривода. Зависимость $a = f(v, j)$ рассчитана для асинхронного электропривода с фазовым управлением при равенстве пускового и тормозного моментов, $a=1$, $\tau_p=0,4$, $\mu_c=3,3$, $k_b=0,4$, $k_1=0,2$, $k_2=0,53$ графически представлена на рис. 3.9.

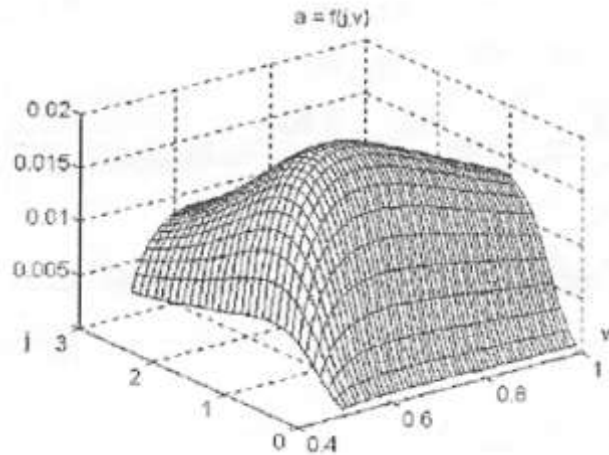


Рисунок 3.9 – График определения оптимальных обобщенных координат электропривода

На третьем этапе рассчитываются параметры электропривода, определяющие экстремум тому или иному критерию оптимизации. При этом величина, экстремум которой находится, выражается через обобщенные координаты системы (j, v) , напряжение (a) и коэффициент формы скоростной диаграммы (k_f) (в случае неравенства пускового и тормозного моментов). Поиск экстремума осуществляется на множестве возможных вариантов, которое определено уравнением (3.35).

Критерием оптимизации могут быть минимум габарита или мощности двигателя. Рассмотрена возможность оптимизации электропривода по критерию минимума потерь энергии в двигателе. Показано, что минимум данного критерия соответствует минимуму выражения:

$$q = \frac{jv}{a^{0.5} \tau_p} \left(\frac{k_b}{k_f} + 0,5(1-k_b) \frac{\tau_p}{v} \right).$$

и в общем случае совпадает с минимумом мощности двигателя.

Из-за сложности полученных выражений решение задач проектирования электропривода и его оптимизации возможно только с использованием численных методов на ЭВМ. Разработаны соответствующие алгоритмы и решения в среде MatLab для ПК.

Результаты расчетов позволили сделать следующие выводы:

1. погрешности в задании коэффициентов k_1 и k_2 мало влияют на выбор двигателя по мощности;
2. оптимизация по величине k_f целесообразна только при значительных моментах сил статического сопротивления, в других вариантах предпочтительно выбирать кратности пускового и тормозного моментов равными;
3. оптимальной относительной величиной напряжения (a) в конце разгона следует признать максимально допустимую величину ($a=1$ и более);
4. оптимизация по критерию минимума мощности двигателя и оптимизации по критерию минимума потерь дают очень близкие результаты.

По предлагаемой методике был проведен расчет вариантов электропривода для механизма смесовой машины С-12М на основе специальных асинхронных двигателей серии 4А (табл. 3.3). Расчет параметрического электропривода КПЭ производился при равенстве пускового и тормозного моментов и $a=1$. Критерий оптимизации – минимум мощности, развиваемой двигателем.

Таблица 3.3-Расчеты электропривода на основе ДПТ серии Д.

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Скорость вала в конце разгона, мин ⁻¹	Потери на цикл, %	Габариты, масса h/133/h31/m, мм, кг	Передаточное число редуктора
Д808	37,0	382	166	280/1206/562/885	1,3
Д806	22,0	716	121	250/1073/508/635	2,5
Д41	16,0	1146	119	250/1055/508/540	4

Таблица 3.4-Варианты электропривода на основе АД серии 4А.

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Скорость вала в конце разгона, мин ⁻¹	Потери на цикл, %	Габариты, масса h/133/h31/m, мм, кг	Передаточное число редуктора
4А200М8У3	18,5	7500	100	200/815/535/260	2,6
4А180М6У3	18,5	10000	100	180/735/470/190	4
4А160М4У3	18,5	15000	100	180/705/430/135	6

Результаты расчета в табл. 3.3 и 3.4. Потери энергии на цикл для трех приведенных вариантов управляемого асинхронного электропривода практически одинаковы и для сравнения с вариантами на основе ДПТ приняты за 100%.

Анализ вариантов таблиц показывает, что переход на управляемый асинхронный электропривод позволяет снизить мощность, габариты двигателя и потери энергии в нем при тех же значениях передаточного числа редуктора.

3.3 Влияние качества электроэнергии на работу технологического оборудования

Экспертные оценки влияния низкого качества электроэнергии на работу электрооборудования показывают, что ущерб, вызванный отклонениями частоты и величины напряжения, несимметрией напряжения и высшими гармоническими составляющими напряжения, составляет более 300 млрд. кВт·ч [57].

При использовании микропроцессорных регуляторов напряжения МРН 000 для поддержания заданного значения коэффициента мощности определение коэффициента мощности возможно после регулятора, где формы кривых тока и напряжения несинусоидальны. Так как нагрузка линий определяется прежде всего эффективностью потребления мощности из питающей сети, то коэффициент мощности целесообразно определять по выражению [58]:

$$\cos\varphi = P/S = K_u \cos\varphi_1,$$

где P - активная мощность по первой гармонике; S - полная мощность, потребляемая из сети; φ_1 - угол сдвига между первой гармоникой потребляемого тока и кривой напряжения питающей сети; K_u - текущее значение коэффициента нелинейных искажений.

Наиболее целесообразным является решение, не требующее измерение неявных величин ($\cos\varphi$), а обеспечивающее непосредственное измерение величины K_u [59]. В ОАО «РТИ им. А.Л. Минца» предложено устройство для авто-

матического измерения нелинейных искажений в электрических сетях общего назначения, в состав которого входит блок аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и персональный компьютер (ПК).

Измеритель нелинейных искажений (ИНИ) выполняет следующие функции:

- аналого-цифровые преобразования;
- низкочастотную цифровую фильтрацию с помощью программного фильтра низких частот в диапазоне от 0 до 2000 Гц;
- преобразование Фурье (ПФ), с помощью которого определяют действующие значения напряжения, частоты $f_1=50$ Гц и 39 гармонических составляющих U_n . В качестве базового алгоритма выбран алгоритм 2048-точечного ПФ на 8 периодах основной частоты электрической сети $f_1= 50$ Гц (256 отсчетов АЦП на 1 период частоты f_1) с использованием взвешивающей функции в виде «прямоугольного окна»;
- вычисление коэффициентов гармоник K_n ;
- вычисление коэффициента нелинейных искажений K_u ;
- фазовую автоматическую подстройку частоты (ФАПЧ) преобразования АЦП в случае девиаций основной частоты f_1 (48 - 52 Гц);
- частотную автоматическую подстройку частоты (ЧАПЧ) преобразования АЦП при большой девиации частоты, когда она находится вне пределов полосы захвата ФАПЧ.

В 1999 г. введен в действие стандарт ГОСТ 13109-97, который определяет обязательную номенклатуру показателей качества электрической энергии (КЭ) и устанавливает нормы, выполнение которых обеспечивает электромагнитную совместимость по кондуктивным электромагнитным помехам системы электропитания (ЭС) общего назначения и электрических сетей потребителей электрической энергии [60].

В обязательный перечень контролируемых Госэнергонадзором показателей КЭ входят коэффициент n -ной ($n=2,3,\dots,40$) гармонической составляющей контролируемого напряжения электрической сети K_n , в дальнейшем коэффициент гармоник (КГ) и K_u - коэффициент нелинейных искажений (КНИ).

Текущее значение коэффициента n-ной гармоники ($n=2,3,\dots,40$) определяют по формуле [61]:

$$K_n = (U_n / U_{скз}) \cdot 100\% , \quad (3.22)$$

где $U_{скз}$ - действующее значение напряжения основной частоты электрической сети $f=50$ Гц (без высших гармоник), В; U_n - действующее значение напряжения n-ной гармонической составляющей исследуемого напряжения основной частоты $50n$ Гц, В.

Текущее значение коэффициента нелинейных искажений исследуемого напряжения определяют по формуле:

$$K_u = \sqrt{\sum_{n=20}^{40} U_n^2 \frac{1}{U_1}} \cdot 100\% , \quad (3.23)$$

где U_1 - действующее значение первой гармоники.

Источниками нелинейных искажений в электрических сетях общего назначения являются нелинейные нагрузки, которыми являются электросварочное оборудование, мощное полупроводниковое выпрямительное оборудование и др.

Чтобы обеспечить требуемую согласно ГОСТу 13109-97 абсолютную погрешность измерения коэффициентов гармоник $K_n = \pm 0.05\%$, и относительную погрешность измерения коэффициента нелинейных искажений $K_u = \pm 10\%$, проведено исследование макета прибора с помощью соответствующей автоматизированной контрольно-измерительной аппаратуры (КИА).

Разработка эффективной (с точки зрения степени детализации, достоверности, точности и простоты) методики математического моделирования измерителя нелинейных искажений, которая обеспечивает выбор оптимального схемотехнического решения по критерию «точность - стоимость», актуальна и представляет практический интерес. Применение такой методики позволяет решить задачу создания прецизионного прибора на базе блока АЦП и ПК при минимальном объеме макетирования без привлечения дорогостоящей КИА.

Измеритель нелинейных искажений, разработан в соответствии с требованиями ГОСТа 13109-97 в части измерения коэффициентов K_n и K_u . В этом приборе все измерительные операции, включая частотную автоматическую подстройку

частоты (АПЧ) или фазовую АПЧ квантования, реализуются в цифровой форме (программно) с помощью персонального компьютера. В качестве первичного измерительного преобразователя используется прецизионный делитель напряжения и высокочастотный (с числом двоичных разрядов не менее 10) аналого-цифровой преобразователь (АЦП). На выходе АЦП формируется последовательность двоичных кодов $N(U_i)$, значения которых прямо пропорциональны мгновенным значениям фазного или межфазного напряжения исследуемой электрической сети U_i , где $i=1,2,\dots,N=512,1024,2048,\dots$ - фиксированное число анализируемых мгновенных значений исследуемого напряжения. Выходные коды АЦП, записанные в память ПК, являются входной исходной информацией для программной реализации алгоритмов измерения коэффициентов K_n и K_u с помощью соответствующей рабочей программы для ПК.

На основе методики, разработанной в ОАО «РТИ им. академика А.Л. Минца», проведено моделирование ИНИ в программной среде MathCad Plus 6.0 [62].

Входными сигналами модели ИНИ являются цифровые сигналы, формируемые программным генератором измерительных сигналов. Параметры этих сигналов заранее известны и вычисляются компьютером с высокой точностью с помощью соответствующей программы.

Выходными сигналами модели ИНИ являются измеренные значения K_n и K_u , вычисленные для определенных сочетаний параметров ИНИ, задаваемых оператором, которые влияют на точность измерения.

Основными результатами моделирования ИНИ являются погрешность измерений в абсолютной и относительной форме, рассчитанная с помощью модели ИНИ, действующее значение напряжения основной частоты $f_1=39$, погрешность измерений коэффициентов гармоник K_n и погрешность измерений коэффициента нелинейных искажений K_u .

Погрешности измерений K_n и K_u определяются прямым сопоставлением параметров гармонических составляющих образцового сигнала программного генератора измерительных сигналов (ГИС) с соответствующими значениями, измеренными моделью ИНИ.

Результаты моделирования ИНИ отображаются в виде отдельных значений, таблиц и соответствующих графиков в рамках возможностей графического интерфейса программной среды MathCad Plus 6.0.

Поскольку основополагающими для определения коэффициентов K_n и K_u являются измерительные сигналы (ИС) с образцовыми параметрами гармонических составляющих этих сигналов, которые формируют программный ГИС модели ИНИ, рассмотрим более подробно математические модели ИС, требуемые для определения конкретных значений параметров исследуемой модели ИНИ.

Математические модели измерительных сигналов. Рассмотрим математические модели измерительных сигналов, требуемых для измерения и контроля параметров и характеристик ИНИ.

Опишем обобщенную модель измерительного сигнала (ИС). Эта модель, имеющая вид $U_{\Sigma}(t)$, представляет собой сумму мгновенных значений n составляющих ИС, каждое из которых воспроизводится на отрезке времени $[0, T_{\phi}(n)]$, где $T_{\phi}(n)$ - продолжительность процесса формирования n -й составляющей ИС. Обобщенная модель ИС описывается следующим выражением:

$$U_{\Sigma}(t) = \sum_{n=1}^{40} a(n) [U_n(t)] \quad 0 < t < T_{\phi}(n), \quad (3.24)$$

где $n = 1, 2, \dots, 40$ - порядковый номер n -й составляющей ИС; $\{U_n(t)\}$ - n -ная составляющая ИС (одионый сигнал), представляющая собой гармоническое синусоидальное напряжение, которое воспроизводится на отрезке времени $[0, T_{\phi}(n)]$; $\alpha(n)$ - логическая переменная, принимающая значение, равное 1, если формируется n -ная составляющая ИС, которая входит в формулу (3.38), или значение 0, если n -ная составляющая сигнала не формируется.

Исследован состав линейной комбинации сигналов $[U_n(t)]$ для каждого конкретного варианта измерения или контроля параметров ИНИ. В работе для исследования параметров ИНИ используются следующие математические модели одионых сигналов, имеющих определённую длительность $T_{\phi}(n)$ и представляющих собой отрезок синусоидального напряжения:

- первая модель n-го одиночного ИС $[U_n(t)]_1$ с фиксированной амплитудой $A(n)$ и управляемой частотой $\omega(n)$; модель используется для исследования частотно-зависимых параметров ИНИ. Модель описывается следующим выражением:

$$[U_n(t)]_1 = U_n(\omega_n, t) = A_n \cdot \sin\left[\left(\omega_{\text{нач}} + \Delta\omega_n N_{\omega_n}\right) \cdot t\right]; \quad 0 < t < T_\phi(n), \quad (3.25)$$

где $\omega_{\text{нач}}$ - начальное фиксированное значение частоты ω_n ; $\Delta\omega_n$ - шаг перестройки частоты ω_n ; $N_{\omega_n} = 0, 1, 2, \dots$ - код управления частотой ω_n .

- вторая модель n-го одиночного ИС $[U_n(t)]_2$ с управляемой амплитудой $A(n)$ и фиксированной частотой $\omega(n)$. Модель используется для исследования амплитудно-зависимых параметров ИНИ и описывается следующим выражением:

$$[U_n(t)]_2 = U_n(A_n, t) = \left(A_{\text{нач}} + \Delta A_n N_{A_n}\right) \cdot \sin(\Delta\omega_n t); \quad 0 < t < T_\phi(n), \quad (3.26)$$

где $A_{\text{нач}}$ - начальное фиксированное значение амплитуды сигнала; ΔA_n - шаг перестройки амплитуды сигнала; $N_{A_n} = 0, 1, 2, \dots$ - код управления амплитудой A_n .

- третья модель n-го одиночного ИС $[U_n(t)]_3$ с управляемым фазовым сдвигом ϕ и фиксированными амплитудой $A(n)$ и частотой $\omega(n)$. Модель используется для исследования фазозависимых параметров ИНИ и описывается следующим выражением:

$$[U_n(t)]_3 = U_n(\varphi_n, t) = A_n \sin\left(\omega_n t + \varphi_{\text{нач}} + \Delta\varphi_n N_{\varphi_n}\right); \quad 0 < t < T_\phi(n), \quad (3.27)$$

где $\varphi_{\text{нач}}$ - начальное фиксированное значение фазового сдвига; $\Delta\varphi_n$ - шаг перестройки фазового сдвига; $N_{\varphi_n} = 0, 1, 2, \dots$ - код управления фазовым сдвигом.

- четвертая универсальная модель n-го ИС $[U_n(t)]_4$ с управляемыми амплитудой A_n , частотой $\omega(n)$, и фазовым сдвигом φ_n ; модель позволяет исследовать взаимозависимые параметры ИНИ, и описывается следующим выражением:

$$[U_n(t)]_4 = U_n(A_n, \omega_n, \varphi_n, t) = \left(A_{\text{нач}} + \Delta A_n N_{A_n}\right) \times \sin\left[\left(\omega_{\text{нач}} + \Delta\omega_n N_{\omega_n}\right)t + \varphi_{\text{нач}} + \Delta\varphi_n N_{\varphi_n}\right]. \quad (3.28)$$

Дискретные модели описанных выше одиночных измерительных сигналов формируются путём последовательного вычисления мгновенных значений функций (4.10) - (4.13) в дискретные моменты времени

$$t_k = 1 \cdot \Delta t, 2 \cdot \Delta t, \dots, k \cdot \Delta t, \dots, T_{\phi}(n)/M,$$

где M - число последовательно формируемых мгновенных значений одиночных ИС на отрезке времени $[0, T_{\phi}(n)]$.

Приведем характерные модели измерительных сигналов, используемых при исследовании ИНИ:

Сумма 40 гармонических составляющих с равными амплитудами (рис. 3.10):

$$u_k = \sum_{n=1}^{40} \sin(2\pi F_0 n T k).$$

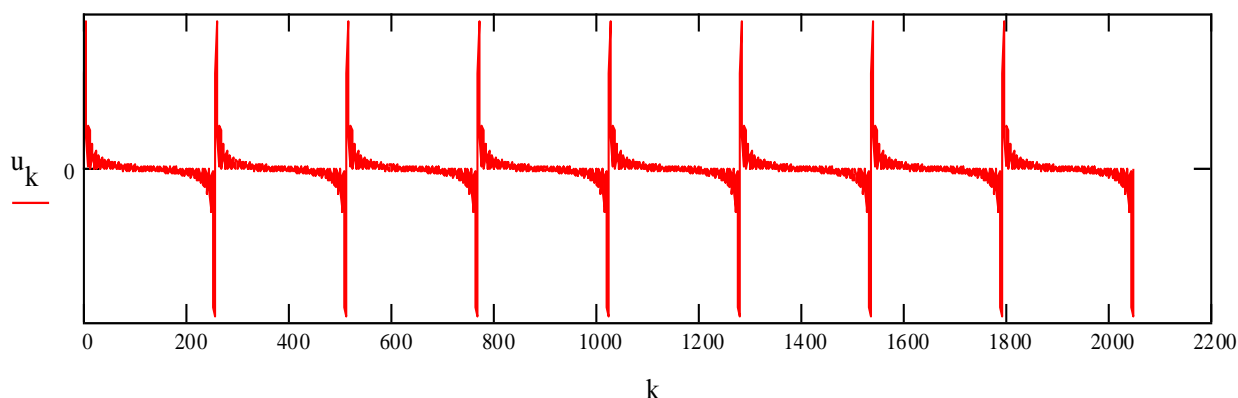


Рисунок 3.10 – Сумма 40 гармонических составляющих с равными амплитудами

Сумма трех гармонических составляющих (рис 3.11):

$$u_k = \sin(2\pi F_0 \cdot 10n T k) + \sin(2\pi F_0 \cdot 20n T k) + \sin(2\pi F_0 \cdot 30n T k).$$

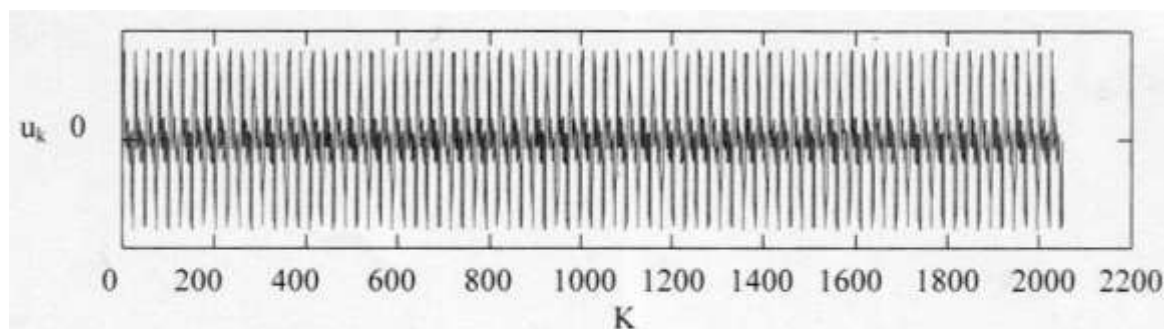


Рисунок 3.11 – Сумма трех гармонических составляющих

Сумма первой и сороковой гармонических составляющих с равными амплитудами (рис 3.12):

$$u_k = \sin(2pF_0Tk) + \sin(2pF_0 \cdot 40Tk).$$

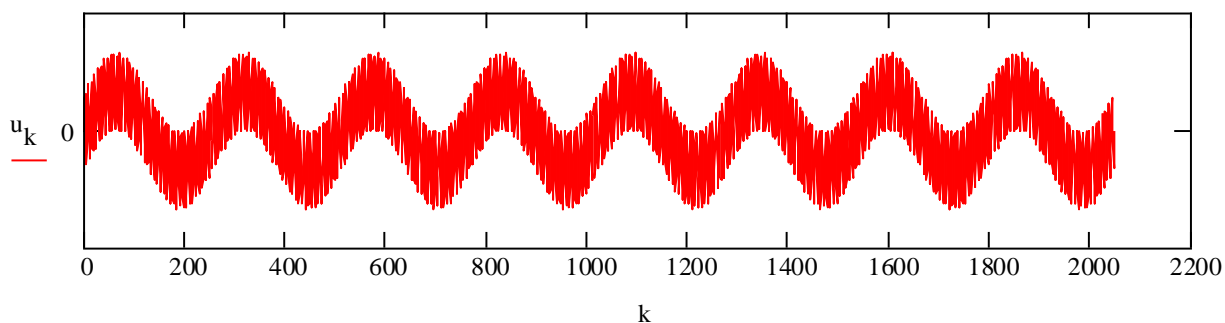


Рисунок 3.12 – Сумма первой и сороковой гармонических составляющих с равными амплитудами

Результаты исследования нелинейных искажений на разработанной математической модели. Ниже приведены результаты исследования измерителя НИ на разработанной математической модели, представляющие практический интерес. В частности, получены результаты анализа взвешивающих функций (весовых функций, функций «окна»), используемых при реализации алгоритмов, с помощью программного ГИС. Промоделирован процесс измерения амплитудно-частотной характеристики одиночных фильтров анализатора гармоник основной частоты электрической сети для характерных видов взвешивающих функций.

Проведен расчет влияния погрешности квантования АЦП с различным числом разрядов (8,10,12,14) на точность измерения коэффициентов гармоник.

Приведены оценки погрешностей измерителя НИ при отклонении текущего значения основной частоты исследуемой электрической сети от номинального значения $f_1=50$ Гц.

Анализ взвешивающих функций для быстрого преобразования Фурье и оценка их влияния на АЧХ одиночных фильтров измерителя нелинейных искажений. Идея использования весовой функции с целью изменения коэффициентов Фурье периодической функции для управления сходимостью этого ряда известна и основана на замене прямоугольного «окна», ограничивающего бесконечный

ряд, «окном» некоторой другой формы. Поскольку умножение коэффициентов Фурье на функцию «окна» соответствует свертыванию периодической функции с преобразованием коэффициента Фурье от функции этого «окна», то ставится задача определения такой функции «окна», преобразование коэффициентов Фурье которого имеет относительно малые боковые лепестки:

прямоугольное окно имеет преобразование Фурье в виде $\sin(x)/x$ с относительно большими боковыми лепестками (на 12-14 дБ основного лепестка);

треугольное «окно» имеет преобразование Фурье в виде $[(\sin x)/x]^2$ со значительно меньшими боковыми лепестками, которые затухают быстрее за счет двойной ширины центрального (основного) лепестка;

параболическое «окно» имеет преобразование Фурье вида $[(\sin x)/x]^3$, тройную ширину центрального «окна» и выброс 0,5%, т.е. затухание в полосе пропускания составляет 46 дБ. В этом случае боковые лепестки уменьшаются обратно пропорционально кубу расстояния от центрального лепестка.

Подавление пульсаций основывается на том факте, что они переменны по знаку. Если их наложить друг на друга с задержкой на одну пульсацию, то они будут компенсироваться. Функция окна, соответствующая этому варианту подавления пульсаций амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра, будет равна:

$$0,5(e^{-j\pi n/N} + e^{j\pi n/N}) = \cos[(\pi n) / N], \quad -0,5N \leq n \leq 0,5N$$

и равна нулю вне указанного интервала.

Если сформировать три копии АЧХ фильтра, раздвинутые на промежутки $2\pi/N$, причем центральная копия должна быть вдвое больше двух смежных копий, как следствие, пиковый выброс уменьшается до 0,5%, а пульсации спадают обратно пропорционально кубу их расстояния от точки разрыва. Соответствующая функция окна будет равна:

$$0,25(e^{-j\pi n/N} + e^{j\pi n/N}) = 0,5[1 + \cos[(2\pi n) / N]]$$

для значений n : $-0,5N \leq n \leq 0,5N$ и равна нулю вне указанного интервала.

Это окно известно как окно Хеннинга. Подобно примеру с окном вида $[(\sin x)/x]^3$, приведенному выше, окно Хеннинга обеспечивает затухание 44 дБ в полосе непропускания с пульсациями, спадающими со скоростью 60 дБ на декаду. Второй выброс составляет приблизительно 55 дБ.

В отличие от примера с окном вида $[(\sin x)/x]^3$ в примере с окном Хеннинга видно, каким образом можно дополнительно изменить веса 1/4, 1/2, 1, 4, чтобы увеличить затухание в полосе непропускания. Первые несколько выбросов не полностью компенсируются при вторичном их вычитании, потому что они не составляют линейную прогрессию (средний выброс всегда несколько меньше чем требуется). Для того, чтобы компенсировать выбросы, вес центрального выброса должен быть несколько увеличен, а веса крайних выбросов уменьшены. Откорректированные весовые коэффициенты, при которых существенно уменьшается первый выброс, составляют величины 0,22, 0,56, 0,22. Это хорошее приближение к функции окна Хэмминга, которое встречается на практике.

Дадим краткую характеристику функции окна Хэмминга.

Простой весовой функцией, которая имеет широкое практическое применение, является функция окна Хэмминга, определяемая следующим образом:

$$W(t) = \begin{cases} 0,54 + 0,46 \cos(\pi t / \tau), |t| \leq \tau \\ 0, |t| > \tau \end{cases}.$$

Почти вся энергия этой функции, а именно 99,96%, сосредоточена в полосе $|\omega| \leq 2\pi/\tau$, причем максимальная пиковая амплитуда боковых лепестков $W_h(j\omega)$ составляет меньше 1% амплитуды центрального пика. Дальнейший подбор весовых коэффициентов позволяет сбалансировать первые два выброса, доведя уровень затухания в полосе непропускания до 60 дБ.

Описанный подход можно развить и улучшить компенсацию выбросов, вызванных разрывом [63]. Дополнительные весовые коэффициенты имеют существенно меньшие значения как, например, в окне Блэкмана (0,04; 0,25; 0,42; 0,25; 0,04), и приводят к пятикратному увеличению переходной полосы фильтра и к увеличению уровня затухания в полосе непропускания до 87 дБ.

На практике используется семейство функций окна Кайзера:

$$W(t) = \begin{cases} J_0(\omega, \sqrt{\tau^2 - t^2}) / J_0(\omega, \tau), |t| \leq \tau \\ 0, |t| > \tau \end{cases}.$$

где J_0 - модифицированная функция Бесселя первого рода и нулевого порядка требует, чтобы точно выдерживались различия в весовых коэффициентах, с которыми накладываются друг на друга смежные аппроксимации разрыва. Это позволяет получить очень большие затухания в полосе пропускания в сочетании с переходными полосами минимальной ширины.

В качестве примера в табл. 3.5 приведены параметры АЧХ одиночных фильтров ИНИ для трех весовых функций при различном числе периодов $m = 8, 16, 32$, частоты $f=50$ Гц (число точек ПФ равно 2048, число разрядов АЦП равно 12).

Функция окна $Sinc^3$ представлена следующим образом:

$$Sinc^3 = \left(\frac{\sin[2p(k - 0,5k_{\max}) / k_{\max}]}{2p(k - 0,5k_{\max}) / k_{\max}} \right).$$

Амплитудно-частотные характеристики одиночных фильтров при прямоугольной функции окна и для функции окна Хеннинга приведены на рис. 3.13 для 2048-точечного ПФ. (Число периодов частоты $f = 50$ Гц равно 8).

Таблица 3.5 - Параметры АЧХ одиночных фильтров для ИНИ

Параметры	Число периодов, m								
	8			16			32		
	“Окно”								
	пря- мо- уго- льно е	Хен- нин- га	Sinc ³	пря- мо- уго- льное	Хен- нин- га	Sinc ³	пря- мо- уго- льно е	Хен- нин- га	Sinc ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ширина по- лосы пропус- кания фильт- ра по уровню минус 3дБ, Гц.	5,6	8,8	12	2,8	4,4	6	1,9	2,2	3
Ширина по- лосы пропус- кания фильт- ра по уровню минус 40дБ, Гц.	12	24	40	6	12	20	3	6	10
Отношение первого боко- вого лепестка к централь- ному минус 50дБ, Гц.	14	33	55	14	33	55	14	33	55

Выводы.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие результаты.

1. Приведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность существенного повышения энергетических показателей АД при изменении величины питающего напряжения. Понижение напряжения при нагрузке близкой к $0,7P_{ном}$ приводит к увеличению коэффициента мощности на 5-

11%, а КПД на 1-2%, а при нагрузке близкой к 0,2 коэффициента мощности на 37-40%, а КПД на 7-14%.

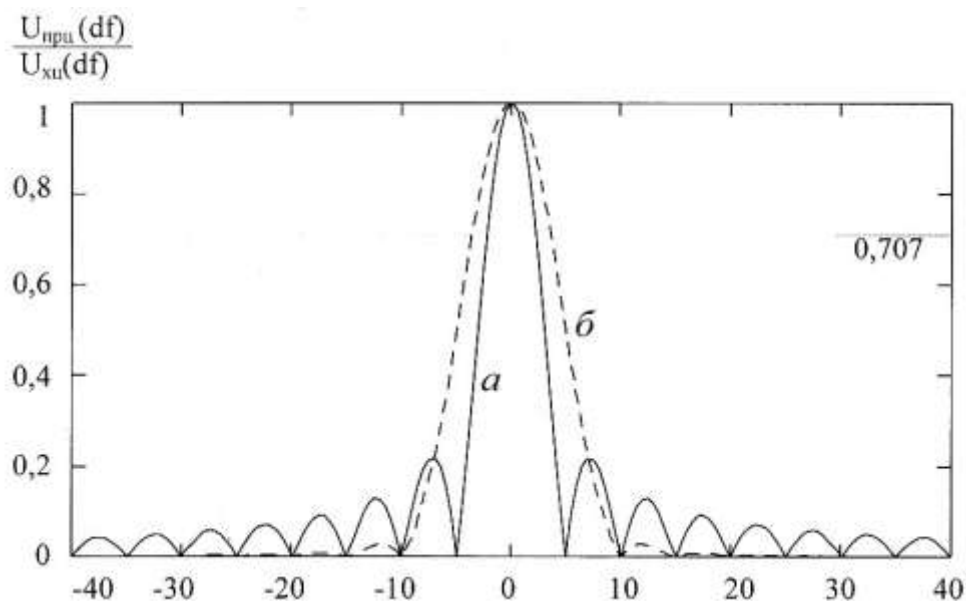


Рисунок 3.13 – АЧХ одиночных фильтров ИНИ: а – функция прямоугольного «окна»; б – функция «окна» Хеннинга.

2. Разработана математическая модель и программа расчета, позволяющая исследовать влияние питания АД на энергетические показатели двигателя при изменении нагрузки на валу.
3. Проведены расчеты ряда АД различной мощности и полюсности. Рассмотрены различные алгоритмы регулирования АД. Определены законы изменения напряжения питания АД для рассмотренных алгоритмов. Выявлен наиболее целесообразный алгоритм управления напряжением АД при изменении нагрузки.
4. Рассмотрено влияние несинусоидальности питающего напряжения на АД. Наблюдается снижение КПД от синусоидальности питающего напряжения на 4,5-5%. Следовательно, при рассмотрении конкретного электропривода необходимо определять целесообразность установки на него регулятора с учетом дополнительных потерь от несинусоидальности напряжения.
5. Оценена величина глубины регулирования при которой синусоидальная форма тока лежит в допустимых пределах. Этот диапазон регулирования

должен обеспечить работу регулятора при недогрузках до 30% от номинальной.

6. Проведен ориентировочный расчет экономии электроэнергии от внедрения регулятора напряжения. Отмечено, что целесообразно использовать данные регуляторы в электроприводах при нагрузке меньшей $0,6P_{\text{ном}}$.
7. Даны рекомендации по разработке и применению регуляторов напряжения для трехфазных АД.
8. Предложена методика расчета оптимальных режимов асинхронного электропривода с фазовым управлением для механизмов циклического действия.
9. Проведен расчет вариантов электроприводов постоянного и переменного тока для механизма циклического действия смесовой машины С-12М по критерию минимума потерь энергии в двигателе при равенстве пускового и тормозного моментов. Анализ исследуемых вариантов показал, что использование параметрического управляемого асинхронного электропривода КПЭ на базе специального двигателя серии 4А, позволяет снизить мощность, габариты двигателя и потери энергии в нем при тех же значениях передаточного числа редуктора.

Глава 4 Применение интеллектуальных методов и технологий для исследования сложных электромеханических систем технологического оборудования

4.1 Применение технологии нейронных сетей для разработки и исследования управляемого электротехнического комплекса с крутильно-мотальным механизмом

Существующие методы анализа и синтеза систем автоматического управления (САУ) электроприводами позволяют создавать системы с достаточно высокими показателями регулирования. Их практическая реализация сопряжена с рядом технических трудностей, к которым относятся измерения труднодоступных координат, например таких, как электромагнитный и упругий моменты [64].

С развитием нейросетевых технологий появилась возможность заменить применяемые линейные регуляторы нелинейными, которые при меньшем числе сигналов от измеряемых координат обеспечивали бы требуемое выходное управляющее воздействие для объекта регулирования. С этой целью возможна реализация нелинейного регулятора в виде нейроконтроллера [65], который представляет собой нейронную сеть, функционирующую по принципу биологических нейронов [66].

Повышение качества управления с использованием нейросетевых технологий обосновано следующими положениями [67]:

- нейросетевые модели рассматриваются как естественное развитие традиционной теории автоматического управления;
- нейронные сети способны обучаться на основе соотношения «вход-выход», поэтому они могут обеспечить более простые решения для сложных задач управления;
- нейронные сети имеют способность к самообучению, что исключает необходимость иметь большой объем информации для нейроконтроллеров и делает пригодными их для регулирования в условиях существенных неопределенностей;

– высокая степень параллелизма нейронных сетей позволяет реализовывать быстрые методы микропроцессорной обработки на основе использования нейронных кристаллов или параллельных аппаратных средств [68, 69].

Для описания устройств и алгоритмов функционирования искусственных нейронных сетей (ИНС) разработана специальная системотехника (сумматоры, синапсы, нейроны, дендриты), предусматривающая объединение простейших устройств в функционально ориентированные сети, предназначенные для решения конкретных задач. С точки зрения использования математики и ЭВМ, можно сказать, что ИНС – это динамическая система, состоящая из совокупности связанных между собой по типу узлов направленного графа элементарных процессов, называемых формальными нейронами, и способная генерировать выходную информацию в ответ на входное воздействие.

Для синтеза нейроконтроллера необходимо получить экспериментальные характеристики работы регулятора. Для их получения использована двухканальная структурная схема зоны транспортирования и наматывания волокнистого материала, представленная на рисунке 2.10. На вход системы подается тренировочный сигнал $U=U_{32}$ (рис. 4.1), далее с помощью блоков «To Workspace...» входные и соответствующие выходные сигналы системы записываем в память компьютера. Анализируя выходные сигналы, заменяем незначительные колебания напряжения, стараясь получить эталонный сигнал, при котором достигаются наилучшие характеристики системы. В результате моделирования получаем тренировочный шаблон, который содержит: напряжения на входе ΔU и на выходе $U_{\text{АД}}$ асинхронного двигателя (АД); напряжения на входе ΔU_2 и на выходе $U_{\text{ДПТ}}$ регулятора мощности двигателя постоянного тока (ДПТ).

Для синтезирования нейроконтроллеров создадим нейронную сеть (НС), используя расширение математической среды Matlab – пакет Neural Network Toolbox [70] (в дальнейшем NNTools). В графическом интерфейсе NNTools выбираем структуру желаемой НС с видом активационных функций нейронов скрытого и выходного слоев. В качестве тренировочных данных используем данные напряжений из тренировочного шаблона.

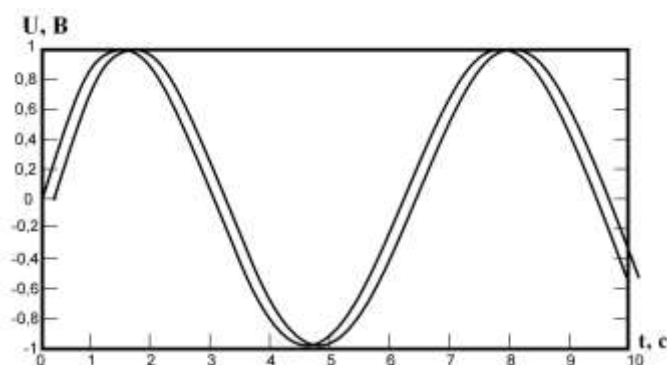


Рисунок 4.1 – График тренировочного сигнала

На рисунке 4.2 представлена структурная схема синтезируемой нейронной сети. Нейронная сеть регулятора напряжения и регулятора мощности состоит из одного скрытого слоя с четырьмя нейронами, входного и выходного слоев. В качестве входных сигналов для системы регулятора напряжения и мощности соответственно используются: управляющие сигналы U и U_{32} , сигналы датчиков частоты вращения $U_{дч4}$, $U_{дч5}$ и натяжения волокнистого материала $U_{дч7}$. Нейроны входного слоя ретранслируют входные сигналы на скрытый слой, не преобразуя их.

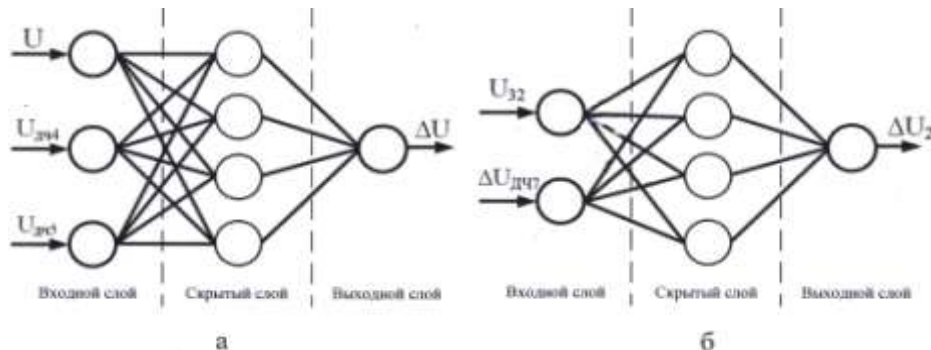


Рисунок 4.2 – Структурные схемы нейронной сети в системах регулятора напряжения (а) и регулятора мощности (б)

Нейроны скрытого слоя имеют логистическую активационную функцию, а выходного слоя – линейную. В скрытом слое происходит нелинейное преобразование сигналов с последующей передачей на нейроны выходного слоя, которые формируют реакцию сети в виде управляющих сигналов для регулятора напряжения (ΔU) и регулятора мощности (ΔU_2).

Тренировка НС осуществляется по алгоритму обратного распространения ошибки согласно схеме, представленной на рисунке 4.3. Для оценки качества работы сети служит минимум интегрально-квадратичной ошибки.

Процесс обучения заканчивается, когда удастся настроить сеть так, чтобы величина минимума интегрально-квадратичной ошибки (H) не превышала некоторую величину одновременно для всех совокупностей входных сигналов. Зависимость изменения H от числа эпох (Θ) при обучении нейронного регулятора АД представлена на рисунке 4.4.



Рисунок 4.3 – Схема обучения нейроконтроллера при помощи алгоритма обратного распространения ошибки

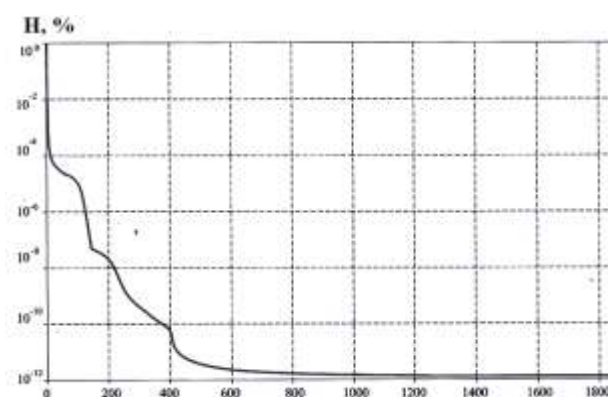


Рисунок 4.4 – Зависимость изменения интегрально-квадратичной ошибки (H) от количества эпох (Θ) при обучении нейронного регулятора АД

В результате тренировки нейроконтроллеры получают способность вырабатывать последовательность воздействий, переводящих объект из произвольного начального состояния в заданное состояние за конечное число шагов. На рисунке 4.5 представлены переходные процессы, полученные в результате работы системы транспортирования и наматывания волокнистого продукта в математической среде Matlab (рис. 4.6).

Полученные характеристики (рис. 4.5) указывают на допустимое использование НС в качестве регуляторов двухдвигательного электропривода исследуемой электромеханической системы.

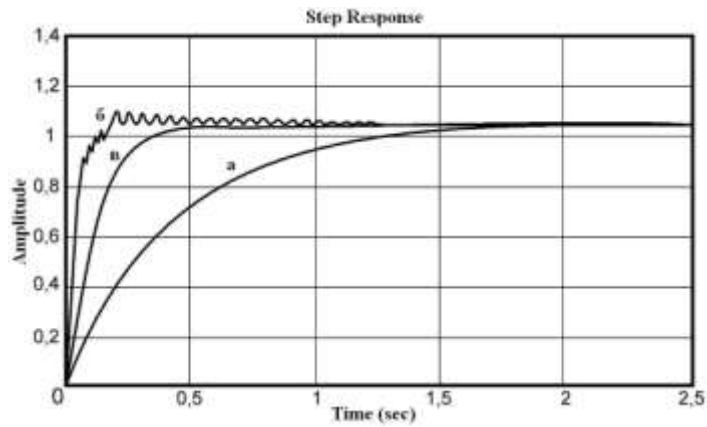


Рисунок 4.5 – Переходный процесс в зоне транспортирования и наматывания волокнистого материала: а – без НС, б – с НС, обученной на данных из тренировочного шаблона, в – с НС, обученной на реальных данных

При использовании НС происходит значительное повышение быстродействия. Колебательность переходного процесса (рис. 4.5, кривая б) говорит о недостаточном обучении сети. Для устранения колебаний необходимо проводить обучение на реальных данных, т.е. тренировать сеть на конкретную задачу. Результаты такой тренировки представлены на рисунке 4.5, кривая в.

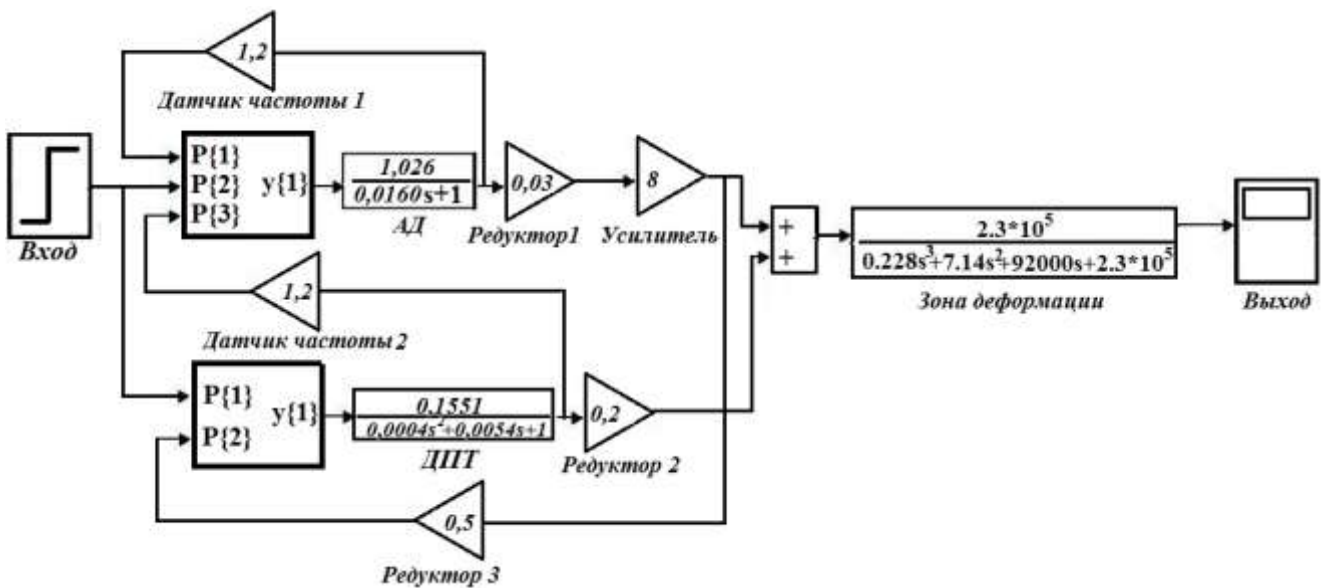


Рисунок 4.6 – Структурная схема зоны транспортирования и наматывания волокнистого материала с нейроконтроллерами в среде Matlab

В отдельных случаях необходимо повысить количество нейронов в скрытом слое НС и производить обучение с более высокой точностью на разнообразных обучающих выборках.

4.2 Исследование системы автоматического регулирования электромеханического комплекса с крутильно-мотальными механизмами с использованием технологии нейронных сетей

4.2.1 Постановка задачи экспериментального исследования

Для исследования транспортирующих и крутильно-мотальных механизмов на кафедре автоматики и промышленной электроники ФГБОУ ВПО «МГУДТ» разработаны функциональная схема лабораторного многодвигательного электропривода (рис. 4.7) и его физическая модель для проведения экспериментов (рис. 4.8). Лабораторный стенд смонтирован на базе однофазного тиристорного преобразователя ПТО-230-50, микропроцессорного регулятора напряжения МРН000, двигателя постоянного тока ПБСТ-43 и асинхронного комплектного параметрического электропривода КПЭ.

При экспериментальном исследовании систем автоматического регулирования сложных электромеханических систем с крутильно-мотальными механизмами важнейшим условием является получение информации об основных регулируемых параметрах, которыми являются момент нагрузки и частота вращения вала двигателя.

При построении замкнутых систем регулирования современных устройств, имитирующих нагрузку, следует решать вопрос об использовании датчиков нагрузочного момента, обладающих высокой точностью измерения момента и дающих информацию о мгновенном его значении [71].

Одним из подходов к измерению момента является использование нейронных сетей для формирования момента электрической машины. Этот метод относится к методам косвенного измерения. Точность таких датчиков зависит от того, насколько точная использовалась модель двигателя, или от класса точности прибора, используемого для снятия данных для обучающей выборки [72].

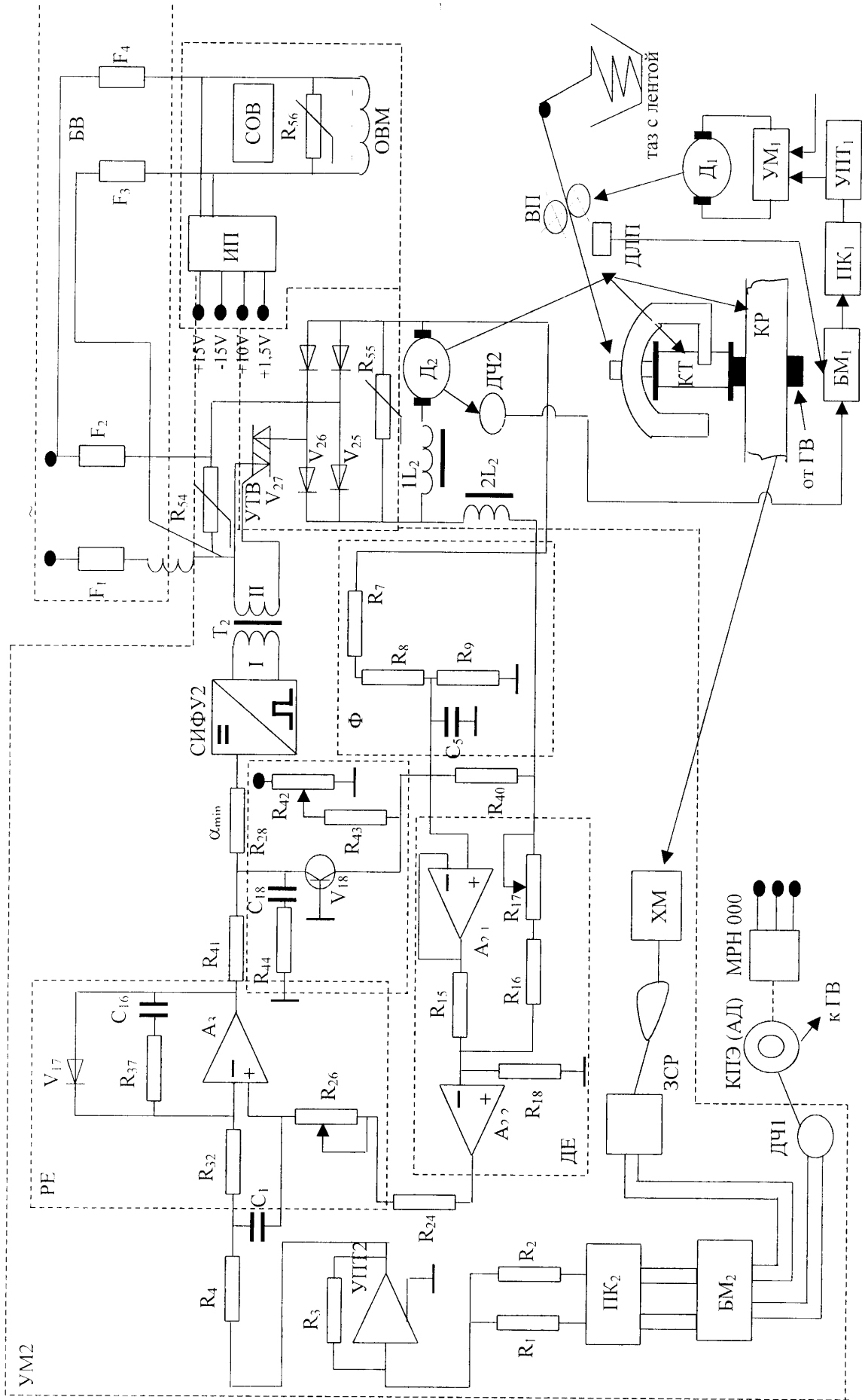


Рисунок 4.7 – Функциональная схема лабораторного стенда многодвигательного электропривода с микропро-
цессорным регулятором напряжения

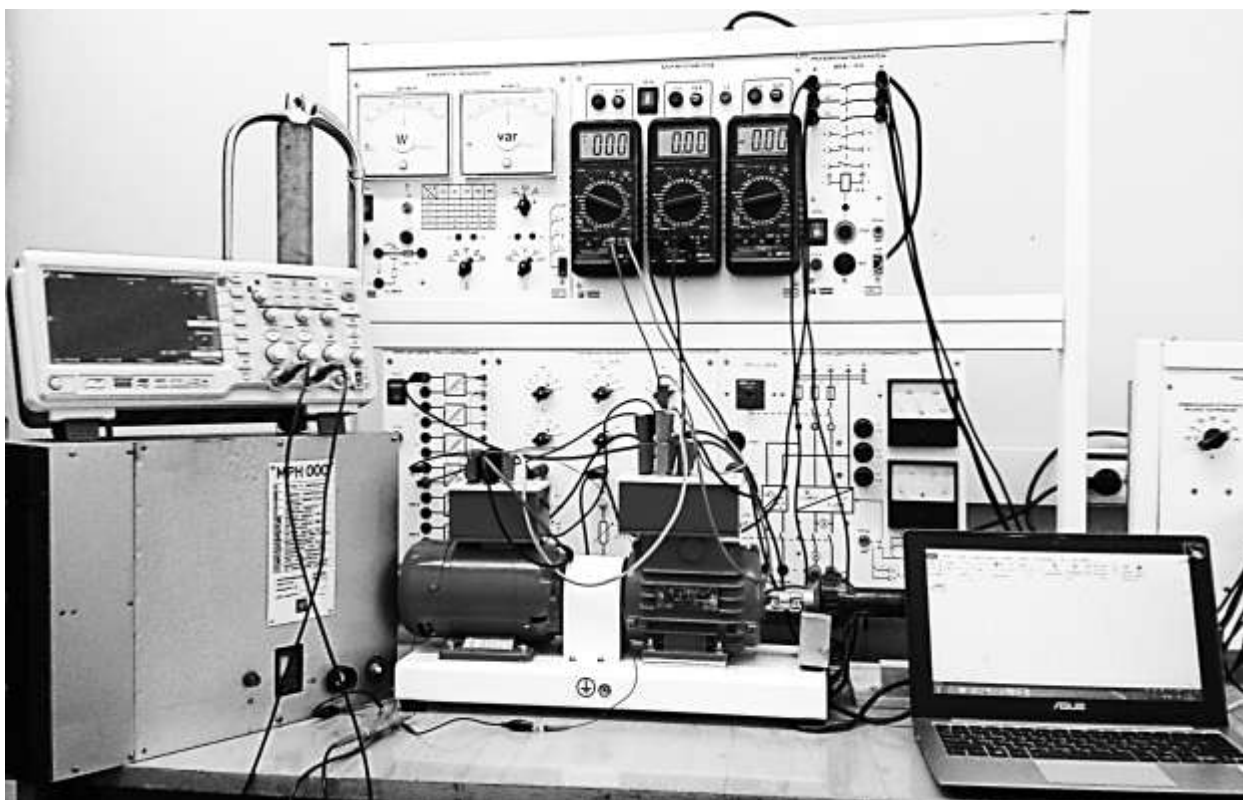


Рисунок 4.8 – Лабораторный стенд многодвигательного электропривода с микропроцессорным регулятором напряжения MPH000

Поставлена задача исследовать принципиальную возможность создания датчика момента двигателя постоянного тока (ДПТ). Следовательно, необходимо построить нейронную сеть и обучить ее на данных ДПТ таким образом, чтобы на выходе сети формировался момент ДПТ и значение этого момента было близко к (желаемому) моменту двигателя. Ошибка сети должна быть минимальна и при обучении, и при тестировании.

Для обучения сети необходимо иметь обучающую выборку, которая должна состоять из входных и соответствующих им выходных координат. Выходной координатой является момент, который может быть выражен с помощью тока I , напряжения U и частоты вращения ω , являющимися входными координатами:

$$M = P/\omega = UI/\omega. \quad (4.1)$$

Смоделируем ДПТ независимого возбуждения. Так как задача ограничивается исследованием принципиальной возможности формирования момента ДПТ с помощью нейронной сети, модель двигателя является приближенной.

4.2.2 Модель ДПТ независимого возбуждения

Исходные данные однофазного тиристорного преобразователя типа ПТО-230-50. Преобразователь предназначен для питания ДПТ мощностью 0,7-11 кВт. Основным назначением преобразователя является питание якорной цепи ДПТ с номинальным напряжением сети 220 В в замкнутых системах автоматического регулирования с обратной связью по частоте вращения. Обратная связь осуществляется с помощью тахогенератора, установленного на валу двигателя. Регулирование производится плавно от нуля до номинального значения. Преобразователь обеспечивает диапазон регулирования скорости двигателя до 1:200. При данных условиях работы преобразователь обеспечивает следующие технические характеристики привода:

- точность поддержания установленной частоты вращения ДПТ при изменении момента нагрузки от холостого хода до номинальной нагрузки – не более 1% при использовании тахогенераторов с крутизной характеристики не менее 0,062 В/мин;
- время восстановления частоты вращения ДПТ при набросе-сбросе нагрузки в пределах от 20% до 100% от номинальной – не более 0,2 с;
- возможность ограничения зоны регулирования частоты вращения ДПТ с помощью редукторов;
- возможность регулирования выходного напряжения в пределах от нуля до номинального значения при подаче на вход системы импульсно-фазового управления от источника постоянного тока сигнала от 0 до 5 В.

Исходные данные ДПТ независимого возбуждения типа ПБСТ-43 приведены в приложении Д. Регулировочная характеристика тракта управления тиристорного преобразователя представляет собой зависимость выходного напряжения от напряжения управления:

$$u_d = F[a(u_y)] = f(u_y), \quad (4.2)$$

где u_d , u_y – соответственно выходное напряжение тиристорного преобразователя и напряжение управления.

Для однофазной схемы преобразователя

$$u_d = \frac{1}{\lambda} \int_{\alpha_{\min}}^{\pi} U_m \sin(\omega t) d(\omega t), \quad (4.3)$$

где λ – интервал проводимости; α – угол открытия тиристоров; U_m – амплитудное значение напряжения; $\lambda_{\max} = \pi = 180^\circ$; $\alpha_{\min} = 35^\circ 18'$; $U_m = 380$ В;

$$u_d = U_m / \pi \cdot (\cos \alpha_{\min} - \cos \pi) = U_m / \pi \cdot (\cos \alpha + 1), \quad (4.4)$$

$$u_d = \sqrt{2} / \pi \cdot U_c (\cos \alpha + 1), \text{ при } \alpha > \alpha_{\min}, U_c - \text{напряжение сети.}$$

На графике функции выпрямленного напряжения (рис. 4.9) пунктирной линией показано среднее значение выпрямленного напряжения.

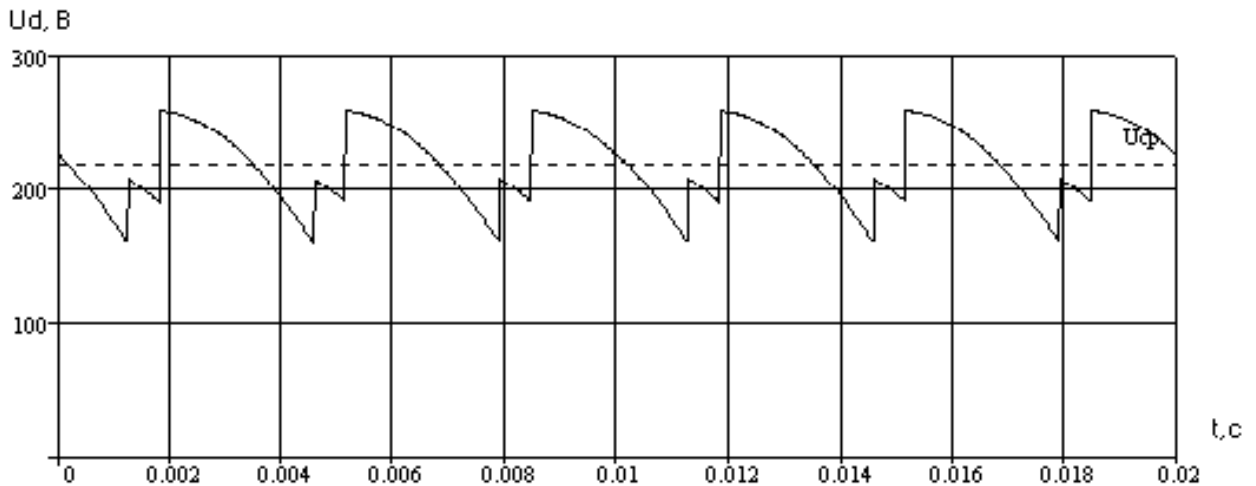


Рисунок 4.9 - График функции выпрямленного напряжения

Зная функцию выпрямленного напряжения, можно моделировать ДПТ независимого возбуждения.

Моделирование ДПТ независимого возбуждения. ДПТ описывается системой дифференциальных уравнений, решив которую можно получить мгновенные значения характеристик двигателя. При моделировании не учитываются колебание магнитного потока и влияние его на момент двигателя.

Выделим основные уравнения, описывающие электромагнитные процессы в ДПТ:

– уравнение якорной цепи

$$u_d(t) - e(t) = R_{\text{я}} i_d(t) + L_{\text{я}} di_d(t) / dt, \quad (4.5)$$

где $u_d(t)$ – мгновенное значение выпрямленного напряжения; $e(t)$ – ЭДС двигателя; $R_{\text{я}}$ – активное сопротивление якорной цепи; $i_d(t)$ – мгновенное значение тока якоря; $L_{\text{я}}$ – индуктивность якорной цепи;

– уравнение ЭДС двигателя

$$e(t) = c\omega(t), \quad (4.6)$$

где c – постоянный коэффициент ЭДС ДПТ; $\omega(t)$ – значение частоты вращения якоря двигателя.

Подставив уравнение (4.6) в уравнение (4.5), получим:

$$u_d(t) - c\omega(t) = R_{\text{я}} i_d(t) + L_{\text{я}} di_d(t) / dt; \quad (4.7)$$

– уравнение движения

$$Jd\omega(t) / dt = M(t) - M_c, \quad (4.8)$$

где $M(t)$ – мгновенное значение момента двигателя, которое можно записать:

$$M(t) = c_m i_d(t). \quad (4.9)$$

где c_m – постоянный коэффициент момента ДПТ.

Подставив выражение (4.9) в выражение (4.8), получим:

$$Jd\omega(t) / dt = c_m i_d(t) - M_c. \quad (4.10)$$

Решив уравнения (4.7) и (4.10) относительно первых производных, получим систему из двух дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_d(t)}{dt} = \frac{1}{L_{\text{я}}} [u_d(t) - c\omega(t) - R_{\text{я}} i_d(t)]; \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} (c_m i_d(t) - M_c). \end{cases} \quad (4.11)$$

Дифференциальные уравнения (4.11) описывают динамику ДПТ без учета влияния колебаний напряжения на характеристики двигателя. Эта система имеет множество решений, которые зависят от начальных условий. После моделирования получим мгновенные значения напряжения на якоре, значения тока

якоря, частоты вращения двигателя и момента двигателя для использования при обучении и тестировании нейронной сети.

Смоделируем систему в трех режимах.

Режим 1. Пуск ДПТ независимого возбуждения на номинальное напряжение. Нулевые начальные условия:

$$\begin{cases} i_d(0) = 0; \\ \omega(0) = 0. \end{cases} \quad (4.12)$$

Режим 2. Установившийся режим работы двигателя. Начальные условия:

$$\begin{cases} i_d(0) = I_n; \\ \omega(0) = \omega_n. \end{cases} \quad (4.13)$$

Режим 3. Пуск ДПТ независимого возбуждения при изменении напряжения от нуля до номинального значения. Нулевые начальные условия:

$$\begin{cases} i_d(0) = 0; \\ \omega(0) = 0. \end{cases} \quad (4.14)$$

Режим 1. Пуск осуществляется на номинальное напряжение с номинальным моментом нагрузки. Случай нереальный, так как при пуске на номинальное напряжение происходит бросок тока. Пусковой ток для двигателей постоянного тока должен ограничиваться $2 \div 2,5$ номиналами [73]. Это ограничение накладывается конструкцией двигателей.

Результаты моделирования первого режима приведены ниже в виде графиков (рис. 4.10).

Ток якоря резко возрастает до 8 номиналов, так как частота вращения вала двигателя равна нулю (4.6), следовательно, ЭДС двигателя так же равна нулю (4.7). При возрастании частоты вращения увеличивается ЭДС двигателя и ток падает, что можно увидеть на рисунке 4.10 а и в. Система приходит в установившийся режим. Момент изменяется так же, как и ток, так как связан коэффициентом двигателя, т.е. пропорционален току (4.9).

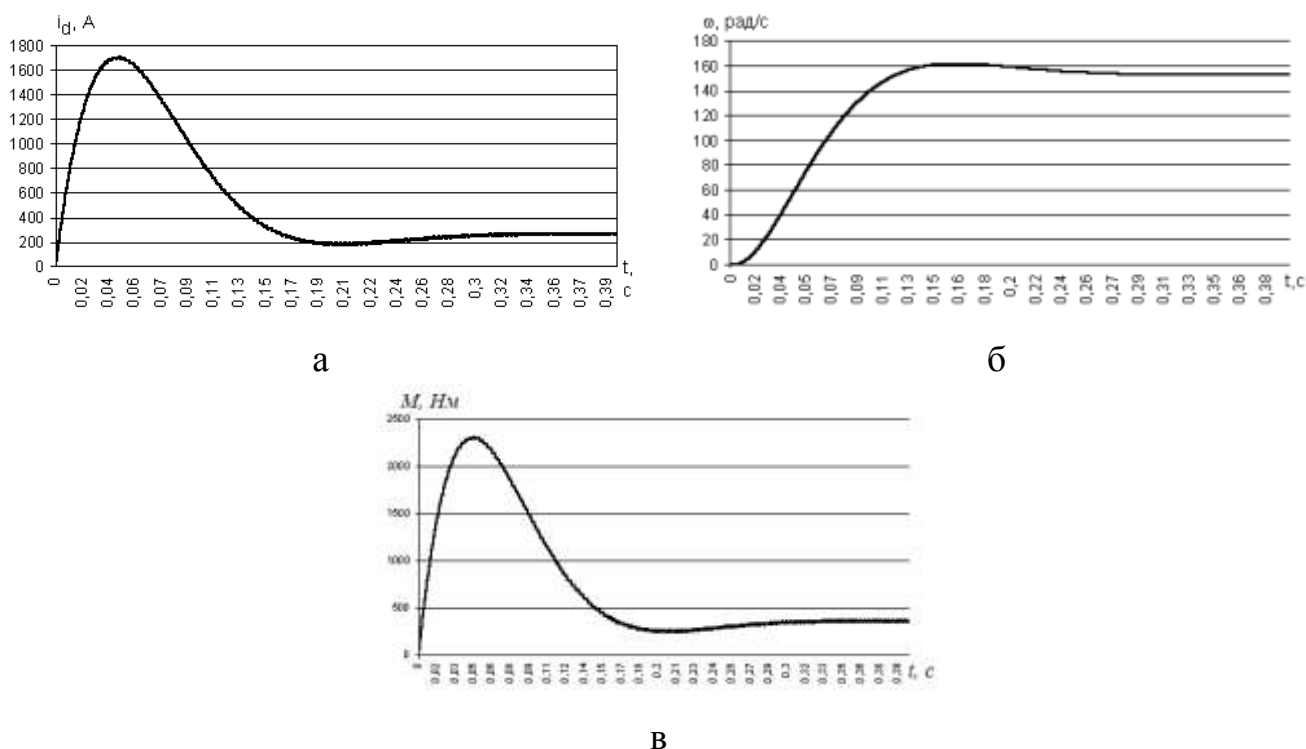


Рисунок 4.10 – Изменения а - тока якоря, б - частоты вращения якоря, в - момента двигателя при пуске на номинальное напряжение

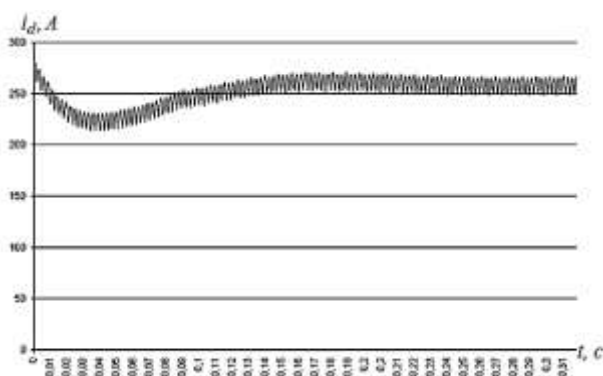
Режим 2. Установившийся режим можно получить, решая систему дифференциальных уравнений с номинальными начальными условиями (4.13). Это долговременный режим работы двигателя с номинальным моментом нагрузки. Результат моделирования установившегося режима представлен ниже в виде графиков (рис. 4.11).

Начальное колебание тока (рис. 4.11а), частоты вращения (рис. 4.11б) и момента (рис. 4.11в) связано с несовершенством метода решения системы дифференциальных уравнений.

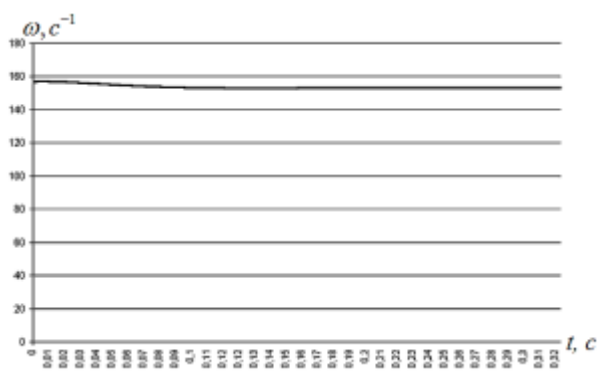
Режим 3. Пуск осуществляется на изменяющееся напряжение от нуля до номинального значения с номинальным моментом нагрузки.

Изменение напряжения происходит за счет изменения угла управления, который изменяется по линейному закону от $\pi/2$ до значения, при котором среднее значение выпрямленного напряжения будет равно номинальному напряжению двигателя:

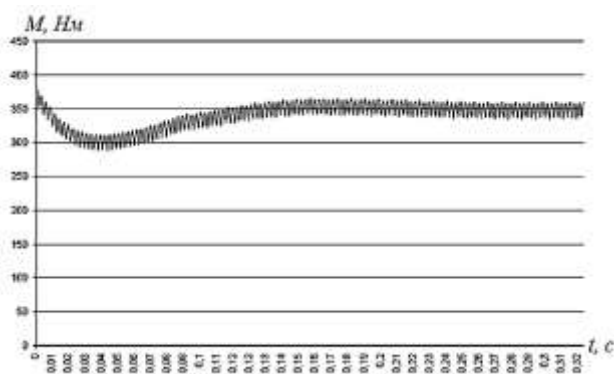
$$\alpha(t) = (\alpha - \pi / 2) / (0,5t) + \pi / 2. \quad (4.15)$$



а



б

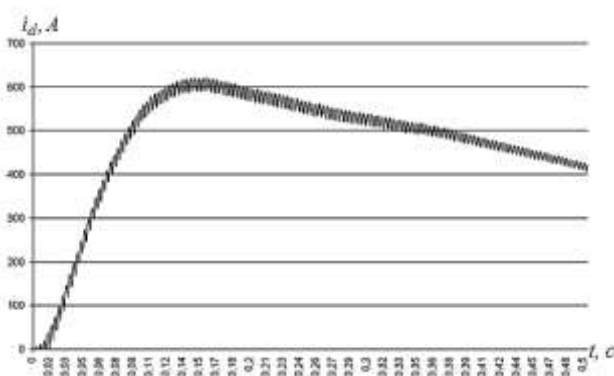


в

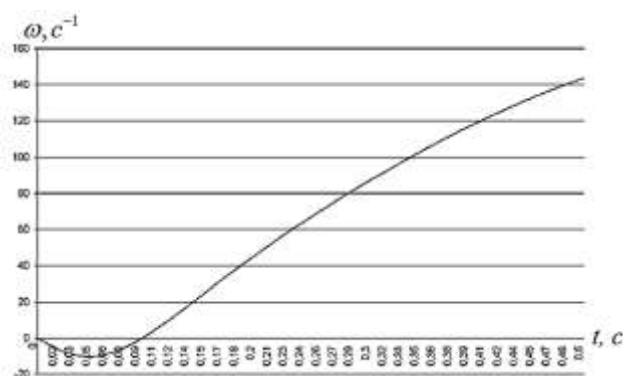
Рисунок 4.11 – Изменения а - тока якоря, б - частоты вращения якоря, в - момента двигателя в установившемся режиме

При таком изменении напряжения пусковой ток соответствует $2 \div 2,5$ номинальным значениям. Результаты моделирования этого режима приведены в виде графиков (рис. 4.12).

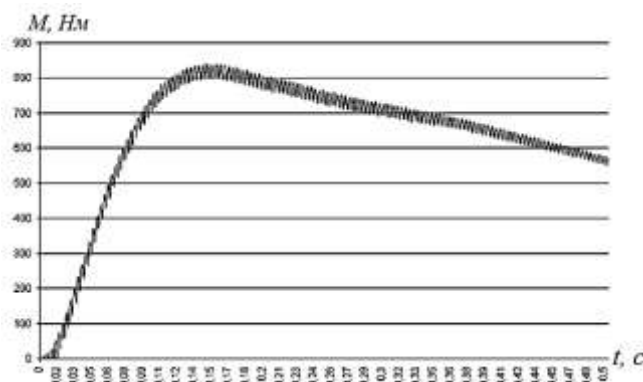
Ток (рис. 4.12а) плавно увеличивается примерно до двух номиналов и выходит на установившееся значение. Частота вращения плавно возрастает от 0 до номинала (рис. 4.12б). Провал частоты вращения в период времени от 0 до 0,01 с происходит из-за того, что в модели задан активный момент сопротивления. По уравнению движения (4.8), пока момент двигателя меньше момента сопротивления, производная по скорости отрицательна и с нулевыми начальными условиями частота вращения отрицательна. Когда момент двигателя сравняется с моментом сопротивления, частота вращения начнет выходить из отрицательного значения в положительное значение.



а



б



в

Рисунок 4.12 – Изменения а - тока якоря, б - частоты вращения якоря, в - момента двигателя в пусковом режиме при изменяющемся угле управления

Создание нейронной сети. Данные, полученные при моделировании двигателя (см. рис. 4.10-4.12), используются для обучения и тестирования нейронной сети.

Первый этап при создании нейронной сети – выбор структуры сети и функции активации каждого нейрона сети. Не существует точных правил определения структуры сети. Есть лишь доказанное правило, что лучшее средство для аппроксимации – это трехслойная нейронная сеть, причем, чем больше нейронов в скрытом слое, тем ближе выход сети к желаемому значению [74]. Каждый исследователь определяет структуру сети путем перебора нескольких структур и основываясь на своем личном опыте. Выбор функции активации связан с перебором нескольких вариантов. Для аппроксимации нелинейных функций в большей степени подходят S-образные функции активации: сигмоид, симметричный логарифмоид и др.

В данном случае выбираем трехслойную нейронную сеть с одним скрытым слоем и в качестве функции активации – симметричный логарифмоид. Количество нейронов определим в процессе обучения.

Второй этап – выбор алгоритма обучения и режима, данные которого будут использоваться для обучения. Выбор оптимального варианта связан с перебором всех возможных вариантов [74]. Обучить сеть на данных установившегося режима является самым простым режимом, при этом сеть будет обучаться с меньшим количеством итераций за меньшее время. Принято, что сеть надо обучать на данных сложного режима. В качестве последующей работы сети важно количество образцов в обучающем множестве. Чем больше примеров, тем успешнее будет обучаться сеть, но тем продолжительнее будет ее обучение, и наоборот.

Третий этап – тестирование сети. При тестировании определяется способность сети к обобщению, т.е. определяется ошибка, которую сеть дает на данных тестирующего множества. На этом этапе и происходит выбор оптимального варианта.

Для обучения выберем два подхода: первый – обучение на данных установившегося режима (см. рис. 4.11), второй – обучение на данных пускового режима с изменяющимся напряжением (см. рис. 4.12). И в том, и в другом случае будем использовать в качестве алгоритма обучения алгоритм обратного распространения ошибки.

4.2.3 Нейронная сеть, обученная на данных установившегося режима

В процессе выбора оптимальной структуры нейронной сети, обучаемой в рамках первого подхода, осуществлялся перебор нескольких вариантов структур. Лучшие результаты получили на трехслойной сети с одним скрытым слоем со структурой: 3 элемента во входном слое, 6 нейронов в скрытом и 1 нейрон в вы-

ходном (рис. 4.13). В качестве функции активации каждого нейрона был выбран симметричный логарифмоид.

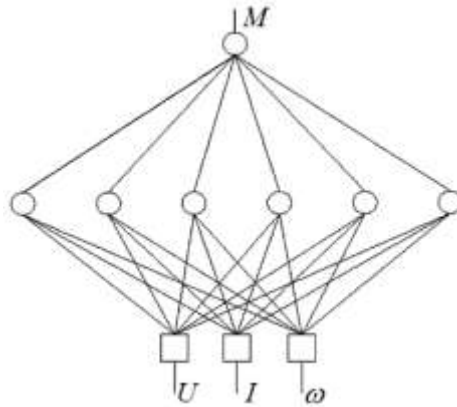


Рисунок 4.13 - Структура нейронной сети, обучаемой на данных установившегося режима

Процесс обучения проводился по данным установившегося режима (режим 2). Обучение проходило в 1148 итераций. График изменения среднеквадратичной ошибки (СКО) от номера итерации приведен на рисунке 4.14.

В процессе обучения получены следующие значения ошибки, Н·м:

средняя..... $5,6 \cdot 10^{-4}$;
 максимальная..... $4,4 \cdot 10^{-3}$;
 среднеквадратичная..... $7,6 \cdot 10^{-4}$.

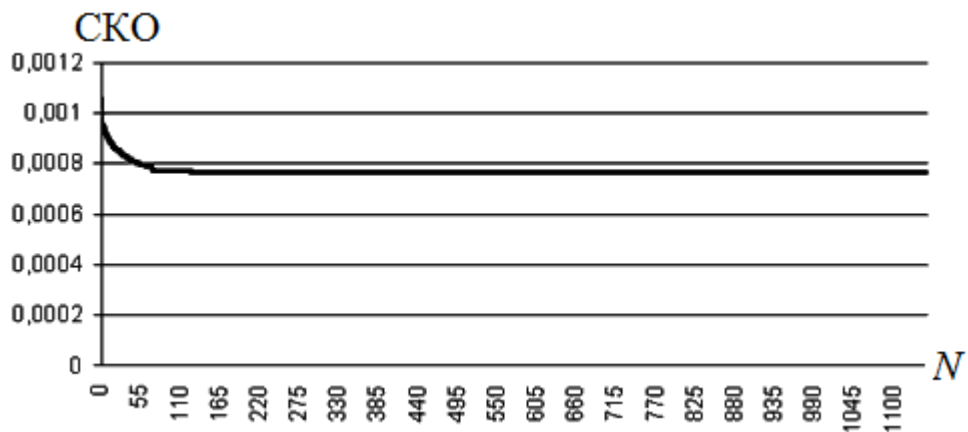


Рисунок 4.14 - Изменение среднеквадратичной ошибки в процессе обучения

В процессе обучения были получены удовлетворительные результаты по точности. Чтобы подтвердить эти результаты, необходимо провести тестирование, так как в процессе тестирования определяется соответствие обученной нейронной сети требованиям по точности.

Тестирование проводилось на данных пускового режима с изменяющимся напряжением (режим 3). Для тестирования была создана тестирующая выборка из 2000 образцов. Графики изменения момента формируемого нейронной сетью $M(net)$ и смоделированного момента режима 3 $M(des)$ представлены на рисунке 4.15.

Как видно из рис. 4.15, ошибка, полученная при тестировании, оказалась очень большой, причем она вызвана не структурой сети и не характеристиками нейронов, а обучающей выборкой. Данные в обучающей выборке не давали представления, как вести должна себя нейронная сеть в случае нулевых значений входных координат. Этим объясняется неправильная отработка сетью этих данных.

В процессе тестирования были получены следующие значения ошибки, Н·м:

средняя.....89,8;

максимальная.....297.

График изменения абсолютной ошибки, представленный на рисунке 4.16, является дополнением к рисунку 4.15 и иллюстрирует результаты, полученные при тестировании. Из результатов тестирования можно сделать следующий вывод: нейронная сеть не удовлетворяет требованиям по точности и нормально работает

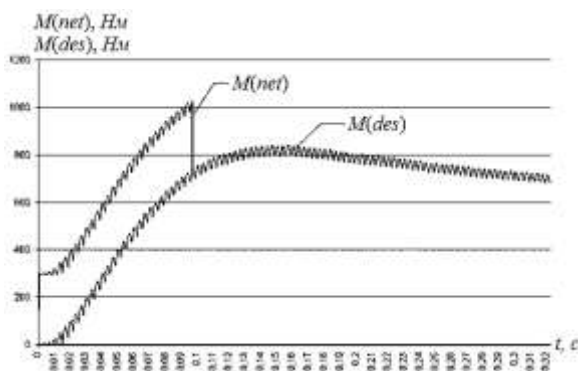


Рисунок 4.15 - Изменение момента, формируемого нейронной сетью $M(net)$, и смоделированного момента $M(des)$

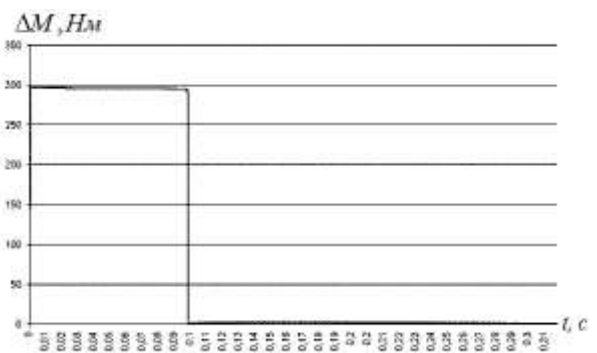


Рисунок 4.16 - Изменение абсолютной ошибки нейронной сети, обученной на установленном режиме (режим 2), при тестировании на пусковом режиме с изменяющимся напряжением (режим 3)

только в установленном режиме. Необходимо обучить сеть на более сложном режиме.

4.2.4 Нейронная сеть, обученная на данных пускового режима с изменяющимся напряжением

Так же, как и в предыдущем варианте, оптимальная структура нейронной сети, обучаемой в рамках второго подхода, выбиралась из нескольких вариантов. Наилучшие результаты показала трехслойная сеть с одним скрытым слоем со структурой: 3 элемента во входном слое, 8 нейронов в скрытом слое и 1 нейрон в выходном слое (рис. 4.17). В качестве функции активации каждого нейрона также был выбран симметричный логарифмоид.

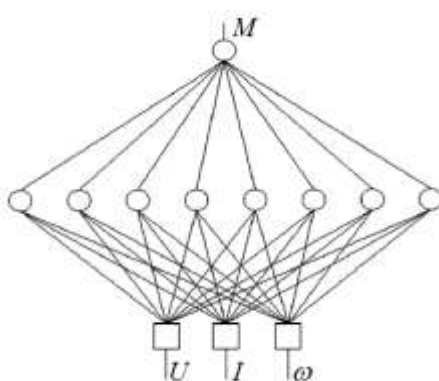


Рисунок 4.17 - Структура нейронной сети, обучаемой на данных пускового режима с изменяющимся напряжением

Процесс обучения проводился на данных пускового режима с изменяющимся напряжением (режим 3). Обучение проходило в 362 итерации. График изменения СКО от номера итерации приведен на рис. 4.18.

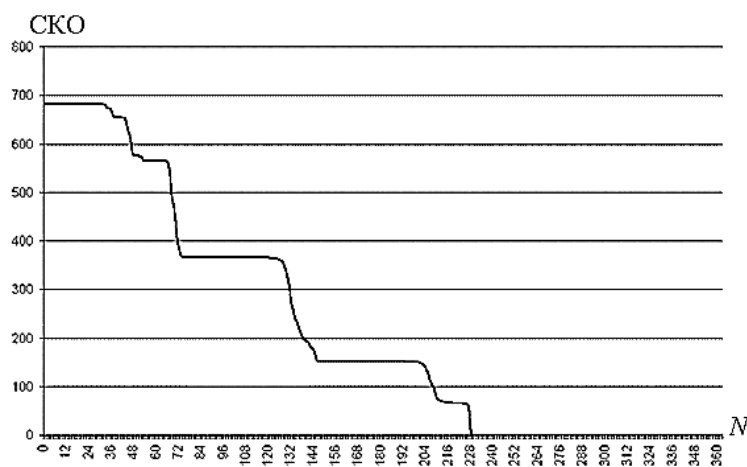


Рисунок 4.18 - График изменения среднеквадратичной ошибки в процессе обучения

В процессе обучения получены следующие значения ошибки, Н·м:

средняя.....	$6,78 \cdot 10^{-6}$;
максимальная.....	$7,85 \cdot 10^{-5}$;
среднеквадратичная.....	10^{-5} .

В процессе обучения были получены удовлетворительные результаты по точности. Чтобы подтвердить эти результаты необходимо провести тестирование. Тестирование проводилось на данных установившегося режима (режим 2). Для тестирования была создана тестирующая выборка из 2000 образцов.

В процессе тестирования получены следующие значения ошибки, Н·м:

средняя.....	$6,5 \cdot 10^{-4}$;
максимальная.....	$8 \cdot 10^{-4}$.

Графики момента, формируемого нейронной сетью $M(net)$, и смоделированного момента режима 2 $M(des)$ практически совпали (рис. 4.19). График изменения абсолютной ошибки представлен на рис. 4.20.

Получен ожидаемый результат. Сеть, обученная на сложном режиме, будет хорошо проходить тестирование на более легком режиме. Поэтому логично будет требование протестировать эту же сеть на другом режиме. Был смоделирован режим пуска на номинальное напряжение (режим 1), графики характеристики которого приведены на рис. 4.10. Это не реальный режим из-за восьмикратного броска тока при пуске, и поэтому для тестирования необходимо выбрать участок графиков характеристик, где ток отвечает требованию менее $2 \div 2,5$ номинала.

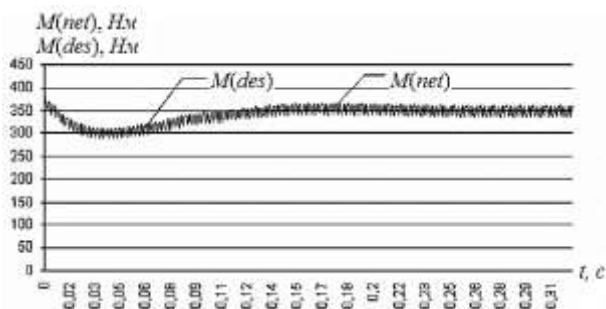


Рисунок 4.19 - Изменение момента, формируемого нейронной сетью $M(net)$, и смоделированного момента в установившемся режиме $M(des)$

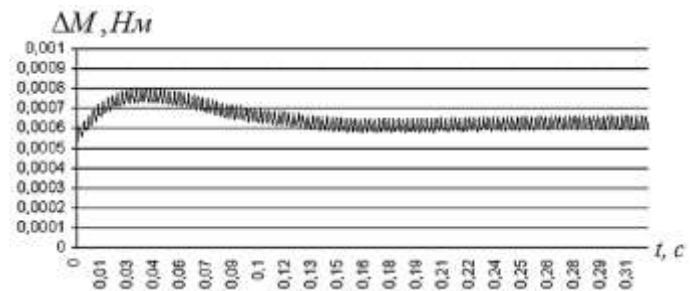


Рисунок 4.20 - Изменение абсолютной ошибки нейронной сети, обученной на данных режима 3, при тестировании на установившемся режиме (режим 2)

Для тестирования на данных режима пуска на номинальное напряжение выбрали тестирующее множество, состоявшее из 1250 образцов, во временном интервале 0,1-0,3 с на графиках, изображенных на рис. 4.10.

В процессе тестирования были получены следующие значения ошибки, Н·м:
 средняя $3,3 \cdot 10^{-3}$;
 максимальная $8,1 \cdot 10^{-2}$.

Графики изменения момента, формируемого нейронной сетью $M(net)$, и смоделированного момента режима 1 $M(des)$ так же, как и в предыдущем тестировании, практически совпали, как видно из рис. 4.21. График изменения абсолютной ошибки представлен на рис. 4.22.

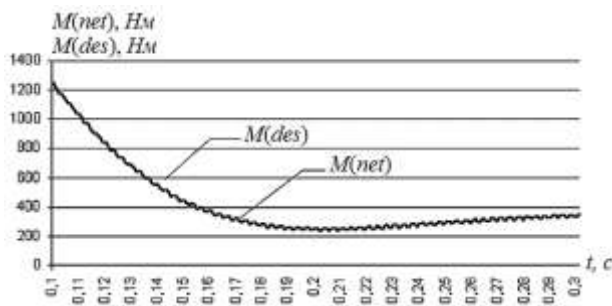


Рисунок 4.21 - Изменение момента, формируемого нейронной сетью $M(net)$, и смоделированного момента $M(des)$

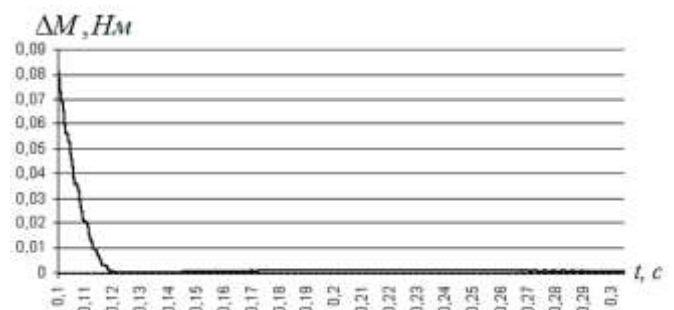


Рисунок 4.22 - Изменение абсолютной ошибки нейронной сети, обученной на данных режима пуска на номинальное напряжение (режим 1)

Из результатов тестирования можно сделать следующий вывод: нейронная сеть удовлетворяет требованиям по точности и нормально работает как в пусковом, так и в установившемся режиме.

Характеристики второй сети, т.е. сети, обученной на данных режима пуска с изменяющимся напряжением, вполне удовлетворительные. Для реализации нейронной сети необходимо знать структуру сети, весовые коэффициенты и функцию активации каждого нейрона. Весовые коэффициенты для нейронной сети, обученной на данных режима пуска на изменяющееся напряжение, для скрытого и выходного слоев приведены соответственно в приложениях А2 и А3 (отсчет элементов нейронной сети ведется слева направо).

4.3 Моделирование и анализ качества переходных процессов в нечеткой системе управления электроприводом сновальной машины

Для исследования сложных динамических объектов технологического оборудования в последние годы все больший интерес находят технологии искусственного интеллекта в системах управления электроприводами, в частности применение нечётких алгоритмов регулирования. Регуляторы, построенные на базе этой инновационной концепции, в ряде случаев способны обеспечить более высокие показатели качества переходных процессов по сравнению с классическими регуляторами. Кроме того, используя технологию синтеза нечётких алгоритмов управления, возможно провести оптимизацию сложных контуров регулирования без проведения всесторонних математических исследований [75].

Автором проведен сравнительный анализ основных показателей качества переходного процесса для классической двухкратноинтегрирующей системы (рис.1.3) и нечеткой системы управления однодвигательным электроприводом управлением сновальной машины с целью выявления преимуществ и недостатков последней. Построены две модели систем управления: классическая двухконтурная система стабилизации скорости «Двигатель постоянного тока – Управляемый выпрямитель» (ДПТ-УВ) с ПИ-регулятором и система стабилизации ДПТ-УВ на основе нечеткого регулятора скорости. Моделирование систем стабилизации и анализ переходных процессов осуществлялся с помощью среды моделирования Matlab Simulink [76].

В качестве данных для расчета применялись технические характеристики лабораторной установки, разработанной на кафедре автоматики и промэлектроники МГУДТ (рис.4.8). После проведения необходимых математических расчетов и выбора оптимальных передаточных функций за основу была принята функциональная схема двухконтурной системы стабилизации скорости ДПТ-УВ с последовательной коррекцией, представленная на рис.4.23.

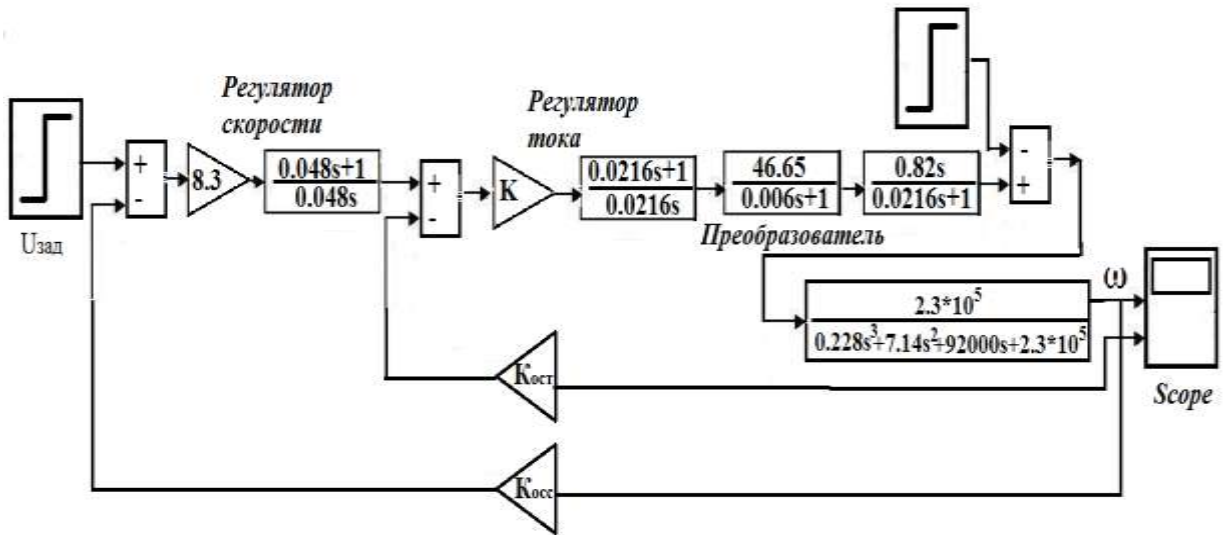


Рисунок 4.23 – Функциональная схема двухконтурной системы стабилизации скорости ДПТ в среде моделирования Matlab Simulink

Для получения графиков переходных процессов на основе модели классической системы стабилизации скорости был проведен следующий опыт. Имеющиеся в составе построенной модели стандартные блоки системы Matlab - генераторы ступенчатого сигнала Step, которые в данном случае выполняют роль задающего сигнала и нагрузки, позволяют изменять свои величины в заданный момент времени. Благодаря этому, исследуемая модель запущена в работу со следующими условиями:

1. Система запускается с сигналом задания $U_{\text{зад}} = 10$ о.е. и под нагрузкой $I_{\text{наг}} = 50$ о.е.
2. В момент времени $t = 7,5$ с сигнал задания уменьшается вдвое.
3. В момент времени $t = 15$ с момент нагрузки возрастает.

При заданной настройке всех параметров системы, ее реакция по скорости на отмеченные выше скачки сигнала задания и нагрузки представлена на рисунке 4.24.

Далее была построена модель системы стабилизации скорости ДПТ-УВ на основе нечеткого регулятора. Основные принципы моделирования нечеткого регулятора скорости, при помощи пакета расширения Fuzzy Logic Toolbox, для системы ДПТ-УВ приведены в работе [77].

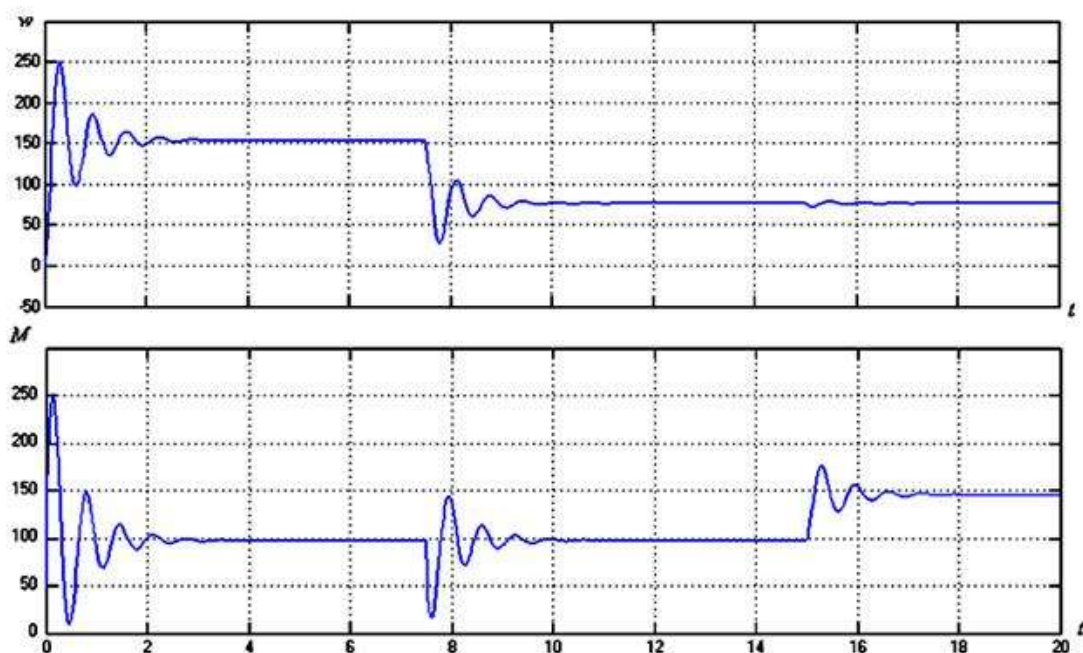


Рисунок 4.24 - График переходных процессов классической системы стабилизации скорости

Модель системы стабилизации скорости ДПТ-УВ с нечетким регулятором, построенная с помощью среды моделирования Matlab Simulink, представлена на рисунке 4.25. Переходные процессы, полученные с помощью данной модели, приведены на рис. 4.26.

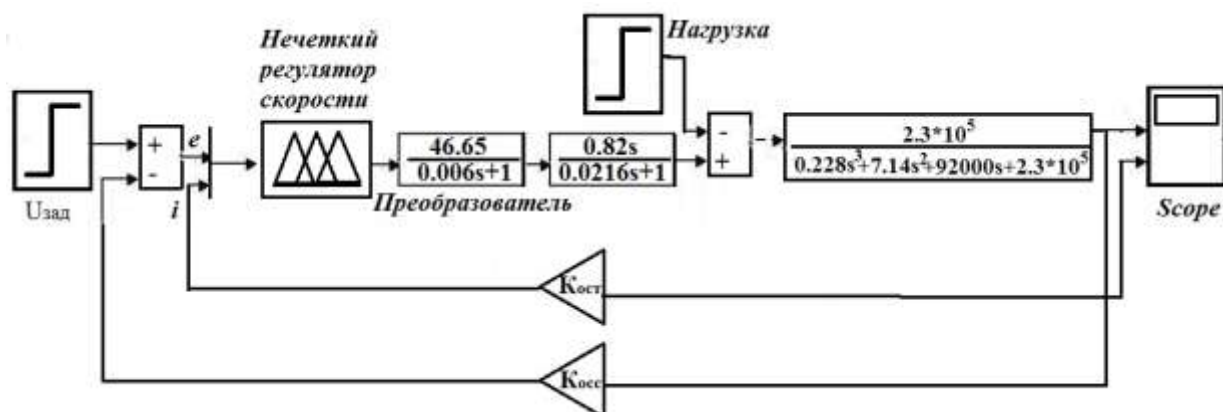


Рисунок 4.25 – Модель системы стабилизации скорости ДПТ с нечетким регулятором

Далее проводился сравнительный анализ основных показателей качества переходных процессов по полученным графикам для построенных моделей.

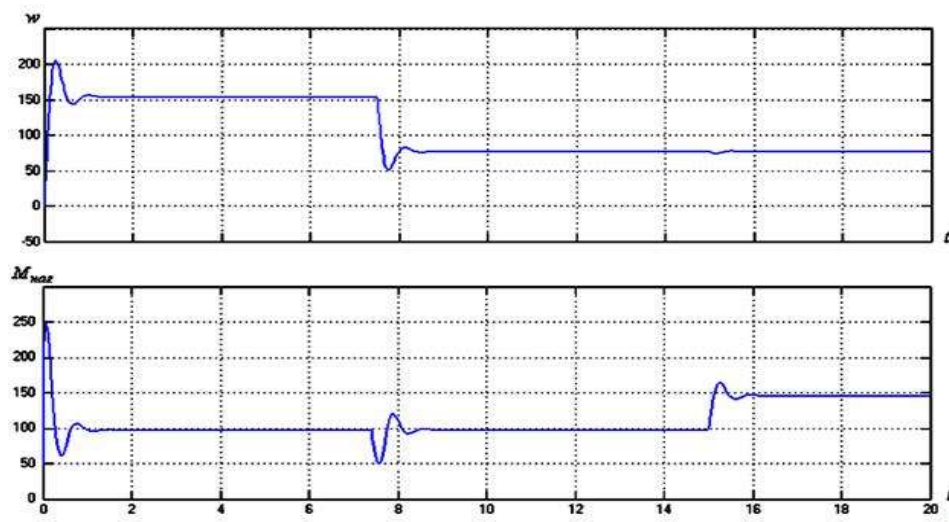


Рисунок 4.26 - Графики переходных процессов для модели системы стабилизации с нечетким регулятором скорости

Оценка качества переходных процессов проведена по следующим основным показателям: время регулирования ($t_{\text{рег}}$); перерегулирование (σ); частота колебаний (ω); число колебаний (n); время достижения первого максимума ($t_{1\text{max}}$); время нарастания переходного процесса ($t_{\text{н}}$); декремент затухания (χ).

Переходные процессы по скорости были рассмотрены для 3-х режимов:

- 1) переходной процесс при пуске под нагрузкой ($t = 0$ с);
- 2) переходной процесс в момент времени, когда сигнал задания уменьшается вдвое при $t=7,5$ с;
- 3) переходной процесс в момент возрастания нагрузки при $t=15$ с.

Анализ качества переходных процессов для исследуемых моделей, приведен в таблице 4.1:

Таблица 4.1 – Сравнительный анализ графиков переходных процессов исследуемых моделей.

Основные показатели качества переходного процесса	Режим 1		Режим 2		Режим 3	
	Классическая модель	Нечеткая модель	Классическая модель	Нечеткая модель	Классическая модель	Нечеткая модель
$t_{\text{рег}}, \text{с}$	4	1,5	3	1,2	3	2
$\sigma, \%$	62,3	40	36,4	10,4	2,6	1,03
ω	9,37	7,85	7,85	7,39	8,97	8,97
n	5	2	4	2	5	3
$t_{1\text{max}}, \text{с}$	0,25	0,27	0,7	0,6	0,5	0,5
$t_{\text{н}}, \text{с}$	0,18	0,13	0,3	0,5	0,3	0,35
χ	3,23	19,3	3,5	4	2,5	8

2. Для второго режима, при скачке сигнала задания – модель системы с нечетким регулятором обеспечивает на 30-35% меньшие провалы по скорости, чем модель классической системы. При этом уменьшается время регулирования и число колебаний за время регулирования (50%).

3. Для третьего режима, при скачкообразном изменении нагрузки – модель системы стабилизации с нечетким регулятором обеспечивает меньшие провалы по скорости (45-50%), чем классическая модель, а также характеризуется меньшим значением временем регулирования (33 %) и числом колебаний (40%).

На основании полученных результатов, можно сделать вывод, что замена классического регулятора скорости, на регулятор идентичной структуры, но построенный по принципам нечеткой логики, приводит к повышению качества переходного процесса системы.

4.4 Применение нечетких когнитивных карт для управления энергосберегающими режимами ЭМС с транспортирующими и наматывающим механизмами

Нечеткие когнитивные карты сочетают в себе преимущества нечеткой логики (не требуют четких математических моделей и базируются на эмпирически полученных правилах ЕСЛИ ТО), а также обладают известными достоинствами нейронной сети (нелинейность описания, возможности обучения и самообучения, направленность на получение оптимальных законов управления).

Под когнитивным подходом к изучению процессов, явлений, объектов в любой предметной области понимается такая методология исследования, когда основное внимание акцентируется на процессах представления, хранения, обработки и интерпретации знаний.

Когнитивный подход эффективен при изучении сложных динамических объектов и систем, для которых характерны [78]:

- наличие большого количества взаимосвязанных подсистем различной физической природы;

- отсутствие достаточной количественной информации о поведении системы и происходящих в ней изменениях, а также факторах, действующих на систему и её элементы, что заставляет переходить к качественному анализу протекающих в ней процессов;

- высокая динамичность и определенность характера поведения системы и её окружающей среды;

- существенная нелинейность характеристик элементов системы, что также затрудняет прогнозирование поведения системы.

В частности, электромеханическая система сновальной машины является сложным динамическим объектом, состоящим из нескольких взаимосвязанных подсистем. В процессе проведенных исследований выявлена взаимосвязь показателей качества снующихся нитей со скоростными режимами рабочих органов машины, определены зоны деформации, управление которыми позволяет оптимизировать процесс транспортирования и наматывания волокнистого продукта в пределах заданного технологического регламента. В процессе снования основных нитей сложно получить количественную информацию о вариации толщины и натяжения нитей на протяжении всего процесса наматывания на сновальный вал, т.к. скорость изменения данных параметров в десятки раз превышает скорость самого процесса снования.

В основе когнитивного моделирования сложных систем используется понятие когнитивной карты (или карты познания), под которой понимается математическая модель системы (объекта, проблемы), представленная в виде ориентированного взвешенного графа и позволяющая описывать субъективное восприятие этой системы (объекта, проблемы) человеком или группой людей.

Функции когнитивного моделирования на этапе принятия управленческих решений заключается в следующем [79]:

- создается когнитивная модель управляемого объекта (системы);
- на основе этой модели (с помощью алгоритмов обучения и адаптации) строится имитационная модель объекта управления;

- строится множество правил (продукций ЕСЛИ-ТО) по управлению объектом на основе сценарного подхода;

- осуществляется выбор подходящей (наилучшей) альтернативы и оценка эффективности выбранного способа управления с использованием когнитивной модели.

Для определения вероятности обрыва нитей в процессе снования была построена когнитивная карта, узлы которой представляют собой концепты, т.е. факторы, наиболее влияющие на обрывность нитей.

Исследуемая когнитивная карта представляет собой знаковый орграф (рис. 4.27) и включает в себя 6 вершин – концептов:

C_1 – натяжение нитей в процессе снования;

C_2 – скорость снования нитей;

C_3 – толщина нитей;

C_4 – колебания вытяжки нитей;

C_5 – вероятность обрыва в процессе пуска двигателей;

C_6 – вероятность обрыва в процессе работы;

C_7 – общая вероятность обрыва.

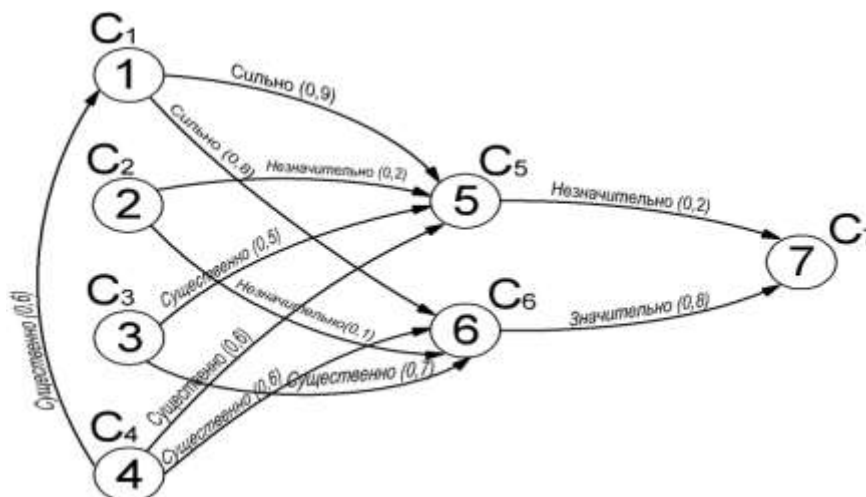


Рисунок 4.27 – Когнитивная карта определения обрывности нитей в процессе снования

Дуги графа, отмеченные знаками «+» или «-», отражают наиболее существенные причинные связи между концептами. Связь между концептами C_1 и C_4 является положительной поскольку увеличение колебаний вытяжки неумолимо приводит к увеличению натяжения в процессе снования. Связь $C_1 - C_5$, C_6 поло-

жительная, так как при увеличении натяжения как в процессе пуска, так и в рабочем режиме увеличивается вероятность обрыва нитей. Концепт C_2 незначительно влияет на концепты C_5, C_6 поскольку скорость снования нитей поддерживается на заданном уровне (является величиной постоянной). Связь $C_4 - C_5, C_6$ положительная, т.к отклонение вытяжки от заданного значения существенно влияют на обрывность нитей. Концепт C_3 существенно влияет на концепты C_5 и C_6 поскольку толщина нитей является величиной переменной со случайным знаком, таким образом чем ниже толщина нити тем выше вероятность обрыва и наоборот. Связи между концептами C_5 и C_7, C_6 и C_7 являются положительными поскольку вероятности обрыва в процессе пуска и работы влияют на общую вероятность обрыва незначительно и значительно соответственно.

Для оценки общего характера изменения переменных x_i ($i=1, 2, \dots, 6$), описывающих состояние концептов C_1, \dots, C_7 при действии внешних возмущающих воздействий, составлена матрица весов.

$$W = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0,8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8 & 0,7 & 0 \\ 0,6 & 0 & 0 & 0 & 0,6 & 0,6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Элементами этой матрицы являются числа, принимающие значения от 0 до +1, в зависимости от того какое влияние оказывают концепты друг на друга.

В качестве преобразующей функции для перехода от реальных физических величин, характеризующих состояние каждого концепта, к их безразмерным аналогам воспользуемся сигмоидальной функцией:

$$X_i = \exp(Y_i - \theta_i) / (1 + \exp(Y_i - \theta_i)),$$

где $Y_i = \sum_j W_{ji} X_j$ - взвешенная сумма воздействий на концепт C_i со стороны всех остальных концептов нечеткой когнитивной карты (НКК); W_{ji} - весовая

функция, характеризующая причинное влияние концепта C_j на концепт C_i ; θ_i - величина смещения (порога), выбираемого из условия: $X_i=0,5$ при $Y_i = \theta_i$.

На основе построенной когнитивной карты можно наглядно представить процессы, протекающие в сложной динамической системе и предложить рациональные варианты управления этими процессами.

Вероятность обрыва нити имеет начальное значение при пуске, которое постепенно увеличивается в процессе разгона двигателей (рис. 4.28).

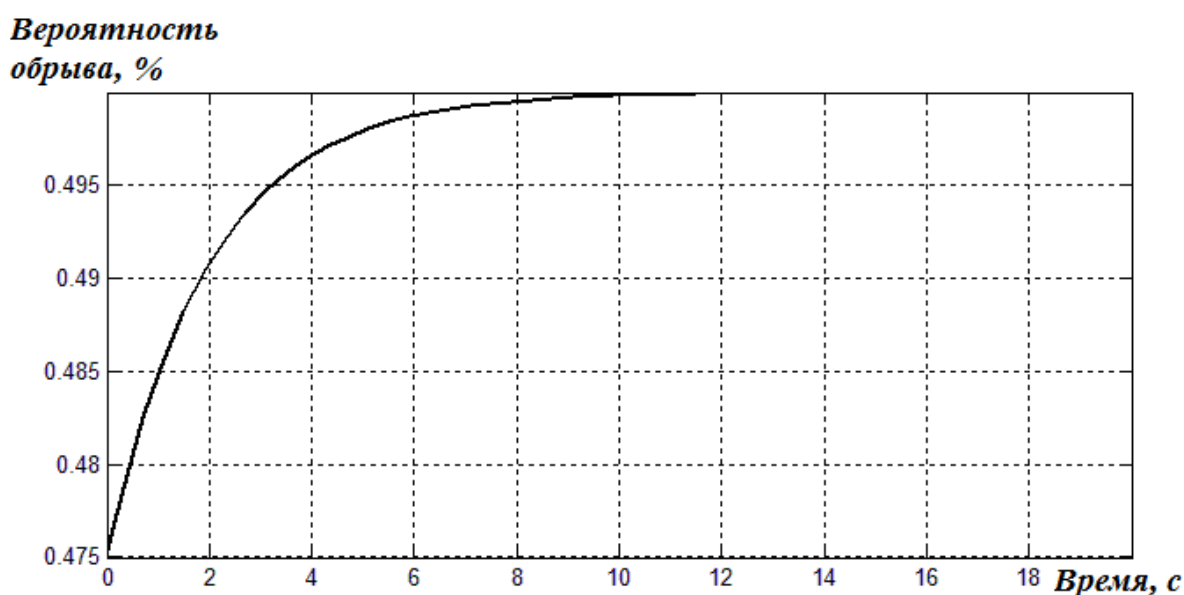


Рисунок 4.28 – Зависимость вероятности обрыва нитей в процессе наматывания

Целью управления данной системой является поддержание обрывности нитей в процессе снования в пределах от 0 до 3%.

Возможны два направления моделирования процесса управления:

- 1) прогноз развития ситуации с выбранным комплексом управлений (прямая задача);
- 2) синтез комплекса мероприятий для достижения желаемого изменения ситуации управления (обратная задача).

В качестве основного направления рассмотрим эффективность введения в систему двухдвигательного электропривода (8) и компенсатора (9) (рис. 4.29).

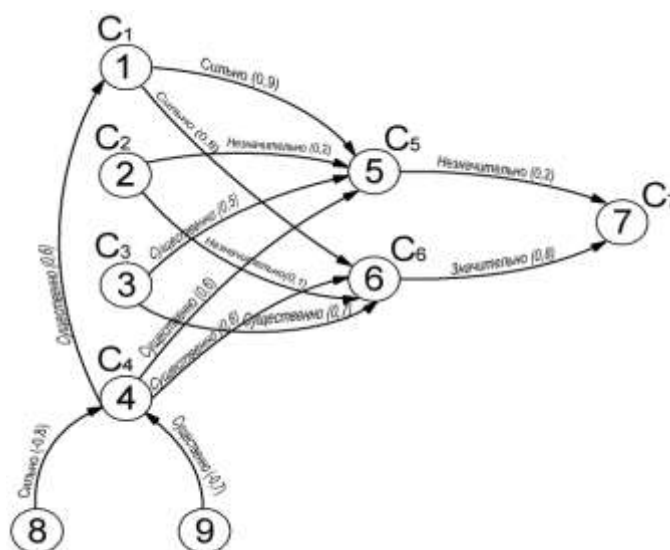


Рисунок 4.29 – Когнитивная карта с управляющими воздействиями:

8 – двухдвигательный электропривод, 9 – компенсатор

Как видно из рисунков 4.28 и 4.30 после введения в нечеткую когнитивную карту управляющих воздействий (8) и (9), влияющих на концепт C₄ (колебания вытяжки нитей) вероятность обрыва нитей снижается на 36,3%.

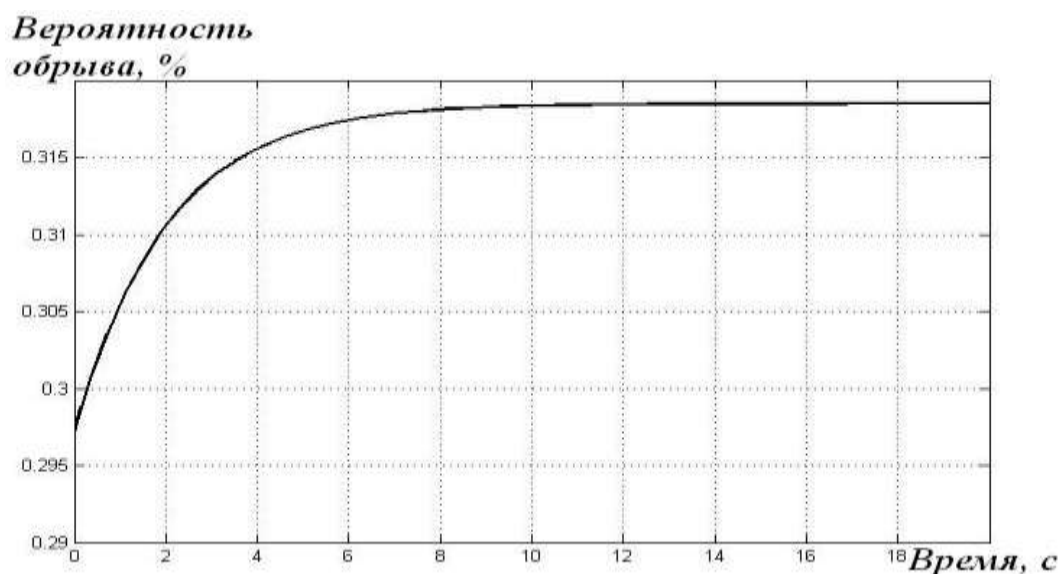


Рисунок 4.30 – Зависимость вероятности обрыва нитей в процессе наматывания после введения в когнитивную карту управляющих воздействий.

Таким образом, при исследовании нечеткой когнитивной карты системы управления партионной сновальной машиной выявлена взаимосвязь показателей качества (обрывность нитей) со скоростными режимами ЭМС. Для снижения вероятности обрыва снующихся нитей к электроприводу сновальной машины были приложены управляющие воздействия, обеспечивающие постоянное натяжение и

учитывающие физико-механические параметры волокнистого продукта. Таким образом, применение нечетких когнитивных карт позволяет оптимизировать процессы транспортирования и наматывания нитей на партионной сновальной машине СП-140.

4.5 Основные положения методики анализа, расчета и проектирования транспортирующих, наматывающих и крутильно-мотальных механизмов

Автором разработана методика анализа, расчета и оптимизации энергосберегающего управления электромеханическими системами технологического оборудования, позволяющая обеспечивать повышение эффективности технологического оборудования за счет оптимизации и управления скоростными режимами согласно технологическому регламенту.

Выделены следующие этапы процесса формализации и математического описания.

1. Анализ основных направлений энергосбережения при эксплуатации управляемых электротехнических комплексов технологического оборудования. Установлено, что наиболее перспективным в настоящее время является применение интеллектуальных технологий для управления ЭМС с транспортирующими, наматывающими и крутильно-мотальными механизмами.
2. Постановка задачи исследования и её формулировка. Для УЭТК сновальной и рогульчатой ровничной машин определены задачи оптимального управления скоростными режимами процессами формирования, транспортирования и наматывания, обеспечивающими энергосберегающие режимы и заданное качество выпускаемой продукции.
3. Определение основных этапов теоретических и экспериментальных исследований.
 - Анализ сложных динамических объектов с транспортирующими, наматывающими и крутильно-мотальными механизмами с целью определения пу-

тей частичной модернизации за счет применения интеллектуальных технологий и современных энергосберегающих электроприводов постоянного и переменного тока с микропроцессорным управлением.

- Проведение экспериментов, связанных с определением энергетических и технологических параметров и характеристик, в частности анализ физико-механических свойств волокнистых материалов. Для снующихся нитей, полученных на партионной машине СП-140, и гребенной ровницы, выработанной на рогольчатой ровничной машине Р-260-3, получены одноцикловые разрывные характеристики для определения предельно возможной деформации волокнистого материала в процессе его транспортирования и наматывания. На основании проведенных исследований относительная деформация (ϵ) и вытяжка (E) должны составлять $\leq 0,04$ и $\leq 1,04$ для снующихся нитей и $\leq 0,02$, $\leq 1,02$ для ровницы соответственно.

4. Анализ динамических режимов основных кинематических узлов и механизмов машин.

- Исследование существующих систем управления, с целью выявления критерия оптимизации управляемых электротехнических комплексов. Основным критерием оптимизации для сновальной машины является натяжение волокнистого материала, а для ровничной машины – вытяжка.
- Анализ факторов, влияющих на оптимизационные переменные. Для сновальной машины выявлено влияние веса тела наматывания на момент сопротивления привода сновального вала, вызывающего отклонение частоты вращения от заданной программы.

5. Математическое описание моделей машин и их узлов с помощью дифференциальных и алгебраических уравнений. С целью исследования статических и динамических режимов сложных электромеханических систем составлена система уравнений (1.17-1.29), позволяющая оценить поведение системы с учетом гибких связей механических звеньев кинематических передач, электромагнитных процессов в приводных электродвигателях, физико-механических свойств волокнистого продукта.

6. Разработка модернизированных систем управления сложными динамическими объектами. Для исследуемых УЭТК процессами формирования, транспортирования и наматывания волокнистого материала разработаны функциональные и структурные схемы, обеспечивающие заданное качество управления и энерго-сберегающие режимы работы. Определены передаточные функции основных узлов и механизмов машин для последующего моделирования в операционной среде Matlab.

7. Математическое моделирование и расчет ЭМС с помощью информационных и компьютерных технологий. В качестве среды для моделирования использован пакет системы Matlab Simulink, позволивший исследовать модернизированные системы с целью определения основных показателей качества управления. При этом обеспечено повышение запаса устойчивости по амплитуде и по фазе, что указывает на улучшенные динамические характеристики по сравнению с традиционными системами.

8. Исследования сложных управляемых электротехнических комплексов с применением современных интеллектуальных технологий. При проектировании оптимальных систем управления использованы интеллектуальные методы: нейронные сети, нечеткая логика, нечеткие когнитивные карты.

8.1 Применение технологии нейронных сетей для разработки и исследования управляемого электротехнического комплекса с крутильно-мотальным механизмом. Нейронные сети являются эффективным инструментом при реализации сложных нелинейных зависимостей между входным сигналом и сигналом управления.

- Получение экспериментальных данных о моменте ДПТ независимого возбуждения для обучения нейронной сети. Исследована двухканальная система управления процессами транспортирования и наматывания волокнистого продукта на ровничной с целью получения тренировочного шаблона, описывающего наилучшие характеристики системы.

- Создание НС. Состоит из нескольких этапов: подбор оптимальной структуры НС, выбор алгоритма обучения и режима. Для управления процес-

сами транспортирования и наматывания наиболее оптимальна структура НС, состоящая из одного скрытого слоя с четырьмя нейронами, входного и выходного слоев. Тренировка осуществлялась по алгоритму обратного распространения ошибки. В результате обучения получены характеристики, указывающие на повышение быстродействия переходного процесса и допустимость использования НС в качестве регуляторов двухдвигательного электропривода электромеханической системы с КММ.

- Тестирование НС. Осуществлялось на экспериментальных данных установившегося и пускового режимов с изменяющимся напряжением. Наиболее эффективным является тестирование на данных пускового режима с изменяющимся напряжением, показывающее целесообразность применения НС, удовлетворяющей требованиям по точности и функциональности.

8.2 Исследование системы автоматического управления сновальной машиной с помощью нечеткого регулятора. Исследуемый нечеткий логический контроллер позволил адаптировать систему к изменяющимся параметрам объекта управления и моменту сопротивления на валу наматывающего механизма, с целью обеспечения инвариантности системы управления. Проведено исследование двух систем: классической двухкратноинтегрирующей и нечеткой с однодвигательным электроприводом. Моделирование систем выявило повышение качества переходного процесса (снижение колебаний и значения времени регулирования) второй системы по сравнению с первой.

8.3 Применение нечетких когнитивных карт для управления энергосберегающими режимами ЭМС с транспортирующими и наматывающим механизмами. Исследование системы управления с помощью нечетких когнитивных карт.

- Осуществлен анализ основных концептов, влияющих на показатели качества волокнистого продукта. В частности, для снующихся нитей данными концептами являются натяжение в процессе снования, скорость снования, толщина и колебания вытяжки нитей.

- Приняты управленческие решения по снижению обрывности нитей. Предложено внедрение в систему управления двух новых управляющих концептов двухдвигательного электропривода (8) и компенсатора (9) (рис. 4.29), позволяющих снизить обрывность нитей на 36,3%.

Таким образом, разработка энергосберегающих способов управления электромеханическими системами технологического оборудования включает в себя анализ основных направлений энергосбережения при эксплуатации УЭТК, определение задач управления скоростными режимами и экспериментальное исследование параметров и характеристик электромеханических систем, математическое описание моделей и узлов машин, разработку модернизированных способов управления сложными динамическими объектами и их моделирование на основе применения современных компьютерных и информационных технологий.

Выводы.

1. Показана возможность использования нейронных сетей в качестве регуляторов напряжения и мощности управляемых электротехнических комплексов с крутильно-мотальными механизмами.
2. Нейроконтроллер обеспечивает повышение скорости отклика рассматриваемой системы, а незначительная колебательность переходного процесса говорит о необходимости проведения обучения на реальных данных.
3. На основе модели ДПТ независимого возбуждения предложен нейросетевой подход к измерению момента сопротивления на валу. Исследована возможность создания датчика момента ДПТ.
4. Проведено моделирование нейронной сети, реализующей формирование момента ДПТ, значение которого близко к желаемому моменту двигателя.
5. Выявлено повышение качества переходного процесса система автоматического управления процессами транспортирования и наматывания при заме-

не классического регулятора скорости на нечеткий регулятор идентичной структуры.

6. Исследована система автоматического управления сновальной машиной с применением нечетких когнитивных карт, с целью выявления путей повышения качества волокнистого продукта.
7. Разработаны научные положения методики анализа, расчета и оптимизации энергосберегающего управления электромеханическими системами технологического оборудования, обеспечивающие повышение эффективности эксплуатации технологического оборудования за счет оптимизации и управления скоростными режимами согласно технологическому регламенту.

Основные результаты и выводы

1. Проведенный анализ научно-технической литературы, посвященный исследованию режимов работы энергоемкого технологического оборудования показал, что в настоящее время недостаточно изучены вопросы комплексного влияния скоростных режимов рабочих органов на производительность, качественные показатели волокнистых продуктов, рациональное потребление сырьевых и энергетических ресурсов.
2. Предложена концепция построения структуры и исследования сложных управляемых электротехнических комплексов технологического оборудования с транспортирующими, наматывающими и крутильно-мотальными механизмами.
3. Проведена классификация энергоемкого технологического оборудования по характерным режимам эксплуатации, электропотребления и изменяющейся нагрузки на рабочие органы и механизмы.
4. Экспериментально получены технологические параметры и энергетические характеристики исследуемых динамических объектов, а также определены особенности и критерии оценки качественных показателей волокнистых продуктов и их взаимосвязь со скоростными режимами работы оборудования, осуществляющего процессы формирования, транспортирования и наматывания волокнистого материала.
5. Установлено, что одним из направлений разработки энергосберегающих решений является использование энергетических и технологических характеристик автоматизированных систем управления для проведения комплексного анализа и оптимизации режимов работы, которые дают возможность научно обоснованно подойти к решению указанной проблемы как при эксплуатации существующего, так и нового оборудования.
6. Поставлена и решена задача повышения эффективности энергоресурсосбережения за счет управления скоростными режимами электромеханической системы с транспортирующими и наматывающими механизмами.

- 6.1 С целью реализации энергосберегающих режимов предложены функциональная и структурная схемы усовершенствованного способа управления процессами транспортирования и наматывания нитей на партионной сновальной машине.
- 6.2 Дано математическое описание в операционной среде MatLab и проведено моделирование двухканальной системы управления скоростными режимами, обеспечивающими заданный регламент технологических процессов транспортирования и наматывания нитей.
- 6.3 Осуществлен анализ переходных процессов и расчет устойчивости системы автоматического управления; проведенная параметрическая оптимизация системы автоматического регулирования позволила определить оптимальные параметры скоростных режимов исследуемой системы; полученные переходные функции, характеризующие сигнал управления и выходную величину (относительную деформацию нитей), позволяют оценить качество системы автоматического регулирования при управляющих и возмущающих воздействиях.
7. На примере управляемого электротехнического комплекса с крутильно-мотальным механизмом с целью детального исследования сложной электромеханической системы математически систематизировано и уточнено описание взаимосвязи известных условий наматывания волокнистого материала (ровницы) на паковки со скоростными режимами рабочих органов.
- 7.1 Для совершенствования процесса наматывания ровницы на паковки и модернизации централизованного электропривода ровничной машины разработаны функциональная и структурная схемы двухдвигательного электропривода, обеспечивающего повышение статической и динамической точности регулирования скоростных режимов крутильно-мотального механизма.
- 7.2 Проведено математическое описание специальных режимов, происходящих в двухдвигательной электромеханической системе с крутильно-мотальным механизмом, позволяющее анализировать статические и динамические характеристики рабочих органов рогульчатой ровничной машины для гребен-

ного прядения шерсти при различных стадиях наматывания ровницы на пакетки и колебаниях питающей сети.

8. Осуществлены лабораторные испытания комплектного параметрического асинхронного электропривода КПЭ с микропроцессорным регулятором напряжения МРН000, которые подтвердили целесообразность управления энергосберегающими и специальными режимами электромеханических систем с транспортирующими, наматывающими и крутильно-мотальными механизмами.

9. Для исследования статических и динамических режимов двухдвигательного привода партионной сновальной машины составлена система алгебраических и дифференциальных уравнений первого порядка с учетом деформации гибких звеньев передач и электромеханической инерции электроприводов постоянного и переменного тока; полученная система уравнений является замкнутой, нелинейной и позволяет исследовать динамические свойства сложной электромеханической системы.

10. Представленные алгоритмы управления и идентификации подтверждаются схемами Simulink, которые могут стать основой для аппаратной реализации и дальнейших исследований.

11. На основе разработанных теоретических положений определены методы исследования и расчета сложных электромеханических систем с транспортирующими, наматывающими и крутильно-мотальными механизмами с использованием нейронных сетей, нечеткой логики и нечетких когнитивных карт.

12. Разработаны методология и алгоритмические основы для математического моделирования и анализа процессов транспортирования, формирования и наматывания волокнистых материалов.

13. Имитационные модели и разработанные системы автоматического регулирования могут быть использованы в практике научных исследований, при проектировании и частичной модернизации эксплуатируемого технологического оборудования и систем управления энергосберегающими режимами.

Список литературы

1. Дубовицкий В.А., Бордовская Т.П., Максимова Е.М., Павлов Н.К., Поляков А.Е. Направления исследования управляемых электротехнических комплексов текстильного оборудования.// Вестник молодых ученых СПГУДТ: в 4 ч. Ч. 4: Тез. докл. Всерос. науч. конф. «Инновации молодежной науки» 25-28 апреля 2011 г. – С. 191-192.
2. Поляков К.А., Поляков А.Е. Методы и системы энергосберегающего управления текстильным оборудованием: монография. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2004. – 330 с.
3. Дубовицкий В.А., Филимонова Е.М., Поляков А.Е., Чесноков А.В. Расчет энергетических показателей асинхронного двигателя при изменении напряжения питания и меняющейся нагрузки на валу.// «Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности (ПОИСК - 2013)»: сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов. Часть 2. – Иваново: Текстильный институт ФГБОУ ВПО «ИВ-ГПУ», 2013. – С. 197-198.
4. Автоматизированный электропривод в текстильной и легкой промышленности. Под ред. А.М. Быстрова, С.В. Пастина. – М.: Энергия, 1972. – 256 с.
5. Дубовицкий В.А., Успенский А.А., Поляков А.Е., Поляков К.А., Филимонова Е.М., Бычков В.В., Степанова М.С. Модернизированный способ управления процессом холстообразования и наматывания нетканых материалов.// Хим. волокна. – 2012. – №1. – С. 45-48.
6. Филимонова Е.М., Поляков А.Е., Поляков К.А., Дубовицкий В.А., Бычков В.В. Основные направления повышения эксплуатации управляемых электротехнических комплексов для производства нетканых материалов.// Хим. волокна. 2014. №___. – С.
7. Cirstea M.N., Dinu A., Khor J.G., McCormick M. Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems. – Oxford: Newnes. 2002. 399 p.

8. Кулида Н.А. Теоретические основы повышения эффективности партионного снования: монография. – Иваново: ИГТА, 2003 – 268 с.
9. Поляков А.Е., Дубовицкий В.А., Филимонова Е.М. Повышение эффективности работы управляемых электротехнических комплексов технологического оборудования.// В сборнике тез. докл. междунар. н/т конф. «Современные технологии и оборудование текстильной промышленности» (ТЕКСТИЛЬ-2012). Часть 2 – М.: ФГБОУВПО «МГТУ им. А.Н. Косыгина», 2012. – С. 3-4.
- 10.Ефремов Е.Д., Кислякова А.М., Попова Г.К. Технологический процесс снования пряжи в текстильном производстве. – Ярославль: ВерхнеВолжское книжное издательство, 1977. – 235 с.
- 11.Брут-Бруляко А.Б., Ступников А.Б., Старинец Е.Ю., Тульская Л.А. Влияние диаметра бобины на натяжение нитей при сновании.//Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000. – №4 – С. 56-59.
- 12.Ефремов Е.Д., Rogozin В.В., Плужник Т.С., Ковязина Т.И. Деформация и движение нити при сновании.//Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1980. – №6 – С. 37-39.
- 13.Ефремов Е.Д., Плужник Т.С. О неравномерности деформации нитей при наматывании на сновальный вал.//Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1982. – №6 – С. 37-39.
- 14.Ланген А.М., Лакс Б.М., Кирышкин А.В. Исследование пусковых режимов электропривода сновальной машины. / В кн.: Совершенствование электроприводов в текстильной и легкой промышленности: межвуз. сб. науч. трудов. – Иваново: ИвГУ, 1982 – С. 106-111.
- 15.Врублевский В.А. Исследование и нормализация скорости движения нитей в процессе снования: автореферат канд. техн. наук. – Иваново. 1981. – 19 с.
16. ГОСТ 6611.2-73 Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1973. – 36 с.

- 17.ГОСТ 28890-90 Нити текстильные. Методы определения компонентов полного удлинения при растяжении нитей нагрузкой меньше разрывной. – М.: Издательство стандартов, 1990. - 18 с.
- 18.Серяков И.Н., Дубовицкий В.А., Поляков К.А., Поляков А.Е., Бордовская Т.П., Максимова Е.М. Исследование физико-механических свойств нетканых полотен различной плотности.// Изв. Вузов. Технол. текст. пром-ти. – 2012. – №3. – С. 8-11.
- 19.Дубовицкий В.А., Филимонова Е.М., Степанова М.С., Поляков А.Е. Экспериментально-теоретическое моделирование процессов наматывания волоконистых продуктов.// Инновации молодежной науки: тез. докл. Всерос. науч. конф. молодых ученых / С.-Петербургск. гос. ун-т технологии и дизайна. – СПб.: ФГБОУВПО «СПГУТД», 2012. – С. 19-20.
- 20.Филимонова Е.М., Поляков А.Е. Система автоматического управления сновальной машиной с коррекцией по натяжению.// Сборник научных трудов аспирантов. Вып.19. – М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2013.- С.
- 21.Козлов А.Б., Румянцев Ю.Д., Тимохин А.Н., Ермаков А.А., Захаркина С.В., Макаров А.А. Основы управления и технические средства автоматизации текстильных производств. Учебное пособие для вузов. – М.: ГОУ ВПО МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2009. – 224 с.
- 22.Филимонова Е.М., Дубовицкий В.А., Поляков А.Е. Коррекция динамических режимов управляемого электротехнического комплекса сновальной машины.// Студенты и молодые ученые КГТУ – производству: материалы 65-й юбилейной межвузовской научно-технической конференции молодых ученых и студентов. В 2 т. Т. 2. Секции 4-8 / Костромской гос. технол. ун-т. – Кострома: Изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2013. – С. 110-111.
- 23.Петелин Д.П., Ромаш Э.М., Шахнин В.Н. Автоматизация технологических процессов текстильной промышленности.//В 5 кн. кн. 2 Автоматизация механико-технологических процессов текстильного производства. – М.: Лег-промбытиздат, 1993. – 160 с.

24. Дубовицкий В.А., Максимова Е.М., Бордовская Т.П., Поляков А.Е. Исследование электротехнического комплекса линии производства нетканого полотна методом термоскрепления. // Студенты и молодые ученые КГТУ – производству: материалы 63-ей межвуз. н/т конференции молодых ученых и студентов. В 2 т. Т. 2. Секции 4–8. – Кострома: Изд-во КГТУ, 2011. – С. 98-99.
25. Поляков А.Е., Поляков К.А., Дубовицкий В.А., Максимова Е.М., Бордовская Т.П., Павлов Н.К. Исследование динамики управляемого электротехнического комплекса. // Изв. Вузов. Технол. Текст. пром-ти. – 2011. - №4. – С. 128-133.
26. Дманов В.И., Доманов А.В. Элементы систем автоматики (силовой канал): учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 107 с.
27. Радин В.И., Брускин Д.Э., Зохорович А.Е. Электрические машины: Асинхронные машины. – М.: Высшая школа, 1988. – 256 с.
28. Таточенко Л.К., Киселев В.И. и др. Контроль технологических параметров текстильных материалов: методы, устройства. – М.: Легпромбытиздат, 1985. – 192 с.
29. Поляков А.Е., Дубовицкий В.А., Чесноков А.В., Филимонова Е.М. Применение классических и интеллектуальных методов для исследования энерго-сберегающих режимов сложных управляемых электротехнических комплексов технологического оборудования: монография. – М.: ФГБОУВПО «МГУДТ», 2013. – 213 с.
30. Поляков А.Е. Анализ динамики согласованного вращения двигателей двухдвигательного электропривода. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1997. – № 2. – С. 114-117.
31. Поляков А.Е., Поляков К.А. Факторы, влияющие на скоростные режимы ровничной машины для гребенного прядения шерсти. // Изв. Вузов. Технол. Текст. пром-ти. – 1997. - №5. – С. 18-20.
32. Кукин Г.Н. Текстильное материаловедение: учебник для вузов. – М.: Легпроиздат, 1989. – 352 с.

33. Поляков А.Е., Чесноков А.В., Смольников Л.Е. Разработка теоретических основ анализа и оптимизации ресурсосберегающих режимов работы энергоемкого текстильного оборудования при интенсивных условиях его эксплуатации. (№91-526-32) / Отчет по НИР № ГР 01.9.40 002424 ИН №03.940 001435. – М.: МГТА. – 1992. – 109 с.
34. Вязгин В.А., Федеров В.В. Математические методы автоматизированного проектирования. – М.: Высшая школа, 1989. – 184 с.
35. Солодовников В.В. Теория сложности и проектирования систем управления. – М.: Наука, 1990. – 162 с.
36. Поляков А.Е. Анализ скоростных режимов и повышение эффективности управляемых электромеханических систем прядильного производства: монография – М.: МГТУ, 2001. – 264 с.
37. Поляков К.А. Основные направления экономии энергетических ресурсов в текстильном производстве./ Междунар. н/т конференции «Лен-2004»: тезисы докл. – Кострома, 2004.
38. Дубовицкий В.А., Поляков А.Е., Поляков К.А., Чесноков А.В., Филимонова Е.М. Технические решения для оптимального управления сложными динамическими объектами при производстве нетканых материалов.// Хим. волокна. – 2013. – №.2 – С. 59-61.
39. Свириденко П.А., Мовшович П.М., Малышков М.М. Регулируемые электроприводы в текстильной и легкой промышленности. М.: «Легкая индустрия», 1973. – 285 с.
40. Дубовицкий В.А., Поляков А.Е., Филимонова Е.М., Степанова М.С. Разработка способа адаптации самовеса к изменению величины потока поступающего волокна. – В кн.: Сб. материалов докладов всероссийской НТК. – Димитровград: ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2012. – С. 64-66.
41. V.A. Duboviskii, A.E. Polyakov, K.A. Polyakov, A.V. Chesnokov and E.M. Filimonova Technical solutions for optimum of complex dynamic objects in the production of nonwovens.// Fibre Chemistry. Vol 45. No. 2. July, 2013. (Russian original No. 2, March-April, 2013), pp. 119-121.

42. Поляков А.Е., Дубовицкий В.А., Филимонова Е.М., Степанова М.С. Исследование динамических режимов управляемого электротехнического комплекса для производства нетканых материалов.// Вестник Московского государственного текстильного университета. – М.: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. А.Н. Косыгина», 2012. – С. 76-79.
43. Бордовская Т.П., Козлова Л.А., Максимова Е. М., Поляков А.Е. Энергосбережение при эксплуатации технологического оборудования.// Тезисы докладов Всероссийской НТК студентов и аспирантов (Дни науки-2010). – СПб: СПГУТД, 2010.
44. Поляков А.Е., Поляков К.А., Шевнина Е.А., Пятибратова Е.А., Пименова Е.Л. Повышение эффективности эксплуатации электромеханических систем технологического оборудования./ Вестник ДИТУД. – 2003. – № 3(17).
45. Поляков А.Е., Поляков К.А., Шевнина Е.А., Пятибратова Е.А. Энергосберегающие режимы на базе асинхронных электроприводов и микропроцессорных регуляторов напряжения./ Всерос. н/т конференция «Современные технологии и оборудование текстильной пром-ти (Текстиль-2003)»: тезисы докладов. – М.: МГТУ, 2003.
46. Поляков К.А. Энергосбережение за счет оптимизации режимов работы электромеханических систем вспомогательного оборудования./ Всерос. н/т конференция «Современные технологии и оборудование текстильной пром-ти (Текстиль-2003)»: тезисы докладов. – М.: МГТУ. – 2003. – С. 253.
47. Захарова З.А., Синельников Г.А. Разработка рекомендаций и устройств для снижения потерь электроэнергии в асинхронных двигателях: отчет НИР № гос. рег. 01850050016. Инв. №02860092697. – М., МТИ, 1986. – 182 с.
48. Исаев И.Н., Созонов А.Г. Электропривод механизмов циклического действия. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 305 с.
49. Дубовицкий В.А., Павлов Н.К., Филимонова Е.М., Поляков А.Е. Исследование электромеханической системы холстоформирующих машин.// Сборник научных трудов аспирантов. Вып.18. – М.: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. А.Н. Косыгина», 2012.- С. 65-70.

50. Поляков А.Е., Чесноков А.В., Бычков В.В., Дубовицкий В.А., Филимонова Е.М., Степанова М.С. Разработка технических средств и систем энергосберегающего управления текстильным оборудованием./ Отчет по НИР №01201168303. – М.: ГОУВПО МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2012. – 92 с.
51. Brown G.S. and Campbell. D.P. Principles of Servomechanisms. – New York.: Wiley, 1991.
52. Ivey K.A., Carrier A.C. Control Systems. – New York: Wiley, 1984.
53. Поляков А.Е., Поляков К.А., Дубовицкий В.А., Филимонова Е.М., Степанова М.С. Оптимизация режимов работы электроприводов машин и аппаратов циклического действия./ Сборник материалов Международной НТК «Прогресс-2012». – Иваново: ИГТА. – 2012. – С. 51-52.
54. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – М.: Корона Принт, 2003. – 256 с.
55. Куско А., Тмпсон М. Качество энергии в электрических сетях. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.
56. Пар И.Т., Захарова З.А. Энергосберегающие микропроцессорные регуляторы напряжения для асинхронного привода. // Электротехническая промышленность. Сер. 08. Электропривод: обзор. информ. – 1990. – Вып. 28. – С. 1-44.
57. Вейц В.Л. Динамика управляемых машинных агрегатов. – К.: Наукова думка, 1991. – 232 с.
58. Номенклатура показателей качества электрической энергии. ГОСТ 13109-97. – М.: Госстандарт, 1999. – 52 с.
59. Милях А.Н., Шидловский А.К. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях. – К.: Наукова думка, 1973. – 215 с.
60. Поляков А.Е., Поляков К.А., Шилов А.В. Анализ эффективных способов управления сложными динамическими объектами текстильной промышленности: монография. – М.: ГОУ ВПО «МГТУ им. А.Н. Косыгина», 2009. – 214 с.

61. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры. Кн. 3.: Учеб. пособие для вузов./ Общ. ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – 416 с.
62. Логовский А.С. Применение искусственных нейронных сетей для решения задач управления динамическими объектами: автореф. диссертации канд. ф-м. наук. – М. – 1998. – 17 с.
63. Дубовицкий В.А., Филимонова Е.М., Степанова М.С., Поляков А.Е. Экспертные оценки качества электрической энергии.// Студенты и молодые ученые КГТУ – производству: материалы 64-ей межвуз. н/т конференции молодых ученых и студентов. В 2 т. Т. 2. Секции 4–8. – Кострома: Изд-во КГТУ, 2012. – С. 105-106.
64. Поляков А.Е., Поляков К.А., Филимонова Е.М., Дубовицкий В.А., Бычков В.В. Применение технологии нейронных сетей для разработки и исследования управляемого электротехнического комплекса приемно-намоточного устройства агрегата для производства и синтетических нитей и нетканых материалов.// Хим. волокна. – 2014. – №. – С.
65. Комарцова Л.Г., Максимов А.В. Нейрокомпьютеры: учеб. пособие для вузов. – 2-е издание, перераб. и доп. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 400 с.
66. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. Кн. 1: учеб. пособие для вузов./ Под общ. ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – 416 с.
67. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации./ Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
68. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.
69. Поляков К.А., Поляков А.Е. Исследование динамики вспомогательного электропривода рогульчатой ровничной машины.// Изв. Вузов. Техн. текст. пром-ти. №1 – 2000. - С. 105-109.
70. Уорсен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. Перевод с англ. языка Зуева Ю.А., Точенова В.А. – М.: NeuroSchool, 1992. – 184 с.

71. Дубовицкий В.А., Филимонова Е.М. Применение современных методов и технологий для разработки и исследования сложных управляемых электро-технических комплексов. // Сборник материалов Всерос. конкурса НИР студентов и аспирантов в области технических наук. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 25-27.
72. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 432 с.
73. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. / Отделение информ. технологий и вычислит. систем РАН. – М.: Наука, 2006. – 333 с.
74. Зайцев А.И., Муравьев Г.Л., Сташнёв Б.Л. Применение нечетких систем управления в электроприводах. // www.electro.nizniy.ru/papers/4/00407.html, 2013.
75. Кабылбекова В.В., Улахметов Р.Ф., Надеев А.И. Нечеткие системы управления тиристорными электроприводами. // Датчики и системы, 2009. - №5. – С. 37-39.
76. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие. – М.: Радиотехника, 2009. – 392 с.
77. Stylios C.D., Groumpos P.P. A Soft Computing Approach for Modelling the Supervisor of Manufacturing Systems // Intelligent and Robotic Systems. – 1999 - №26. – P. 389-403.
78. Кулинич А.А. Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы. // Проблемы управления №3, 2010. – С. 2-16.
79. Лавренев Н.В. Постановка физического эксперимента и статическая обработка его результатов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 272 с.
80. Смольников Л.Е., Чесноков А.В., Поляков А.Е., Поляков К.А. Разработка технических решений, направленных на реализацию энергосберегающих режимов работы текстильного оборудования (№93-584-32)/ Отчет по НИР №01.960.010080 ИНН №02.950.006900. – М.: МГТА, 1995.

Приложение А

Таблица А.1 – Рабочие характеристики электродвигателя 4А90L4

U, В	I ₁ , А	P ₁ , Вт	S, %	N, мин ⁻¹	M, Н·м	P ₂ , Вт	η, %	cosφ	f, Гц
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,2U _H									
456	6,93	3760	4,5	1418	18,5	2742,6	72,9	0,824	49,5
456	6,5	3100	3,43	1434	14,4	2158,9	69,6	0,725	49,5
456	6,37	2780	3,03	1440	12,9	1942,1	69,9	0,663	49,5
456	6,417	2640	2,76	1444	11,8	1781,5	67,5	0,625	49,5
456	6,417	1380	0,81	1473	3,5	539	39,1	0,327	49,5
456	6,683	920	0,3	1481	0,6	92,9	10,1	0,209	49,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U _H									
380	6,433	3720	7,68	1371	19,2	2752	74,0	0,879	49,5
380	5,5	2900	5,73	1400	15,2	2224,8	76,7	0,8	49,5
380	4,43	2240	4,24	1422	11,7	1739,5	77,6	0,768	49,5
380	3,53	1480	2,56	1447	7,3	1104,4	74,6	0,619	49,5
380	3,25	1040	1,61	1461	4,5	678,4	66,1	0,486	49,5
380	3,15	840	1,15	1468	3,3	506,5	60,3	0,405	49,5
380	3,05	400	0,47	1478	0,6	92,7	23,2	0,199	49,5
0,8U _H									
304	9,217	4440	18,2	1215	19,3	2451,7	55,2	0,915	49,5
304	7,0	3360	12,5	1299	16,1	2186,6	65,1	0,911	49,5
304	6,817	3240	11,9	1308	15,65	2140	66,1	0,901	49,5
304	5,183	2440	8,0	1366	12,4	1771	72,6	0,894	49,5
304	3,38	1460	4,2	1422	7,6	1130	77,4	0,82	49,5
304	2,27	760	1,75	1459	3,6	549	72,2	0,636	49,5
304	1,883	280	0,47	1478	0,6	92,7	33,1	0,282	49,5
0,6U _H									
228	8,23	2960	23,8	1132	11,6	1372,9	46,4	0,911	49,5
228	5,283	1890	12,5	1299	9,0	1222,3	64,7	0,906	49,5
228	4,517	1610	10,0	1336	7,9	1103,4	68,5	0,903	49,5
228	2,917	1010	5,52	1403	5,1	748,1	74,1	0,877	49,5
228	2,09	640	3,23	1437	3,0	450,7	70,1	0,775	49,5
228	1,93	570	2,69	1445	2,6	392,8	68,9	0,747	49,5
228	1,34	200	1,2	1467	0,6	92	46,0	0,378	49,5

Приложение Б

Расчет ожидаемой экономии электроэнергии

По разработанной программе рассчитаны энергетические показатели АД с учетом потерь от несинусоидального питающего напряжения при неполной нагрузке двигателя. Расчеты проводились для двигателей серии 4А, мощностной ряд которых составил от 0,75 до 15кВт, при этом 25% времени двигатели работали на холостом ходу, а 75% - при $P_{нагр}=0,7P_{ном}$.

Напряжение на АД изменяли таким образом, чтобы коэффициент мощности поддерживался равным номинальному. Результаты испытаний и расчетов приведены в таблице 3.4 параграфа 3.2.1, где $P_{ном}$ - номинальная мощность АД; $K_{загр}$ - коэффициент загрузки; η_p , $\cos\varphi_p$ - значение энергетических показателей при регулируемом напряжении; η , $\cos\varphi$ - значения показателей при номинальном напряжении и соответствующей нагрузке.

Таблица Б.1 – Энергетические показатели АД

Мощность		$\cos\varphi$		η		Разность показателей, %	
$P_{ном}$, кВт	$K_{загр}$	$\cos\varphi_H$	$\cos\varphi_p$	η_H	η	$\Delta\cos\varphi$	$\Delta\eta$
15	0,2	0,6	0,88	0,82	0,87	28	5
	0,7	0,85	0,88	0,895	0,902	3	1
11	0,2	0,5	0,87	0,75	0,82	37	7
	0,7	0,82	0,87	0,865	0,835	5	1
5,5	0,2	0,48	0,85	0,75	0,83	37	8
	0,7	0,78	0,85	0,865	0,855	7	1
1,1	0,2	0,36	0,81	0,58	0,72	45	14
	0,7	0,71	0,81	0,73	0,75	11	2
0,75	0,2	0,3	0,73	0,53	0,68	43	15
	0,7	0,61	0,73	0,715	0,735	12	2

Как видно из таблицы, изменения напряжения питания для двигателей до 1,1 кВт при $P_{\text{нагр}}=0,7P_{\text{ном}}$ позволило увеличить $\cos\varphi$ в среднем на 10-12%, КПД на 2%, а для двигателей от 1,1 до 15кВт увеличение КПД составило 1%, $\cos\varphi$ - 3-7%. При этом $\Delta\eta$, $\Delta\cos\varphi$, % определены по формулам:

$$\Delta\eta = \frac{\eta_p - \eta_H}{\eta_H} \times 100\%; \quad \Delta\cos\varphi = \frac{\cos\varphi_p - \cos\varphi_H}{\cos\varphi_H} \times 100\%.$$

Экономическая эффективность, получаемая от использования регуляторов напряжения для указанного мощностного ряда АД может быть определена по указанному ниже алгоритму. При этом учитывались как от снижения потребления активной мощности, так и затраты на компенсацию реактивного тока АД. Расчет рекомендуется проводить в следующем порядке.

1. Снижение потребления активной мощности P_a и экономии энергии $\Delta\mathcal{E}_1$

$$P_a = P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{загр}} \cdot \Delta\eta; \quad \Delta\mathcal{E}_1 = P_a K,$$

где K – среднее время наработки АД (1000 ч, 3000 ч); $K_{\text{загр}}=0,2; 0,7$.

2. Снижение реактивной мощности P_p и экономии энергии $\Delta\mathcal{E}_2$

$$P_p = P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{загр}} \cdot \Delta\cos\varphi; \quad \Delta\mathcal{E}_2 = P_p K.$$

3. Стоимость сэкономленной энергии, обусловленной снижением активной мощности

$$S_a = \Delta\mathcal{E}_2 S_{\text{ЭА}},$$

где $S_{\text{ЭА}} \approx 4,5$ руб/кВт – стоимость 1кВт·ч.

4. Стоимость компенсации реактивного тока в год

$$S_p = \frac{\Delta\mathcal{E}_2 S_k}{P_k T_H K},$$

где S_k - полная мощность компенсатора; P_k - активная мощность компенсатора; T_H - срок эксплуатации.

Для компенсации реактивного тока, потребляемого АД из сети используются синхронные компенсаторы. В расчете применяется синхронный ком-

пенсатор мощности 1000 кВт средней стоимостью 500000 рублей. Учитывалось, что средний срок эксплуатации компенсаторов составляет 15 лет.

5. Средняя стоимость потерь энергии в конденсаторе

$$S_{\text{ПК}} = \Delta \mathcal{E}_2 \cdot 0,05 S_{\text{ЭА}}.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 3.5. Расчеты проводились из условия, что АД большую часть времени работает при $P_{\text{нагр}} = 0,7 P_{\text{ном}}$, т.е. энергетические показатели максимальны.

6. Годовой экономический эффект

$$\Delta \mathcal{E} = (\Delta \mathcal{E}_1 + \Delta \mathcal{E}_2) S_{\text{ЭА}} - S_p = (659,4 + 1785) \cdot 0,45 - 60000 = 50000,$$

где S_p - стоимость регулятора напряжения (60000 р.)

7. Срок окупаемости

$$T = \frac{S_p}{\Delta \mathcal{E}_2} = \frac{60000}{50000} = 1,2.$$

Учитывая, что производство двигателей указанных мощностей является наиболее массовым, определяемым миллионами штук в год, и часть из них работает при значительных недогрузках, на основании проведенных исследований можно сделать вывод, что внедрение регуляторов напряжения приведет к значительной экономии электроэнергии.

Установлено, что целесообразно использовать данные регуляторы в приводах при нагрузке, меньшей $0,6 P_{\text{ном}}$. В противном случае выигрыш в энергетических показателях от изменения напряжения компенсируется ростом потерь в АД от искажения формы кривой напряжения.

Таблица Б.2 – Расчет экономической эффективности микропроцессорного регулятора напряжения МРН000.

Мощность		Экономия электроэнергии, кВт				Стоимость затрат, тыс. руб.																																																
$P_{ном}$	$K_{загр}$	$\Delta \mathcal{E}_1$	$\Delta \mathcal{E}_2$	$\sum \Delta \mathcal{E}_1$	$\sum \Delta \mathcal{E}_2$	S_a	S_p	$S_{пк}$	$S_{общ}$																																													
15	0,2	150	840	465	1785	3780	18,67	189	3987,67																																													
	0,7	315	945							11	0,2	154	814	385	1969	3663	18,09	183,15	3864,24	0,7	231	1155	5,5	0,2	88	407	203,5	1215,5	1831,5	9,04	91,58	1932,12	0,7	115,5	808,5	1,1	0,2	30,8	99	77	353,1	445,5	2,2	22,28	469,98	0,7	46,2	254,1	0,75	0,2	22,5	64,5	54	253,5
11	0,2	154	814	385	1969	3663	18,09	183,15	3864,24																																													
	0,7	231	1155							5,5	0,2	88	407	203,5	1215,5	1831,5	9,04	91,58	1932,12	0,7	115,5	808,5	1,1	0,2	30,8	99	77	353,1	445,5	2,2	22,28	469,98	0,7	46,2	254,1	0,75	0,2	22,5	64,5	54	253,5	290,25	1,43	14,51	306,19	0,7	31,5	189						
5,5	0,2	88	407	203,5	1215,5	1831,5	9,04	91,58	1932,12																																													
	0,7	115,5	808,5							1,1	0,2	30,8	99	77	353,1	445,5	2,2	22,28	469,98	0,7	46,2	254,1	0,75	0,2	22,5	64,5	54	253,5	290,25	1,43	14,51	306,19	0,7	31,5	189																			
1,1	0,2	30,8	99	77	353,1	445,5	2,2	22,28	469,98																																													
	0,7	46,2	254,1							0,75	0,2	22,5	64,5	54	253,5	290,25	1,43	14,51	306,19	0,7	31,5	189																																
0,75	0,2	22,5	64,5	54	253,5	290,25	1,43	14,51	306,19																																													
	0,7	31,5	189																																																			

Приложение В

Технологические испытания оборудования циклического действия

На текстильной фабрике «Купавна» при участии автора проведена работа по экспериментальному определению энергетических и технологических характеристик машин приготовительного цеха аппаратно-прядельного производства. Удельные расходы электроэнергии единой технологической цепочки аппаратно-прядельного производства определялись на основе характеристик P , $\mathcal{E}_y(v)$ при различных ассортиментах и режимах обработки сырья, где P , $\mathcal{E}_y(v)$ – соответственно мощность, потребляемая из сети, удельный расход электроэнергии в функции от производительности (Π) или скоростного режима (v). Для этого замеряли расходы электроэнергии, необходимые для производства данного сорта продукции заданного объема за определенный промежуток времени.

Экспериментальное определение энергетических параметров осуществлялось по общепринятой методике, описанной в работе [79].

В группу трепания входит угароочищающая машина УО-Ш периодического действия, которую используют для трепания и разрыхления отходов, получающихся как в гребенном, так и в аппаратном прядении. Рабочий цикл машины состоит из трех периодов: питания, трепания и выбрасывания.

Целью испытания электропривода УО-Ш было: установить характер изменения мощности, потребляемой машиной, при различных циклах и видах перерабатываемых угаров; определить удельный расход электроэнергии; составить баланс мощности по отдельным элементам и узлам машины.

Испытания машины проводились при переработке угаров с периодами работы, рекомендованными ЦНИИшерсти. Время питания - $T_{п}=1,5$ с (I цикл); время трепания – $T_{тр}=43$ с (II цикл); время выбрасывания $T_{в}=3,5$ с (III цикл); время полного цикла – $T_{ц}=48$ с. [80].

Характер изменения потребляемой мощности УО-Ш при переработке четырех основных видов угаров графически представлен на рисунке В.1. Характер кривых показывает различное потребление электроэнергии при периодическом режиме работы машины. В период питания потребляемая мощность для всех случаев увеличивается на 8% относительно мощности холостого хода, к началу периода трепания потребляемой мощности возрастает от 46% до 67% и по мере разрыхления клочков волокнистого материала убывает до 38-25%, в процессе выбрасывания порции угаров мощность вновь возрастает до 10%. В процессе очищения угаров циклы повторяются более шести раз в минуту, что приводит к колебаниям потребляемой мощности и её потерям. Наиболее энергоемким видом угаров являются отходы после трепальных машин.

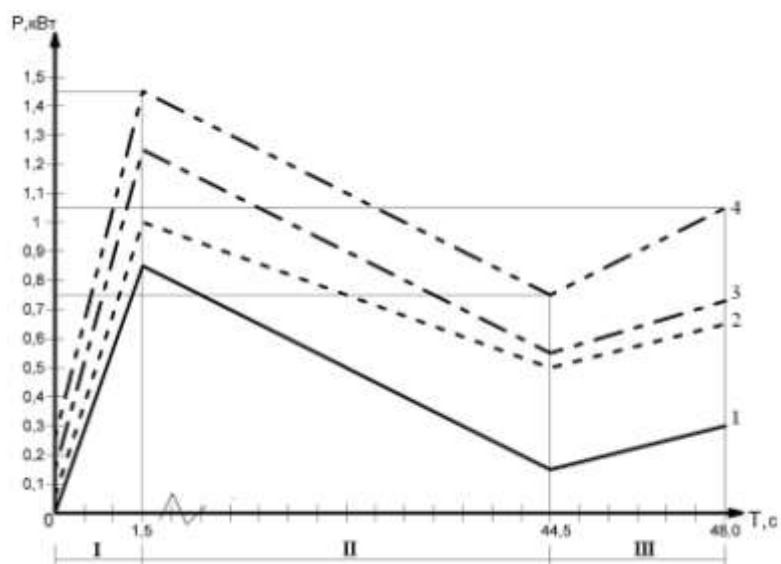


Рисунок В.1 – Характер расходуемой мощности на технологический процесс УО-Ш

Определение удельного расхода электроэнергии проводилось при переработке чистшерстяного сдира (аппаратного), являющегося основным видом сырья для УО-Ш посредством измерения расхода электроэнергии с одновременным учетом количества вырабатываемой продукции. По экспериментальным данным построены зависимости изменения расхода электроэнергии P^* и удельного расхода электроэнергии \mathcal{E}_y от веса перерабатываемого сырья m (рис. В.2).

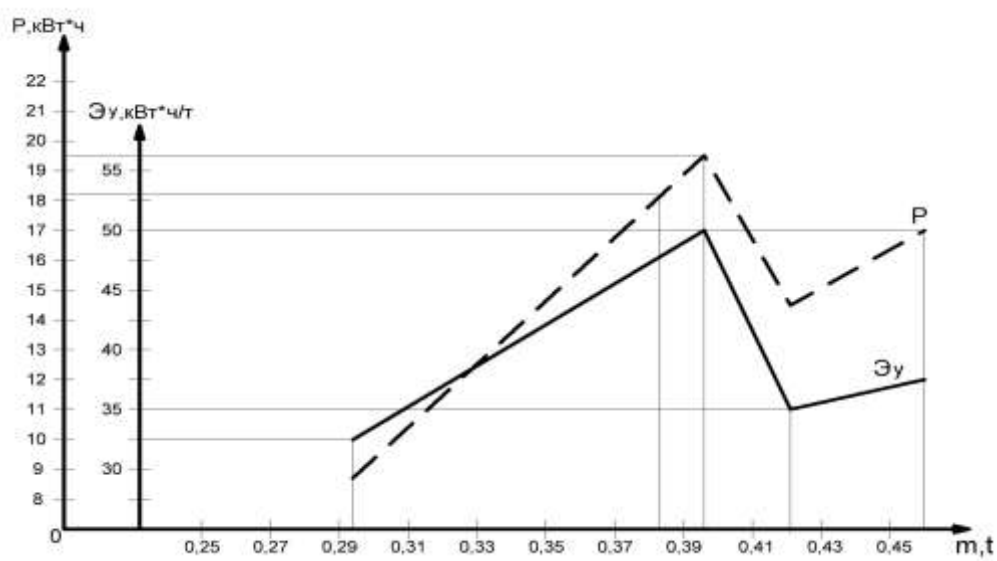


Рисунок В.2 – Энергетические характеристики аппарата УО-Ш

При отсутствии ограничений со стороны программы выпуска оборудования с точки зрения расхода энергии наиболее выгодно эксплуатировать в постоянном режиме максимальной нагрузки и при непрерывной работе, при котором обеспечивается наименьшая величина удельного расхода электроэнергии. В настоящем случае при периодической работе режим нагрузки изменяется, и максимальная величина его соответствует максимальной величине удельного расхода. Поэтому наиболее оптимальным по удельному расходу электроэнергии будет режим, соответствующий минимальному значению $\mathcal{E}_y=34,8$ и среднему значению $P^*=14,4$, что соответствует количеству перерабатываемого сырья $m=0,414$ т.

Смесовая машина С-12М (круглая) используется для замкнутого цикла смешивания и обеспечивает большую равномерность смешивания и более высокую производительность по приготовлению смеси. Применение замкнутого цикла смешивания в смесовых машинных, которые последовательно выполняют роль смесовой машины и расходного механизированного лабаза, позволяет сократить общее число машин в единой технологической цепочке приготовления аппаратной ровницы (ленты), сократить время на чистку смесового оборудования от угаров, увеличить выход ровницы (ленты) и пряжи из смеси.

Машина С-12М имеет периодический режим работы с тремя переменными циклами: загрузка, перевал и выгон смеси. Проведены замеры расхода и потребления электроэнергии смесовой машиной для указанных циклов работы при переработке четырех видов смесей.

Зависимости $P=f(t)$ (рис. В.3) характеризуют режим работы и различный характер электропотребления по циклам и в зависимости от состава перерабатываемой смеси. Наиболее энергоемким циклом является перевал. На рис. В.4 показаны зависимости $P^*=f(m)$ и $\mathcal{E}_y=f(m)$ для каждого цикла работы. Из полученных зависимостей видно, что наиболее благоприятным режимом является работа оборудования при перерабатываемой массе сырья 2,24 т., когда минимальному расходу электроэнергии соответствует минимальный удельный расход электроэнергии на единицу выпускаемой продукции.

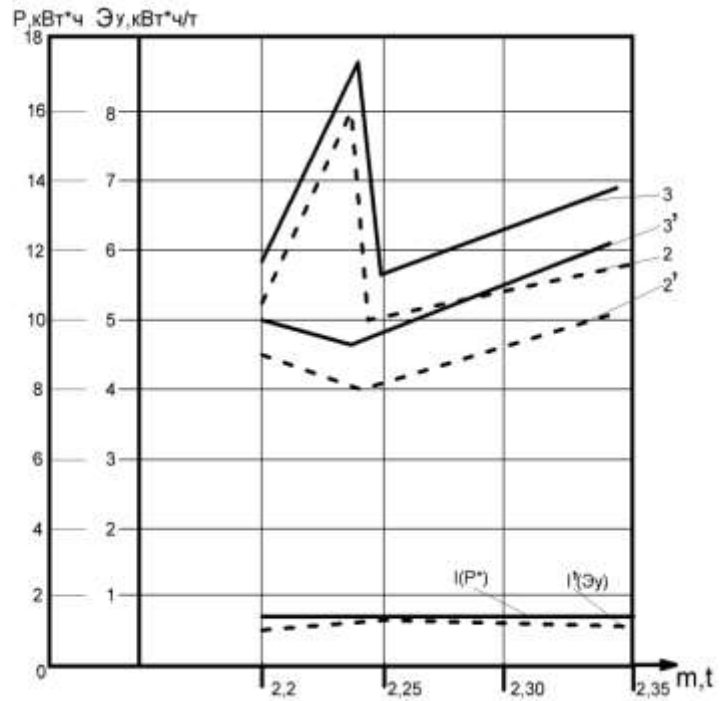


Рисунок В.3 – Зависимости расхода электроэнергии и удельного расхода электроэнергии от массы перерабатываемой смеси на машине С-12М

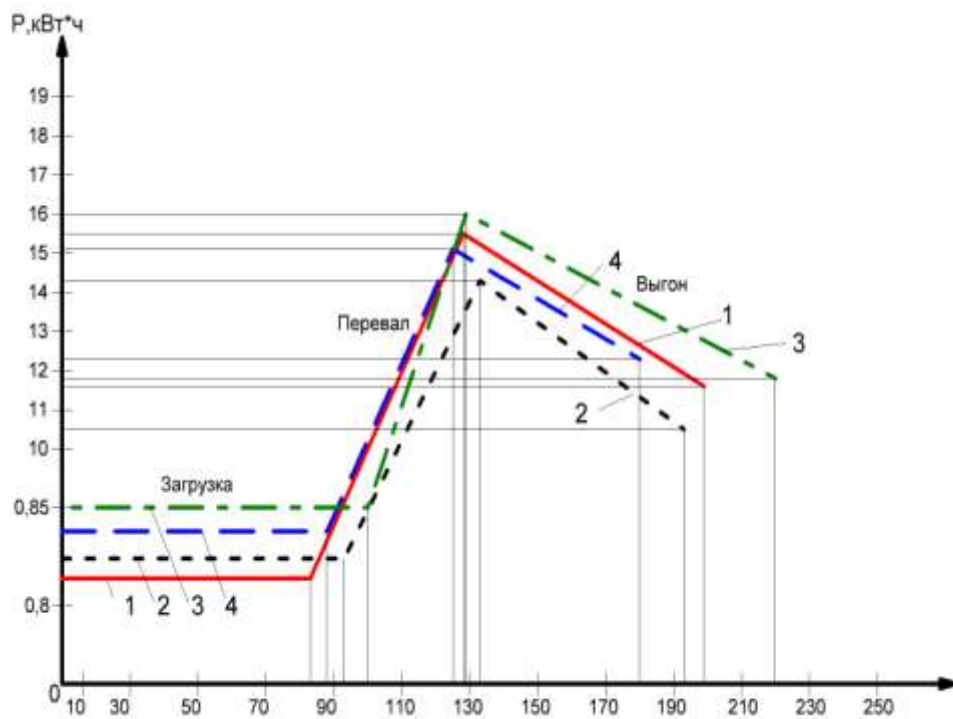


Рисунок В.4 – Режим работы смесовой машины С-12М и характер электропотребления в зависимости от состава перерабатываемой смеси

Приложение Д

Исходные данные ДПТ независимого возбуждения типа ПСТБ-43

Номинальная мощность, кВт.....	2,4
Номинальное напряжение, В.....	220
Номинальный ток якоря, А.....	12,5
Число пар полюсов.....	2
Номинальная частота вращения, с ⁻¹	157
Номинальный момент, Н·м.....	17,1
Кратность перегрузки, I_{max}/I_n	4
Сопротивления якоря, Ом ($R_я$).....	1,34
Индуктивность якорной цепи, мГн.....	0,018
Электромагнитная постоянная времени якорной цепи, с ($T_э$).....	0,046
Момент инерции, кг·м ²	0,26
Постоянная двигателя.....	1,07.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 110091

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ
ХОЛСТООБРАЗОВАНИЯ И НАМАТЫВАНИЯ**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный текстильный университет имени А.Н. Косыгина" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2011120037

Приоритет полезной модели 19 мая 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 10 ноября 2011 г.

Срок действия патента истекает 19 мая 2021 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Национальный исследовательский университет
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

ДИПЛОМ

ЛАУРЕАТА КОНКУРСА

ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РА-
БОТ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ
В ОБЛАСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК
2012 ГОДА

НАГРАЖДАЕТСЯ

ФИЛИМОНОВА ЕКАТЕРИНА МИХАЙЛОВНА

аспирант

Московского государственного текстильного
университета им. А.Н. Косыгина



Ректор

А.И. Рудской

Санкт-Петербург
2012



«Утверждаю»
 Проректор по учебной работе
 Московского государственного
 университета дизайна и технологии
 канд. техн. наук, проф. Козлов А.С.

« _____ » 20 ____ года



АКТ

*внедрения в учебный процесс кафедры «Автоматики и промышленной электроники»
 ФГБОУ ВПО «МГУДТ»
 результатов диссертации Филимоновой Е.М. на тему
 «Разработка методов расчета и оптимизации систем энергосберегающего управления
 электромеханическими системами технологического оборудования»*

Мы, нижеподписавшиеся, комиссия в составе: председателя, начальника учебного управления, канд. техн. наук, профессора Рыкова С.П. и членов: заведующего кафедрой «Автоматики и промышленной электроники» канд. техн. наук, профессора Румянцев Ю.Д., научного руководителя, д-ра техн. наук, проф. Полякова А.Е., заместителя начальника учебно-методического управления канд. техн. наук, доц. Петровой Т.В. удостоверяем, что результаты диссертационного исследования Филимоновой Е.М. внедрены в учебный процесс для подготовки бакалавров по следующим направлениям подготовки 29.03.02 «Технологии и проектирование текстильных изделий», 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование».

Лабораторный комплекс многодвигательного электропривода используется при проведении лабораторных работ по дисциплинам «Автоматизированный электропривод», «Управляемые электротехнические комплексы». Он также используется при проведении УИРС, в курсовом и дипломном проектировании. Лабораторный комплекс позволяет исследовать управляемые электротехнические комплексы с транспортирующими, наматывающими и крутильно-мотальными механизмами на базе современных интеллектуальных систем управления и современных энергосберегающих электроприводов постоянного и переменного тока.

Председатель:
 Начальник учебного управления,
 канд. техн. наук, профессор
 Члены комиссии:
 Заведующий кафедрой автоматике и
 промышленной электроники
 канд. техн. наук, профессор
 Научный руководитель,
 д-р техн. наук, проф.
 Заместитель начальника учебно-
 методического управления
 канд. техн. наук, доц.
 Подписи членов комиссии заверяю,
 начальник отдела кадров

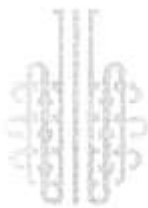

 Рыков С.П.


 Румянцев Ю.Д.


 Поляков А.Е.


 Петрова Т.В.


 Калиночкина Е.В.



ООО «ТЕКС-ЦЕНТР»

Юридический адрес: 107076, г. Москва
ул. Электrozаводская, 29
ИНН 7718103358

Почтовый адрес: 105005, г. Москва
ул. М. Почтовая, 2/2
КПП 771801001

17 сентября 2014 г. № 160

« _____ » _____ 2014


В федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный
университет дизайна и технологии»
Белгородскому В.С.

СПРАВКА

об апробации результатов, проведенных исследований по разработке методики анализа, расчета и оптимизации энергосберегающих режимов энергоемкого технологического оборудования

Настоящий документ подтверждает заинтересованность ООО «ТЕКС- ЦЕНТР» г. Москва и принятие к практическому использованию методики анализа, расчета и оптимизации энергосберегающего управления электромеханическими системами технологического оборудования, разработанной аспирантом Филимоновой Екатериной Михайловной под руководством доктора технических наук, профессора Полякова Анатолия Евгеньевича. Данный метод позволяет обеспечить повышение эффективности технологического оборудования за счет оптимизации и управления скоростными режимами согласно технологическому регламенту. При разработке были использованы современные компьютерные и информационные технологии, такие как нейронные сети, нечеткая логика и когнитивные карты.

Разработанные положения методики анализа, расчета и оптимизации энергосберегающего управления электромеханическими системами технологического оборудования приведены к алгоритмически завершеному виду, допускающему его практическое применение.

Генеральный директор ООО «ТЕКС-ЦЕНТР»  к.т.н. Леваикова Н.М.