

На правах рукописи



Микитинский Александр Петрович

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Новочеркасск

2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Научный консультант:

Лобов Борис Николаевич

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Мещеряков Виктор Николаевич,

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет», заведующий ка-
федрой «Электропривод», (г. Липецк)

Гасияров Вадим Рашитович,

доктор технических наук, доцент, ФГАОУ
ВО «Московский политехнический универ-
ситет», заведующий кафедрой «Мехатро-
ника и управление», (г. Москва)

Горячев Олег Владимирович,

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет», заведующий кафедрой «Си-
стемы автоматического управления»
(г. Тула)

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государствен-
ный электротехнический университет «ЛЭТИ» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится « 7 » февраля 2025 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании дис-
сертационного совета 24.2.324.05, созданного на базе федерального государ-
ственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»
по адресу: 455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнито-
горский государственный технический университет им. Г.И. Носова», на офици-
альном сайте: <http://www.magtu.ru/>.

Автореферат разослан « 12 » ноября 2024 года.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными пе-
чатью, просим направлять по адресу: 455000, Россия, Челябинская обл., г. Маг-
нитогорск, пр. Ленина, 38.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.324.05

канд. техн. наук, доцент



Одинцов Константин Эдуардович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В реальных электротехнических системах представление о жесткой связи вала электродвигателя и исполнительного механизма является допущением. В промышленности широко применяются электроприводы, где такие допущения неприемлемы. Особенно остро данная проблема возникает при создании современных быстродействующих приводов. Существует два вида упругих связей: упругости первого и второго рода. Упругости первого рода – это упругость валов, канатов и других элементов, расположенных между исполнительным механизмом и двигателем. Если в качестве упругого элемента выступает транспортируемый или обрабатываемый материал (композиционный материал, бумажное полотно, ткань, корд, синтетический материал и тому подобное), то такой электропривод называется электроприводом с упругостью второго рода.

Электроприводы с упругостями второго рода применяются при производстве различных полимерных пленок, при работе с бумажной лентой в процессе ее перемотки и нанесения на нее информации или при обработке, при намотке и размотке рулонов металлической полосы или проволоки, при намотке катушек магнитопровода, и других подобных процессах, а также при намотке изделий из композиционных материалов.

Проведенный анализ показал, что во всех технологических процессах намотки последняя производится на круглую оправку, то есть наматываются цилиндрические изделия (кроме катушек магнитопровода). Данные процессы достаточно хорошо изучены. Однако при намотке композиционных изделий наматываются изделия различной формы: цилиндра, конуса, шара, кокона, призмы и других. Форма наматываемых изделий существенно влияет на режимы работы электропривода. Поэтому в работе рассмотрен процесс намотки изделий из композиционных материалов.

Композиционные изделия, изготавливаемые методом намотки и выкладки, находят широкое применение во многих отраслях промышленности благодаря хорошим физико - механическим свойствам: высокой антикоррозийности, стойкости к агрессивным жидкостям, низкой теплопроводности, радиопрозрачности, способности выдерживать без повреждения высокую температуру. Потребность в композиционных изделиях в машиностроении, авиации, судостроении, энергетике, нефтехимической промышленности, установках для очистки воды постоянно растет. Это обуславливает расширение ассортимента композиционных конструкций, усложнение их формы, возрастание требований к качеству изделий. В нормативных материалах «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» предусмотрено резкое увеличение использования композиционных изделий в различных отраслях промышленности.

В Постановлении Правительства от 15 апреля 2014 г. №328 в рамках подпрограммы №14 «Развитие производства композиционных материалов (композитов) и изделий из них» государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности» предусматривается широкое использование композиционных материалов (КМ) и изделий из них в различных секторах экономики. В соответствии с «дорожной картой» по реализации указанной программы в городе Москве и 65 субъектах Российской Федерации приняты и реализуются отдельные региональные программы, предусматривающие разработку и применение композиционных материалов и современных изделий из них. В данных программах намечено резкое увеличение производства композиционных конструкций в гражданских секторах экономики: на транспорте, в строительной индустрии, энергетике, химии и нефтехимии, жилищно-коммунальном комплексе.

Актуальность настоящей работы определяется необходимостью создания современного оборудования, удовлетворяющего требованиям по обеспечению заданных технологических регламентов намотки и выкладки, обладающего высокой надёжностью при длительной работе.

Степень разработанности темы исследования. В развитие методов расчета электротехнических систем (ЭТС) намоточных устройств в различных отраслях и моделирование процессов намотки большой вклад внесли многие отечественные ученые Бондарев Н.И., Дружинин Н.Н., Иванов Г.М., Лисовская Г.Г., Маринин В.И., Онищенко Г.Б., Осипов О.И., Прокофьев Г.И., Рассудов Л.Н., Рыбников С.И., Соколовский Г.Г., Файнберг Ю.М., Филатов А.С., Хуторецкий В.М., Шукшунов В.Е., Щербина Ю.В. и зарубежные ученые такие как Chen Z., Farese Frank B., Fu H., Grove C., Hong Q., Ikononopoulos G., Krut'ko P., Lu H., Marchetti M., Nazarov V., Ren S.-L., Rosato D., Shi Y., Tang H., Wang Y.-Z., Wang, C., Zhang H. Рач В.А. и другие.

Анализ показал, что, несмотря на выполненные исследования, вопросы создания и практического применения ЭТС намоточных устройств изделий из КМ проработаны недостаточно. Отсутствует системная классификация изготавливаемых методом намотки изделий, что не позволяет обоснованно выбирать структуру ЭТС, ее состав с учетом специфики процессов, происходящих при намотке изделий.

ЭТС, применяемые в настоящее время в промышленности, не в полной мере соответствуют современным требованиям по точности отработки заданных законов силовой намотки при производстве композиционных изделий. Непосредственно применить эти ЭТС натяжения для производства композиционных конструкций невозможно, потому, что они не учитывают специфические особенности процесса намотки и выкладки изделий из КМ.

Решение задачи обеспечения заданного качества процесса регулирования натяжения композиционной ленты в широком диапазоне задаваемых уровней для различных изделий требует учета конструктивных особенностей лентопротяжного тракта оборудования. Для этого необходимо разработать математическую модель упругой ленты, которая учитывала бы специфические особенности намотки современных изделий из композиционных материалов. Особенностью

ЭТС натяжения является то, что к ним предъявляются жесткие требования в отношении режимов пуска оборудования, так как в это время может произойти нарушение структуры наматываемого изделия.

До настоящего времени при проектировании намоточного оборудования натяжное устройство выбиралось без учета специфических особенностей самого натяжного устройства и геометрии наматываемого изделия. Недостаточно полно было разработано математическое описание натяжных устройств, не было исследовано влияние процесса намотки на величину статического момента, возникающего на валу привода, связанного с натяжным устройством. Зависимость угла охвата лентой от угла поворота исполнительного механизма или перемещения ролика этого механизма также не была определена.

Исходя из вышеизложенного возникла необходимость выполнить анализ наиболее распространенных натяжных устройств, используемых при намотке изделий из «мокрого» композиционного материала, разработать их математические модели, а также сформулировать рекомендации по выбору натяжных устройств.

Характерными особенностями рассматриваемого технологического оборудования является нелинейность математической модели объекта управления (ОУ), нестационарность его параметров, многосвязность, цикличность работы оборудования.

Нестационарность ОУ обусловлена рядом факторов: применением при изготовлении изделий нескольких типов лент, имеющих разные модули упругости и площади поперечного сечения; в процессе укладки на оправку композиционная лента может нагреваться, что меняет ее физико-механические свойства; возможностью намотки на одном оборудовании различных изделий как по размерам, так и по форме; изменением радиуса намотки изготавливаемого изделия, скорости движения композиционного материала и момента инерции изготавливаемого изделия. Ряд коэффициентов, в том числе коэффициент вязкого трения (при «мокрой» намотке), зависят от многих факторов: натяжения ленты; температуры материала в зоне контакта, скорости движения композиционной ленты. Зависимость эта нелинейная и нестационарная.

Поскольку форма изготавливаемых изделий, в конечном счете, определяет выбор метода синтеза ЭТС намоточного оборудования, необходимо учитывать два случая:

- намотки изделий цилиндрической формы;
- намотки изделий сложной формы («Шар», «Кокон», «Призма» и т. п.).

Форма изделий рассматривается с позиции влияния ее на работу ЭТС натяжения, выбора методов анализа и синтеза, которые используются при разработке ЭТС натяжения.

В первом случае, при синтезе систем регулирования используется линеаризованная методом малых отклонений математическая модель ОУ. Линеаризация производится при «замороженных» коэффициентах дифференциальных уравнений. Как показали исследования, проведенные в работе, линеаризация указанным методом дает большие ошибки при работе системы в реальных условиях так как в процессе намотки или выкладки изменяются натяжение, скорость

движения композиционного материала и другие технологические параметры намотки. Это необходимо учитывать при синтезе регуляторов систем управления электроприводами.

Во втором случае, при изготовлении изделий сложной формы, кроме перечисленного ранее, радиус намотки, длина зоны деформации композиционного материала изменяются быстро и в широких пределах. Данное обстоятельство существенно усложняет техническую реализацию ЭТС. В данном случае целесообразно использовать текущую идентификацию параметров ОУ и адаптивные регуляторы.

Повышение уровня требований к качеству наматываемых изделий приводит к необходимости создания перспективных ЭТС натяжения, которые учитывают специфические свойства процесса намотки и выкладки композиционных изделий.

Данная работа посвящена решению **научной проблемы** по развитию теории и практики создания электротехнических систем, обеспечивающих повышение точности натяжения композиционного материала при намотке и выкладке изделий. Создание и внедрение разработанных электротехнических систем позволит обеспечить высокие качественные характеристики наматываемых изделий, что имеет важное хозяйственное значение для развития страны.

Объектом исследования являются электротехнические комплексы и системы, используемые при намотке и выкладке различных изделий из композиционных материалов.

Предметом исследования являются методологии расчета, анализа и синтеза ЭТС, используемых для создания натяжения композиционного материала при намотке и выкладке различных изделий.

Цель диссертационной работы – повышение качества изготавливаемых изделий благодаря разработке методологии электротехнических систем регулирования натяжения при намотке и выкладке изделий из композиционных материалов, учитывающей особенности технологического процесса стадии формообразования конструкций из композиционных материалов и на ее основе созданию современных ЭТС натяжения КМ, позволяющих не менее чем в два раза уменьшить отклонения натяжения от заданного значения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проанализированы наматываемые изделия с точки зрения их влияния на процесс работы ЭТС натяжения, выполнена классификация наматываемых изделий по степени этого влияния;

- рассмотрено и оценено влияние натяжения на качественные характеристики изделий из композиционных материалов, сформулированы и обоснованы требования к ЭТС натяжных устройств по точности отработки заданных программ намотки;

- разработана математическая модель нелинейного и нестационарного объекта управления с учетом упругих характеристик используемого композиционного материала и особенностей конструкций, наматываемых и выкладываемых изделий;

- получены аналитические выражения, позволяющие определить мощность электропривода ЭТС исходя из заданных характеристик ЭТС натяжения;
- для различных вариантов используемых натяжных устройств получены аналитические выражения, описывающие эти устройства, и предложены рекомендации по созданию ЭТС натяжных устройств;
- разработан метод синтеза ЭТС устройств намотки и выкладки изделий различной формы сложности из композиционных материалов;
- разработаны технические решения и рекомендации по созданию систем управления электроприводами при изготовлении композиционных изделий различной формы сложности.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались методы теории электропривода, систем автоматического управления, вычислительной математики, методы теории планирования экспериментов, численные методы решения систем нелинейных дифференциальных уравнения, метод конечных элементов, программные продукты системы MatLab.

Достоверность полученных результатов работы определяется корректностью и обоснованностью принятых допущений, адекватностью используемых математических моделей исследуемым процессам, и подтверждением хорошей сходимости результатов аналитических расчётов и математического моделирования с экспериментальными данными. Обоснованность основных выводов и рекомендаций подтверждена испытаниями и внедрением предложенных технических решений при создании систем управления электроприводами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые разработана системная классификация наматываемых изделий в зависимости от их геометрии и требований, предъявляемых к условиям их эксплуатации, диапазона и скорости изменения параметров в процессе намотки, которая позволяет обоснованно осуществлять выбор ЭТС управления процессом намотки (соответствует области исследования п.1 паспорта специальности).

2. Разработано математическое описание упругой композиционной ленты, которое в отличие от существующих учитывает изменение параметров в процессе намотки изделий сложной геометрической формы, что позволяет использовать его для анализа процессов, происходящих в ЭТС натяжения (соответствует области исследования п.1 паспорта специальности).

3. Разработаны оригинальные математические модели ЭТС натяжения композиционной ленты, которые отличаются тем, что учитывают специфику намотки изделий из композиционных материалов и позволяют использовать их при анализе и синтезе ЭТС натяжения, что повышает точность отработки системы управления заданных законов намотки (соответствует области исследования п.1 паспорта специальности).

4. Впервые предложена оригинальная методика выбора мощности привода натяжных устройств с учетом геометрии наматываемых или выкладываемых изделий, что позволяет обоснованно выбирать тип и мощность привода (соответствует области исследования п.2 паспорта специальности).

5. Предложены и обоснованы рациональные структуры ЭТС, используемых при намотке и выкладке изделий из композиционных материалов, отличающиеся тем, что позволяют обеспечить заданную точность поддержания натяжения наматываемого материала, сократить время, затрачиваемое на проектирование и наладку систем регулирования натяжения (соответствует области исследования п.3 паспорта специальности).

6. Разработан метод синтеза электротехнических систем натяжения устройств намотки и выкладки изделий сложной формы, отличающийся учетом изменения параметров объекта управления в процессе намотки, что обеспечивает высокие технические характеристики проектируемых и модернизируемых ЭТС натяжения и выкладки, позволяет определять рациональные алгоритмы управления для различных условий эксплуатации (соответствует области исследования п.3 паспорта специальности). Метод включает в себя:

- методику синтеза робастной ЭТС натяжения, позволяющую синтезировать ЭТС натяжения для намотки изделий простой геометрической формы с невысокими требованиями к точности поддержания заданных законов намотки (соответствует области исследования п.3 паспорта специальности);

- методику синтеза адаптивных ЭТС натяжения при намотке изделий сложной геометрической формы и изменении параметров объекта управления в широких пределах (соответствует области исследования п.3 паспорта специальности);

- методику синтеза электротехнических систем регулирования натяжения устройств намотки изделий сложной формы, отличающаяся тем, что учитывает быстрые изменения параметров объекта управления в процессе намотки (соответствует области исследования п.3 паспорта специальности).

Достоверность сформулированных научных положений и выводов подтверждена следующим: аналитическим выводом дифференциальных и интегральных уравнений, описывающих процесс намотки; корректным применением математического аппарата; использованием проверенных взаимодействий инструментов и материалов; проведенными испытаниями разработанных систем управления натяжением композиционной ленты.

Практическая ценность работы.

В процессе выполнения работы получены следующие результаты, имеющие практическую ценность:

- методика выбора мощности привода натяжных устройств, реализованная при модернизации намоточного станка КУ-421М для изготовления Силовой оболочки корпуса ВПХО системы РБАС РН «Союз-5» 374СА11.10.00.110 (АЕВ 02101.13080);

- адаптивные ЭТС натяжения, учитывающие форму наматываемых изделий, реализованы при модернизации намоточного станка КУ-479ФЗ для изготовления Силовой оболочки корпуса соединительного отсека 18СП3927.00.000, 18СП3928.00.000 (АЕВ 02101.13826, АЕВ 02101.13829);

- технические предложения и схемные решения для реализации ЭТС натяжения композиционной ленты реализованы при модернизации намоточного станка КУ-489ФЗ для изготовления Силовой оболочки корпуса ОРД системы

РБАС РН «Союз-5» 374СА11.01.10.000 (АЕВ 02101.11009, АЕВ 02101.11.300) и Силовой оболочки корпуса УРД системы РБАС РН «Союз-5» 374СА11.02.02.000 (АЕВ 02101.10977);

- метод синтеза ЭТС регулирования натяжения при намотке изделий различной формы реализован при создании автоматизированных систем управления технологическими процессами при изготовлении опытных образцов и в мелкосерийном производстве ряда изделий, а также для модернизации автоматизированной линии по ламинированию Lamitex-1400/60 при изготовлении синтетического полотна в серийном производстве.

Эффективность разработанных технических решений подтверждена АО «ЦНИИСМ», г. Хотьково, Московской обл., ООО фирма «Пластик Энтерпрайз», г. Новочеркасск, Ростовской обл., ООО «Дон-Тек», г. Шахты, Ростовской обл.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения заключается в улучшении качества наматываемых изделий, уменьшении расхода материала на их изготовление, уменьшении брака изделий.

Практическим результатом работы, внедренным в учебный процесс, является курс лекций по дисциплине «Автоматизированные электромеханические системы», читаемый обучающимся 2-го курса магистратуры по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Научные положения, выносимые на защиту:

- системная классификация изготавливаемых методом намотки изделий на классы и подклассы в зависимости от требований, предъявляемых к ним по условиям эксплуатации и по геометрической форме изделия, что позволяет обоснованно определять структуру и состав автоматических систем регулирования натяжения композиционных лент;

- математические модели ЭТС при намотке изделий из композиционной ленты, которые, описывают динамические процессы, при изготовлении как простых («Цилиндр», «Конус»), так и сложных («Призма», «Кокон», «Шар») изделий;

- методика выбора мощности привода натяжных устройств, учитывающая динамические моменты, возникающие в электроприводе, при намотке композиционных изделий;

- метод синтеза систем ЭТС натяжения композиционной ленты при изготовлении изделий различной формы:

- методика синтеза систем регулирования натяжения при намотке изделий «Цилиндр» и «Конус» из композиционной ленты, с невысокими требованиями к точности поддержания параметров регулирования;

- методика синтеза систем регулирования при намотке изделий «Кокон», «Шар» с текущей идентификацией параметров объекта управления, адаптацией регулятора системы;

- методика синтеза регулятора при намотке изделий сложной формы с прогнозом состояния системы с учетом быстрых, изменений параметров объекта управления в процессе намотки.

Реализация результатов работы. Основные научные положения, инженерные методики и рекомендации диссертационной работы внедрены на ряде

предприятий, а также в учебном процессе ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова в виде курсов лекций:

- 1) в 2022 году в АО «ЦНИИСМ» (г. Хотьков, Московская обл.) на намоточных станках КУ-489Ф3 (технические предложения и схемные решения для реализации ЭМС натяжения композиционной ленты), КУ-421М (методика выбора мощности привода натяжных устройств, позволяющая обоснованно выбирать привод, и в конечном итоге повысить точность отработки заданных законов намотки реализована при модернизации намоточного станка), КУ-479Ф3 (адаптивные ЭМС натяжения, учитывающие форму наматываемых изделий реализованы при модернизации намоточного станка при изготовлении конструкций для ракеты носителя «Союз-5»);
- 2) в 2022 году в ООО «Фирма «Пластик Энтерпрайс» при создании автоматизированных систем управления технологическими процессами при изготовлении опытных образцов и в мелкосерийном производстве ряда изделий;
- 3) в 2023 году в ООО «Дон-Тек» для модернизации автоматизированной линии по ламинированию Lamitex-1400/60 при изготовлении синтетического полотна в серийном производстве;
- 4) практическим результатом работы, внедренным в учебный процесс, является курс лекций по дисциплине «Автоматизированные электромеханические системы», читаемый обучающимся 2-го курса магистратуры по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Ожидаемый экономический эффект от внедрения заключается в улучшении качества наматываемых изделий, уменьшении расхода материала на их изготовление, уменьшении брака изделий.

Публикации. По теме диссертации опубликованы лично и в соавторстве 43 печатных работы, в том числе, 10 статей опубликованы, в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени доктора наук, 1 патент РФ на полезную модель, 10 статей проиндексированы в международных базах Web of Science и SCOPUS.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на: Всероссийском электротехническом конгрессе с международным участием ВЭЛК-99 На рубеже веков: итоги и перспективы (Москва, 1999 г.); VIII-XII международных (XIX-XXIII всероссийских) конференциях по автоматизированному электроприводу (Саранск, 2014 г., Пермь, 2016 г., Новочеркасск, 2018 г., Санкт Петербург, 2020 г., Тула, 2022 г.); XVII, XIX, XX международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях» (Кострома, 2004 г., Воронеж, 2006 г., Ярославль, 2007 г.); XLIV, XLV международных научно – технических конференциях «Кибернетика энергетических систем» (Новочеркасск, 2022, 2023 г.); 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives, IWED 2021 - Proceedings, 2021 (Москва, МЭИ, 2021 г.); III Международной научно-практической конференции Перспективы развития технических наук (Челябинск, 2006 г.); Всероссийской научной школе Мехатронные информационно-управляющие системы (Новочеркасск, 2011 г.); 2nd and 5nd International Conferences on Industrial Engineering / Applications

and Manufacturing, ICIEAM 2016, 2019 (Челябинска, Новочеркасск 2016 г., 2019 г.); IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. (Ростов-на-Дону, 2021 г.); Products Proceedings - 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019, 2023 (Сочи, 2019 г., 2023 г.); Lecture Notes in Electrical Engineering, 2020; Всероссийской научно-практической конференции «Интеграция науки и практики как механизм развития отечественных наукоемких технологий производства» (Каменск-Шахтинский, 2016 г., 2021 г.), XXXI Всероссийском научно-техническом семинаре «Актуальные вопросы электропривода» (Москва, МЭИ, 2024 г.); Международная научно-практическая конференция «Автоматизированный электропривод, робототехника и электроэнергетика» (Липецк, 2024 г.)

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы:

-п.1: рассматриваются вопросы развития общей теории электротехнических комплексов, используемых при изготовлении изделий из композиционных материалов, разработаны математические модели упругой ленты, получены аналитические выражения для натяжных устройств, предложена новая методика выбора мощности привода натяжных устройств, получены обобщенные структурные схемы электромеханического преобразователя натяжного устройства при намотке изделий, проведено математическое моделирование разработанных систем регулирования;

-п.2: в работе разработаны математические модели упругой ленты, получены аналитические выражения для натяжных устройств, предложена новая методика выбора мощности привода натяжных устройств;

-п.3: в работе получены обобщенные структурные схемы электротехнического преобразователя натяжного устройства при намотке изделий из композиционного материала, разработан метод синтеза ЭТС натяжения композиционной ленты при изготовлении изделий различной формы, состоящий из трех методик, методики синтеза простых электротехнических систем регулирования натяжения и методики синтеза электротехнических систем регулирования с текущей идентификацией параметров объекта управления, адаптацией регулятора системы; методики синтеза регулятора электротехнической системы с прогнозом состояния системы; проведено математическое моделирование разработанных электротехнических систем регулирования натяжения;

-п.4: в работе проведены исследования разработанных электротехнических систем управления натяжением в различных режимах работы оборудования и при различных внешних воздействиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, изложенных на 369 страницах машинописного текста, и содержит 177 рисунка, 26 таблиц и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована решаемая в диссертационной работе научно-техническая проблема, обоснованы актуальность, цель, направления исследований, сформулированы основные задачи диссертации, приведена структура работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационной работы рассмотрена особенность работы электроприводов в механизмах намотки и выкладки. Показано, что в зависимости от формы изготавливаемых изделий, изменяются режимы работы ЭТС натяжения композиционного материала.

Исследования показали, что тракт намотки и управление натяжением существенно влияют на качество изготавливаемых композиционных изделий. Однако, реализации качественных электротехнических систем натяжения препятствует отсутствие математического описания тракта намотки, в том числе и упругой композиционной ленты. Наши исследования показали, что даже при упрощении полученного математического описания упругой ленты получается объект с переменными параметрами, что, в свою очередь, накладывает ограничения на реализацию ЭТС натяжения, и возникает вопрос об использовании адаптивных ЭТС.

Отмечено, что в настоящее время широко используются активные шпулярики, как правило, число шпуль ограниченное (до 48 шт.).

При выкладке, в основном, используется несколько бобин с предварительно пропитанной лентой (до 12 шт.), которые в выкладной головке собираются в единую ленту. При этом необходимо, чтобы натяжение каждой ленточки было одинаковым и постоянным независимо от скорости выкладки, а скорость при выкладке меняется от нуля до максимально возможной. При этом в таких ЭТС могут использоваться тормозные устройства, связанные с бобинами с лентой, или дополнительно тракт смотки может оснащаться промежуточным натяжным устройством. Возможно и использование амортизаторов в виде пружин, уменьшающих динамические нагрузки на привод.

Проведен анализ тенденций развития электротехнических систем для изготовления изделий из композиционных материалов методом намотки и выкладки. Проведенный обзор современных ЭТС намотки показал, что автоматические системы регулирования, применяемые в настоящее время, не в полной мере соответствуют современным требованиям по точности отработки заданных законов силовой намотки при производстве композиционных изделий. Системы же, используемые в других отраслях промышленности, непосредственно применить для производства композиционных конструкций невозможно, потому, что они не учитывают специфические особенности процесса намотки и выкладки изделий из композиционных материалов.

Впервые предложена системная классификация изделий, изготавливаемых методом намотки. Классификация проведена на основании условий эксплуатации и формы изделий, изготавливаемых методом намотки.

Изделия разбиты на два класса: к первому классу отнесены изделия, с жесткими условиями эксплуатации; ко второму классу отнесены изделия, которые эксплуатируются при нежестких условиях.

Показано, что все разнообразие изготавливаемых изделий можно объединить в шесть подклассов. К первому подклассу относятся изделия, при изготовлении которых диаметр намотки изменяется незначительно, и можно считать, что линейная скорость намотки остается постоянной (таблица 1).

Назовем эти изделия – «Цилиндр» (рисунок 1, а). Динамические моменты привод при намотке развивает очень редко, только при пуске оборудования. Ко второму подклассу относятся изделия в виде бобин с материалом. К третьему подклассу относятся изделия типа «Конус», при намотке которых диаметр изменяется значительно (рисунок 1, б) – до трех раз и более за один проход. Динамические моменты привода при намотке данных изделий незначительные. К четвертому подклассу систем относятся изделия типа «Кокон» и «Шар» (рисунок 1, в, г). При намотке таких изделий возникают достаточно большие динамические моменты. К пятому подклассу относятся изделия типа «Призма» (рисунок 1, д, е). При намотке таких изделий возникают существенные динамические

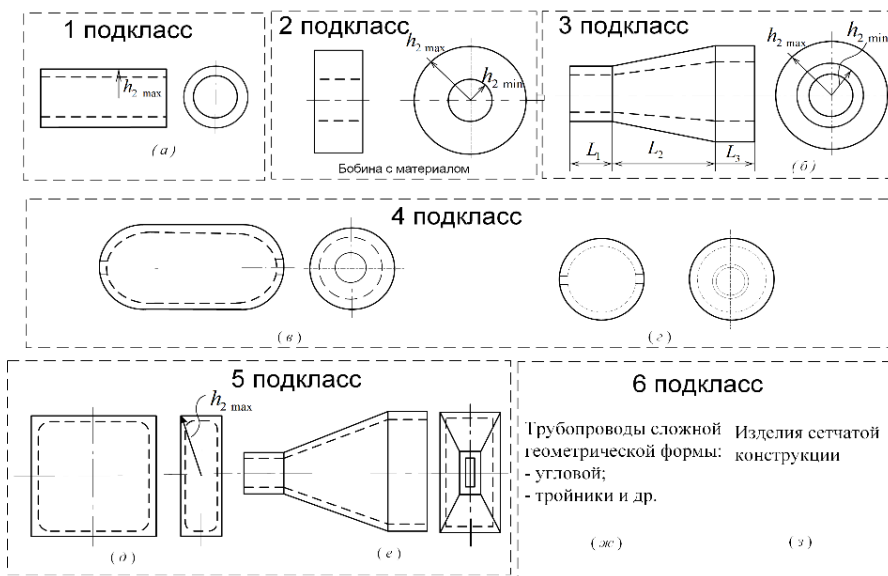


Рисунок 1 – Форма изделий, изготавливаемых методом намотки

моменты, развиваемые приводом, скорость изменения параметров намотки соизмерима с временем переходных процессов в электроприводе, параметры намотки изменяются очень резко. К шестому подклассу относятся трубопроводы сложной формы (уголки, тройники и др., рисунок 1, ж) и изделия сетчатой структуры (соединители,

высоковольтные столбы и др., рисунок 1, з).

Классификация учитывает основные особенности изготовления изделий из композиционных материалов и управления ЭТС натяжения в процессе изготовления. Классификация позволяет выполнять обобщение результатов исследований и унифицировать принимаемые технические решения.

Приведенная классификация позволяет на этапе проектирования ЭТС натяжения композиционного материала, в зависимости от номенклатуры выпускаемых изделий, учесть основные особенности изготовления изделий методом намотки разнообразных изделий, выполнить обобщения результатов исследований и унифицировать принимаемые технические решения (выбор структурной схемы, расчета мощности двигателей исполнительных механизмов, выбор структуры и расчета регуляторов ЭТС).

В процессе намотки изделий из композиционных материалов в изделии формируется предварительно напряженное состояние.

Натяжение, с которым материал наматывается на оправку, зависит как от теоретически рассчитанной программы намотки, так и от точности отработки ее электроприводом. В процессе намотки изделия ЭТС натяжения подвержена случайным воздействиям, и поэтому происходят отклонения δx_j натяжения материала от их требуемых значений $x_j^{\text{ОПТ}}$. Эти отклонения являются случайными ошибками единого процесса управления натяжением. Допустимые отклонения δx_j (погрешность регулирования натяжения), характеризуются дисперсией $D_{\delta x}$. Поскольку допустимые отклонения δx_j и δf во всех точках характеризуются одной величиной $D_{\delta x}$, с использованием метода конечных элементов, получено:

$$st[\delta x] \leq \Delta C \cdot \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial C}{\partial x_j} \right)_{\bar{x}=\bar{x}^{\text{ОПТ}}}^2 \right]^{-0.5}; \quad st[\delta x] \leq \left\{ \left[1 + \delta f - |f_K(x^{\text{ОПТ}}; \xi_K, \eta_K)| \right] \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial f_K}{\partial x_j} \right)_{\bar{x}=\bar{x}^{\text{ОПТ}}}^2 \right]^{-1} \right\}^{0.5}.$$

Таблица 1 – Значения отношений параметров для наиболее характерных конструкций наматываемых изделий

Тип изготавливаемого изделия по рисунку 1	Параметры			
	$\frac{h_{2\max}}{h_{2\min}}$	$\frac{l_{1\max}}{l_{1\min}}$	$\frac{dl_1}{dt}$, м/с	$\frac{dh_2}{dt}$, м/с
<i>a</i>	1,2	1,01	10^{-5}	10^{-5}
Бобины с наматываемым материалом	6	1,01	10^{-5}	10^{-4}
<i>b</i>	3	1,02	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$
<i>в, г</i>	20	3	1,0	1,0
<i>д, е</i>	10	2,5	1,0	1,0

Здесь $st[\delta x]$ – средне-квадратическое значение ошибки регулирования натяжения; ΔC – допустимые отклонения целевой функции C , характеризующие качественные

характеристики изделия; ξ_K, η_K – координаты точек изделия, имеющего форму вращения; δf – функция, характеризующая условия прочности композита.

Здесь и далее приводимые числовые значения параметров намотки различных изделий основываются на опыте эксплуатации реального намоточного оборудования и анализе литературных источников.

Проведенные расчеты показали, что при намотке изделий, к которым не предъявляются требования по жестким условиям эксплуатации, точность стабилизации натяжения может составлять 3–4 %; при намотке изделий, к которым предъявляются жесткие требования, – 0,5–1 %; при выкладке изделий – 4–10 %.

На основании проведенного анализа предмета исследования сформулированы цель и задачи, которые решены в диссертационной работе.

Во второй главе разработана математическая модель упругой ленты, как элемента ЭТС натяжения с учетом особенностей процессов намотки изделий из КМ.

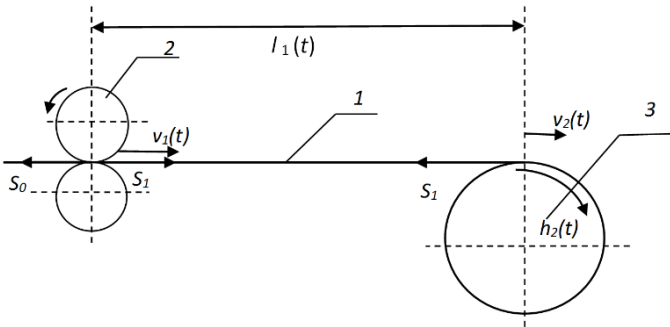
«Сухая» намотка. С использованием обобщенного закона Гука, получено дифференциальное уравнение, описывающее упругую «сухую» ленту, полагая, что длина тракта намотки $l_1(t)$ является непрерывной функцией времени или

функцией, имеющей разрывы первого рода. Последнее связано с намоткой изделий сложной формы – «Призма».

В произвольный момент времени t длина напряженной упругой ленты $l(t)$ равна:

$$l(t) = \frac{l_1(t)}{1 + \varepsilon_1(t)},$$

где $l_1(t)$ – длина тракта намотки ленты на изделие в момент времени t ; $\varepsilon_1(t)$ – упругое удлинение ленты в момент времени t (рисунок 2).



На рисунке обозначено: 1 – наматываемая лента; 2 – натяжной ролик; 3 – наматываемое изделие; $h_2(t)$ – расстояние от точки касания ленты с изделием до оси вращения изделия.

После ряда преобразований, получено дифференциальное уравнение, описывающее упругую «сухую» композиционную ленту:

Рисунок 2– Участок намотки изделия

$$\frac{dS_1}{dt} = \frac{1}{l_1(t)} \cdot [(S_1 - S_0 + EF) \cdot (v_2 + \frac{dl_1(t)}{dt} - \frac{S_1 - S_0 + EF}{EF} \cdot v_1)] + \frac{dS_0}{dt},$$

где S_1 – натяжение ленты на участке намотки; S_0 – натяжение ленты на предыдущем участке (см. рисунок 2); E и F – соответственно модуль упругости и площадь поперечного сечения ленты; v_2 – скорость, с которой лента укладывается (наматывается) на изделие; v_1 – скорость, с которой лента входит на участок намотки.

Использовать полученное математическое описание для синтеза ЭТС натяжения не представляется возможным. Поэтому далее проведена линеаризация данного выражения. Структурная схема линеаризованной математической модели приведена на рисунке 3.

Здесь коэффициенты линеаризации:

$$k_1 = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial v_1} \right)^*; k_2 = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial v_2} \right)^*; k_3 = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial S_0} \right)^*; k_4 = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial l_1} \right)^*; k_5 = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \left(\frac{dl_1}{dt} \right)} \right)^*; T_1 = 1 / \left(\frac{\partial \Phi}{\partial S_1} \right)^*, \quad (1)$$

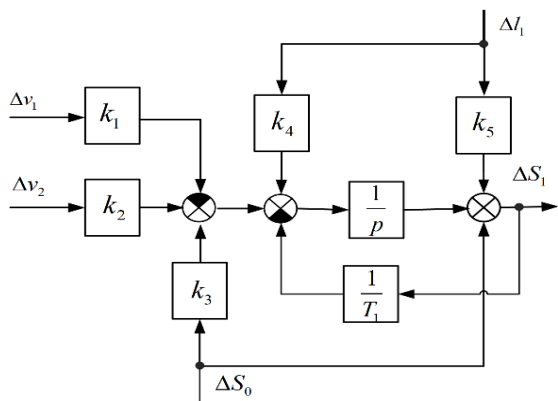
где
$$\Phi = \frac{dS_1}{dt} - \frac{1}{l_1(t)} \cdot \frac{dl_1(t)}{dt} \cdot S_1 + \frac{(EF - S_0)^2}{l_1(t) \cdot EF} \cdot v_1 - \frac{EF - S_0}{l_1(t)} \cdot v_2 + \frac{2 \cdot (EF - S_0)}{l_1(t) \cdot EF} \cdot v_1 \cdot S_1 - \frac{1}{l_1(t)} \cdot v_2 \cdot S_1 + \frac{1}{l_1(t) \cdot EF} \cdot v_1 \cdot S_1^2 - \frac{EF - S_0}{l_1(t)} \cdot \frac{dl_1(t)}{dt} - \frac{dS_0}{dt}.$$

Коэффициенты линеаризации полученных выражений (1) определяются рабочей точкой процесса намотки изделия (S_0^* , S_1^* , v_1^* , v_2^* , l_1^*). Рабочая точка в процессе намотки может изменяться. В работе проведено исследование зависимостей k_i и T_1 от изменения параметров намотки, то есть рабочей точки. В таблице 2 приведены результаты исследований.

«Мокрая» намотка. Особенностью данного процесса является то, что длина зоны деформации композиционного материала определяется длиной дуги

AB на которой лента контактирует с неподвижным роликом (рисунок 4). Деформация вызвана разностью усилий S_1 и S_0 . Усилие S_1 существенно больше S_0 (по уравнению Эйлера $S_1 = S_0 \cdot e^{\alpha \cdot f}$, α – угол охвата лентой роликов, см. рисунок 4, f – коэффициент трения ленты по ролику). На других участках лентопротяжного тракта, где лента не охватывает неподвижные ролики, разность усилий на концах ленты небольшая, и деформациями на этих участках пренебрегаем.

Таблица 2 – Параметры, которые изменяются во время намотки



Параметр	Значение параметра		Изменение параметра, раз
	min	max	
S_0 (Н)	200	400	2
S_1 (Н)	400	3000	7,5
v_1, v_2 (м/с)	0,05	0,3	6
l_1 (м)	0,7	1,5	2,14
k_1	27350	200000	7,3
k_2	33346	210051	6,3
k_3	0,21	0,846	4
k_4	0	10097	
k_5	6667	18286	2,74
T_1	1,5	30	20,1

Рисунок 3 – Линеаризованная структурная схема математической модели упругой «сухой ленты»

С учетом того, что $l_1(t) = r \cdot \alpha(t)$, получена математическая модель упругой «мокрой» ленты:

$$\frac{dS_1}{dt} = \frac{1}{\alpha(t)} \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt} \cdot S_1 + \frac{S_1 \cdot S_0 \cdot e^{\alpha(t) \cdot f}}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} - \frac{S_1^2}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} + \frac{(EF - S_0) \cdot S_0 \cdot e^{\alpha(t) \cdot f}}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} - \frac{(EF - S_0) \cdot S_1}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} + \frac{EF - S_0}{\alpha(t)} \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt} + \frac{dS_0}{dt} \quad (2)$$

Обозначим: $\Phi_2 = \frac{dS_1}{dt} - \frac{1}{\alpha(t)} \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt} \cdot S_1 - \frac{S_1 \cdot S_0 \cdot e^{\alpha(t) \cdot f}}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} + \frac{S_1^2}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} - \frac{(EF - S_0) \cdot S_0 \cdot e^{\alpha(t) \cdot f}}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} + \frac{(EF - S_0) \cdot S_1}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} - \frac{EF - S_0}{\alpha(t)} \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt} + \frac{dS_0}{dt}$

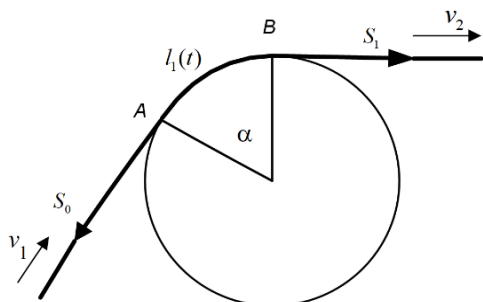


Рисунок 4 – Схема прохождения материала по направляющему тракту

Здесь r – радиус ролика, по которому скользит «мокрая» композиционная лента, см. рисунок 4. Использовать полученное математическое описание для синтеза ЭТС натяжения не представляется возможным. Поэтому далее проведена линеаризация данного выражения. На рисунке 5 приведена структурная схема линеаризованной модели материала при прохождении ее по направляющему тракту станка с учетом изменения

угла охвата лентой этих направляющих.

После линеаризации полученного выражения имеем коэффициенты линеаризации

$$k_{1,m} = \left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial \alpha} \right)^*; k_{2,m} = \left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial v_2} \right)^*; k_{3,m} = \left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial S_0} \right)^*; k_{4,m} = \left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial (d\alpha/dt)} \right)^*; T_{1,m} = 1 / \left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial S_1} \right)^*. \quad (3)$$

Здесь и далее коэффициенты k_i с индексом m – обозначают, что рассматривается процесс «мокрой» намотки. Без индекса – «сухой» намотки.

Как и в случае с «сухой» композиционной лентой, коэффициенты линеаризации (3) определяются рабочей точкой процесса намотки изделия (S_0^* , S_1^* , α^* , v_2^*). Рабочая точка в процессе намотки может изменяться. В работе проведено исследование зависимостей $k_{i,m}$ и $T_{1,m}$ от изменения параметров намотки, то есть рабочей точки. В таблице 3 приведены результаты исследований.

Таблица 3 – Параметры, которые изменяются во время намотки и значения $k_{i,m}$ и $T_{1,m}$

Параметр	Значение параметра		Изменение параметра, раз
	min	max	
S_1 (Н)	400	3000	7,5
v_2 (м/с)	0,05	0,3	6
α (рад)	2	6	3

Параметр	Значение параметра		Изменение параметра, раз
	min	max	
$k_{1,m}$	13228,5	349882,5	26,4
$k_{2,m}$	0	0	0
$k_{3,m}$	7,94	21,69	2,7
$k_{4,m}$	1688,61	5080,78	3,0
$T_{1,m}$	0,15	1,43	9,5

Из полученных данных видно, что параметры линеаризованного объекта управления изменяются в широких пределах.

В работе предложено вычислять значение коэффициента f , входящего в выражения (2,3), используя дополнительный датчик натяжения S_0 и вычисляя угол α . Получаем: $f = (\ln(S_1 / S_0)) / \alpha$.

В третьей главе разработаны математические модели ЭТС натяжения. В

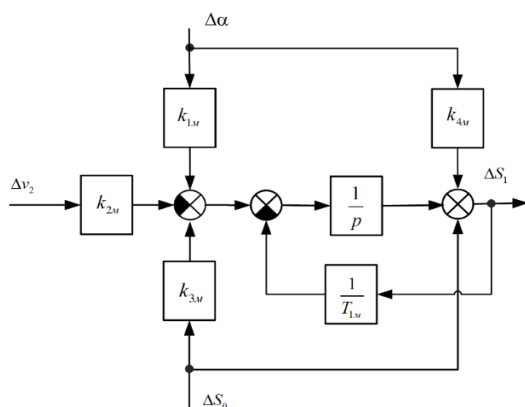


Рисунок 5 – Линеаризованная структурная схема упругой «мокрой» ленты

качестве исполнительных механизмов рассматривались механические тормозные устройства, ферропорошковые тормоза (ФТ), электродвигатели постоянного и переменного тока, вентильно-индукторные двигатели. Проведенный анализ показал, что при намотке изделий для жестких условий эксплуатации необходимо использовать синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) с векторным управлением, а при намотке изделий с невысокими требованиями к условиям эксплуатации – ФТ.

Структурная схема обобщенного электротехнического преобразователя натяжного устройства «сухой» приведена на

рисунке 6, а «мокрой» – на рисунке 7. Так как электромагнитная постоянная времени привода меньше электромеханической постоянной времени, противо-ЭДС не учитываем. На рисунках 6,7 использованы следующие обозначения: T_{Π} – постоянная времени преобразователя; k_{Π} – коэффициент передачи преобразователя по напряжению; u_M – напряжение преобразователя; I_M – ток электродвигателя; $W_{PT}(p)$ – передаточная функция регулятора тока электродвигателя; $W_{PC}(p)$ – передаточная функция регулятора частоты вращения электродвигателя; $W_{PP}(p)$ – передаточная функция регулятора положения натяжного устройства; $W_{PS}(p)$ – передаточная функция регулятора положения натяжного устройства; k_{OCT} – коэффициент передачи обратной связи по току электродвигателя; k_{OCC} – коэффициент передачи обратной связи по частоте вращения двигателя; k_{OCP} – коэффициент передачи обратной связи по положению натяжного устройства; k_{OCS} – коэффициент передачи обратной связи по натяжению; ΔM – электромагнитный момент электродвигателя; ΔM_{C1} – момент статического сопротивления на валу двигателя; T_M – электромагнитная постоянная времени статора СДПМ или ФТ; R_M – эквивалентное сопротивление СДПМ или ФТ; k_M – коэффициенты передачи для СДПМ или ФТ; I_{OC} – сигнал обратной связи по току электродвигателя; $I_{ЗAD}$ – сигнал задания на ток электродвигателя; S_{1OC} – сигнал обратной связи по натяжению; $S_{ЗAD}$ – сигнал задания на натяжение; J_1 – приведенный момент инерции привода; Ω_1 – частота вращения вала двигателя; α – угол охвата лентой невращающегося ролика; r_1 – радиус тормозного ролика; i_1 – передаточное отношение редуктора, расположенного между тормозным роликом и двигателем; η_1 – КПД редуктора; k_{5M} – коэффициент, связывающий перемещение ролика исполнительного механизма с углом охвата «мокрой» лентой роликов исполнительного механизма; k_{6M} – передаточное отношение редуктора, установленного между двигателем и роликами натяжного устройства; k_{7M} – коэффициент, учитывающий влияние натяжения S_0 на момент на валу привода натяжного устройства при повороте натяжного устройства.

Структурная схема обобщенного электротехнического преобразователя натяжного устройства для «мокрой» намотки (см. рисунок 7) имеет дополнительный внутренний контур положения исполнительного механизма.

Полученные схемы рекомендуется применять для построения ЭТС натяжения, исследования процессов, происходящих в ЭТС.

В работе впервые получены аналитические выражения, описывающие натяжные устройства, выражения для расчета эквивалентного момента электродвигателя при намотке различных изделий из КМ.

Так при намотке изделия «Призма» из «сухой» ленты длина участка намотки l_1 и скорость намотки v_2 изменяются во времени как показано на рисунке 8. Графики получены для изделия, имеющего следующие параметры: размер изделия 2,4x1,6 м, расстояние между центром вращения изделия и укладчиком $L_P=2,5$ м при скорости вращения изделия $\Omega_{\text{опр}}=1$ рад/с. Из рисунка видно, что длина тракта намотки изменяется от (0,9 до 3) м, причем очень резко, скорость намотки изменяется от (0,4 до 0,72) м/с.

Условием правильного выбора мощности привода является: $M_{дв} \geq M_{экв}$. Очевидно, что эквивалентный момент двигателя зависит от наматываемого изделия и угловой скорости вращения оправки. Все эти параметры должны быть выбраны исходя из наиболее тяжелых режимов работы привода.

Рассмотрим процесс намотки изделий из «мокрого» композиционного материала. Отметим, что реализации качественных электротехнических систем натяжения препятствует отсутствие математического описания тракта «мокрой» намотки, в том числе используемых в данном процессе натяжных устройств.

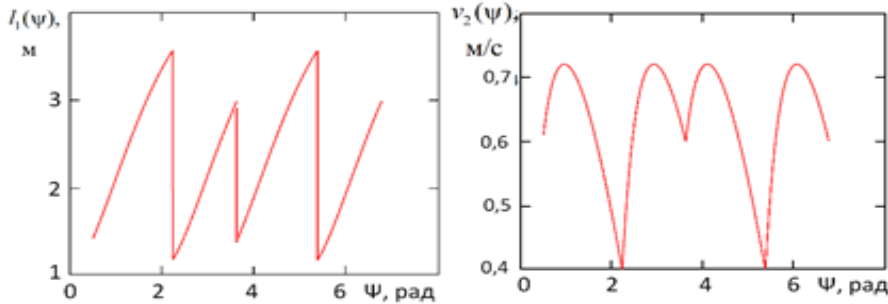


Рисунок 8 – Графики зависимости длины тракта намотки l_1 и скорости намотки v_2 от угла поворота изделия ψ

На требуемую мощность двигателя, управляющего данным натяжным устройством, существенное влияние оказывает конструкция. В данном случае используются несколько конструкций

натяжных устройств, они приведены на рисунке 9. Здесь обозначено: 1 – мокрая лента; 2, 3 – не вращающиеся ролики. Ролики 2 жестко закреплены на натяжном устройстве, а ролики 3 или перемещаются вдоль оси x , или поворачиваются по оси 4, или перемещаются по направляющей 5. Для уменьшения момента на валу двигателя используется «сложная» конструкция, состоящая из двух, связанных между собой шестернями 6 «восьмерок» (рисунок 9, е) или натяжное устройство с комбинированным приводом (электрическим и пневматическим приводом).

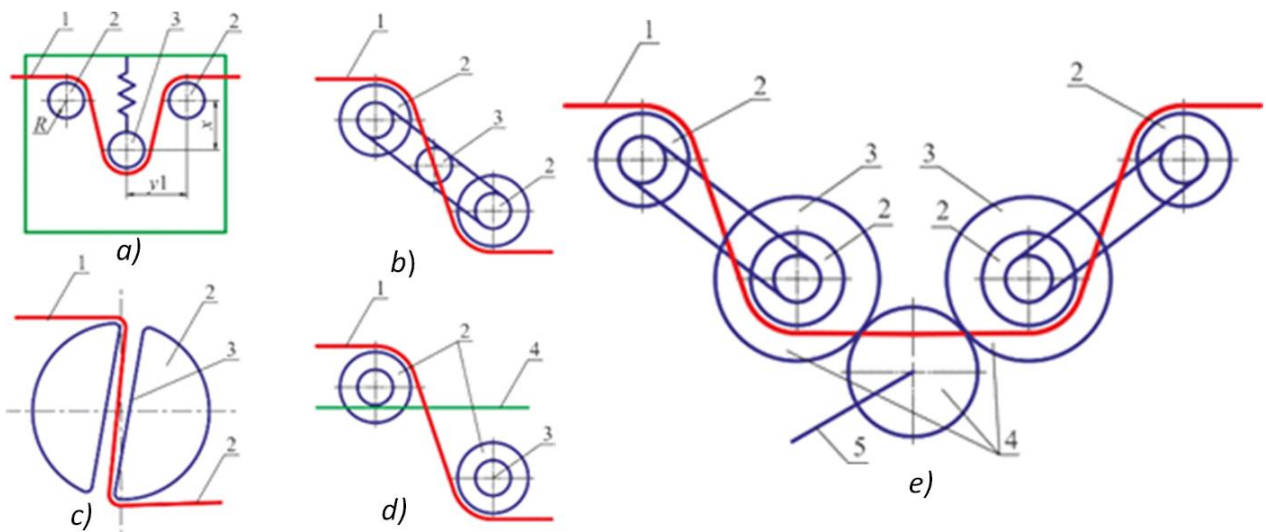


Рисунок 9 – Конструкции натяжных устройств

Для выбора мощности двигателей, работающих с данными натяжными устройствами, в работе впервые получены аналитические выражения, связывающие угол охвата роликов «мокрой» лентой α и положение роликов в пространстве φ или x (рисунок 10):

$$(\alpha/2)(\varphi) = F(\varphi), \quad (4)$$

где
$$F(\varphi) = \begin{cases} \arccos\left\{-\frac{2 \cdot r \cdot \cos \varphi}{L} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot r^2 - L^2 \cdot \sin^2 \varphi}{4 \cdot r^2 \cdot \cos^2 \varphi}}\right)\right\}, & \text{если } \varphi \leq \arcsin\left(\frac{2r}{L}\right); \\ \arccos\left\{-\frac{2 \cdot r \cdot \cos \varphi}{L} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot r^2 - L^2 \cdot \sin^2 \varphi}{4 \cdot r^2 \cdot \cos^2 \varphi}}\right)\right\}, & \text{если } \varphi > \arcsin\left(\frac{2r}{L}\right). \end{cases}$$

Выражение (4) можно линеаризовать:

$$\Delta\alpha(\varphi) \approx (2/L) \cdot \Delta\varphi. \quad (5)$$

Для случая использования двух пар роликов имеем:

$$\Delta\alpha(\varphi) \approx (4/L) \cdot \Delta\varphi \quad (6)$$

Угол φ , при котором в выражении (4) происходит переход с одного уравнения на другое, равен $\arcsin(2r/L)$; L – расстояние между осями роликов; r – радиус роликов.

Зависимость угла охвата α от угла поворота восьмерки φ практически линейна, поэтому, вместо достаточно сложного выражения (4) в расчетах можно использовать линеаризованные выражения (5), (6). Отметим, что пределы изменения угла φ зависят от конструктивных особенностей исполнительного механизма и на практике не могут превышать диапазона от $-1,5$ до $1,5$ рад, то есть физической возможности «восьмерки» поворачиваться.

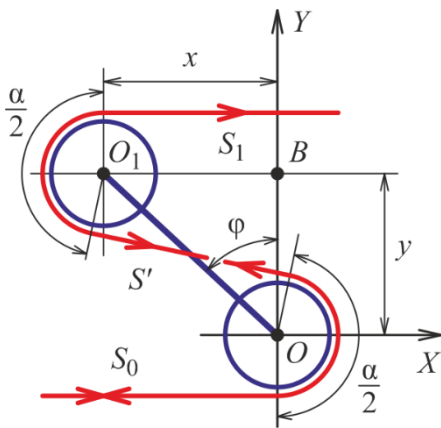


Рисунок 10 – Натяжное устройство с «угловым перемещением» (от угла φ)

Для натяжного устройства с линейным перемещением ролика (рисунок 9, d) в диссертационной работе также получены аналитические выражения.

Приведем только линеаризованное выражение:

$$\Delta\alpha(x) \approx (2/y_1) \cdot \Delta x.$$

В диссертационной работе впервые для рассмотренных натяжных устройств получены выражения, связывающие момент M_C на валу двигателя в установившемся режиме с величина S_1 , S_0 и положением восьмерки в пространстве (углом φ).

Двигатель соединен с восьмеркой через редуктор с передаточным отношением k_m .

Для натяжного устройства с угловым перемещением:

$$M_C = \begin{cases} \frac{[S_1 + S_0 \cdot e^{\frac{\alpha(\varphi) \cdot f}{2}} \cdot \cos(\pi - \frac{\alpha(\varphi)}{2})] \cdot (L \cdot \cos \varphi + r)}{k_m} + M_{TP}, & \text{если } \varphi \leq \arcsin(\frac{2r}{L}); \\ \frac{[S_1 - S_0 \cdot e^{\frac{\alpha(\varphi) \cdot f}{2}} \cdot \cos(\pi - \frac{\alpha(\varphi)}{2})] \cdot (L \cdot \cos \varphi + r)}{k_m} + M_{TP}, & \text{если } \varphi > \arcsin(\frac{2r}{L}). \end{cases} \quad (7)$$

Здесь M_{TP} – приведенный к валу двигателя момент трения в механической части натяжного устройства и двигателе. В натяжных устройствах могут использоваться два вида редукторов: червячные самотормозящиеся и планетарные. На графиках рисунка 11 показаны зависимости натяжения S_1 на выходе натяжного устройства и момента на валу двигателя M_C . Из графиков видно, что в рабочем диапазоне зависимость натяжения на выходе натяжного устройства S_1 практически линейна от угла охвата φ или линейного перемещения x .

Полученные выражения позволяют обоснованно подойти к выбору как самого натяжного устройства, так и электропривода для его управления.

В таблице 4 приведены основные параметры натяжных устройств, позволяющие обоснованно выбрать один из вариантов устройства по одному из четырех критериев: диапазону изменения угла охвата лентой направляющих натяжного устройства, диапазону изменения натяжения на выходе натяжного устройства, значению момента на валу привода, времени перемещения роликов из одного крайнего положения в другое.

Таблица 4 – Данные натяжных устройств, используемых при намотке изделий «мокрым» способом

Предлагаемые критерии выбора	Натяжное устройство			
	С угловым перемещением	С угловым перемещением, две «восьмерки»	С линейным перемещением	
			$k_m=40$	$k_m=8$
Диапазон изменения угла охвата лентой роликов, рад	от 1,2 до 5,9	от 1,2 до 12	от 1,2 до 5,5	
Диапазон создаваемого натяжения на выходе устройства, раз относительно S_0	от 1,05 до 2,38	от 1,13 до 5,75	от 1,18 до 2,13	
Максимальное значение момента на валу привода, Нм (при $S_0 = 400$ Н)	3,9	2,9	0,78	3,8
Время перемещения роликов из одного крайнего положения в другое, с	0,51	0,51	2,56	0,51

Анализ приведенных в таблице 4 данных показывает, что использование натяжного устройства с двумя парами связанных роликов уменьшает момент на валу двигателя при прочих равных условиях в 1,34 раза, а диапазон создаваемых натяжений в 2,4 раза больше, чем с одной восьмеркой.

Определение мощности привода натяжных устройств впервые предлагается производить с учетом особенности намотки изделий из композиционных материалов:

- исходя из требуемых характеристик ЭТС натяжения определяем элементы кинематической схемы натяжного устройства;
- рассчитываем мощность двигателя натяжного устройства в статическом режиме, выбираем двигатель;

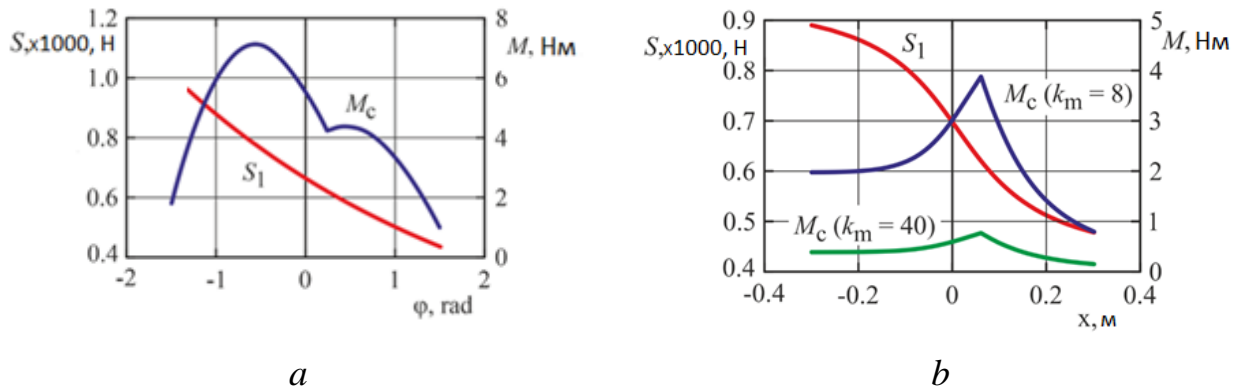


Рисунок 11 – Зависимость момента на валу двигателя и натяжения от положения натяжного ролика, и передаточного отношения редуктора k_m :

a – с угловым перемещением; b – с линейным перемещением

- по выражениям (4)–(7) рассчитываем динамические моменты, при намотке изделия, находим эквивалентный момент привода, проверяем, обеспечит ли выбранный двигатель требуемое значение эквивалентного и максимального момента, если это не так, выбираем двигатель бóльшей мощности и повторяем расчет.

В четвертой главе выполнен анализ вариантов и обоснование построения ЭТС натяжения композиционного материала натяжного устройства и бобины с препрегом при намотке и выкладке. При этом учтено использование различных исполнительных механизмов от механических тормозов до синхронных двигателей с постоянными магнитами.

Обосновано, что при намотке ком изделий из «сухого» композиционного

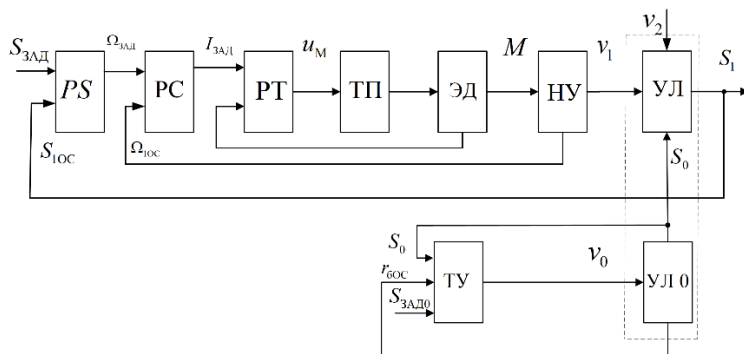


Рисунок 12 – Функциональная схема трехконтурной ЭТС натяжения «сухой» композиционной ленты

материала целесообразно применять трехконтурную ЭТС, а при намотке изделий из «мокрого» композиционного материала – четырехконтурную.

На рисунке 12 приведена функциональная схема наиболее перспективной трехконтурной ЭТС натяжения «сухой» компокомпозиционной ленты. Здесь УЛ 0 – участок ленты от бобины до натяжного ролика; ТУ – тормозное устройство (как правило, это механический тормоз или ФТ); $r_{бос}$ – радиус сматываемой бобины; $S_{зад0}$ – задание на натяжение ленты на участке бобина - тормозной ролик.

В работе получены аналитические выражения передаточных функций регуляторов натяжения ЭТС:

- «сухой» композиционной ленты:

$$W_{PS}(p) = k_{PSM} \left(1 + \frac{1}{T_1 p}\right), \quad (8)$$

- «мокрой» композиционной ленты:

$$W_{PS}(p) = k_{PM} \left(1 + \frac{1}{T_{1M} p}\right). \quad (9)$$

Здесь $k_7 = r_1 / i_1$; $k_{PSM} = \frac{k_{OCC}}{8T_{\mu} \cdot k_1 \cdot k_7 \cdot k_{OCS}}$; $k_{PM} = \frac{k_{OCP}}{16T_{\mu} \cdot k_{1M} \cdot k_{5M} \cdot k_{OCS}}$ T_{μ} – малая постоянная кон- тура тока.

В выражениях (8), (9) коэффициенты k_1, k_{1M}, T_1, T_{1M} получены при линеаризации математического описания упругой композиционной ленты и в процессе намотки могут изменяться в широких пределах.

В работе рассмотрены возможные варианты построения приводов активного шпулярника. К ЭТС натяжения активного шпулярника предъявляются более мягкие требования по точности поддержания заданного значения натяжения.

В пятой главе проанализированы и сопоставлены возможные подходы к синтезу электротехнических систем для изготовления изделий из композицион-

1. Изделия, к условия эксплуатации которых *предъявляются жесткие требования*
(изделия *первого* класса)

Подклассы изделий				
1 - Цилиндрические	2 - Бобины с материалом	3 - Конические	4 - Кокон, Шар	4 - Призма
1 - Стандартные настройки (Первая методика)	3 - ЭТС натяжения с адаптивным регулятором (Третья методика)		4 - ЭТС с прогнозом состояния (Четвертая методика)	

2. Изделия, к условия эксплуатации которых *не предъявляются жесткие требования*
(изделия *второго* класса)

Подклассы изделий				
1 - Цилиндрические	2 - Бобины с материалом	3 - Конические	4 - Кокон, Шар	5 - Призма
1 - Стандартные настройки (Первая методика)	2 - Синтез "грубой" (робастной) ЭТС натяжения (Вторая методика)		3 - ЭТС натяжения с адаптивным регулятором (Третья методика)	4 - ЭТС с прогнозом состояния (Четвертая методика)

Рисунок 13 – Синтез ЭТС натяжения

ных материалов методом намотки и выкладки. Описан предлагаемый метод синтеза ЭТС натяжения (рисунок 13).

Новизна нового метода заключается в том, что:

- при формулировании требований, предъявляемых к ЭТС натя-

жения, анализируется продукция, которая будет изготавливаться с применением разрабатываемой системы, учитываются форма изготавливаемых изделий и требования к условиям их эксплуатации (к какому классу и подклассу они относятся);

- на основании сформулированных требований к ЭТС и с учетом формы выпускаемой продукции обоснованно выбираются из предложенных автором математическое описание объекта управления и его структура;

- на основании информации о параметрах наматываемых изделий осуществляется выбор типа исполнительного механизма и рассчитывается мощность электродвигателя;

- на основании информации о параметрах наматываемых изделий и точности отработки электроприводом заданных законов намотки выбирается структура ЭТС, рассчитываются регуляторы.

При намотке изделий «Конус» и «Цилиндр» технологический процесс характеризуется медленным изменением параметров объекта управления (радиуса

наматываемого изделия, длины участка намотки, приведенного момента инерции изделия, скорости намотки). При невысоких требованиях к условиям эксплуатации наматываемых изделий и исходя из требований, предъявляемых к таким ЭТС, следует применять при синтезе метод «замороженных» коэффициентов объекта управления (параметры изменяются медленно) и синтезировать «робастную» (грубую) систему регулирования.

Задача синтеза ставится следующим образом: по известной структурной схеме ЭТС рассчитать параметры регуляторов, обеспечивающие заданные показатели качества работы при медленном изменении параметров объекта управления в заданном диапазоне и с учетом ограничений, вызванных действием насыщения регуляторов. Методика заключается в целенаправленном выборе нормированного уравнения, использование которого при расчете регулятора натяжения обеспечивает заданные показатели функционирования ЭТС натяжения при намотке изделий «Конус» и «Цилиндр».

При намотке изделий «Конус», «Кокон» первого класса (с высокими требованиями к условиям эксплуатации наматываемых изделий) параметры объекта управления изменяются в широких пределах, до 20 раз в процессе намотки, но скорость изменения параметров невелика. В данном случае целесообразно применять адаптивные ЭТС натяжения. Такие системы смогут обеспечить требуемое быстродействие в широком диапазоне изменения параметров объекта управления.

Рассмотрим возможность процесса параметрической адаптации регулятора натяжения PS при данных изменениях параметров. В общем случае этот процесс можно представить в следующем виде:

$$[P] = [C_k] \cdot [y_{\text{нп}}],$$

где $[P]$ – вектор параметров для коррекции работы регулятора $[P] = [T_1 \ k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5]^T$; $[C_k]$ – матрица коррекции $[C_k] = |f_{1A} \ f_{2A} \ f_{3A} \ f_{4A} \ f_{5A} \ f_{6A}|$; $[y_{\text{нп}}]$ – вектор наблюдаемых переменных $[y_{\text{нп}}] = [S_1 \ S_0 \ l_1 \ v_1 \ v_2 \ EF]^T$, T – знак транспонирования матрицы или вектора.

В работе получены математические зависимости коэффициентов линеаризации от параметров процесса намотки:

$$\left. \begin{aligned} T_1 = f_{1A}(S_1, S_0, l_1, v_1, v_2, EF); \quad k_1 = f_{2A}(S_1, S_0, l_1, EF); \quad k_2 = f_{3A}(S_1, S_0, l_1, EF); \\ k_3 = f_{4A}(S_1, S_0, l_1, v_1, v_2, EF); \quad k_4 = f_{5A}(S_1, S_0, l_1, v_1, v_2, EF); \quad k_5 = f_{6A}(S_1, S_0, l_1, EF). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Для создания адаптивного регулятора измеряются реальные значения S_1, S_0, v_1, v_2, l_1 в процессе намотки. На основании данной информации в темпе с процессом намотки производится изменение параметров регулятора натяжения. Функциональная схема адаптивной ЭТС натяжения приведена на рисунке 14.

Данная схема содержит вычислительное устройство ВУ, которое осуществляет вычисления коэффициентов линеаризации T_1, k_i . Проведенные исследования показали, что в адаптивных ЭТС натяжения следует использовать аналого-цифровые преобразователи с разрядностью не менее 10 и временем преобразования сигнала 1 мс и менее.

При намотке изделий «Призма» первого класса (с высокими требованиями к условиям эксплуатации наматываемых изделий) параметры объекта управления

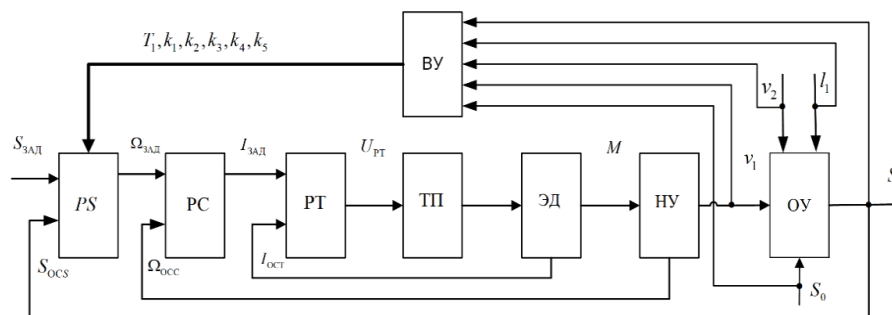


Рисунок 14 – Функциональная схема адаптивной ЭТС натяжения «сухой» композиционной ленты

изменяются в широких пределах, в том числе очень резко. В данном случае целесообразно применить ЭТС натяжения с прогнозом состояния на несколько шагов вперед. Предлагается использовать в качестве

критерия оптимизации ЭТС квадратичную функцию потерь:

$$J_{\Sigma} = \sum_{k=0}^{N-1} [\bar{x}^T(k) \cdot Q(k) \cdot \bar{x}(k) + u_M^T(k) \cdot R(k) \cdot u_M(k)], \quad (11)$$

где $\bar{x} = S_1 - S_{\text{зАд}}$; $S_{\text{зАд}}$ – желаемое значение вектора состояния; Q, R – весовые матрицы; u_M – вектор управления ($u_M = \Omega_{\text{зАд}}$); $k=0, 1, \dots, N-1$; $N-1$ – количество шагов вперед, на которые прогнозируется состояние системы.

Неизменяемая часть ЭТС описывается разностными уравнениями вида:

$$\left. \begin{aligned} x(k+1) &= A(k) \cdot x(k) + B(k) \cdot u(k); \\ y(k+1) &= C(k) \cdot x(k), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где x – вектор состояния системы; $u(k)$ – вектор управления; A – матрица динамики; B – матрица входа; C – матрица выхода; y – вектор выходов;

$$x(k) = \begin{vmatrix} S_1(k) \\ v_1(k) \end{vmatrix}; \quad y(k) = |S_1(k)|; \quad u(k) = |\Omega_{\text{зАд}}|; \quad A = \begin{vmatrix} 1 - \frac{1}{T_1(k)} & k_1(k) \\ 0 & 1 - \frac{1}{4 \cdot T_{\mu}} \end{vmatrix}; \quad B = \begin{vmatrix} \frac{1}{4 \cdot T_{\mu} \cdot k_{\text{ОСС}}} \\ 0 \end{vmatrix}; \quad C = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

В уравнении (12) k изменяется от 0 до $N-1$ и описывает поведение ЭТС на несколько интервалов вперед. При этом матрицы A, B и C на этих интервалах рассчитываются.

Для нестационарных систем регулирования решение цифровым регулятором в реальном масштабе времени большого числа уравнений Риккати требует существенных затрат машинного времени.

В работе предлагается найти управления $u(k)$ в моменты времени $k \in [0, N-1]$, минимизирующие выражение (11).

Для минимизации выражения (11), наиболее целесообразно использовать один из методов нелинейного программирования. Для данного случая это метод поочередного изменения независимых переменных (метод Гаусса-Зейделя). Данный метод прост и имеет сравнительно небольшой объем вычислений, что особенно важно при работе в режиме реального времени.

1. Выбираем стартовую точку $u_M^{(0)} = (u_1^{(0)}, u_2^{(0)}, \dots, u_n^{(0)})$ и вычисляем $J_{\Sigma}(u_M^{(0)})$.

2. Рабочая формула метода:

$$u_i^{(m+1)} = u_i^{(m)} \pm \Delta u_i \quad (i = 1, n; m = 0, 1, \dots).$$

Поочередно изменяя независимые переменные u_i , добиваемся минимизации функционала (11).

3. Критерием окончания минимизации является норма разности вида:

$$\|u_M^{(m+1)} - u_M^{(m)}\| = \sqrt{(u_1^{(m+1)} - u_1^{(m)})^2 + \dots + (u_n^{(m+1)} - u_n^{(m)})^2} \leq \varepsilon_2,$$

где ε_2 – некоторая малая величина.

4. Выдается управляющее воздействие $u_M = u_1^{(m+1)}$.

5. Определяется новое значение начального состояния $x(0)$. Далее процесс оптимизации повторяется сначала.

Таким образом, управляющее воздействие $u_1^{(0)}$ определяется как наилучшее не только на заданном отрезке $(0,1)$, но и на всем интервале $(0,n)$, то есть с учетом поведения ЭТС на прогнозируемом участке. В работе рассмотрены условия устойчивости ЭТС натяжения с цифровым регулятором.

В шестой главе приведено исследование применения разработанных методов и алгоритмов для ЭТС натяжения.

При намотке только цилиндрических изделий из «сухого» композиционного материала на станке СНП-36 для уменьшения момента инерции использовались два синхронных двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) фирмы Siemens 1FK7060 мощностью 1,48 кВт. При намотке изделий «Квадрат» с габаритными размерами 2,4x1,6 м и частотой его вращения 1,5 рад/с – один СДПМ 1FK7062 мощностью 1,1 кВт.

Для намотки изделия «Кокон» (баллоны диаметром 0,2 м со сферическими днищами) из «мокрого» композиционного материала с повышенными требованиями к условиям эксплуатации конструкций на намоточном станке РПН-Н-500, рассчитан требуемый угол поворота исполнительного механизма (рисунок 15). Один виток наматывается за 5 с. Для требуемого изменения в процессе намотки угла поворота α натяжного устройства, изображенного на рисунке 15, рассчитаны статический M_C и динамический $M_{дин}$ моменты на валу двигателя при намотке одного витка ленты на изделие. При намотке последующих витков, график не изменяется.

Графики зависимости статического и динамического момента приведены на рисунках 16,17.

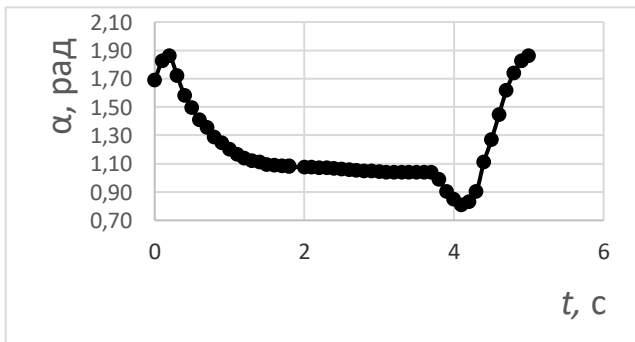


Рисунок 15 – График зависимости угла поворота натяжителя при намотке изделия «Кокон»

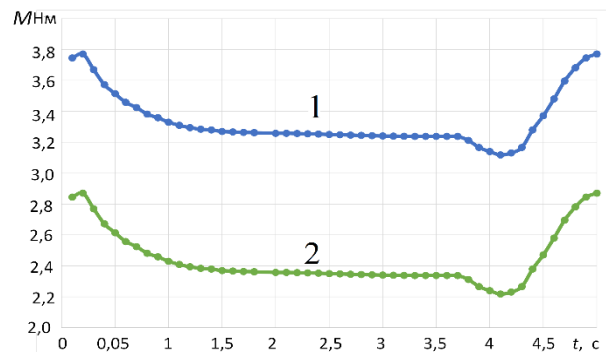


Рисунок 16 – График зависимости M_C при намотке одного витка изделия

Значение эквивалентного момента при использовании червячного редуктора 3,53 Нм, при использовании планетарного редуктора 2,58 Нм. Значение динамического момента при намотке изделия существенно меньше величины статического момента привода.

На рисунках обозначено: 1 – графики с червячным редуктором; 2 – с планетарным редуктором.

Исследования показали, что при намотке изделий «мокрым» композиционным материалом и использовании натяжных устройств (см. рисунок 9) следует оценить целесообразность применения планетарного или червячного самотормозящегося редукторов.

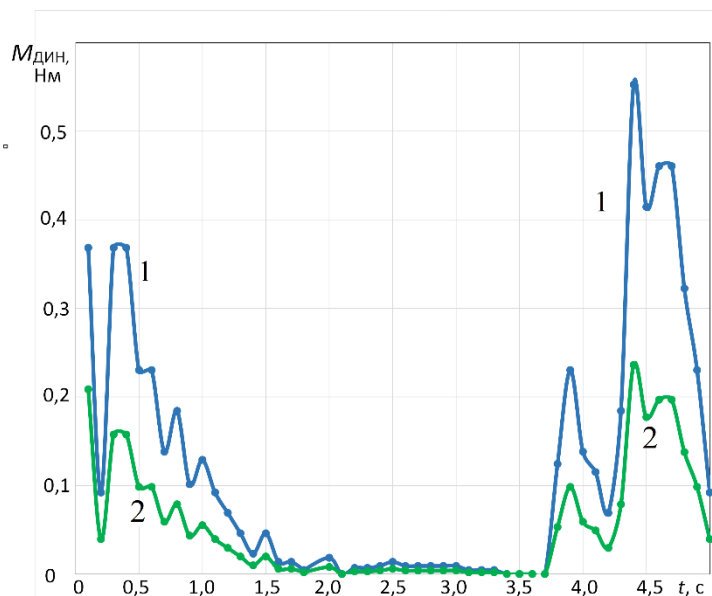


Рисунок 17 – Зависимость динамического момента при намотке

Исследования показали, что при намотке изделий «мокрым» композиционным материалом и использовании натяжных устройств (см. рисунок 9) следует оценить целесообразность применения планетарного или червячного самотормозящегося редукторов. Во втором случае следует использовать двигатели большей мощности, в первом случае имеется возможность использовать двигатель меньшей мощности, который должен в режиме стоянки обеспечивать заданный момент на валу. В

настоящее время СДМП удовлетворяют данным требованиям. Поэтому рекомендуется их использование с планетарным редуктором.

Исследована ЭТС натяжения композиционной ленты при «сухой» намотке изделий «Цилиндр» диаметром 2000 мм. В качестве приводного устройства использовался ферропорошковый тормоз фирмы Warner Electric типа BR35. При намотке изделий «Цилиндр» диаметр изделия практически не изменяется. В соответствии с полученными ранее рекомендациями применена трехконтурная система с внутренними контурами тока и скорости.

Передаточная функция регулятора натяжения, настроенного на модульный оптимум, принята в виде (8).

Результаты моделирования ЭТС натяжения приведены на рисунке 18.

Время переходного процесса ЭТС натяжения при ее пуске составляет 0,019 с, при максимальном перерегулировании 1,35 %.

Установившееся значение натяжения 1995 Н при заданном уровне 2000 Н, то есть ошибка регулирования составляет 0,25 %. В момент времени 0,05 с в ЭТС натяжения подается возмущающее воздействие в виде изменения S_0 от 100 до 200 Н, при этом наблюдается увеличение натяжения на 4,7 % (до уровня 2094 Н).

Возмущающее воздействие достаточно быстро обрабатывается (за 0,01 с). Данные показатели удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ЭТС натяжения.

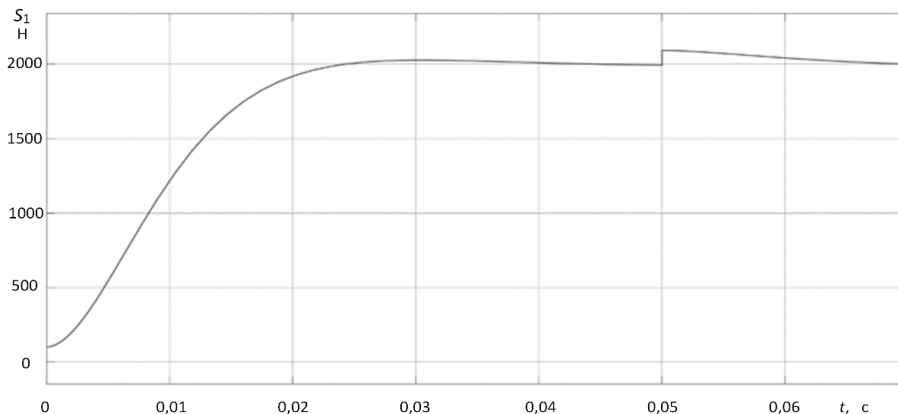


Рисунок 18 – Результаты моделирования ЭТС натяжения при намотке изделий «цилиндр»

модульный оптимум (9). Исследования показали, что время переходного процесса в системе составляет 0,04 с при перерегулировании 5 %. Время отработки возмущающего воздействия не превышает 0,08 с, что удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к таким ЭТС.

По предлагаемой методике синтезирована ЭТС натяжения при намотке изделий «Конус».

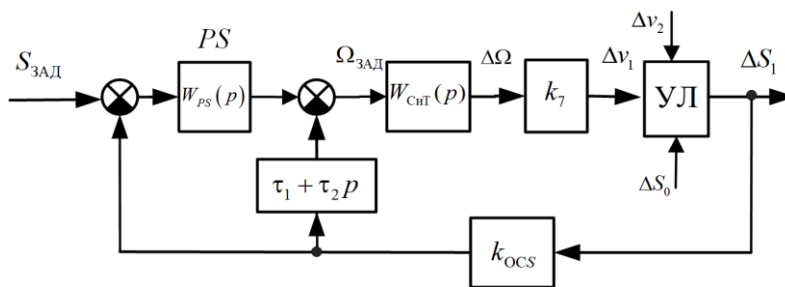


Рисунок 19 – Структурная схема скорректированной ЭТС натяжения

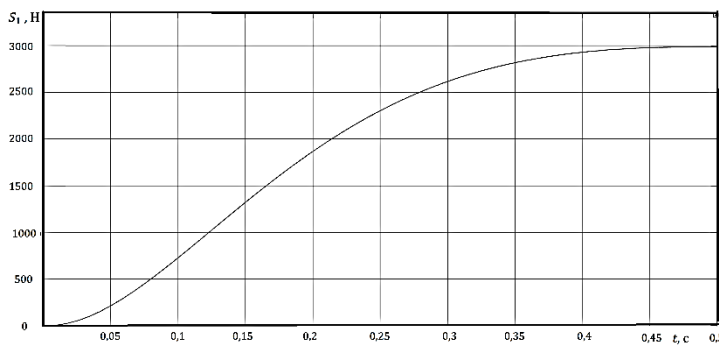


Рисунок 20 – График переходного процесса ЭТС натяжения при намотке изделия «Конус»

В диссертационной работе проведено исследование работы ЭТС натяжения «мокрой» композиционной ленты при намотке изделий «Цилиндр».

Передаточная функция регулятора натяжения настроена на мо-

дульный оптимум (9). Исследования показали, что время переходного процесса в системе составляет 0,04 с при перерегулировании 5 %. Время отработки возмущающего воздействия не превышает 0,08 с, что удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к таким ЭТС.

По предлагаемой методике синтезирована ЭТС натяжения при намотке изделий «Конус». В этом случае диаметр изделия изменяется в три раза за один проход. Из рассмотренных ранее структурных схем, описывающих ЭТС натяжения при «сухой» намотке, следует использовать трехконтурную систему с внутренними контурами тока и скорости. Для изделий второго класса предложена методика, при использовании которой ЭТС натяжения изменение параметров объекта управления не приводит к изменению показателей качества регулирования.

Передаточную функцию $W_{\text{СНТ}}$ внутренних контуров тока и скорости можно приближенно представить в виде апериодического звена: $W_{\text{СНТ}} = \frac{1/k_{\text{ОСС}}}{4T_{\text{м}}p+1}$. Регулятор натяжения PS имеет передаточную функцию: $W_{PS}(p) = k_{PS}/p$. Дополнительно в цепь обратной связи включается корректирующее звено с передаточной функцией $W_{\text{РРОС}}(p) = \tau_1 + \tau_2 p$. Структурная схема скорректированной системы, изображена на рисунке 19.

Произведен расчет ЭТС натяжения по предлагаемой методике. В результате моделирования получено, что изменение ошибки регулирования при изменении параметров объекта управления составляют 2,6%, при этом время переходного процесса не изменяется и равно 0,4 с. График переходного процесса ЭТС натяжения при намотке изделий «Конус» показан на рисунке 20.

По предлагаемой методике рассчитаны ЭТС натяжения «мокрой» композиционной ленты при намотке изделий «Конус», относящихся ко второму классу изделий. В качестве приводного устройства используется синхронный электродвигатель 1FT6 1,7 кВт, 3,9 А, 3,6 Нм, 4500 об/мин фирмы Siemens. Максимальное натяжение, с которым наматываются изделия на станке, может достигать 3000 Н.

Для данного случая используется четырехконтурная ЭТС с внутренними контурами тока, скорости вращения привода и положения исполнительного механизма. Моделирование показало, что изменение параметров объекта управления не влияет на показатели качества системы регулирования. Время переходного процесса составляет 0,4 с, перерегулирование отсутствует.

В работе предложена реализация адаптивного регулятора натяжения при «мокрой» намотке. При намотке изделий изменяются угол охвата лентой натяжных роликов α , натяжение, с которым наматываемый материал поступает на натяжное устройство S_0 , и скорость намотки v_2 . Это приводит к изменению коэффициентов линеаризации $k_{1\text{м}}, k_{3\text{м}}, k_{4\text{м}}, T_{1\text{м}}$ в широких пределах (таблица 3). Полученные ранее (3) выражения для расчета этих коэффициентов достаточно сложны. Воспользовавшись методикой, используемой в теории планирования эксперимента, упростим данные выражения. Параметры и значения коэффициентов $k_{1\text{м}} - k_{4\text{м}}, T_{1\text{м}}$, которые в процессе намотки варьируются, представлены в таблице 3. Здесь X_i – кодированные значения реальных переменных: $i = 1$ – это α ; $i = 2$ – это S_0 ; $i = 3$ – это v_2 ; $i = 4$ – это f .

Структурная схема электротехнического преобразователя «мокрой» композиционной ленты приведена на рисунке 7. Передаточные функции регулятора натяжения даны в выражении (9).

В работе исследовано влияние изменения параметров объекта управления на время переходного процесса при неизменных параметрах регулятора. В таблице 5 приведены данные моделирования ЭТС натяжения «сухой» композиционной ленты без адаптации. Из полученных данных видно, что время переходного процесса изменяется от 0,025 с до 6,0 с, то есть в 240 раз.

Для уменьшения влияния параметров объекта управления на поведение ЭТС натяжения необходимо ввести коррекцию регулятора натяжения.

Таблица 5 – Анализ полученных переходных процессов

k_1	T_1	$t_{пп}, c$
200000	28,8	0,8
200000	1,5	0,025
27350	28,8	6,0
27350	1,5	0,35

Очевидно, что это можно сделать, используя полученные выражения (3), при линейризации уравнения (2). Однако они довольно сложные и требуют значительных временных затрат при вычислении в реальном времени. Эти выражения упрощены. С использование критерия Кохрена,

проверена однородность дисперсии полученных коэффициентов, сделан вывод об адекватности полученной модели для данных коэффициентов. С помощью критерия Стьюдента, определен доверительный интервал коэффициентов Δb и значимость каждого коэффициента. Окончательно получено:

$$\tilde{k}_{1,м} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_4 X_4 + b_{12} X_1 X_2 = 64,34 - 61,97 \cdot X_1 + 40,33 \cdot X_2 - 18,69 \cdot X_4 - 40,51 \cdot X_1 \cdot X_2;$$

$$\tilde{k}_{3,м} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_4 X_4 + b_{12} X_1 X_2 + b_{14} X_1 X_4 + b_{24} X_2 X_4 = -564,77 - 165,7 X_1 - 348,83 X_2 - 120,72 X_4 - 108,53 X_1 X_2 - 83,94 X_1 X_4 - 79,1 X_2 X_4;$$

$$\tilde{k}_{4,м} = b_0 = 2,57; \quad \tilde{T}_{1,м} = b_0 + b_3 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + b_{44} X_4^2 = 2,75 - 2,48 X_3 + 4,64 X_1^2 + 4,51 X_2^2 + 4,93 X_3^2 + 4,64 X_4^2.$$

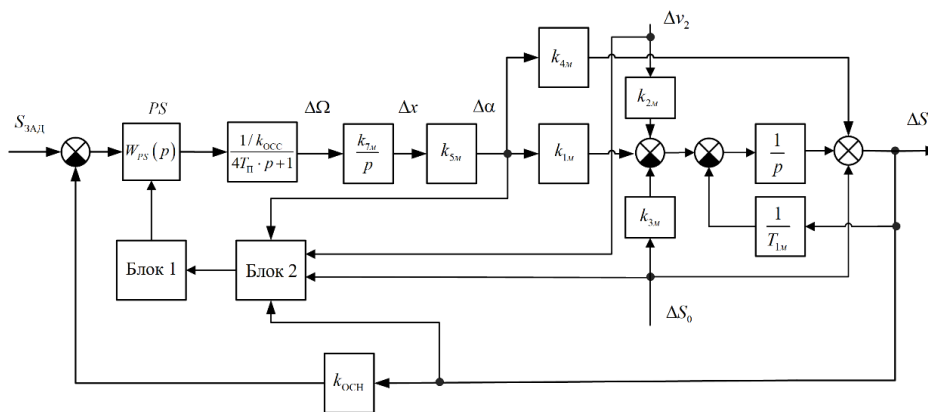


Рисунок 21 – Структурная схема адаптивной ЭТС натяжения «мокрой» композиционной ленты

На рисунке 21 показана структурная схема ЭТС натяжения с адаптивным регулятором. Адаптивный регулятор состоит из двух блоков. Блок 2 преобразует реальные переменные в кодированные. Далее, Блок 1 осуществ-

ляет коррекцию параметров регулятора.

На рисунке 22 показаны результаты моделирования ЭТС натяжения «мокрого» КМ при существенном изменении параметров объекта управления. Адаптивная ЭТС хорошо работает при широких изменениях параметров объекта регулирования, перерегулирование в системе не превышает 5 %, время переходного процесса 0,025 с.

При линейризации математического описания «сухой» упругой ленты получают передаточные функции, коэффициенты которых, зависят от режимов работы оборудования и наматываемого изделия. При настройке регулятора без его коррекции время переходного процесса сильно зависит от условия намотки. Для вычисления уставок регулятора натяжения использованы выражения, полученные во втором разделе работы. Упростить данные выражения не представляется

возможным. Функциональная схема адаптивной электротехнической системы приведена на рисунке 14. Проведенные исследования показали, что адаптивные ЭТС натяжения «сухого» КМ хорошо работают при широких изменениях параметров объекта управления.

Проведено исследование разработанной ЭТС натяжения «сухого» композиционного материала с прогнозом состояния. Исследования проводились при изменении параметров k_2 и T_1 , при воздействии как управляющего воздействия S_1 зад, так и при изменении длины тракта l_1 (при намотке изделий «Призма»), изменении предварительного натяжения S_0 , изменении скорости намотки v_2 .

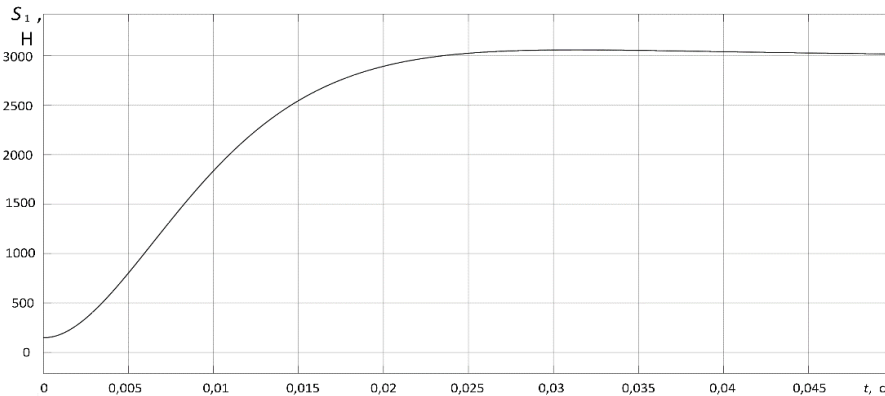


Рисунок 22 – График переходного процесса намотки адаптивной ЭТС натяжения

Управление рассчитывалось на 5 интервалов вперед, время каждого интервала 0,001 с. Таким образом, ЭТС просчитывает управление на 0,05 с вперед. Результаты моделирования приведены на рисунке 23.

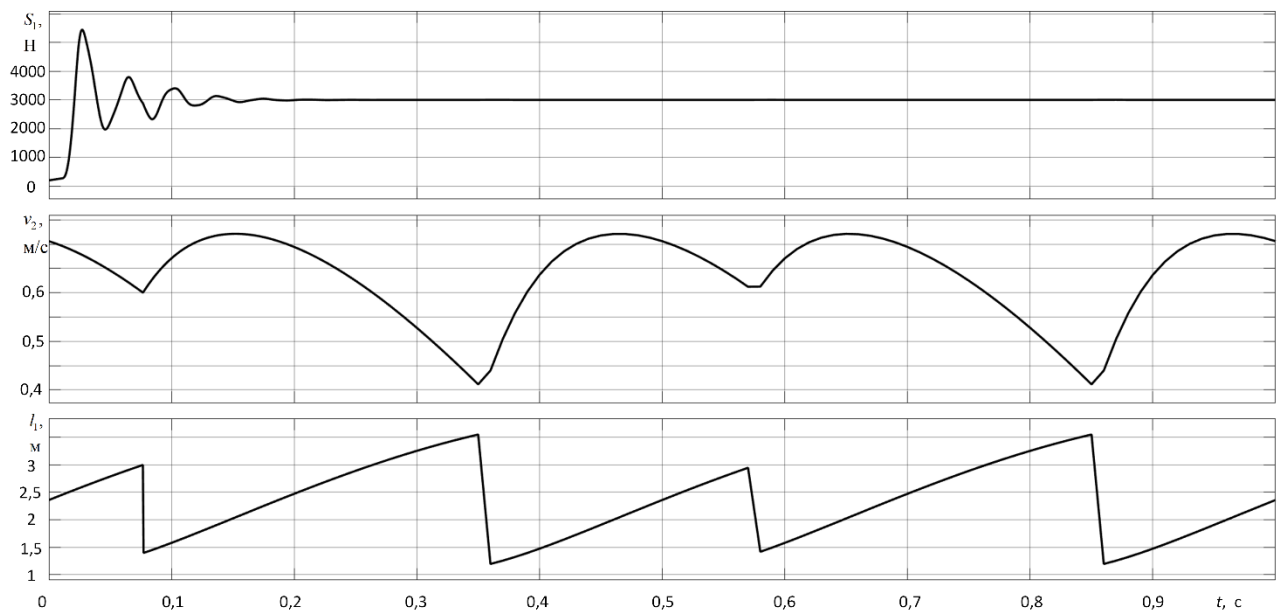


Рисунок 23 – Результаты моделирования ЭТС натяжения с прогнозом состояния

Моделирование показало, что при намотке изделий «Призма», когда параметры объекта управления изменяются достаточно быстро, натяжение композиционного материала практически не изменяется во времени (от 2999,5 Н до 3003 Н), то есть на 0,12% от заданного уровня натяжения.

Проблемой применения такой системы являются:

- процесс пуска системы, перерегулирование здесь достигает 83%;
- разработка быстрых алгоритмов работы системы.

Выходом из первого создавшегося положения является разработка системы с переменной структурой, с двумя регуляторами. Пуск системы должен осуществляться при использовании стандартных регуляторов (ПИ), а потом (через 0,1–0,2 с) ЭТС будет переключаться на регулятор с прогнозом состояния. Решение второй проблемы значительно труднее. Однако, по всей видимости, и здесь можно найти приемлемые решения.

В седьмой главе разработаны рекомендации по реализации и выбору элементной базы ЭТС натяжения. При выборе элементов ЭТС следует учитывать требуемые технические характеристики, надежность и стоимость.



Рисунок 24 – Намоточный станок СНП-36

При выборе технических средств для оснащения станков, предназначенных для намотки изделий с высокими требованиями к механическим характеристикам на первое место встает вопрос надежности и технических характеристик изделия. Требования к габаритным и весовым характеристикам как самого привода, так и его системы управления не предъявляются.

Проведенные в работе теоретические исследования легли в основу разработанной, изготовленной, прошедшей лабораторные испытания и переданной заказчику ЭТС натяжения композиционной ленты на намоточном станке с ЧПУ модели СНП-36. Специальный намоточный станок СНП-36 (общий вид которого показан на рисунке 24) может осуществлять многокоординатную намотку «мокрым» и «сухим» способами изделий. В процессе «сухой» и «мокрой» намотки изделий ЭТС должна обеспечить стабилизацию усилия натяжения ленты, жгутов или ткани.

В качестве тормозных устройств при «сухой» намотке здесь используются синхронные двигатели 1FK7060-5, управляемые от преобразователей Sinamics S120 фирмы Siemens. Для реализации регулирования натяжения используются два обрешиненных ролика диаметром 150 мм. Ролики связаны с электродвигателями через планетарные редукторы фирмы Apex Dynamics - модель AFR 100-S2-P2.

При намотке изделий по «мокрой» технологии регулирование натяжения осуществляется за счет изменения угла охвата лентой не вращающегося ролика.

Автоматизированная система контроля и регулирования технологических параметров, установленная на станке, представляет собой двухуровневую систему сбора и обработки данных, целью функционирования которой являются поддержание в заданных пределах основных параметров при намотке изделий и

также осуществление оперативного контроля, супервизорного управления и протоколирования процесса намотки.

Управляющее устройство натяжения «мокрого» композиционного материала реализовано с использованием программируемого логического контроллера Simatic S7-300.

На рисунке 25 показаны результаты испытаний ЭТС натяжения «мокрого» композиционного материала. Испытания показали, что ЭТС соответствует заданным требованиям, ошибка отработки заданных значений натяжения не более $\pm 1\%$.

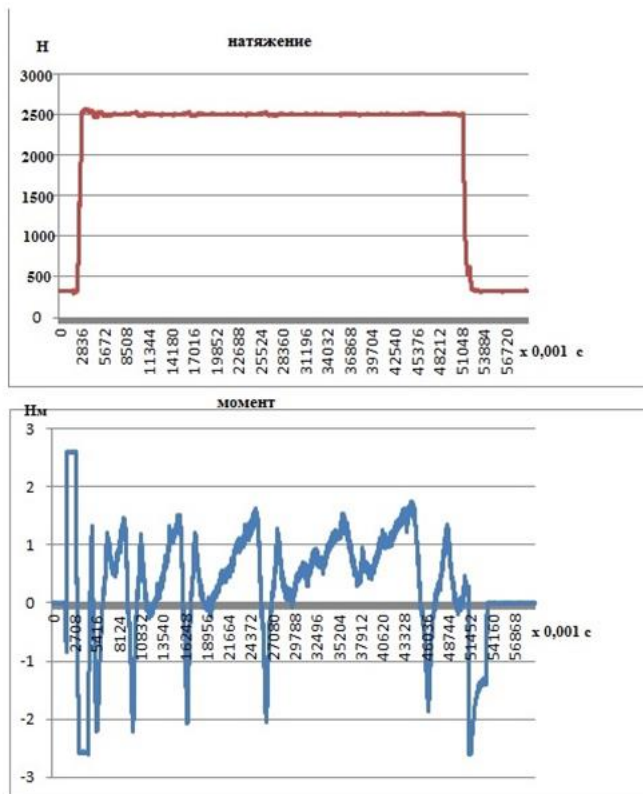


Рисунок 25 – Осциллограммы работы ЭТС

Испытания показали, что современные требования к ЭТС натяжения определяют перспективы и направления дальнейшего развития научных исследований:

- совершенствовать методику расчета мощности двигателей натяжных устройств с учетом случайных воздействий при намотке и выкладке;

- полученные в работе результаты создают предпосылки для разработки САПР по расчету и синтезу ЭТС намоточного оборудования с учетом изготавливаемых на нем изделий, в том числе специализированного программного обеспечения, баз данных по элементам систем электропривода, исполнительным механизмам и т.д.;

- совершенствовать методы оптимизации ЭТС натяжения, используемые при изготовлении изделий сложной формы с прогнозом состояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы представляют собой новые, научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в решение крупной научной проблемы по развитию теории и практики электротехнических систем регулирования натяжения при намотке и выкладке изделий из композиционных материалов, учитывающей особенности технологического процесса стадии формообразования конструкций из композиционных материалов и на ее основе созданию современных ЭТС натяжения при намотке и выкладке изделий. Создание и внедрение разработанных ЭТС позволяет обеспечить высокие качественные характеристики наматываемых изделий, что имеет важное хозяйствен-

ное значение для развития страны. В результате выполненных исследований получены следующие основные выводы и результаты.

1. Электротехнические системы регулирования натяжения, применяемые в настоящее время при намотке изделий из композиционных материалов, не в полной мере соответствуют современным требованиям по точности отработки заданных законов силовой намотки при производстве композиционных изделий, что связано с отсутствием теории процессов, происходящих при работе таких систем.

2. Выполненные исследования, позволяют сделать заключение, что теория процессов в ЭТС натяжения, включает в себя методы анализа и синтеза, математические модели упругой ленты (элемента ЭТС натяжения) и элементов электропривода. В том числе обоснованный выбор требований к ЭТС натяжения при намотке изделий различных геометрических форм с использованием различных технологий производства данных изделий.

3. Все наматываемые изделия объединены в зависимости от требований к прочностным характеристикам и геометрической формы в два класса и шесть подклассов. Предложенная классификация позволила обоснованно выбирать структуру, состав и метод синтеза электротехнической системы натяжения.

4. Разработаны строгие математические модели упругой композиционной ленты, которые, в отличие от известных описывают динамические процессы в КМ, возникающие при намотке различных изделий и используются для анализа процессов, происходящих в ЭТС натяжения. Для решения задач синтеза ЭТС проведена линеаризация полученных математических описаний упругой ленты, исследовано влияние процесса намотки на коэффициенты линеаризации.

5. Исследованы варианты возможных натяжных устройств, при намотке изделий из «сухого» и «мокрого» композиционного материала. Показано, что при намотке изделий с жесткими условиями эксплуатации целесообразно применять синхронные двигатели с постоянными магнитами с векторным управлением. При изготовлении изделий по технологии «сухой» намотки, к условиям эксплуатации которых не предъявляются особые требования, целесообразно использовать ферропорошковые тормозные устройства.

6. Впервые получены аналитические выражения для натяжных устройств, позволяющие определять статические и динамические моменты, возникающие на валу двигателя натяжного устройства, максимальные статические моменты в зависимости от угла поворота роликов или их линейного перемещения. Предложены рекомендации по выбору натяжных устройств, при намотке изделий из композиционных материалов.

7. Предложена методика выбора мощности привода натяжных устройств, учитывающая динамические моменты, связанные с изменением длины тракта намотки, линейной скорости движения КМ и других параметров, при намотке композиционных изделий, позволяющая обоснованно выбирать двигатель привода натяжного устройства.

8. Разработан метод синтеза электротехнических систем регулирования натяжения композиционной ленты при изготовлении изделий различной формы,

основанный на особенностях намотки изделий с текущей идентификацией параметров объекта управления, адаптацией регулятора системы, с оценкой текущего состояния и прогнозом следующих состояний параметров намотки, включающий в себя методики синтеза ЭТС натяжения, используемых при намотке изделий «Цилиндр», «Конус», «Кокон», «Шар», «Призма».

9. Полученные результаты исследования использованы при создании ЭТС натяжения для «сухой» и «мокрой» композиционной ленты, применяемые на станке СНП-36 Коломенского завода ООО «Механик»; при изготовлении конструкций ракеты-носителя «Союз-5» (системная классификация наматываемых изделий в зависимости от их геометрии и требований, предъявляемых к условиям эксплуатации диапазона и скорости изменения параметров в процессе намотки позволяющая обоснованно осуществлять выбор электромеханических систем (ЭМС) управления процессом намотки), на станках КУ-489Ф3 (технические предложения и схемные решения для реализации ЭМС натяжения композиционной ленты, которые учитывают специфику намотки изделий из композиционных материалов и позволяют повысить точность обработки системой управления заданных законов намотки реализованы при модернизации намоточного станка), КУ-421М (методика выбора мощности привода натяжных устройств, позволяющая обоснованно выбрать привод и в конечном итоге, повысить обработки заданных законов намотки), КУ-479Ф3 (адаптивные ЭМС натяжения, учитывающие форму наматываемых изделий реализованы при модернизации намоточного станка для изготовления силовой оболочки корпуса соединительного отсека); в ООО «Пластик Энтерпрайз» при создании автоматизированных систем управления технологическими процессами при изготовлении опытных образцов и в мелкосерийном производстве ряда изделий; в ООО «Дон-Текс» при модернизации автоматизированной линии по ламинированию Lamitix-1400/60 для производства синтетического полотна в серийном производстве.

РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Упругодиссипативные свойства электропривода натяжного устройства станков для изготовления изделий из композиционных материалов / А. П. Микитинский, О. А. Кравченко, Б. Н. Лобов, Д. Ю. Богданов, Ю. С. Кленин // Электротехнические системы и комплексы. - 2024. - № 1(62). - С. 4-10. - URL : [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2024-1\(62\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2024-1(62)-4-10).
2. Микитинский, А.П. Синтез регуляторов электроприводы натяжного устройства композиционных материалов [Электронный ресурс] / А.П. Микитинский, О.А. Кравченко, Д.Ю. Богданов, Б.Н. Лобов // Электронный сетевой политематический журнал («Научные труды КубГТУ»). - 2023. - № 6. - С. 132-149. - URL : <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0103/4735.pdf>.
3. Елсуков, В.С. Электромеханическая система натяжения при намотке изделий сложной геометрической формы из «сухого» композиционного материала / В. С. Елсуков, А. П. Микитинский, Б. Н. Лобов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. - 2023. - Т. 192, № 1. - С. 43-50.
4. Микитинский, А.П. К синтезу электропривода с упругостью второго рода [Электронный ресурс] / А. П. Микитинский // Электронный сетевой политематический журнал («Научные труды КубГТУ»). - 2023. - № 5. - С. 108-122. - URL : <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0102/4702.pdf>.

5. Микитинский, А. П. К вопросу выбора мощности двигателя натяжных устройств при намотке композиционных изделий из «сухого» материала / А. П. Микитинский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. - 2020. - Т. 175, № 2. - С. 42-50.

6. Микитинский, А. П. К вопросу математического описания натяжных устройств, используемых при намотке композиционных изделий из «мокрого» композиционного материала / А. П. Микитинский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. - 2020. - Т. 177, № 4. - С. 50-59.

7. Микитинский, А. П. К вопросу определения мощности двигателя натяжных устройств, используемого при намотке изделий из «мокрого» композиционного материала / А. П. Микитинский // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2020. - Т.63, № 6. - С. 21-28.

8. Автоматическая система для обеспечения заданных значений линейной плотности и натяжения синтетической нити / Б. Н. Лобов, П. Г. Колпахчян, А. П. Микитинский и др. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2020. - № 2-3. - С. 55-61.

9. Разработка вентильно-индукторного двигателя для индивидуального привода дозирующего насоса прядильной машины / П. Г. Колпахчян, А. Р. Шайхиев, Б. Н. Лобов и др. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2017. - № 2. - С. 38-43.

10. Микитинский, А. П. Математическая модель лентопротяжного тракта станка для намотки изделий из композиционных материалов / А. П. Микитинский // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2016. - № 1. - С. 62-66.

Патенты

11. Пат. 128606 Российская Федерация, МПК В65Н20/00. Устройство автоматического управления намоткой [Текст] / Микитинский А. П., Орлов С. И. - № 2012138017/13 ; заявл. 05.09.2012 ; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 15.

Издания, включенные в международную базу цитирования Web of Science и SCOPUS

12. Mikitinskiy, A. P. Mathematical Description of the Tensioners Used while Winding of the Wet Composite Material Products / A. P. Mikitinskiy, B. N. Lobov, P. G. // 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives, (IWED-2021), Moscow, Russian Federation, 27 -29 January 2021 / IEEE. - Moscow : IEEE, 2021. - Article number : 9376352.

13. Mikitinskiy, A. P. Control System of Tension Device in Winding Fabrics from Composite Materials / A. P. Mikitinskiy, B. N. Lobov, P. G. Kolpachshan // Lecture Notes in Electrical Engineering. - 2020. - Vol. 641 : International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019; Sochi; Russian Federation; 8-14 September 2019. - P. 42-49.

14. The Production Possibility of Permanent Magnet High Speed Electric Generator Rotors // Kolpakhchyan P.G., Lobov B.N., Mikitinskiy A.P. [et el.] // X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS) : Conference Proceedings, 3-6 Oct. 2018, Novocherkassk, Russia [Электронный ресурс] / Moscow Power Engineering Institute; Platov South-Russian Polytechnic University (NPI). - Novocherkassk : IEEE, 2018. - 5 с. - URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8571423>.

15. Lobov, B. N. The control of dosing pumps by modern electric drive / B. N. Lobov, A. P. Mikitinskiy, P. G. Kolpachshan // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 19-20 May 2016, Chelyabinsk, Russia [Электронный ресурс]. - Chelyabinsk : IEEE, 2016. - URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7911499>.

Издания, включенные в международную базу цитирования SCOPUS

16. Use of adaptive electromechanical tension control system when «wet» winding of composite material products / A. P. Mikitinskiy, B. N. Lobov, V. V. Smirnov // Proceedings - 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 15-16 May. 2023, Sochi, Russia / IEEE. - 2023. -P. 421-425. Article number : 10139284. - URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10139284>

17. Selecting the engine power while the dry winding of the composite material / A. P. Mikitinskiy, B. N. Lobov, P. G. Kolpakhchyan [et el.] // IOP Conference Series: Materials Science and

Engineering. – 2021. – Vol. 1029 : Dynamics of Technical Systems (DTS 2020), 11-13 September 2020, Rostov-on-Don, Russia. - Article number : 012113. – URL : <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1029/1/012113>.

18. Energy characteristics of the tensioners motor when winding products of a wet composite material / A. P. Mikitinskiy, B. N. Lobov, Y. A. Valyukevich [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1029 : Dynamics of Technical Systems (DTS 2020), 11-13 September 2020, Rostov-on-Don, Russia. - Article number : 012111. – URL : <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1029/1/012111>.

19. Mikitinsky, A.P. Tension control adaptive system synthesis used in winding of products made of dry composite materials / A. P. Mikitinskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. - Vol. 680 (1) : XV International Scientific-Technical Conference «Dynamics of Technical Systems» 11–13 September 2019, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation. - Article number : 012028. - URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/680/1/012028/pdf>.

20. Mikitinskiy, A. P. Synthesis of Adaptive Tension Control System Used in Winding of Some 'Dry' Composite Material / A. P. Mikitinskiy, N. Sukhenko // Proceedings - 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 8-14 Sept. 2019, Sochi, Russia / IEEE. - 2019. - Article number : 8867808. - URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8867808>.

21. Mikitinskiy, A. P. Control System of Tension Device in Winding Fabrics from Composite Materials // A. P. Mikitinskiy, B. N. Lobov, P. G. // Lecture Notes in Electrical Engineering. - 2020. - Vol. 641 : International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019; Sochi; Russian Federation; 8 - 14 September 2019. - P. 42-49.

Публикации по теме диссертационных исследований в других научных изданиях

22. Микитинский, А.П. Система регулирования натяжения композиционного материала при изготовлении изделий методом выкладки / А. П. Микитинский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2023. - № 1. - С 452-458.

23. Микитинский А.П. Робастная система управления натяжением при намотке лонжеронов из «сухой» композиционной ленты / А.П. Микитинский, Б.Н. Лобов // Кибернетика энергетических систем : сб. материалов XLIV Междунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 8-10 нояб. 2022 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ). - Новочеркасск : ЮРГПУ (НПИ), 2023. - С. 463-475.

24. Микитинский, А. П. Метод синтеза автоматизированных электроприводов систем натяжения композиционной ленты при изготовлении изделий различной формы / А.П. Микитинский, Б.Н. Лобов, П.Г. Колпахчян // Интеграция науки и практики как механизм развития отечественных наукоемких технологий производства : сб. науч. ст. по материалам X Всерос. науч.-практ. конф., г. Каменск-Шахтинский, 19 нояб. 2021 г. / Каменский технологический институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова. - Новочеркасск : Лик, 2022. - С. 26-41.

25. Микитинский, А. П. Синтез адаптивной системы управления натяжения при намотке изделий из «мокрого» композиционного материала / А. П. Микитинский // Сборник трудов XI Международной (XXII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2020 (Санкт-Петербург, 4-7 окт. 2020 г.) / Национальный исследовательский институт ИТМО. - Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2021. - С. 65-69.

26. Об одной возможности изготовления роторов высокоскоростных электрогенераторов с постоянными магнитами // П. Г. Колпахчян, Б. Н. Лобов, И. В. Русакевич [и др.] // X Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2018 : материалы конф., г. Новочеркасск, 3-6 окт. 2018 г. - Новочеркасск : Лик, 2018. - С. 14-19.

27. Микитинский, А. П. Система регулирования натяжного устройства при намотке изделий из композиционных материалов / А. П. Микитинский, Б. Н. Лобов, П. Г. Колпахчян // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. - 2018. - Т.6, №3. - С. 3-8.

28. Микитинский, А. П. Система регулирования натяжения «мокрого» композиционного материала / А. П. Микитинский, Б. Н. Лобов, П. Г. Колпахчян // X Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2018 : материалы конф., г. Новочеркасск, 3-6 окт. 2018 г. - Новочеркасск : Лик, 2018. – С. 81-84.

29. Пути повышения качества при производстве синтетических волокон / Б. Н. Лобов, П. Г. Колпахчян, А. П. Микитинский [и др.] // Международный научно – исследовательский журнал. – 2016. – № 6 (48), Ч. 2 – С. 74-77.

30. Завалий, А. А. Автоматизация процесса изготовления препрега на ленточной установке / А. А. Завалий, А. П. Микитинский // Перспективы развития технических наук : сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-практ. конф., г. Челябинск, 11 июля 2016 г. / ИЦРОН. - Челябинск, 2016. - Вып. 3. - С. 63-70.

31. Микитинский А.П. Математическая модель лентопротяжного тракта станка для «мокрой» намотки изделий из композиционных материалов = Mathematical model of wet-filament winding machine tape path // АЭП-2016: труды IX Междунар. (XX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу, г. Пермь, 3-7 окт. 2016 г. / Пермский нац. исследов. политехн. ун-т=IX International (XX All-Russian) Conference on Power Drives Systems, (ICPDS 2016) : Conference Proceedings, Perm; Russian Federation; 3 - 7 October 2016. - Пермь: изд-во ПНИПУ, 2016. - С. 447-450.

32. Кравченко, О. А. Система регулирования натяжения при намотке изделий из композиционных материалов. / О. А. Кравченко, А. П. Микитинский // Интеграция науки и практики как механизм развития отечественных наукоемких технологий производства : сб. науч. ст. по материалам IV Всерос. науч.-практ. конф. - Новочеркасск, 2015. - С. 130-132.

33. Микитинский, А. П. Электроприводы механизмов намотки изделий из композиционных материалов / А. П. Микитинский, А. Б. Бекин, Л. Л. Алтунян // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизирован. электроприводу АЭП-2014, 7-9 окт. 2014 г. : в 2 т. / Национал. исследоват. Мордов. гос. ун-т им. Н.П. Огарева. - Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. - Т. 2. - С. 516-520.

34. Математическое описание упругой ленты как объекта управления при намотке тел вращения типа прямоугольник // Д. Ю. Богданов, К. А. Микитинский, Д. Г. Борзенко, А.П. Микитинский // Микропроцессорные информационно-управляющие системы и комплексы : сб. тез. и стат. Всероссийской научной школы, г. Новочеркасск, 5-7 сентября 2011 г. / Южно-Российский государственный технический университет (НПИ). – Новочеркасск : Лик, 2011. - С. 138-141.

35. Математическое описание упругой ленты как объекта управления при намотке тел вращения типа прямоугольник // Д. Ю. Богданов, Д. В. Чередникова, А. П. Микитинский // Микропроцессорные информационно-управляющие системы и комплексы : сб. тез. и стат. Всероссийской научной школы, г. Новочеркасск, 5-7 сентября 2011 г. / Южно-Российский государственный технический университет (НПИ). – Новочеркасск : Лик, 2011. - С. 141-143.

36. Богданов, Д. Ю. Математическое описание намотки прямоугольника с закругленными углами / Д. Ю. Богданов, Д. В. Чередникова, А. П. Микитинский // Микропроцессорные информационно-управляющие системы и комплексы : сб. тез. и ст. Всерос. науч. школы / Южно-Российский государственный технический университет. - Новочеркасск, 2011. - С.168-141.

37. Микитинский, А. П. Об устойчивости квазиоптимальных цифровых систем управления. Математические методы в технике и технологиях / А. П. Микитинский // ММТТ-20 : сб. тр. XX Междунар. науч. конф., г. Ярославль : в 10 т. / Яросл. гос. техн. ун-т. - Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2007. - Т. 7. Секц. 13. Автоматизация технических систем и процессов. - С. 303-304.

38. Микитинский, А. П. Выбор такта квантования в цифровых системах управления. Математические методы в технике и технологиях / А. П. Микитинский, Р. А. Микитинский // ММТТ-19 : сб. тр. XIX Междунар. науч. конф., г. Воронеж, 30 мая - 2 июня 2006 г. : В 10 т. / Воронеж. гос. технол. акад. - Воронеж : Изд-во ВГТА, 2006. - Т. 6. - С. 106-107.

39. Микитинский, А. П. Оптимальное управление системой натяжения композиционного материала / А. П. Микитинский // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-17 [1-3 июня 2004 г.] : сб. трудов XVII Междунар. науч. конф. : в 10 т. / Костромской гос. технол. ун-т. - Кострома : Изд-во КГТУ, 2004. - Т. 6. секц. 13. - С. 142-144.

40. Микитинский, А. П. Управление электроприводом прямого поиска вектора оптимального управления / А. П. Микитинский // На рубеже веков: итоги и перспективы : тез. Всерос. электротехн. конгр. с междунар. участием ВЭЛК-99. - Москва, 1999. - Т. 1. - Б.с.

41. Микитинский, А. П. Прямой метод поиска оптимального управления электроприводами, описываемыми разностными уравнениями / А. П. Микитинский // Техника, экономика, культура : юбил. сб. науч. тр. проф.-преп. состава [на об. тит. л. : Сб. статей и кратких науч. сообщений сотр. и аспирантов НГТУ по материалам юб. науч. сессии, посвященной 100-летию истории университета, г. Новочеркасск, 5-15 апр. 1997 г.] / Новочерк. гос. техн. ун-т ; отв. ред. В.Г. Ушаков. - Новочеркасск, [Ростов н/Д] : НГТУ, [Гефест], 1997. - С. 157-161.

42. Микитинский, А. П. О синтезе квазиоптимальных дискретных электроприводов методом переменных состояний / А. П. Микитинский, В. И. Пашковский // Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 1989. – № 2. – С. 99-102.

43. Микитинский, А. П. Учет ненулевых начальных условий при синтезе регуляторов электроприводов методом типовых характеристик / А. П. Микитинский // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 1989. – № 10. – С. 101-103.

В работах, опубликованных в соавторстве работах состоит в постановке задачи исследования [1,2,8,9,11,12,14-16,18,42]; формулировании требований к ЭТС натяжения [19,23,26,27]; решении задач улучшения технических характеристик ЭТС [1,2,11,12,14-16,18,21,24,26,28,29,30,32,33,35,40-42]; разработке математической модели ЭТС натяжения [1,12,15-20,24,27,28,32-36,42]; выполнении теоретических и экспериментальных исследований, проведение моделирования ЭТС натяжения [9,12,16-21,23,32,33,36,38]; разработке методов, методик, алгоритмов, проведение практических расчетов [1,2,11,12,14-16,18,19,24,30,35,36].