

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Южно-Российский государственный политехнический университет  
(НПИ) имени М.И. Платова»



*На правах рукописи*

**Микитинский Александр Петрович**

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

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант  
д-р техн. наук, профессор  
Лобов Борис Николаевич

Новочеркасск - 2024

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	9
1 АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ НАМОТКИ И ВЫКЛАДКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К НИМ .....	26
1.1 Электротехнические системы с упругостями второго рода .....	26
1.2 Анализ тенденций развития электротехнических систем с упругостью второго рода для изготовления изделий из композиционных материалов .....	28
1.3 Технологический процесс изготовления композиционных изделий. Особенности работы электроприводов в механизмах изготовления композиционных изделий .....	32
1.3.1 Метод “сухой” намотки .....	32
1.3.2 Метод “мокрой” намотки .....	36
1.3.3 Метод выкладки изделий .....	38
1.4 Основные качественные показатели изделий из композиционных материалов .....	43
1.5 Обзор современных электротехнических систем намотки .....	45
1.6 Задачи развития теории и практики создания электротехнических систем для изготовления изделий из композиционных материалов .....	50
1.7 Систематизация изделий, изготавливаемых методом намотки из композиционных материалов, в зависимости от их геометрической формы .....	57

1.8 Методика обоснования требований к электротехническим системам натяжения по точности обработки заданного закона намотки .....	63
<b>2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРУГОЙ “СУХОЙ” И “МОКРОЙ” ЛЕНТЫ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАТЯЖЕНИЯ.....</b>	<b>75</b>
2.1 Разработка и исследование математической модели “сухой” ленты ..	75
2.1.1 Разработка математической модели упругой “сухой” ленты .....	75
2.1.2 Линеаризация разработанного математического описания упругой “сухой” ленты.....	80
2.1.3 Исследование зависимости коэффициентов линеаризации разработанного математического описания упругой “сухой” ленты от значения параметров технологического процесса изготовления изделий.....	85
2.2 Разработка и исследование математической модели “мокрой” ленты	87
2.2.1 Разработка математическая модель упругой “мокрой” ленты .....	87
2.2.2 Линеаризация разработанного математического описания упругой “мокрой” ленты .....	91
2.3.3 Исследование зависимости коэффициентов линеаризации разработанного математического описания упругой “мокрой” ленты от значения параметров технологического процесса изготовления изделий.....	94
<b>3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАТЯЖНЫХ УСТРОЙСТВ .....</b>	<b>97</b>
3.1 Натяжные устройства, используемые при “сухой” намотке и выкладке .....	97

3.2	Анализ натяжных устройств и исполнительных механизмов, используемых при “сухой” намотке.....	104
3.2.1	Тормозные устройство с механическими фрикционными тормозами .	104
3.2.2	Сматывающее и натяжное устройства с ферропорошковым электромагнитным тормозом .....	107
3.2.3	Сматывающее и натяжное устройства с двигателем постоянного тока. ....	110
3.2.4	Сматывающее и натяжное устройства с асинхронным двигателем ..	112
3.2.5	Сматываемые и натяжные устройства с синхронным двигателем .....	118
3.2.6	Сматывающее и натяжное устройства с вентильно-индукторным двигателем .....	122
3.2.7	Методика выбора мощности привода натяжного устройства при “сухой” намотке .....	131
3.2.8	Разработка обобщенной структурной схемы электротехнического преобразователя натяжного устройства при “сухой” намотке .....	144
3.3	Анализ натяжных устройств и исполнительных механизмов, используемые при “мокрой” намотке .....	145
3.3.1	Натяжные устройства, используемые при “мокрой” намотке .....	145
3.3.2	Анализ вариантов приводов, используемых в исполнительных механизмах при “мокрой” намотке .....	162
3.3.3	Методика расчёта мощности двигателя натяжного устройства при “мокрой” намотке.....	165

3.3.4	Разработка обобщенной структурной схемы электротехнического преобразователя натяжного устройства при “мокрой” намотке .....	170
3.4	Анализ натяжных устройств активного шпулярика.....	172
3.5	Анализ натяжных устройств, используемых при выкладке .....	174
4	<b>РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАТЯЖЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЕГО НАМОТКЕ И ВЫКЛАДКЕ .....</b>	<b>178</b>
4.1	Подходы к структурно-параметрическому синтезу электротехнических систем натяжения композиционного материала .....	178
4.2	Разработка функциональных схем электротехнических систем натяжения при “сухой” намотке и выкладке.....	179
4.3	Разработка структурных схем электротехнических систем регулирования натяжения при “сухой” намотке и выкладке .....	192
4.4	Разработка функциональных схем электротехнических систем натяжения при “мокрой” намотке и обоснование наиболее рациональных схем.....	204
4.5	Разработка структурных схем электротехнических систем регулирования натяжения “мокрой” композиционной ленты .....	214
5	<b>РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАТЯЖЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОЙ ЛЕНТЫ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ.</b>	<b>220</b>
5.1	Анализ и сопоставление возможных вариантов к расчету и синтезу электротехнических систем для изготовления изделий из композиционных материалов методом намотки и выкладки.....	220

5.2 Анализ известных методик синтеза регуляторов электротехнических систем регулирования натяжения при намотке и выкладке .....	225
5.3 Разработка методики синтеза регуляторов электротехнических систем натяжения при намотке изделий “Конус” .....	226
5.4 Разработка методики синтез адаптивных регуляторов электротехнических систем регулирования натяжения намотки изделий “сложной” формы “Кокон” .....	241
5.5 Синтез регулятора натяжения с прогнозом состояния системы.....	245
5.5.1 Обоснование критерия оптимальности .....	245
5.5.2 Синтез регулятора электропривода системы регулирования натяжения с прогнозом состояния.....	246
<b>6 ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ.....</b>	<b>252</b>
6.1 Исследования влияния параметров наматываемых изделий на работу натяжных устройств.....	252
6.1.1 Исследование влияния габаритных размеров наматываемого изделия методом “сухой” намотки на эквивалентный момент двигателя .....	252
6.1.2 Исследование влияния процесса намотки на работу натяжных устройств при “мокрой” намотке .....	257
6.2 Исследования регуляторов электротехнических систем регулирования натяжения при намотке изделий «Цилиндр» .....	264
6.2.1 Исследования регуляторов электротехнических систем натяжения при намотке изделий «Цилиндр» из “сухой” композиционной ленты.....	264

6.2.2 Синтез регуляторов электротехнической системы натяжения при намотке изделий “Цилиндр” из “мокрой” композиционной ленты .....	267
6.3 Синтез электротехнических систем регулирования натяжения при намотке изделий с медленно меняющимися параметрами.....	270
6.3.1 Синтез электротехнической системы регулирования натяжения намотки изделий из “сухой” ленты с медленно меняющимися параметрами.....	270
6.3.2 Синтез электротехнической системы регулирования натяжения намотки изделий из “мокрой” ленты с медленно меняющимися параметрами .....	274
6.4 Синтез адаптивных регуляторов электротехнических систем .....	278
6.4.1 Синтез адаптивных регуляторов электротехнической системы натяжения при “мокрой” намотке .....	278
6.4.2 Синтез адаптивных регуляторов электротехнических систем регулирования натяжения при “сухой” намотке .....	291
6.5 Синтез регулятора электротехнической системы натяжения с прогнозом состояния .....	305
<b>7. ПРАКТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ.....</b>	<b>318</b>
7.1 Задачи и условия выбора элементной базы электротехнических систем регулирования натяжения.....	318
7.2 Электротехнические системы регулирования натяжения, разработанные, изготовленные и внедренные на намоточном оборудовании ... ..	323
7.3 Перспективы и направления дальнейшего развития научных исследований .....	335

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	338
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	341
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	370
Акты внедрения результатов диссертационной работы .....	370
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	374
Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс ЮРГПУ(НПИ) имени М.И.Платова.....	374
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	376
Расчет бандажа роторов высокоскоростных генераторов из композиционных материалов.....	376

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследований.** 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 и 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: “Цилиндр”, “Конус”, “Шар”, “Кокон”, “Призма” и других. Форма наматываемых изделий существенно влияет на режимы работы электропривода. Поэтому в дальнейшем рассмотрен процесс намотки изделий из композиционных материалов.

Композиционные изделия, изготавливаемые методом намотки и выкладки, находят широкое применение во многих отраслях народного хозяйства благодаря хорошим физико - механическим свойствам: высокой антикоррозийности, стойкости к агрессивным жидкостям, низкой теплопроводности, немагнитности, радиопрозрачности, способности выдерживать без повреждения высокую температуру [1-13]. 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 [4,5,10,14-23]. Использование композиционных материалов в других отраслях экономики позволяет создавать уникальные устройства. Так при бандажировании высокоскоростных генераторов высокопрочным углепластиком удается довести скорость вращения ротора генератора до ста тысяч оборотов в минуту и более, что существенно снижает массогабаритные показатели энергетической установки, позволяет производить мобильные источники питания большой мощности [24,25]. Расчет бандажа роторов высокоскоростных генераторов из композиционных материалов приведен в Приложении В.

Свой вклад в увеличение ассортимента выпускаемых промышленностью композиционных материалов, вносят и новые разработки как наполнителя, так и связующих с улучшенными характеристиками [14-16,26]. 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 [27-29].

Приоритетных направлениях развития науки, технологии и техники РФ «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», постановлением Правительства от 15 апреля 2014 года № 328 в рамках

подпрограммы № 14 “Развитие производства композиционных материалов (композитов) и изделий из них” государственной программы Российской Федерации “Развитие промышленности и повышения её конкурентоспособности”, научным направлением ЮРГПУ (НПИ) «Развитие теории и практики создания интеллектуальных энергетических и электротехнических систем, 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 [30,31]. 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. По данным Минпромторга России, в настоящее время ОАО “НПК “Уралвагонзавод” разработал не имеющие аналогов в мире опытные образцы вагона-хоппера для перевозки удобрений, контейнеры-цистерны для химических продуктов. ФГУП “Крыловский государственный научный центр” осуществляет разработку моделей для создания корпусных конструкций для надводных и подводных кораблей нового поколения [31], обладающих повышенной прочностью, немагнитностью, радиопрозрачностью. Области применения композиционных конструкций можно перечислять еще долго.

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

Существует достаточно много способов изготовления изделий из композиционных материалов (стадии формообразования), в данной работе рассматриваются три основных, это “сухая” и “мокрая” намотки, выкладка

[1,4,10,11,13,18,20,32,33]. Эти способы позволяют получать изделия с высокой прочностью. В первом случае технологический процесс разбивается на два этапа: формирование предварительно пропитанной ленты (препрега) на ленточных установках и изготовление из нее изделий на намоточных станках. Во втором случае (при “мокрой” намотке), процесс пропитки наполнителя и сама намотка изделий осуществляются последовательно на одном намоточном станке. В третьем случае (при выкладке), в настоящее время в основном применяется предварительно пропитанная лента, которая укладывается на оправку с помощью специального механизма [1,4,10,11,13,18,20,32,33].

Далее изделие, как правило, подвергается термической, а затем механической обработке.

Качество изготавливаемых изделий зависит от многих параметров как самого процесса изготовления изделия, так и последующих этапов производства. На этапе намотки и выкладки на качество изделий существенно влияют свойства композиционного материала, режимы изготовления как препрега, так и самого изделия [34-46]. Среди всех факторов, влияющих на качество будущих изделий, следует отметить режимы силовой намотки. Оптимизация режимов намотки и выкладки при изготовлении изделий из композиционных материалов обеспечивает усиление адгезии на границах раздела армирующих и связующих материалов, устраняет дефекты типа непроклеев, обеспечивает предварительно напряженное состояние конструкции, которое, снижая уровень температурных и эксплуатационных напряжений, увеличивает несущую способность и прочность изделий.

**Разработанность темы исследования.** В развитие методов расчета электроприводов намоточных устройств в различных отраслях и моделирование процессов намотки большой вклад внесли многие отечественные ученые такие, как Л.Н. Рассудов [47], С.И. Рыбников [48], Г.М. Иванов [49-51], В.И. Маринин [52,53], В.Е. Шукшунов [32,33], Г.Б. Онищенко [51], В.М. Хуторецкий [50], Г.Г. Соколовский [54], Г.И. Прокофьев [55], Н.И. Бондарев [56], Г.Г. Лисовская [56],

А.С. Филатов [57], Ю.М. Файнберг [58], Н.Н. Дружинин [59], Ю.В. Щербина [60], и зарубежные ученые, такие как Rosato D. [1], Grove C. [1], Ikonopoulos G. [61], Marchetti M. [61], Nazarov V. [62], Krut'ko P. [62], Farese, Frank B. [63], Lu H. [64], Wang Y.-Z. [64-67], Wang C. [64-67], Ren S.-L. [64,66,67], Zhang H. [68], Tang H. [68], Shi Y. [68,69], Hong Q. [69], Chen Z. [69], В.А. Рач [70] и другие.

Анализ показал, что, несмотря на выполненные исследования, вопросы создания и практического применения электротехнических систем (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 системы 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.

Поэтому необходимо 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 являются нелинейность математической модели объекта управления (ОУ), нестационарность 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 на одном оборудовании различных как по размерам, так и по форме изделий; 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 ЭТС натяжения 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 ЭТС 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 **проблеме** создания электротехнических систем и комплексов при намотке и выкладке изделий из композиционных материалов.

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

**Предметом исследования** являются методологии расчета, анализа и синтеза ЭТС, используемые 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 рассчитать мощность электропривода ЭТС исходя из заданных характеристик системы регулирования натяжения;

- для различных вариантов используемых натяжных устройств получены аналитические выражения, описывающие натяжные 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** подтверждается: аналитическим выводом дифференциальных и интегральных уравнений, описывающих процесс намотки; применением надежного математического аппарата; использованием проверенных взаимодействий инструментов и материалов; проведенными испытаниями разработанных электротехнических систем натяжения композиционной ленты.

Выводы, сделанные по результатам работы, являются достоверными, научные положения аргументированными и прошли апробацию на международных и всероссийских научных конференциях.

**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 системой 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 значимость:

- 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 результаты, 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 курса лекций:

1) в 2022 году в АО «ЦНИИСМ» (г. Хотьков, Московская обл.) на намоточных станках КУ-489Ф3 (технические предложения и схемные решения для реализации ЭТС 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 ЭТС 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.

Акты внедрения результатов диссертационной работы приведены в Приложениях А, Б.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы лично и в соавторстве 43 печатных работ, в том числе, 10 статей опубликованы, в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень Министерства науки и высшего образования РФ для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени доктора наук, 1 патент РФ на полезную модель, 10 статей проиндексированы в Web of Science и SCOPUS.

В работе обобщены результаты 50-летней деятельности автора по вышеуказанной проблеме в качестве исполнителя, ответственного исполнителя и руководителя научно-исследовательских работ в ОКБ «Старт» (г. Новочеркасск), а потом в ЮРГПУ(НПИ).

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались на:

- XXXI Всероссийском научно-техническом семинаре “Актуальные вопросы электропривода” (Москва, МЭИ, 2024 г.);

- 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.);

- XLV Международной научно – технической конференции «Кибернетика энергетических систем» (Новочеркасск, 2023 г.);

- 28<sup>th</sup> 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.);

-2<sup>nd</sup> and 5<sup>nd</sup> 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, 2021г.);

-Products Proceedings - 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019, 2023 (Сочи, 2019, 2023 г.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.).

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

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности:

- п.1 **«Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования»** (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 **«Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов»** (в работе разработаны математические модели упругой ленты, получены аналитические выражения для натяжных устройств, предложена новая методика выбора мощности привода натяжных устройств);

- п.3 **«Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления»** (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; 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).

# **1 АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ НАМОТКИ И ВЫКЛАДКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К НИМ**

## **1.1 Электротехнические системы с упругостями второго рода**

В реальных электротехнических системах представление о жесткой связи вала двигателя и исполнительного механизма является допущением. В промышленности широко применяются электроприводы, где такие допущения неприемлемы. Особенно остро данная проблема возникает при создании современных быстродействующих приводов. Необходимость создания таких приводов диктуется ужесточением требований к электротехническим системам, используемым при изготовлении изделий в различных технологических процессах. Из-за влияния упругостей не удастся повысить быстродействие данных приводов [49-51,54].

В настоящее время синтез и реализацию систем управления электроприводов с упругими механическими передачами обычно выполняют с использованием принципов подчинённого регулирования с использованием последовательной коррекции. В ряде случаев, из-за появления колебательности, в структурную схему вводят дополнительные корректирующие устройства [49-51,54].

Существует два вида упругих связей: упругости первого и второго рода [49-51,54]. 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 и тому подобное), то такой электропривод называется электроприводом с упругостью второго рода [49-51,54].

Вопросы развития теории и практики создания и совершенствования электротехнических систем с упругостями первого рода хорошо разработаны.

Далее будем рассматривать класс электроприводов с упругостью второго рода. Обобщенная функциональная схема электропривода такого класса изображена на рисунке 1.1 [71]. Здесь обозначено: 1 – упругий материал, поступающий в зону деформации (намотки); 2 – натяжное (протягивающее) устройство; 3 – упругий материал в зоне намотки; 4 – технологическое оборудование (нагреватель, окрашиватель, печатающий механизм, устройство нанесения на упругий материал дополнительного слоя и т.п.); 5 – укладчик, обеспечивающий укладку материала на оправку или изделие; 6 – изготавливаемое (наматываемое) изделие;  $l_1(t)$  – длина тракта намотки (зоны деформации изделия).

Рассмотрим работу электропривода.

Упругий материал 1 попадает в зону деформации (намотки) с предварительным натяжением  $S_0$ , линейной скоростью  $v_0$  и длиной зоны деформации  $l_1(t)$ . Далее упругий материал проходит через натяжное (протягивающее) устройство 2. Вид устройства определяется типом упругого материала. Натяжное (протягивающее) устройство управляется от электропривода ЭПНУ. В данный привод входят: механическая передача (ПМ), ротор двигателя (РД), электромеханический преобразователь (ЭМП), регулятор (РС).

Электропривод имеет два канала: силовой и информационный. По силовому каналу передается энергия.

По информационным каналам передаются сведения о технологическом процессе и электроприводе. Эти каналы обозначены широкими стрелочками вида:  $\Leftrightarrow$ .

Силовой канал состоит из электрической и механической частей. В силовую часть входят ЭМП и РД. Вместе они образуют электрический двигатель (ДВ). Силовой канал обозначен стрелочками вида:  $\leftrightarrow$ .

Механическая часть состоит из ротора двигателя и механической передачи.

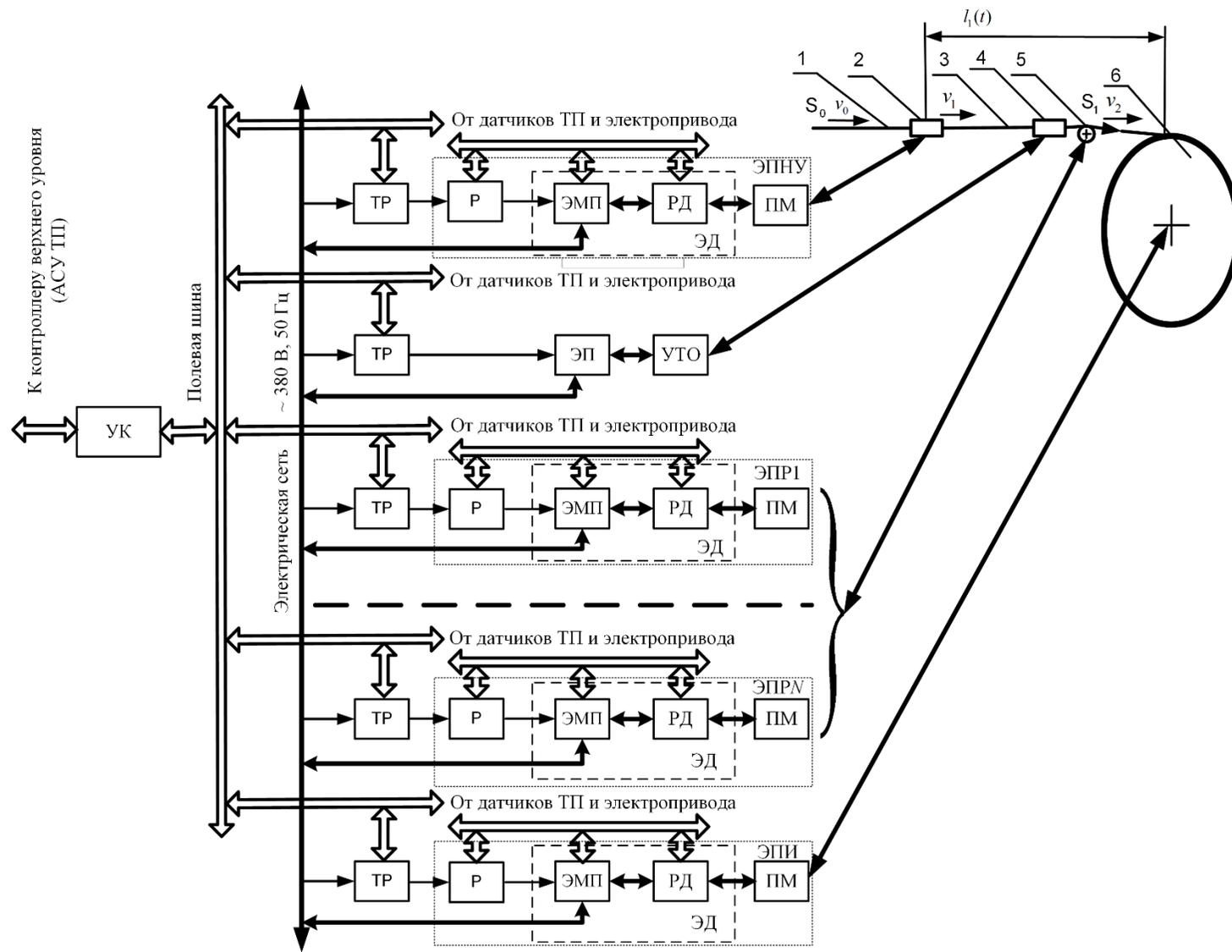


Рисунок 1.1 – Обобщённая функциональная схема электропривода с упругостью второго рода

Электропривод взаимодействует с системой электроснабжения и технологическим оборудованием. При этом возможно, как потребление энергии из сети, так и ее рекуперация.

В зоне деформации (намотки) упругий материал 3 может подвергаться некоторым воздействиям: нагреваться для изменения своих физико-механических характеристик, на его поверхность может наноситься информация (печать) или добавляться небольшой слой нового материала (например, окрашивание) и т. д. Данные действия выполняются с помощью устройства 4. Процессом управляет система, состоящая из устройства управления технологическим оборудованием (УТО), электрического преобразователя (ЭП) и регулятора (Р). В зависимости от используемого оборудования здесь также возможны перетоки энергии между сетью и устройством 4.

Далее материал 3 попадает на раскладчик 5. Раскладчик предназначен для укладки материала 3 на изделие 6 в нужном месте. Раскладчик, в зависимости от вида изделия 6 может и отсутствовать. Его нет при производстве ткани, при перемотке бумаги. Однако, в сложных процессах изготовления композиционных изделий они есть. Раскладчик имеет  $N$  степеней свободы и соответственно  $N$  приводов (ЭПР1-ЭПРН). Состав приводов аналогичен составу привода натяжного устройства.

Во вращение изделие 6 приводится также приводом ЭПИ.

Электропривод многоуровневый. Как правило, используются три уровня. На нижнем уровне находятся электропривода. На следующем уровне – управляющий контроллер (УК). Данный контроллер управляет работой всех электроприводов и обеспечивает заданную геометрию укладки материала на изготавливаемое (наматываемое) изделие. В свою очередь, УК работает под управлением ЭВМ верхнего уровня в рамках АСУТП производства.

Обычно в качестве УК выступает достаточно мощный контроллер, например, программируемый логический контроллер Siemens Simatic S7-300, S7-400 или S7-1500, который предназначен для построения систем

автоматизации средней и высокой степени сложности. УК связан по полевой шине с приводами и оборудованием технологической установки и, обычно по Ethernet или Profinet, с ЭВМ верхнего уровня. УК может получать информацию и непосредственно от датчиков технологического процесса.

## **1.2 Анализ тенденций развития электротехнических систем с упругостью второго рода для изготовления изделий из композиционных материалов**

В настоящее время известно достаточно много методов изготовления композиционных конструкций. Назовём некоторые из них: намоточный, выкладка, центробежный, контактного формования, литья композитов и др. [1,4,10,11,13,18,20,32,33]. Наиболее полно конструктивно – технологические преимущества высокопрочных композитов используются в элементах летательных аппаратов [14,16,17,19,20], в судостроении [21], химической, нефтяной и газовой отраслях промышленности [22,23], в баках для воды в фильтрующих системах [72], в конструкциях ветровых электростанций [73], использование композиционных материалов позволило довести длину лопастей до 60-100 м, уменьшить вес конструкции, увеличить мощность генерируемой энергии [73]. Композиционные конструкции удачно сочетают анизотропию прочностных характеристик композита с надёжностью, высокой удельной прочностью, радиопрозрачностью, технологичностью, химически не активны и, в основном, изготавливаются методами намотки (“сухой” или “мокрой”) и выкладки. Для придания изделиям, изготавливаемым методом намотки, особых свойств, используют комбинированную технологию. В этом случае основную часть изделия изготавливают методом “мокрой” намотки, а методом “сухой” намотки обматывают некоторые участки изделия. Выкладка осуществляется с использованием, в основном, “сухой” ленты (препрега).

В ходе анализа тенденций развития электротехнических систем станков для намотки изделий из композиционных материалов рассмотрим, как совершенствовалось намоточное оборудование.

Изделия из композиционных материалов начали изготавливаться в промышленности с 50-х годов прошлого века в СССР и за рубежом [74,75], когда в промышленности потребовались достаточно прочные и легкие конструкции. Этим качествам полностью удовлетворяли конструкции из композиционных материалов – в то время стеклопластиков.

Все виды намотки можно разделить на полюсную и спиральную. При полюсной намотке слои композиционного материала укладываются впритык друг к другу. При спиральной намотке слои композиционного материала укладываются по заданным траекториям. Иногда используются другие методы намотки или комбинированные методы (например, продольно-поперечная намотка) [4,10,11].

Для намотки изделий применяются различные станки. Первые станки, на которых наматывались композиционные изделия, представляли собой модернизированные токарные станки. В связи с возросшими требованиями к номенклатуре наматываемых изделий и их качеству начали проектироваться и изготавливаться специальные станки для намотки. Эти станки были оснащены системами числового программного управления, устройствами раскладки ленты на изделие, электротехническими системами контроля и регулирования натяжения наматываемой композиционной ленты. В настоящее время для намотки ряда изделий стали использоваться и роботы, в частности роботы Coriolis, KUKA и др. [75].

Первые намоточные станки оснащались простыми механическими или электротехническими устройствами, и, как правило, контроль натяжения наматываемого материала не осуществлялся. На некотором оборудовании использовались механические устройства [32,33,48,76], которые позволяли измерять натяжение и воздействовать на его уровень. До настоящего времени Савеловским машиностроительным заводом выпускался станок НЛ-3А [76], предназначенный для намотки лонжеронов вертолетов, на котором используются механические тормозные устройства без контроля реального натяжения композиционного материала. Отметим, что точность поддержания

заданного значения натяжения материала при намотке на таком оборудовании не превышает  $\pm(10-15)$  %.

В 60–70-х годах прошлого века намоточные станки уже оснащались электротехническими системами с использованием датчика натяжения наматываемого материала [32,33,48,54,56,77-79]. Данные системы, как правило, включали в себя датчик натяжения, электронные устройства и исполнительный механизм в виде двигателя постоянного тока или ферропорошкового тормоза [80,81]. Управлялись исполнительные устройства от тиристорных преобразователей. Точность поддержания заданного значения натяжения материала при намотке на таком оборудовании не превышала  $\pm(5-10)$  %. Данные станки, при необходимости, имели возможность укладки ленты на изделие по сложной траектории. Для этого они оснащались системами ЧПУ и раскладчиками. Последние осуществляли укладку ленты на изделие.

Следующий этап в развитии оборудования для изготовления композиционных изделий методом намотки наступил при массовом внедрении в промышленность преобразователей частоты на транзисторах и контроллеров с высокой производительностью. Это позволило существенно повысить быстродействие электротехнических систем натяжения, но потребовало учитывать специфические особенности поведения композиционного материала как объекта регулирования.

Для производства крупногабаритных деталей из композиционных материалов с жесткими требованиями к условиям эксплуатации в 80-х годах прошлого века стали использовать выкладку. Долгое время процесс выкладки выполнялся вручную. В настоящее время все более широко используются методы автоматизированной выкладки препрегов. Данный метод дает значительное увеличение точности выкладки препрега по сравнению с ручной выкладкой. Без внедрения такого оборудования в производство становится невозможным изготавливать уникальные конструкции достаточно разных габаритов (от маленьких изделий (до 0,5 м) до очень больших (до десятков

метров)). Это элементы фюзеляжа крупногабаритных самолетов, крылья самолетов больших размеров и другие конструкции летательных аппаратов, корпуса надводных и подводных кораблей.

В настоящее время выкладка, в основном, осуществляется препрегом. При этом двумя основными технологиями при выкладке композиционных изделий из предварительно пропитанного материала являются [82]:

- автоматизированная выкладка ленты Automated Tape Laying (ATL);
- автоматизированная выкладка волокон Automated Fiber Placement (AFP).

В методе ATL широкая лента препрега выкладывается на оснастку и прикатывается специальным роликом по заданной программе. Часто поверхность препрега защищена специальной подложкой, которая при выкладке сматывается на отдельную катушку. При выкладке по методу AFP используется лента, собранная из нескольких узких полосок препрега, которая собирается на выкладочной головке. Каждая полоска препрега может подаваться и обрезаться независимо от остальных, что позволяет варьировать ширину подаваемой на оснастку ленты и выкладывать поверхности сложной формы.

Для выкладки изделий по технологии ATL в основном используются конструкции на основе портального принципа с горизонтальной балкой, которая позволяет выкладывать большие, но несложные по форме детали [82]. Для выкладки изделий по технологии AFP используют, в основном роботизированную «руку» с большим количеством степеней свободы [83].

Комплексы для выкладки изготавливаются несколькими фирмами в мире и в России: Coriolis [84], Microsam [85], M-Torres [86], Electroimpact [87], Ingersoll [88], ООО «НПП ВИУС» [89] и др.

Все оборудование для выкладки оснащено головкой для выкладки препрега. В зависимости от конструкции оборудования, бобины с препрегом крепятся или на головке (тогда их число ограничено), или вне станка (тогда

оборудование имеет большой тракт подачи препрега к месту выкладки). В состав головки входят:

- устройства разогрева выкладываемого материала;
- специальный ролик, направляющий препрег в заданную точку пространства;
- прикаточный ролик, обеспечивающий заданное усилие прикатки препрега на изделие;
- устройства обрезания ленты.

В настоящее время наметилась тенденция использования унифицированного оборудования для намотки и выкладки изделий из композиционных материалов. В таком оборудовании применяются агрегаты с роботизированной «рукой». Оборудование используется, например, в NASA для намотки элементов конструкции больших габаритов [75].

### **1.3 Технологический процесс изготовления композиционных изделий.**

#### **Особенности работы электроприводов в механизмах изготовления композиционных изделий**

##### ***1.3.1 Метод “сухой” намотки***

Рассмотрим процесс “сухой” намотки. В этом случае процесс формирования изделия состоит из трех этапов:

- 1) пропитка нитей или лент раствором связующего и последующая термообработка с целью удаления излишнего количества летучих компонентов (полученный материал называют “препрегом”);
- 2) намотка изделий из препрега;
- 3) термообработка изделия.

Иногда этапы 2 и 3 объединяют. Тогда намоточный станок оснащают специальными нагревателями.

Участок получения препрега на ленточных установках изображен на рисунке 1.2.

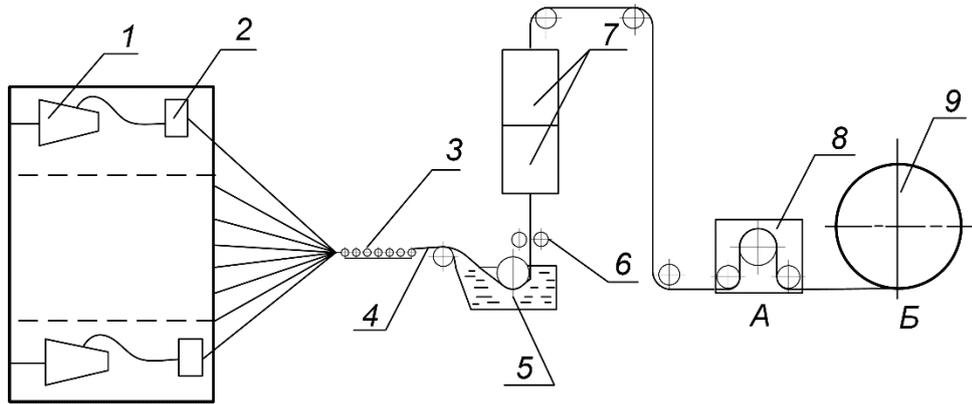


Рисунок 1.2 – Изготовление препрега на ленточной установке

Нити из стекло-, органо-, угольного- или другого волокна, сматываясь с неподвижных шпуль *1* (число шпуль достигает от 600 до 1200 шт., осевое сматывание), проходят через натяжное устройство *2* (как правило, механическое) и формируются гребенкой *3* в ровницу *4* [90]. Ровница проходит через ванну *5*, заполненную раствором связующего. Избыток связующего удаляется отжимными роликами *6*. Пропитанная связующим лента подвергается термической обработке в сушильных камерах *7*. При этом происходит удаление части летучих веществ из связующего. Высушенная лента охлаждается и наматывается на бобину *9*. Натяжное устройство *8* поддерживает требуемое натяжение ленты на участке намотки *АБ*.

Намотка изделий из препрега осуществляется на намоточных станках. Схема намоточного станка показана на рисунке 1.3. Композиционная лента, сматываясь с бобины *1*, проходит через натяжное устройство *2*, укладчик *3* и наматывается на оправку *4*. Нагреватель *5* удаляет избыток летучих компонентов из ленты и размягчает связующее. Каретка станка *6* перемещается вдоль оси изделия *ОО'*, обеспечивая заданную программой траекторию укладки ленты на оправку *4*. При необходимости, на станке устанавливаются бобины *7* продольных лент. Бобины закреплены на вертлюге *8* и вращаются синхронно с наматываемым изделием. Помимо нагревательного элемента *5* станок может содержать устройство подогрева оправки и внешние нагревательные элементы, используемые с целью

послойной полимеризации связующего. Отметим, что существует оборудование, в котором в процессе намотки изделие не вращается, а вокруг изделия вращается бобина с лентой и натяжным устройством.

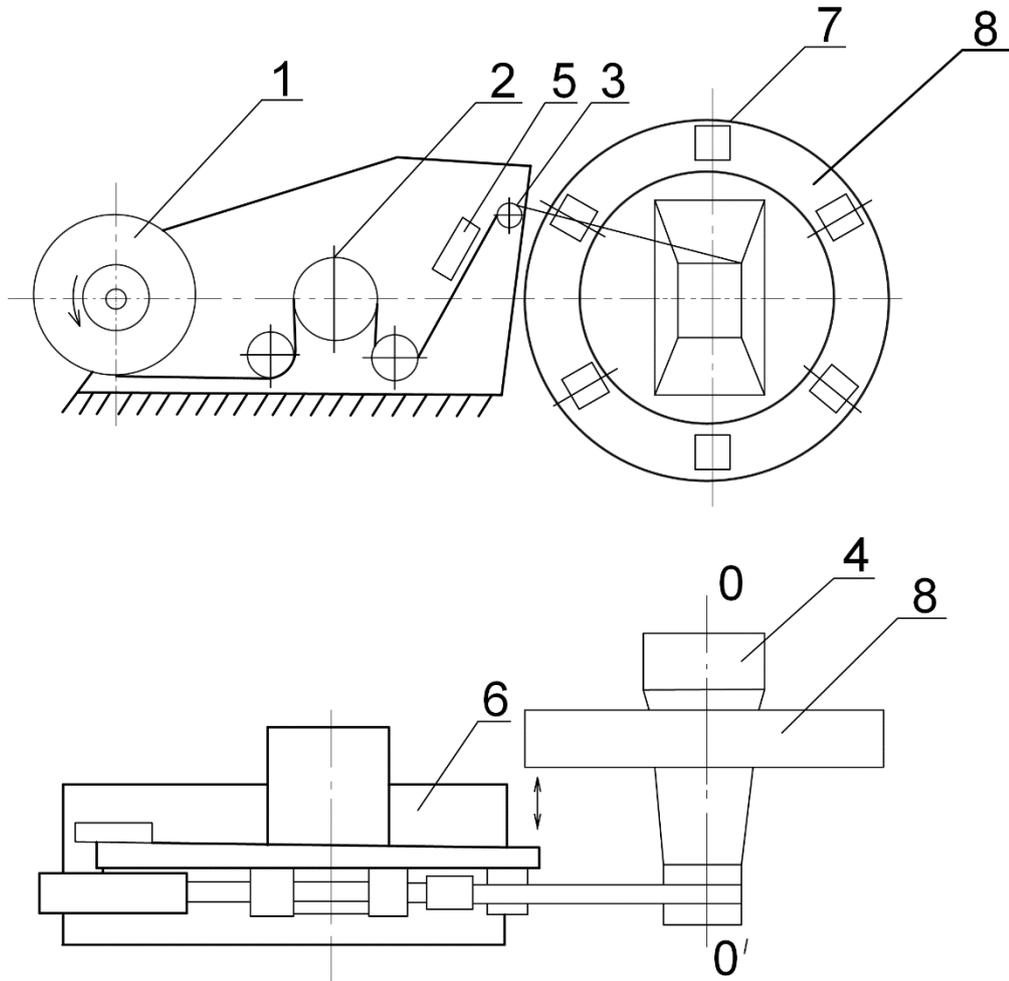


Рисунок 1.3 – Намотка изделий “сухим” методом на намоточном станке

Рассмотренные технологические процессы изготовления препрега и намотки из него изделий имеют идентичные тракты намотки. На рисунке 1.4 изображена обобщенная схема участка намотки композиционной ленты.

Композиционная лента *1*, проходя через ролики *2* промежуточного натяжного устройства, наматывается на бобину или изделие *3*. Последнее через редуктор *4* приводится во вращение электродвигателем. Привод тормозного устройства *6* через редуктор *7* связан с тормозными роликами *2*.

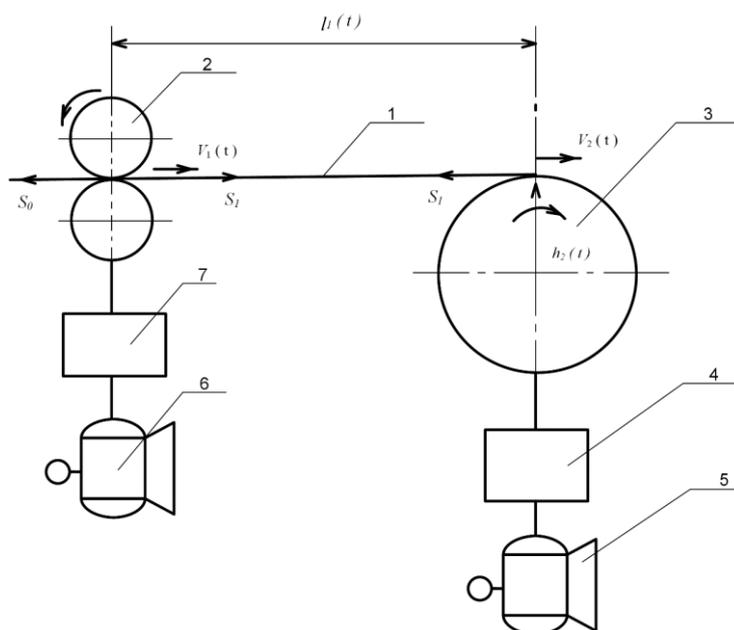


Рисунок 1.4 – Тракт намотки “сухой” композиционной ленты

Натяжение ленты на участке намотки, в основном, определяется тормозным моментом привода б. Скорость намотки  $v_2(t)$  зависит от скорости вращения привода 5 и радиуса изделия  $h_2(t)$ . Здесь обозначены:  $l_1(t)$  – длина тракта намотки;  $v_1(t)$  – скорость входа материала в зону деформации;  $S_1$  – натяжение, с которым лента наматывается на изделие;  $S_0$  – натяжение ленты на предыдущем участке.

Качество изделий, изготавливаемых из композиционных материалов, во многом определяется этапом намотки [34-46, 91-94]. Основными факторами, чрезвычайно сильно влияющими на все показатели качества, являются поле остаточных напряжений в армирующем материале, возникающее в процессе намотки и полимеризации, и точность укладки ленты на оправку. Последний фактор определяется работой раскладчика и системы ЧПУ станка и, являясь предметом отдельных исследований, и нами в работе не рассматривается.

Поле остаточных напряжений в изделии существенно зависит от натяжения композиционного материала при намотке изделия. Вопросам создания и поддержания с определенной точностью натяжения на заданном по технологическому процессу уровне и посвящена настоящая работа.

### 1.3.2 Метод “мокрой” намотки

Рассмотрим процесс “мокрой” намотки изделий.

Схематически тракт намотки при использовании нитей показан на рисунке 1.5. На шпулярник *1* устанавливаются бобины с материалом *2*. Количество бобин зависит от технологического процесса и может изменяться от 6 до 1200 штук. После осевого сматывания нити с неподвижных бобин, сухой еще материал *3* проходит через натяжные устройства *4* и на гребенке *5* формируется в ровницу. Ровница проходит через ванночку *6* со связующим. Количество связующего, нанесенного на ровницу, контролируется датчиком *7*. Избыток связующего удаляется отжимными роликами *8*, зазор между которыми изменяется электроприводом *9*.

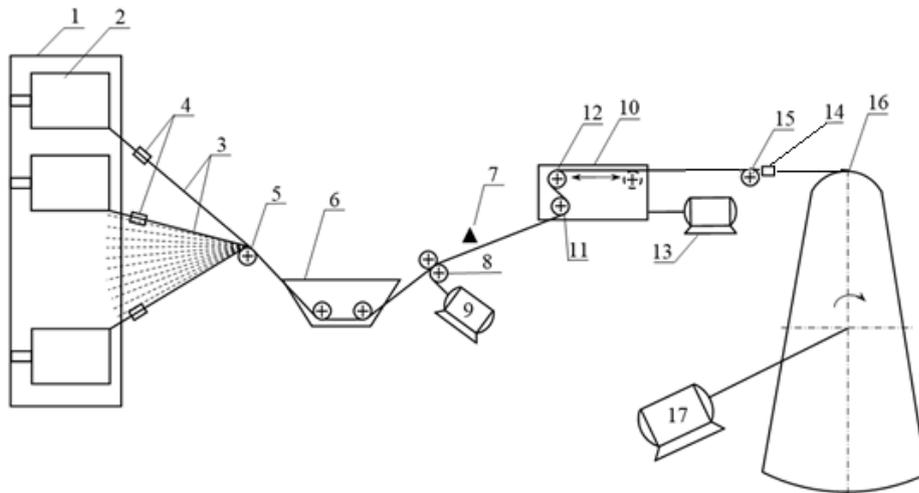


Рисунок 1.5 – Намотка изделий “мокрым” методом на намоточном станке при использовании композиционных материалов

Натяжное устройство *10* состоит из неподвижного, неврещающегося ролика *11* и неврещающегося ролика *12*, который перемещается вдоль натяжного устройства при помощи привода *13*. Таким образом, изменяется угол охвата “мокрой” лентой роликов *11* и *12*. Натяжение ленты измеряется измерителем *14*. Ролик *15* укладывает ленту на изделие *16* по специальной траектории. Для этого он снабжен механизмами укладки, для простоты на рисунке 1.5 не показанными. Изделие *16* приводится во вращение

приводом 17. Отметим, что в процессе намотки изделия угол охвата ролика 15 “мокрой” лентой также изменяется. При этом натяжение на участке намотки зависит как от положения роликов натяжного устройства 10, так и от угла охвата лентой раскладчика 15.

Натяжение на участке намотки определяется, в основном, углом охвата “мокрой” лентой роликов 11,12 натяжного устройства 10, а скорость намотки ленты на изделие – скоростью вращения изделия и его радиусом в текущий момент времени.

На рисунке 1.6 схематически показан тракт “мокрой” намотки при использовании катушек со жгутиком для формирования ровницы. Здесь используется так называемый “активный” шпулярник.

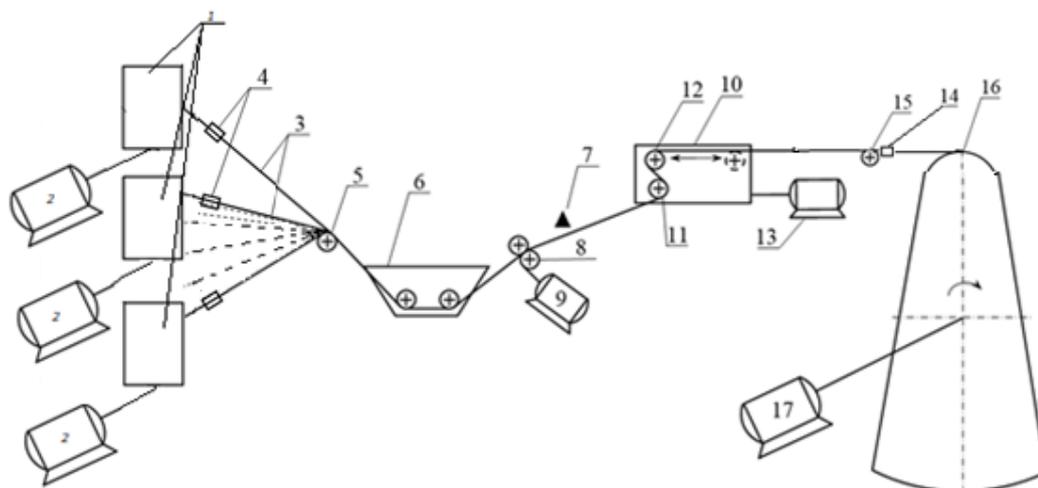


Рисунок 1.6 – Намотка изделий “мокрым” методом на намоточном станке при использовании жгутиков для формирования ровницы

Катушки со жгутиками из композиционного материала (обычно 6-24 штук) устанавливаются на специальный шпулярник. Жгутики тангенциально сматываются с катушек, катушки вращаются при смотке. Для создания необходимого натяжения жгутиков катушки связаны с тормозными устройствами 2. Жгутики 3 формируются на гребенке 5 в ровницу. Натяжение жгутиков измеряется датчиками 4. Далее процесс намотки изделий аналогичен описанному выше. Отметим, что активный шпулярник используется и в

других технологических процессах производства изделий из композиционных материалов, например, при выкладке изделий.

Как отмечалось в разделе 1.3.1 качество изделий, изготавливаемых из композиционных материалов, во многом определяется этапом намотки [34-46, 91-94]. Основными факторами, чрезвычайно сильно влияющими на все показатели качества, являются поле остаточных напряжений, возникающих в процессе намотки, точность укладки ленты на оправку. Последний фактор определяется работой раскладчика и системы ЧПУ станка, нами в работе не рассматривается.

Поле остаточных напряжений в изделии существенно зависит от натяжения композиционного материала при намотке изделия. Вопросы создания и поддержания натяжения на заданном по технологическому процессу уровне и посвящена настоящая работа.

### ***1.3.3 Метод выкладки изделий***

Рассмотрим процесс выкладки изделий. Отметим, что в настоящее время изделия выкладываются, в основном, препрегом. При выкладке используются два метода: автоматизированная выкладка ленты Automated Tape Laying (ATL) и автоматизированная выкладка волокон Automated Fiber Placement (AFP) [82]. В методе ATL широкая лента препрега выкладывается на оснастку и прикатывается специальным роликом по заданной программе с одновременной смоткой защитной подложки на отдельную катушку. Метод AFP отличается тем, что в нем вместо широкой ленты используется лента из узких полосок препрега, которая собирается на выкладочной головке. Каждая полоска препрега может подаваться и обрезаться независимо от остальных, что позволяет варьировать ширину подаваемой на оснастку ленты и выкладывать поверхности сложной формы. Для сложных поверхностей в AFP-установках обычно используют роботизированную «руку» с большим количеством степеней свободы, тогда как при ATL выкладке часто

используют порталную конструкцию с горизонтальной балкой, которая позволяет выкладывать большие, но несложные по форме детали [82].

При методе ATL используются установка порталного типа с горизонтальной балкой. Пример такого оборудования представлен на рисунке 1.7. На рисунке 1.7 показано оборудование фирм M-Torres, Microsam и ООО “НПП ВИУС” (г. Новочеркасск) [85,86,89].

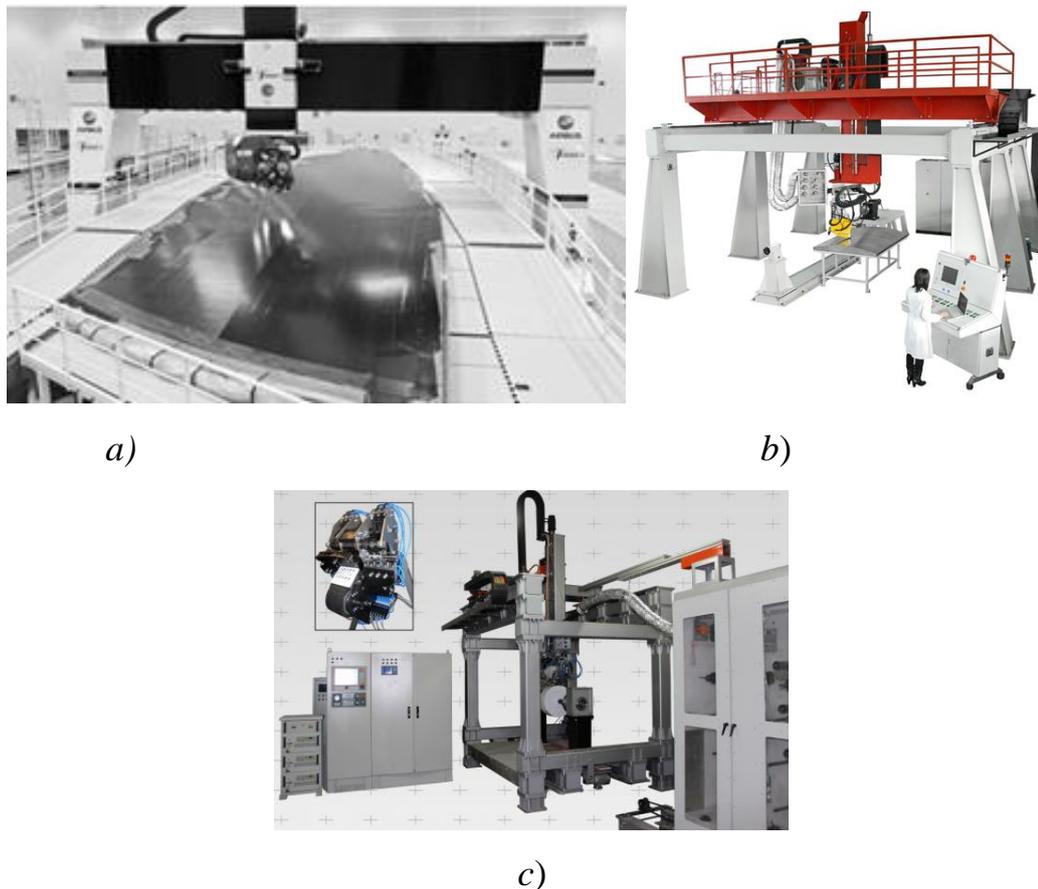


Рисунок 1.7 – Оборудование порталного типа для выкладки изделий:

*a)* фирмы M-Torres; *b)* фирмы Microsam; *c)* фирмы ООО “НПП ВИУС”

При выкладке изделий с помощью метода AFP используются различные роботы. На рисунке 1.8 показаны роботизированные комплексы для выкладки композитов. Данные комплексы содержат робот, который перемещает головку для выкладки препрега. На рисунке показаны комплексы фирмы Coriolis [84] и робот KUKA, используемый в NASA для выкладки и намотки крупногабаритных изделий [75].



a)

b)

Рисунок 1.8 – Роботизированные комплексы для выкладки и намотки композиционных изделий:

a) – выкладка с помощью комплекса фирмы Coriolis;

b) – намотка с помощью робота KUKA

В роботизированных комплексах выкладки и намотки используются различные роботы: Kuka, ABB, Comau, Coriolis. Как правило, они оснащены системами управления фирмы Siemens, это системы Siemens Sinumeric 840D SL.

Существует два вида подачи материала на головку выкладки. При первом бобины с препрегом закрепляются вне станка. При втором, материал закрепляется на выкладочной головке.

Рассмотрим первый вид. Схематический тракт движения препрега при выкладке показан на рисунке 1.9. На рисунке не показаны ряд технологических датчиков, устройство нагрева препрега в точке его касания с изделием, механизм для сматывания защитной подложки на катушку, механизм, выполняющий обрезку препрега. Некоторые из перечисленных механизмов не оказывают существенного влияния на работу системы регулирования натяжения, влияние других может быть учтено путем задания требуемой скорости движения препрега в точке его укладки на изделие.

Отметим также, что в настоящее время разработаны и широко внедряются современные препреги, в которых отсутствует защитная подложка. В этих препрегах используется связующее, которое не липнет друг к другу при нормальной температуре. В процессе выкладки выкладываемый участок нагревается и хорошо прилипает к поверхности изделия.

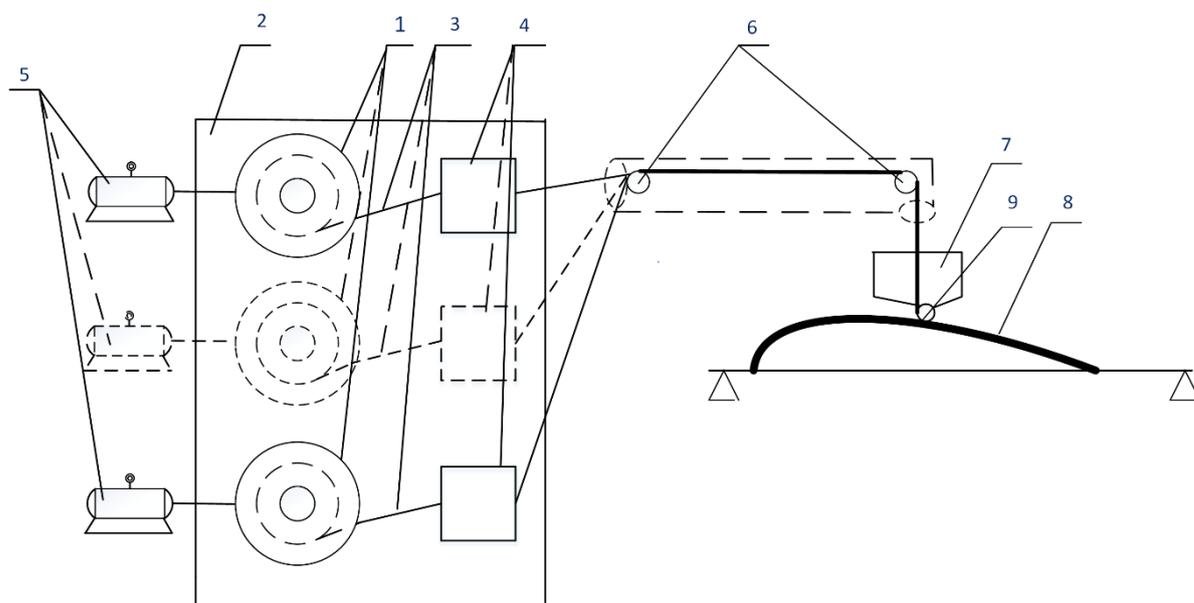


Рисунок 1.9 –Схематический тракт движения препрега при выкладке и закреплении бобин с лентой в шкафу

Несколько бобин с лентой 1 (см. рисунок 1.9) устанавливаются в шкафу 2. Препрег 3, сматываясь с бобин 1, проходит через устройство 4 в котором установлены, в зависимости от исполнения, компенсаторы, датчики натяжения, промежуточные натяжные устройства. Чтобы не перегружать рисунок, они на нем не показаны. Бобины 1 связаны с приводами 5, осуществляющими их подтормаживание. В зависимости от исполнения, основное натяжение препрега осуществляется или этими приводами, или промежуточными натяжными устройствами. Далее препрег с помощью направляющих роликов 6, как правило в изолированной трубе, подается на выкладочную головку 7, которая укладывает ленту на изделие 8. Прикаточный ролик 9 осуществляет требуемое усилие прикатки ленты. Характерной особенностью данного процесса является большое расстояние между роликами 6, достигающее до десятков метров.

При втором виде подачи материала, когда бобины с препрегом закреплены на выкладочной головке, тракт движения материала аналогичен предыдущему, но имеет значительно меньшую постоянную, длину (рисунок 1.10).

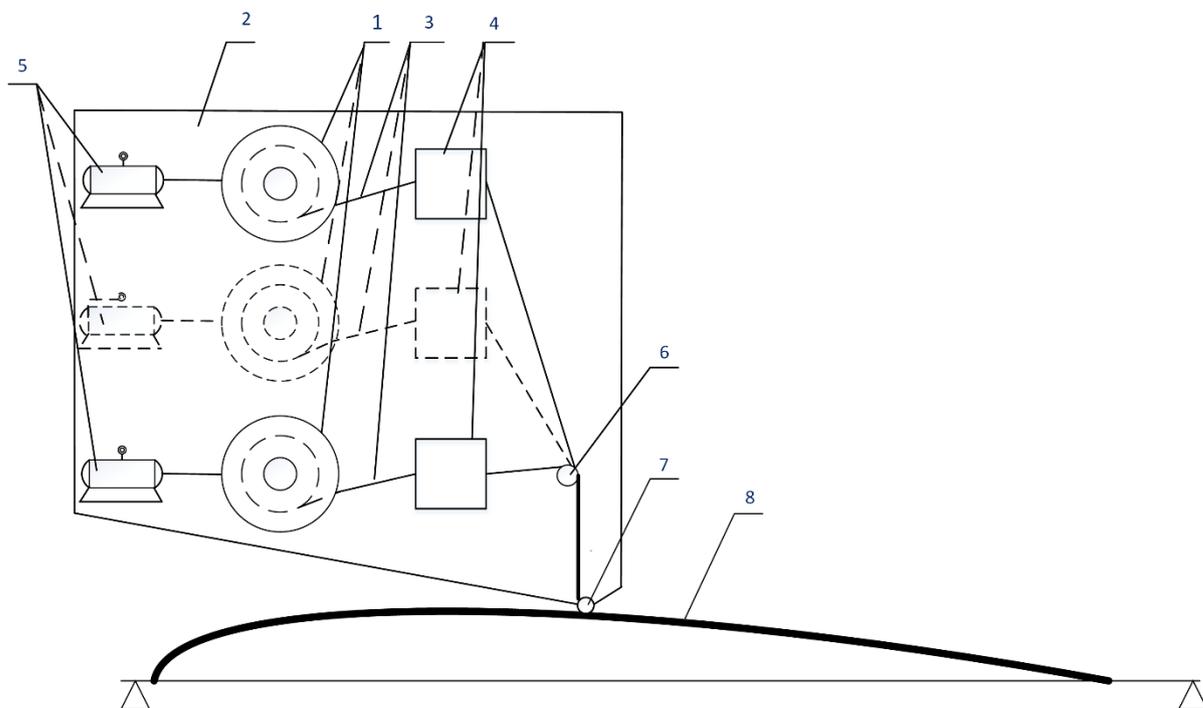


Рисунок 1.10 – Схематический тракт движения препрега при выкладке и закреплении бобин с препрегом на выкладочной головке

На рисунке 1.10, как и на рисунке 1.9 не показаны ряд элементов, используемых в выкладочной головке.

Несколько бобин с лентой 1 устанавливаются на выкладочной головке 2. Препрег 3, сматываясь с бобин 1, проходит через устройство 4 в котором установлены, в зависимости от исполнения, компенсаторы, датчики натяжения, промежуточные натяжные устройства. Чтобы не перегружать излишне рисунок они на нем не показаны. Бобины 1 связаны с приводами 5, осуществляющими их подтормаживание. В зависимости от исполнения, основное натяжение препрега осуществляется или этими приводами, или промежуточными натяжными устройствами. Далее препрег с помощью направляющих роликов 6, подается на прикаточный ролик 7, который укладывает ленту на изделие 8.

Анализируя описанные варианты трактов подачи следует отметить, что каждый из них имеет свои преимущества и недостатки.

Так, при первом варианте нет ограничений по весу используемого оборудования, количеству бобин с лентой, их диаметру, наличию различных механических устройств, использованию дополнительных натяжных устройств. Однако большой тракт движения ленты может вызывать нежелательные колебания натяжения. Кроме того, должны учитываться усилия, прикладываемые к выкладочной головке со стороны ленты должно учитываться, чтобы не приводить к ошибкам позиционирования. К недостаткам данного варианта следует отнести и очень сложную и долгую заправку материалом при окончании ленты на бобинах.

При втором варианте есть существенные ограничения по весу установленного на выкладную головку оборудования. Поэтому количество используемых бобин с препрегом, как и их диаметр, ограничено. Это так же касается и дополнительного оборудования для создания регулируемого натяжения, нагрева препрега в точке выкладки и т. д.

Как и в случае с процессом намотки, при выкладке натяжение композиционного материала, с которым лента входит в зону выкладки, жестко регламентировано. От его соблюдения зависит качество будущих изделий.

#### **1.4 Основные качественные показатели изделий из композиционных материалов**

Современное развитие техники привело к необходимости широкого использования композиционных материалов в различных изделиях.

Процесс изготовления изделий методом намотки и выкладки начинается с подготовки исходного композиционного материала. Далее данный материал наматывается или укладывается на оправку. Намотка может производиться “сухим” или “мокрым” материалом. При этом намотку можно осуществлять на холодную или горячую оправку. В последнем случае оправка нагревается

до определенной температуры, близкой к температуре термообработки. Возможно нагревание изделия и тэнами, находящимися рядом с наматываемым изделием.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что в изделии необходимо создавать переменное по толщине поле начальных напряжений [91]. От данного поля существенно зависит прочность будущих готовых изделий.

Процесс изготовления изделий из композиционных материалов достаточно сложен, он многофакторен и многопараметричен [18,35,91]. Сам процесс изготовления изделий из композиционных материалов имеет ряд этапов: получение композиционного материала; пропитка КМ связующим; намотка самого изделия; процесс отверждения намотанного изделия; при необходимости механическая обработка изделия. Качество будущих изделий определяется как исходными параметрами применяемого сырья, так и работой всего технологического оборудования (намоточного, оборудования для полимеризации изделия). На многие из этих факторов влиять невозможно (на качество используемого связующего, физико-механические параметры композиционного материала и некоторые другие). На другие факторы можно и нужно влиять (это натяжение при намотке для создания в изделии предварительно напряженного состояния, степень пропитки материала связующим, скорость намотки, температура отверждения изделия, скорость нагревания и охлаждения изделия и др.). Данные факторы определяются работой технологического оборудования. При отклонениях реальных параметров работы оборудования от рекомендуемых, возможны появления различных дефектов, снижающих качество изделий. Как показано в [18,35,91], качество изделий из КМ оценивается по нескольким основным критериям: отсутствию внутренних и внешних дефектов, соответствию требуемым размерам, массе и прочности.

Остановимся подробнее на процессе намотки изделий. Данный процесс является наиболее ответственным этапом изготовления изделий из КМ

[18,35,91]. При нарушении параметров при намотке могут возникать ситуации, которые приводят к появлению различных дефектов, причем возможно и к тому, что использовать намотанное изделие далее будет невозможно (при появлении непроклеев, неправильной укладке ленты на изделие, нарушении его структуры, внутренних расслоениях). Такие изделия бракуются. Это приводит, в том числе, и к большим экономическим потерям, так как стоимость изделий из КМ высока из-за дорогих компонентов и длительного времени изготовления.

Таким образом, анализируя процесс изготовления изделий из композиционных материалов, можно сделать выводы о том, что точность поддержания натяжения КМ в процессе намотки и динамические характеристики ЭТС натяжения, в конечном итоге определяют перечисленные выше качественные показатели будущих изделий.

## **1.5 Обзор современных электротехнических систем намотки**

В настоящее время электротехнические системы натяжения и скорости движения различных ленточных материалов при намотке используются во многих отраслях промышленности: в черной металлургии, в целлюлозно-бумажной, текстильной, химической, при прокатке металлов, изготовлении бумаги, текстильных материалов, искусственных пленок и т.д.

В зависимости от области применения и, соответственно, от требований, предъявляемых к электроприводу, разработано большое число разнообразных электротехнических систем регулирования натяжения, которые могут быть классифицированы по способу регулирования, по виду энергии, потребляемой исполнительным механизмом или системой в целом, по способу получения рабочей информации и т.д.

При составлении данного обзора рассмотрены разработанные в России и за рубежом ЭТС натяжения, которые наиболее интересны с точки зрения

возможного применения их при производстве изделий из композиционных материалов.

На ленточной установке УОЛ-1А используется электротехническая разомкнутая система регулирования натяжения с измерением диаметра наматываемой бобины. К достоинствам системы можно отнести ее простоту, возможность в определенных пределах задавать закон изменения натяжения в функции радиуса бобины. Недостатком системы является низкая точность регулирования натяжения (порядка 15 %), обусловленная влиянием ряда неучтенных возмущающих факторов (предварительного натяжения, изменения моментов трения в передачах и т. д.).

Регулирование скорости движения ленты осуществляется изменением передаточного отношения гидроредуктора, связывающего асинхронный двигатель с направляющими роликами. Большие колебания линейной скорости материала (более чем на 10 %) объясняются отсутствием отрицательной обратной связи. Этими же недостатками обладают все разомкнутые системы.

В настоящее время такие системы используются крайне редко в оборудовании, к точности работы которого не предъявляются жесткие требования.

Отметим, что ЭТС, используемые в текстильной промышленности [95-98], также не могут удовлетворить специфическим требованиям процесса изготовления изделий из композиционных материалов. Это объясняется тем, что диаметр намотки текстильных изделий, изменяется весьма медленно, что позволяет применять при синтезе ЭТС метод “замороженных” коэффициентов уравнений динамики и рассчитывать систему как стационарную. Интересной особенностью таких регуляторов является широкое использование в качестве исполнительных механизмов блоков электромагнитных муфт или ферропорошковых тормозов.

Замкнутые ЭТС системы регулирования применяются при производстве изделий из композиционных материалов. Трехпозиционные ЭТС натяжения,

эксплуатируемые на ряде предприятий в течение многих лет, зарекомендовали себя как надежные в эксплуатации. Однако подобные устройства имеют большие динамические и статические ошибки регулирования. Так, изменение тока возбуждения двигателя от нуля до номинального в системе происходит за 1-2 с.

Дальнейшим этапом усовершенствованием ЭТС натяжения можно считать системы регулирования с электродвигателями постоянного тока или ферропорошковыми тормозами и тиристорными регуляторами [47,54,56,77-81]. В ОКТБ “СТАРТ” (г. Новочеркасск) под руководством и при непосредственном участии автора были разработаны, изготовлены и внедрены на ряде предприятий отрасли ЭТС натяжения. Данные системы регулирования достаточно долго эксплуатировались при намотке композиционных изделий. Характеристики некоторых из этих систем приведены в таблице 1.1 [56,77-81].

Однако данные ЭТС морально и физически устарели, имеют устаревшую элементную базу, не обеспечивают требуемую точность отработки натяжения при намотке изделий сложной формы.

Двухконтурная ЭТС натяжения, разработанная в институте ВНИИ «Электропривод», предназначена для работы на ленточной установке УОЛ-1А. Она построена по принципу подчиненного управления и включает в себя контур тока (контур косвенного регулирования натяжения) и контур скорости. В режиме заправки бобины система стабилизирует ее угловую скорость. После окончания заправки происходит автоматическое изменение структуры ЭТС, превращающее ее в одноконтурную систему косвенного регулирования натяжения. Система имеет высокое быстродействие, может изменять натяжение по заданной программе. К недостаткам следует отнести низкую точность ЭТС, обусловленную выбором принципа косвенного регулирования натяжения (по току). Так, по данным работ [49-51, 57-59] точность ЭТС натяжения, работающих в функции тока, даже при регулировании скорости вращения бобины в диапазоне 1:(3-7) не превышает 10-12%.

Таблица 1.1 – Технические характеристики ЭТС натяжения композиционной ленты, разработанные в ОКТБ СТАРТ  
г. Новочеркасск\*

Характеристика	ЭТС натяжения “сухой” композиционной ленты или “мокрого” жгута					
	САРН-1	САРН-2	СПУН-1	АСРНиС	САРН-2М	РНЖ-М2
Диапазон натяжения, Н	45-1176	98-1226	200-1400	20-400	50-400	30-200
Максимальное отклонение натяжения от заданного уровня, %	±3	±3	±3	±3	±3	±10
Время переходного процесса, с не более	0,2	0,25	0,25	0,4	0,4	0,6
Скорость движения ленты, м/с	0,083-0,35	0,043-0,58	До 1,0	0,05-0,3	0,08-0,25	0,1-0,5
Ширина ленты, мм				10-50	10-25	25-50
Исполнительный механизм	Электродвигатель постоянного тока П11	Ферропорошковый тормоз ПТ-2,5М	Ферропорошковый тормоз ПТ-6М	Блок муфт с асинхронным двигателем	Двигатель постоянного тока	Двигатель постоянного тока
Назначение	Стабилизация натяжения	Стабилизация натяжения	Программное управление натяжением	Стабилизация натяжения и скорости намотки	Стабилизация натяжения	Стабилизация натяжения

\*- с участием и под руководством автора

Перечисленные недостатки не делают целесообразным применение аналогичных ЭТС при производстве изделий из композиционных материалов. Кроме того, в рассмотренных ЭТС не учитывается взаимное влияние каналов регулирования натяжения и скорости намотки ленты.

Многосвязные ЭТС используются в черной металлургии для прокатных станов. Здесь большое распространение получили ЭТС натяжения и толщины прокатываемого металла, натяжения материала и его скорости, построенные по принципу прямого измерения натяжения [57-59, 99-101].

Большинство ЭТС в качестве исполнительных устройств имеют асинхронный или синхронный двигатели. При этом ЭТС проектируются, как правило, по принципу подчиненного управления, и, как показывает опыт, применение таких систем позволяет упростить наладку приводов, обеспечить хорошее быстродействие, просто реализовать возможность ограничения любой из регулируемых координат. Наибольшее распространение получили двух- и трехконтурные ЭТС натяжения и двухконтурные ЭТС скорости движения.

В связи с этим, в качестве примера рассмотрим двухсвязную ЭТС натяжения и скорости тонколистовой прокатки на реверсивном стане. Система имеет трехконтурные ЭТС натяжения моталки и разматывающего устройства. Структура системы построена по принципу подчиненного управления. С помощью корректирующих звеньев обеспечивается инвариантность по основным возмущающим воздействиям и автономность систем. Звенья самонастройки обеспечивают требуемое качество регулирования при изменении параметров объекта регулирования. Достоинством системы является большое быстродействие, независимость показателей качества системы при “медленном” изменении параметров ОР.

Таким образом, по итогам анализа ЭТС натяжения и скорости движения ленточного материала, разработанных у нас в стране и за рубежом, можно сделать следующие выводы:

- ЭТС натяжения, применяемые в настоящее время не в полной мере, соответствуют современным требованиям точности отработки заданных законов силовой намотки при производстве композиционных изделий;

- системы, 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.

### **1.6 Задачи развития теории и практики создания электротехнических систем для изготовления изделий из композиционных материалов**

Выполненный анализ литературных источников показал необходимость разработки электротехнических систем регулирования натяжения и скорости движения композиционных лент при намотке и выкладке изделий, удовлетворяющих современным требованиям к процессу производства.

Для разработки ЭТС натяжения необходимо решить следующие задачи.

1. Проанализировать наматываемые изделия с точки зрения их влияния на процесс работы ЭТС натяжения, выполнить классификацию наматываемых изделий по степени этого влияния.

В настоящее время таких исследований нет.

2. Рассмотреть и оценить влияние натяжения на качественные характеристики изделий из композиционных материалов, сформулировать и обосновать требования к ЭТС натяжных устройств по точности отработки заданных программ намотки.

В настоящее время данному вопросу не уделено достаточное внимание. В литературе удалось найти только исследования по влиянию натяжения на параметры наматываемого изделия [34-46, 91-94]. Под натяжением понимаются некоторые средние значения, без учета динамической составляющей. Однако, влияние последних может быть существенным. Для решения поставленной задачи следует привести классификацию

наматываемых изделий, разработать методику обоснования требований к ЭТС по точности обработки заданных законов намотки.

3. Разработать математическую модель нелинейного и нестационарного объекта регулирования с учетом упругих характеристик используемого композиционного материала и особенностей конструкций, наматываемых и выкладываемых изделий.

Математическому описанию упругой ленты посвящено большое количество работ, относящихся к технологическим процессам в черной металлургии, целлюлозно-бумажной, текстильной, химической и электротехнической промышленности. Однако, дифференциальные уравнения, полученные рядом авторов [47-51,56-60], не учитывают специфических особенностей намотки изделий из композиционных материалов, справедливы лишь при намотке тел вращения с постоянной длиной тракта намотки. В работе [60], для процесса печати на бумаге, с учетом небольших изменений тракта смотки бумаги с бобины и работы компенсатора, получены упрощенные уравнения. При намотке современных изделий параметры объекта регулирования изменяются за время, соизмеримое с временем переходного процесса, часто скачком. Пределы изменения параметров большие. Все это необходимо учитывать при анализе и синтезе современных электроприводов систем регулирования натяжения, используемых в технологическом процессе намотки изделий.

4. Получить аналитические выражения, позволяющие рассчитать мощность электропривода ЭТС натяжения исходя из заданных характеристик системы регулирования натяжения.

В настоящее время таких исследований нет.

5. Для различных вариантов используемых натяжных устройств получить аналитические выражения, описывающие натяжные устройства и предложить рекомендации по созданию ЭТС натяжных устройств.

При синтезе ЭТС натяжения “сухой” композиционной ленты большое значение имеет правильный выбор мощности привода исполнительного

механизма. В случае, если мощность привода выбрана неправильно, система может не обеспечить заданного быстродействия или оказаться дороже, чем необходимо, и потреблять большее количество энергии.

До настоящего времени электродвигатель натяжного устройства выбирался из условия обеспечения заданного максимального натяжения “сухой” композиционной [56,102,103] ленты без учета специфических особенностей наматываемого изделия. Однако, при намотке изделия сложной геометрической формы в электроприводе возникают динамические моменты, вызывающие дополнительный нагрев двигателя. Проверку выбранного привода на соответствие требуемому быстродействию автоматической системы регулирования натяжения можно было осуществить лишь на одной из последних стадий проектирования – при моделировании системы регулирования натяжения. В случае, если привод был выбран неправильно, необходимо было повторить весь расчет заново.

Натяжные устройства “мокрого” композиционного материала выбирались 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 и динамического моментов, возникающих на валу привода, связанного с натяжным устройством. Не определена зависимость угла охвата лентой от угла поворота исполнительного механизма или перемещения ролика этого механизма.

Вопросам выбора натяжного устройства посвящена малочисленная исследовательская база. Удалось найти только несколько работ на эту тему [48,102,103]. Однако во всех них отсутствует учет специфики намотки композиционных изделий, не приведены математические выражения, позволяющие рассчитать моменты, возникающие на валу привода натяжного устройства, получить передаточные функции натяжного устройства как объекта управления.

б. Разработать метод синтеза ЭТС устройств намотки и выкладки изделий различной формы сложности из композиционных материалов.

Существующие в настоящее время методы синтеза ЭТС натяжения не учитывают специфику наматываемых или выкладываемых изделий из композиционных материалов. Разнообразие форм изготавливаемых конструкций, различные требования, предъявляемые к условиям эксплуатации этих изделий, требует учета данных обстоятельств при синтезе. Кроме этого, на основании сформулированных требований к электроприводу и с учетом формы выпускаемой продукции следует выбрать математическое описание объекта управления, структуру системы регулирования натяжения, тип исполнительного механизма, в том числе электродвигателя, его мощность.

Проектирование систем электротехнических систем с объектами управления, которые описываются нелинейными или линеаризованными дифференциальными уравнениями, является одной из основных проблем теории автоматического управления [104].

При синтезе ЭТС натяжения возможны три варианта.

Первый вариант. Первым этапом проектирования систем управления является определение структурной схемы ЭТС. Здесь наиболее целесообразно использовать стандартные, традиционные структурные схемы. Следует отметить, что при синтезе ЭТС часть структурной схемы (неизменяемая часть) известна и не может быть изменена. Структурный синтез сводится, в основном, к определению структуры регуляторов, а затем к расчету их параметров. Если при этом не удастся обеспечить требуемые показатели качества, то прибегают к изменениям структурной схемы регуляторов [104 – 107].

Отметим, что с конца 50-х годов прошлого века в электроприводе появились системы подчиненного управления, предложенные Кесслером (ФРГ) [108–110]. Кесслер предложил строить сложную систему как совокупность отдельных, подчиненных один другому контуров. Каждый контур оптимизируется отдельно с использованием своего регулятора. Такие

ЭТС стали повсеместно применяться благодаря простоте расчетов, удобной настройке регуляторов, хорошему качеству регулирования [49-51,54,57-59,108-113].

В ЭТС натяжения внутренним контуром является контур тока, он подчиняется внешнему контуру (скорости, положения исполнительного механизма, натяжения). Здесь возможно построение и многоконтурных систем, например, тока, скорости, натяжения композиционного материала или тока, скорости, положения исполнительного механизма, натяжения.

Второй вариант. Заключается в том, что структурная схема ЭТС не задается, а определяется на основании некоторых математических вычислений [114-119]. К таким системам относятся и робастные системы [114,118,119]. Следует отметить, что здесь используется неизменяемая часть системы управления, включающая исполнительные механизмы и датчики необходимых физических величин. Регулятор определяется, как устройство, реализующее заданный алгоритм функционирования системы управления.

Третий вариант. Заключается в создании алгоритмов работы ЭТС. Здесь разрабатываются алгоритмы вычисления управляющего воздействия. Алгоритмы могут быть очень разнообразные, от простых до оптимальных систем и до систем с искусственным интеллектом (нейронные сети, системы с нечеткой логикой и др.). Как и в предыдущем случае, здесь используется неизменяемая часть системы управления, включающая исполнительные механизмы и датчики необходимых физических величин.

Следует отметить, что возможна и комбинация рассмотренных вариантов.

#### 1. Методика синтеза ЭТС при намотке цилиндрических изделий.

При намотке изделий “Конус” или “Цилиндр”, когда используются при намотке несколько материалов, при невысоких требованиях по условиям эксплуатации изделий, не удастся использовать стандартные настройки регуляторов. В данном случае технологический процесс характеризуется медленным изменением параметров объекта регулирования (радиуса

наматываемого изделия, длины участка намотки, приведенного момента инерции, скорости намотки). Здесь можно применить метод “замороженных” коэффициентов объекта регулирования и синтезировать “грубую” (робастную) ЭТС натяжения, показатели качества регулирования которой не будут зависеть от изменения параметров объекта регулирования.

В работах отечественных и зарубежных ученых предложено использовать “стандартные” формы (нормированные передаточные функции, нормированные уравнения). Известны уравнения, удовлетворяющие критерию наибольшей ровности частотной характеристики системы, заданному проценту перерегулирования, минимуму интегрального критерия качества и др. [105-107]. Разработана методика синтеза ЭТС с заданным порядком астатизма при действии случайного стационарного сигнала. В [106,107] приведен ряд нормированных уравнений и делается попытка оценить чувствительность системы, описанной этим уравнением, к изменению коэффициентов дифференциального уравнения. Допустимые границы вариации коэффициентов нелинейных уравнений определены в предположении, что изменяется только один коэффициент. Это предположение не всегда приемлемо на практике. Поэтому в [56,120-122] получены аналитические выражения, позволяющие определить изменения ошибки регулирования и запаса устойчивости при изменении параметров объекта регулирования. Однако, в перечисленных работах рассматривались линейные или линеаризованные системы регулирования без учета возможных насыщений регулятора и изменения параметров объекта регулирования в широких пределах. Данные обстоятельства не позволяют использовать стандартные методики синтеза ЭТС натяжения при намотке изделий из композиционных материалов.

2. Методика синтеза ЭТС с текущей идентификацией параметров объекта регулирования и адаптацией регулятора системы.

При намотке изделий “Конус”, “Кокон”, “Шар” с высокими требованиями к прочностным характеристикам наматываемых изделий,

очевидно, следует применять адаптивные ЭТС натяжения. Это объясняется изменением параметров объекта регулирования в процессе намотки в широких пределах. Характерной особенностью данного процесса является то, что известно математическое описание объекта регулирования, проведена линеаризация данного описания и получены коэффициенты линеаризации, которые изменяются в процессе намотки. Использование параметрической оптимизации обеспечивает максимальное быстроедействие в широком диапазоне изменения параметров объекта регулирования. В настоящее время нам не известны методики синтеза таких систем при намотке изделий из композиционных материалов.

3. ЭТС с прогнозом состояния при изготовлении изделий сложной формы.

При намотке изделий “Призма”, с высокими требованиями по прочностным характеристикам изделия параметры объекта регулирования изменяются очень быстро, соизмеримо с длительностью переходного процесса. В литературе нет рекомендаций по синтезу ЭТС управления для такого класса систем. Недостаточно изучены и вопросы управления системой с прогнозом состояния.

Современное состояние вычислительной техники и методов оптимизации позволяет создавать и практически реализовывать алгоритмы прямого поиска вектора оптимального управления системами регулирования натяжения. При этом важным вопросом является выбор критерия оптимизации цифровых систем управления. Одним из самых распространенных критериев оптимизации систем является квадратичная функция потерь [123-125]. Для линейных систем регулирования, описываемых преобразованиями Лапласа, на основании этой функции потерь разработаны методики оптимизации для непрерывных и дискретных систем.

Решение задачи определения оптимального управления для такого класса систем, с использованием второго метода Ляпунова, принципа максимума, динамического программирования, как показано в [123-125],

сводится к решению уравнений Риккати. Число уравнений Риккати определяется размерностью вектора состояния системы. Для нестационарных систем регулирования решение цифровым регулятором (ЦР) в реальном масштабе времени большого числа уравнений требует существенных затрат машинного времени.

Для практического использования требуется разработать “быстрые” алгоритмы цифрового управления ЭТС натяжения композиционного материала с прогнозом состояния при изготовлении изделий сложной формы.

4. Разработка технических решений и рекомендаций по созданию электротехнических систем при намотке композиционных изделий различной формы сложности.

### **1.7 Систематизация изделий, изготавливаемых методом намотки из композиционных материалов, в зависимости от их геометрической формы**

Для обоснованного выбора требований по точности отработки заданных законов намотки и выкладки электроприводом, необходимо выполнить систематизацию изготавливаемых изделий в зависимости от их геометрической формы [71].

Рассмотрим характерные особенности технологического процесса намотки изделий из композиционных материалов.

Во-первых, к наматываемым изделиям, в зависимости от их области их применения, предъявляются различные требования по прочностным характеристикам. Прочностные характеристики изделия зависят от используемых при намотке материалов и от точности поддержания системами управления заданных технологических параметров. Одним из основных технологических параметров, от которого зависит прочность наматываемого изделия, является натяжение наматываемого композиционного материала.

Таким образом, все наматываемые изделия можно объединить в два больших класса:

- к первому классу отнесем изделия с жесткими условиями эксплуатации;

- ко второму классу отнесем изделия, к условиям эксплуатации которых не предъявляются жесткие требования.

Во-вторых, процесс намотки изделий имеет следующие особенности:

- изменяется радиус намотки  $h_2(t)$ ;

- медленно увеличивается момент инерции изделия  $J_2(t)$ ;

- при намотке одного изделия может использоваться несколько типов лент, имеющих разные модули упругости  $E$  и площади поперечного сечения  $F$ ;

- намоточное оборудование работает циклично, это вызвано необходимостью замены израсходованного материала и повторяющимся движением раскладчика при намотке.

При этом могут наматываться конструкции различных форм и габаритов. Форма некоторых изделий, изготавливаемых методом намотки, изображена на рисунке 1.10 [71].

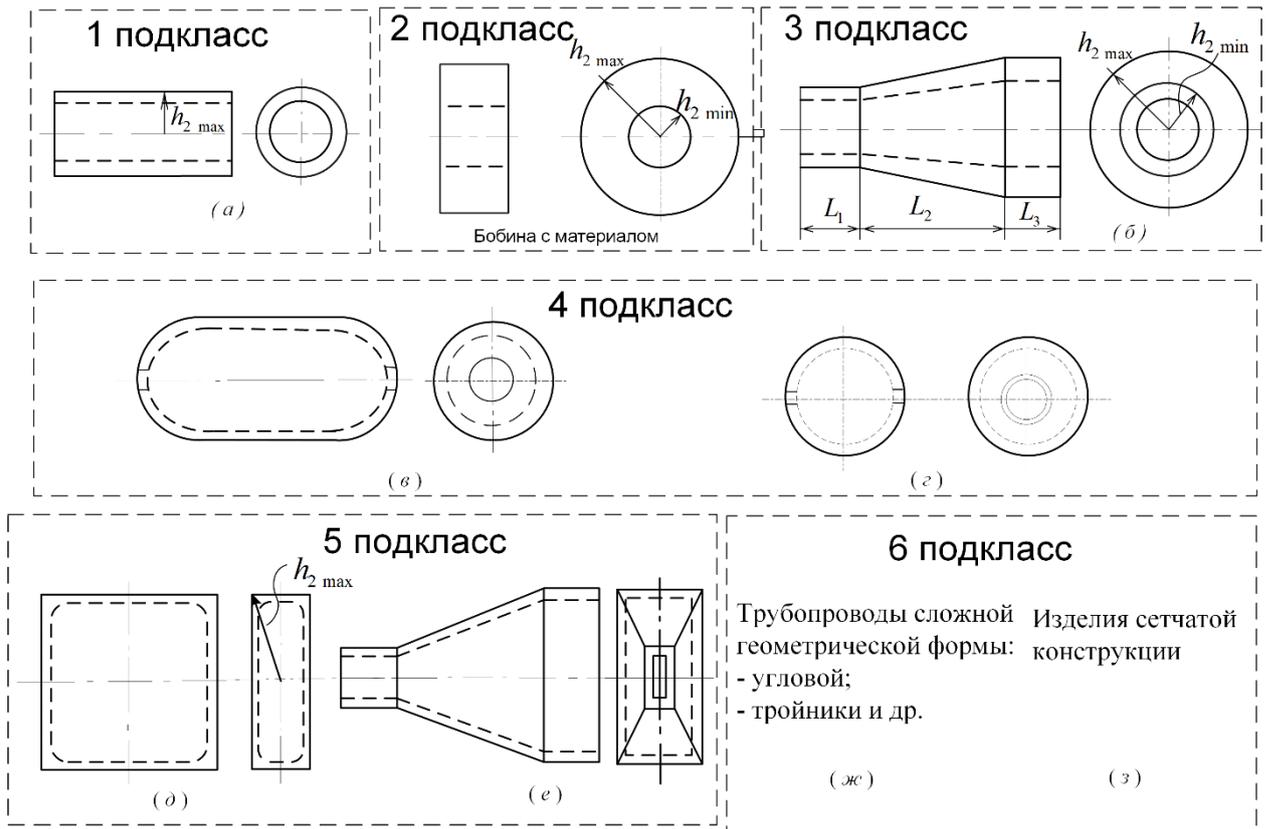


Рисунок 1.11 – Форма некоторых изделий, изготавливаемых методом намотки

$a$  – цилиндр;  $б$  – конус;  $в$  – кокон;  $г$  – шар;  $д$  – прямоугольник или многогранник (призма);  $е$ – прямоугольный конус (призма);  $ж$  – трубопроводы сложной геометрической формы;  $з$  – изделия сетчатой конструкции

Проведенный анализ конструкций изделий, изготавливаемых методом намотки, с точки зрения развиваемого приводом статического и динамического моментов показал, 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. Назовем эти изделия – изделия “Цилиндр” (рисунок 1.11  $a$ ). Динамические моменты привод при намотке развивает очень редко, только при пуске оборудования. Оборудование останавливается для смены бобин ленты или при каких-то непредвиденных

обстоятельствах. Такие ситуации возникают, как правило, один раз в час или в несколько часов.

Ко второму подклассу относятся изделия в виде бобин с материалом. Диаметр намотки таких изделий увеличивается медленно, до 6 раз. Динамические моменты, развиваемые приводом в результате изменения диаметра намотки, незначительны.

К третьему подклассу относятся цилиндрические изделия, при намотке которых диаметр изменяется значительно (рисунок 1.11 б) до трех раз и более за один проход. Назовем эти изделия – изделия “Конус”. Динамические моменты привода при намотке данных изделий, как правило, незначительны.

К четвертому подклассу систем относятся изделия “Кокон” и “Шар” (рисунок 1.11 в, г). При намотке таких изделий возникают достаточно большие динамические моменты, скорость изменения параметров намотки соизмерима с временем переходных процессов в электроприводе. Назовем эти изделия – изделия “Кокон”.

К пятому подклассу относятся изделия типа прямоугольник или многогранник (рисунок 1.11 д, е). В этом случае параметры изменяются быстро, в том числе скачком. Динамические моменты наиболее значительные. Назовем эти изделия – изделия “Призма”.

К шестому подклассу относятся трубопроводы сложной формы (уголки, тройники и др., рисунок 1.11, ж) и изделия сетчатой структуры (соединители, высоковольтные столбы и др., рисунок 1.11, з).

Значения отношений  $\frac{h_{2\max}}{h_{2\min}}, \frac{J_{2\max}}{J_{2\min}}, \frac{l_{1\max}}{l_{1\min}}$ ,  $h_{2\max} = \max h_2(t)$ ,  $J_{2\max} = \max J_2(t)$ ,

$l_{1\max} = \max l_1(t)$  при  $t \in (0, \infty)$  и производных  $\frac{dl_1}{dt}, \frac{dh_2}{dt}, \frac{dJ_2}{dt}$  для наиболее

характерных конструкций приведены таблице 1.2. Тип наматываемых изделий дан в соответствии с рисунком 1.11. Здесь  $h_2, l_1$  в м,  $J_2$  в кгм<sup>2</sup>,  $E$  в Н,  $F$  в м<sup>2</sup>.

Таблица 1.2 – Максимальные значения отношений основных параметров для наиболее характерных конструкций

Тип изготавливаемого изделия в соответствии с рисунком 1.11	Параметры				
	$\frac{h_{2\max}}{h_{2\min}}$	$\frac{l_{1\max}}{l_{1\min}}$	$\frac{J_{2\max}}{J_{2\min}}$	$\frac{dl_1}{dt}$ , м/с	$\frac{dh_2}{dt}$ , м/с
<i>a</i>	1,2	1,01	1,15	$10^{-5}$	$10^{-5}$
Бобины с наматываемым материалом	6	1,01	1,3	$10^{-5}$	$10^{-4}$
<i>б</i>	3	1,02	1,16	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$
<i>в, г</i>	20	3	1,15	1,0	1,0
<i>д, е</i>	10	2,5	1,15	1,0	1,0

Анализ приведенных данных позволяет сделать следующие выводы:

- при формировании композиционной ленты и намотке из нее цилиндрических изделий (типа *a*, *б*, бобины с наматываемым материалом – см. рисунок 1.11) параметры объекта регулирования изменяются медленно;

- при изготовлении изделий сложной формы (типа *в – е*) параметры объекта регулирования изменяются за время, соизмеримое с временем переходного процесса;

- по скорости изменения параметров ОР наматываемые конструкции могут быть объединены в пять подклассов: цилиндрические изделия (изделия типа *a*); бобины с наматываемым материалом, конические изделия (изделия типа *б*); изделия типа “Кокон” и “Шар” (изделия типа *в, г*) и изделия сложной формы (“Призма”) (изделия типа *д, е*).

Рассмотрим требования к пусковым режимам технологического оборудования. Эти режимы не частые, и здесь основные ограничения накладываются на допустимое перерегулирование, так как увеличение натяжения или скорости намотки выше заданных оптимальных значений существенно уменьшает прочность ленты из-за разрыва ее отдельных волокон, изменяет режим пропитки и термообработки композита, распределение

остаточных напряжений в изделии и соотношение «наполнитель – связующее». Все это в конечном счете существенно снижает качественные характеристики наматываемых конструкций.

Таким образом, анализируя особенности процесса производства композиционных изделий, можно отметить нестационарность объекта регулирования, большое разнообразие выпускаемой продукции. При этом такие параметры электропривода, как быстродействие, перерегулирование и точность обработки заданных программ намотки, приобретают первостепенное значение для повышения эффективности технологического процесса и улучшения качества выпускаемой продукции.

Приведем далее характерные особенности технологического процесса выкладки изделий из композиционных материалов.

В отличие от рассмотренного ранее, при выкладке изделий, форма выкладываемого изделия практически не влияет на работу системы регулирования натяжения. Не изменяется длина тракта деформируемого материала. Поэтому, процесс выкладки изделий можно сравнить с процессом намотки изделий цилиндрической формы с достаточно частыми пусками и остановками процесса вращения изделия. Процесс выкладки начинается с позиционирования выкладочной головки в заданную точку пространства, прижима препрега к выкладываемой поверхности и разогрева препрега до нужной температуры. Эти этапы процесса выкладки происходят без движения композиционной ленты (скорость ленты равна нулю). Далее начинается сам процесс выкладки с движения выкладной головки с нулевой скорости до заданной по технологическому регламенту, далее с заданной скоростью по некоторой траектории осуществляется сам процесс выкладки материала. В конце выкладная головка останавливается, происходит обрезка материала. В это время опять скорость движения препрега равна нулю. Далее процесс повторяется с позиционирования выкладной головки в новую заданную точку начала выкладки. Таким образом, в процессе работы оборудования, скорость движения ленты изменяется по трапеции. Причем при нулевой скорости

движения препрега натяжение материала должно сохраняться на заданном уровне.

### **1.8 Методика обоснования требований к электротехническим системам натяжения по точности отработки заданного закона намотки**

В настоящее время в литературе отсутствуют обоснованные требования к точности отработки электроприводом заданных законов регулирования натяжения при намотке изделий как “сухим”, так и “мокрым” способами. Это обусловлено тем, что процесс намотки, с одной стороны, характеризуется большим набором различных факторов (физические и химические характеристики наполнителя, связующего и замасливателя, направление и коэффициент армирования, способ и вид намотки, конструкция оправки и др.), с другой стороны, нет методик, по которым можно было бы обосновать требования к автоматизированным электроприводам по точности отработки оптимального закона намотки. В данном разделе предлагается такая методика.

Факторы, влияющие на качество изделий, можно разбить на две группы, первые допускают регулирование в процессе намотки (натяжение материала, температура отверждения, соотношение наполнитель – связующее, температура оправки и др.), вторые не поддаются прямому регулированию.

Основными факторами, от которых зависит качество изделий, являются:

- а) степень выпрямления волокон, пористость и неоднородность материала, качество начальной адгезии, дефекты микро- и макроструктуры и остаточные напряжения после намотки;
- б) качество полимеризации, остаточные напряжения, прочность и жесткость материала после термообработки.

Очевидно, что качество изделий во многом определяется этими факторами этапа намотки [34-46, 91-94], причем: программа намотки является основным фактором, чрезвычайно сильно влияющим на все показатели качества полуфабриката и готового изделия; поле остаточных напряжений,

возникающих в процессе и после намотки, можно считать обобщенным критерием качества, предопределяющим многие из перечисленных выше вторичных факторов. В литературе известны исследования прочности намотанных изделий при изменении натяжения [34-46, 91-94]. Однако в работах не приводятся данные по точности отработки системой регулирования натяжения заданных законов намотки, нет и сведений о быстродействии используемых систем регулирования. Параметры объекта регулирования, как можно понять, не изменяются во времени, то есть идеализированы.

В соответствии со сказанным возникает задача разработки методики определения требований к автоматизированным электроприводам по точности отработки программ намотки по критериям допустимого отклонения от заданных значений, характеризующих качество изделий, и ограничений, связанных с технологическими требованиями.

Рассмотрим программу силовой намотки изделий из композиционных материалов с целью формирования в полуфабрикате и готовом изделии предварительно напряженного состояния, при котором достигается экстремум целевой функции вида [36,42-45]:

$$C = \int_V f(\vec{\sigma}^H + \vec{\sigma}^Э, \vec{\sigma}_{IIЧ}^H) dV \quad (1.1)$$

при выполнении ограничений

$$\left. \begin{aligned} S_H &\leq S_1 \leq S_B; \\ \vec{\sigma}_H^H &\leq \vec{\sigma}^H \leq \vec{\sigma}_B^H; \\ f(\vec{\sigma}^H, \vec{\sigma}_{IIЧ}^H) &\leq 1; \\ f(\vec{\sigma}^H + \vec{\sigma}^Э, \vec{\sigma}_{IIЧ}^H) &\leq 1, \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

где  $\vec{\sigma}^H, \vec{\sigma}^H$  - напряжения в готовом изделии и полуфабрикате;  $\vec{\sigma}^Э$  - вектор эксплуатационных напряжений;  $\vec{\sigma}_{IIЧ}^H$  - вектор прочностных характеристик композита;  $S_1$  - натяжение материала при намотке;  $f(\vec{\sigma}^H, \vec{\sigma}_{IIЧ}^H) \leq 1$  - условие прочности наматываемого изделия.

Индексами “Н” и “В” отмечены “нижние” и “верхние” допустимые значения соответствующих параметров. В частном случае может быть поставлена минимаксная задача:

$$C = \min | \max f(\vec{\sigma}^И + \vec{\sigma}^Э, \vec{\sigma}_{ПЧ}^И) |. \quad (1.3)$$

Закон изменения натяжения материала при намотке описываем выражением:

$$S(\xi, \eta) = S_{CP} + \bar{S} \sum_{j=1}^n x_j \Psi_j(\xi, \eta), \quad (1.4)$$

где  $\xi_k, \eta_k$  - координаты точек изделия, имеющего форму вращения;

$$\left. \begin{aligned} S_{CP} &= \frac{1}{2}(S^B + S^H); \\ \bar{S} &= \frac{1}{2}(S^B - S^H); \\ x_j &= \frac{S_j - S_{CP}}{\bar{S}}; \end{aligned} \right\}$$

$x_j$  – независимые безразмерные параметры ( $-1 \leq x_j \leq 1$ );  $\Psi_j(\xi, \eta)$  – интерполяционные функции,  $j = 1, \dots, n$ .

Решение задачи о нахождении остаточных напряжений при заданной программе намотки [36,42-45], условно записываем в виде:

$$\vec{\sigma}^{П,И} = F(S_1). \quad (1.5)$$

Выражения (1.1), (1.3), (1.5) в общем случае не могут быть представлены в виде элементарных функций. Поэтому с учетом соотношения (1.4) целевую функцию считаем зависящей от факторов и аппроксимируем рядом:

$$C_M = C_0 + \sum_{k=1}^n x_k C_k + \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n x_k x_s C_{ks} + \dots, \quad (1.6)$$

где  $n$  – общее число варьируемых факторов.

Аналогично составляем модели функций напряжений:

$$\vec{\sigma}_M^И(x_1, \dots, x_n; \vec{r}_v) = \vec{a}_{0v} + \sum_{k=1}^n \vec{a}_{kv} x_k + \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n \vec{a}_{ks} x_k x_s + \dots \quad (1.7)$$

в ряде точек изделия ( $v = 1, 2, \dots$ ). Подставляя (1.7) в ограничения (1.2), получаем в  $n$  – мерном пространстве варьируемых факторов семейство

поверхностей, выделяющих область допустимых значений факторов  $x_1, \dots, x_n$ .  
Задача сводится к определению допустимых  $x_1, \dots, x_n$ , доставляющих экстремум целевой функции (1.6).

При решении минимаксной задачи находим управления

$$\vec{x}_1 = \text{colon}[x_1^{(1)} \dots x_n^{(1)}], \vec{x}_2 = \text{colon}[x_1^{(2)} \dots x_n^{(2)}], \dots,$$

доставляющие минимум функциям  $f_M(\vec{x}, \vec{r}_1), f_M(\vec{x}, \vec{r}_2), \dots$ .

Наилучшим считаем управление  $\vec{x}^{\text{ОПТ}}$ , для которого  $\max f_M(\vec{x}^{\text{ОПТ}}, \vec{r}_v), v=1, 2, \dots$  будет наименьшим.

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 система регулирования натяжения подвержена случайным воздействиям, и поэтому происходят отклонения  $\delta x_j$  параметров натяжения материала от их рассчитанных значений  $x_j^{\text{ОПТ}}$ . Эти отклонения можно считать случайными ошибками единого процесса управления натяжением. Определим допустимые отклонения  $\delta x_j$ , характеризуемые дисперсией  $D_{\delta x}$ , при которых выполняются следующие условия:

а) дисперсия

$$D_{\delta C} = \sum_{j=1}^n D_{\delta x_j} \left( \frac{\partial C}{\partial x_j} \right)_{\vec{x}=\vec{x}^{\text{ОПТ}}}^2 \quad (1.8)$$

отклонения целевой функции

$$\delta C = \sum_{j=1}^n \delta x_j \left( \frac{\partial C}{\partial x_j} \right)_{\vec{x}=\vec{x}^{\text{ОПТ}}} \quad (1.9)$$

от значения  $C(x^{\text{ОПТ}})$  не превосходит допустимого значения  $(\Delta C)^2$ ;

б) отклонения

$$\delta f_K = \sum_{j=1}^n \delta x_j \left( \frac{\partial f_K}{\partial x_j} \right)_{\vec{x}=\vec{x}^{\text{ОПТ}}} \quad (1.10)$$

удовлетворяют условиям

$$|f_K(\bar{x}^{OPT}; \xi_K, \eta_K)| + D_{\delta f_K}^{0.5} \leq 1 + \delta f, \quad (1.11)$$

где  $\delta f$  - допустимое превышение ограничений (1.12) дисперсии

$$D_{\delta f_K} = \sum_{j=1}^n D_{\delta f_j} \left( \frac{\partial f_K}{\partial f_j} \right)_{\bar{x}=\bar{x}^{OPT}}^2. \quad (1.12)$$

Поскольку допустимые отклонения  $\delta x_j$  (погрешность регулирования натяжения) во всех точках характеризуется одной величиной  $D_{\delta x}$ , то, полагая в выражениях (1.8), (1.11), (1.12)  $D_{\delta x_j} = D_{\delta x}$ , получим:

$$(\Delta C)^2 \geq D_{\delta x} \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial C}{\partial x_j} \right)_{\bar{x}=\bar{x}^{OPT}}^2;$$

$$|f_K(\bar{x}^{OPT}; \xi_K, \eta_K)| + D_{\delta x} \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial f_K}{\partial x_j} \right)_{\bar{x}=\bar{x}^{OPT}}^2 \leq 1 + \delta f.$$

Отсюда следует:

$$st[\delta x] \leq \Delta C \left[ \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial C}{\partial x_j} \right)_{\bar{x}=\bar{x}^{OPT}}^2 \right]^{-0.5}; \quad (1.13)$$

$$st[\delta x] \leq \left\{ [1 + \delta f - |f_K(\bar{x}^{OPT}; \xi_K, \eta_K)|] \left[ \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial f_K}{\partial x_j} \right)_{\bar{x}=\bar{x}^{OPT}}^2 \right]^{-1} \right\}^{0.5}. \quad (1.14)$$

Здесь  $st[\delta x]$  – среднеквадратическое значение (стандарт) ошибки регулирования.

По формулам (1.13), (1.14) определяют требования к системе регулирования натяжения по точности отработки заданной программы намотки изделия.

Рассмотрим определение требований к электроприводу на примере намотки цилиндрического кольца.

Задачу решаем в два этапа.

На первом этапе рассчитаем программу намотки, обеспечивающую экстремум интегрального критерия качества.

На втором этапе по предложенной в разделе методике определяем требования по точности отработки системой регулирования натяжения, рассчитанной на первом этапе программы намотки.

*Первый этап.* Рассчитаем закон изменения натяжения, обеспечивающий в наматываемом изделии (рисунок 1.10) минимум потенциальной энергии деформации:

$$C = \frac{1}{2E_r} \int_{R_1}^{R_2} (\sigma_r^2 + \beta^{-2}\sigma_\theta^2 - 2\mu_{\theta r}\sigma_r\sigma_\theta) \rho d\rho \quad (1.15)$$

при выполнении ограничений

$$25 \text{ МПа} \leq \sigma^H \leq 100 \text{ МПа}; \quad (1.16)$$

$$-10 \text{ МПа} \leq \sigma_r \leq -1 \text{ МПа}; \quad 10 \text{ МПа} \leq \sigma_\theta \leq 100 \text{ МПа}. \quad (1.17)$$

Здесь  $E_\theta$ ,  $E_r$  – модуль упругости композита в окружном и радиальном направлениях;  $R_1$ ,  $R_2$  – минимальный и максимальный радиус изделия;  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  – остаточные напряжения;  $\mu_{\theta r}$  – коэффициент Пуассона;  $\rho$  – текущий радиус изделия;  $\sigma^H$  – напряжения в ленте при намотке;  $S = \sigma^H F$ ;  $F$  – площадь поперечного сечения композиционной ленты.

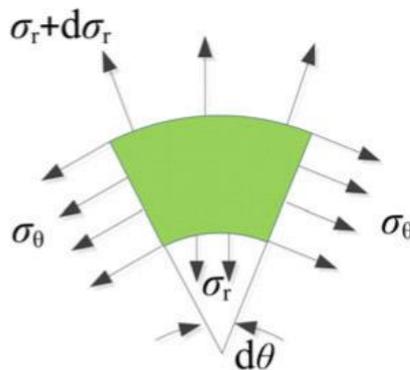


Рисунок 1.12 – Элемент наматываемого изделия

Материал изделия считаем однородным и линейно деформируемым. Расчет проводим при следующих исходных данных:  $E_\theta = 2,9 \cdot 10^4$  МПа,  $E_r = 1,45 \cdot 10^3$  МПа;  $\mu_{r\theta} = \mu_{\theta r} \frac{E_\theta}{E_r} = 0,3$ ; модуль упругости и коэффициент Пуассона оправки  $E_0 = 2 \cdot 10^5$  МПа и  $\mu_0 = 0,3$ ;  $R_1 = 7,5 \cdot 10^{-2}$  м,  $R_2 = 9,75 \cdot 10^{-2}$  м;  $F = 4 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>; толщина стенки оправки  $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$  м. Допустимые изменения  $\delta\sigma_r$ ,  $\delta\sigma_\theta$ ,  $\Delta C$  принимаем равными 10% от оптимальных значений.

Для расчета оптимального значения критерия  $C$  воспользуемся методикой, описанной в [36,42-45]. Разобьем изделие на три элементарных кольца ( $r_1 = 7,5 \cdot 10^{-2}$  м,  $r_2 = 8,17 \cdot 10^{-2}$  м,  $r_3 = 8,38 \cdot 10^{-2}$  м), в пределах каждого из которых натяжение материала считаем постоянным. Функционал цели (1.15) и напряжения  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\Theta$  аппроксимируем рядами

$$C_M = C_0 + \sum_{j=1}^3 C_j x_j + \sum_{j=1}^3 \sum_{l=1}^3 C_{jl} x_j x_l + C_{123} x_1 x_2 x_3; \quad (1.18)$$

$$\sigma_{rm}(r_v, \vec{x}) = b_{0v} + \sum_{j=1}^3 b_{jv} x_j, \quad \sigma_{\Theta m}(r_v, \vec{x}) = \beta_{0v} + \sum_{j=1}^3 \beta_{jv} x_j. \quad (1.19)$$

С целью определения коэффициентов выражений (1.18), (1.19) произведена серия расчетов, соответствующая информационной матрице ортогонального плана второго порядка. Для нахождения коэффициентов  $b_{jv}$ ,  $\beta_{jv}$  зависимостей (1.19) используем факторный эксперимент на двух уровнях.

Модели (1.18), (1.19) искомых функций имеют вид:

$$2E_r C_M = 61,99 + 9,562x_1 + 26,09x_2 + 46,00x_3 + 0,7316x_1x_2 - 1,356x_1x_3 - 1,429x_2x_3 + 4,075x_1^2 + 9,493x_2^2 + 15,54x_3^2 + 1,069x_1x_2x_3; \quad (1.20)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rm}(r_1) &= -9,437 - 2,993x_1 - 1,996x_2 - 1,334x_3; \\ \sigma_{rm}(r_2) &= -7,495 - 2,978x_2 - 2,018x_3; \\ \sigma_{rm}(r_3) &= -4,200 - 2,800x_3; \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\Theta m}(r_1) &= 5,459 + 22,71x_1 - 11,35x_2 - 7,700x_3; \\ \sigma_{\Theta m}(r_2) &= 22,79 + 25,22x_2 - 10,00x_3; \\ \sigma_{\Theta m}(r_3) &= 40,23 + 26,85x_3. \end{aligned} \right\} \quad (1.22)$$

Информационная матрица и результаты вычислений сведены в таблицу 1.3.

Как видно из данных, приведенных в таблице, точность моделей достаточно высока, расхождение между “точными” и “приближенными” значениями функции цели не превышает 2 %.

Оптимальными являются:

$$\begin{aligned} x_1^{\text{ОПТ}} &= -0,590; \\ x_2^{\text{ОПТ}} &= -0,903; \\ x_3^{\text{ОПТ}} &= -1,000, \end{aligned}$$

что соответствует

$$\begin{aligned} S_1(r_1) &= 161,5\text{Н}; \\ S_1(r_2) &= 114,6\text{Н}; \\ S_1(r_3) &= 100,0\text{Н}. \end{aligned}$$

Подставив полученные значения  $x_j^{\text{опт}}$  в (1.20) – (1.22), имеем:

$$\begin{aligned} \tilde{C}_M &= 9,218; \\ \sigma_{r1} &= -4,535 \text{ МПа}; \\ \sigma_{r2} &= -2,788 \text{ МПа}; \\ \sigma_{r3} &= -1,400 \text{ МПа}; \\ \sigma_{\Theta 1} &= 10,01 \text{ МПа}; \\ \sigma_{\Theta 2} &= 10,02 \text{ МПа}; \\ \sigma_{\Theta 3} &= 13,38 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Здесь обозначено  $\tilde{C}_M = 2E_r C_M$ .

Допустимые значения  $\tilde{C}$  и  $\sigma_r, \sigma_{\Theta}$  составляют:

$$\begin{aligned} \Delta C &= 0,9218; \\ \delta\sigma_{\Theta} &= 1,00 \text{ МПа}; \\ \delta\sigma_r &= 0,1 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Подставив полученные значения в (1.13), находим:

$$st[\delta x] \leq \frac{0,9218}{\sqrt{462,0}} = 0,0429,$$

где  $\sum_{j=1}^3 \left(\frac{\partial C}{\partial x_j}\right)_{\bar{x}=\bar{x}^{\text{опт}}}^2 = 462,0$ .

Преобразуем неравенство (1.14) к виду:

$$st[\delta x] \leq \left\{ \left| \sigma_{lp} + \delta\sigma_{lk} - \sigma_{lk} \right|_{\bar{x}=\bar{x}^{\text{опт}}} \left( \sum_{j=1}^3 \left( \frac{\partial \sigma_{lk}}{\partial x_j} \right)_{\bar{x}=\bar{x}^{\text{опт}}}^2 \right)^{-1} \right\}^{0,5}, \quad (1.23)$$

где  $l = r, \Theta; p = H; k = 1, 2, 3$ .

Подставив в (1.23) значение  $\sigma$ , получим:

$$\left. \begin{aligned} st[\delta x] &\leq 0,0367 \text{ для } \sigma_{\Theta 2}; \\ st[\delta x] &\leq 0,0369 \text{ для } \sigma_{\Theta 1}. \end{aligned} \right\} \quad (1.24)$$

Таблица 1.3 – Информационная матрица, результаты численных экспериментов и проверка адекватности полученных данных

№№ точек плана	Значение переменных			Напряжения, полученные по формулам [36,42-45], МПа						Напряжения, полученные по формуле (1.21) МПа			Значение целевой функции $2E_r C$ , МПа <sup>2</sup> м <sup>2</sup>	
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\sigma_{r1}$	$\sigma_{r2}$	$\sigma_{r3}$	$\sigma_{\theta1}$	$\sigma_{\theta2}$	$\sigma_{\theta3}$	$\sigma_{r1}$	$\sigma_{r2}$	$\sigma_{r3}$	по (1.15)	по (1.20)
0	0	0	0	-9,44	-7,50	-4,20	5,46	22,8	40,2	-9,44	-7,50	-4,20	61,9	62,0
1	1	1	1	-15,7	-12,5	-7,00	9,10	38,0	67,1	-15,7	-12,5	-7,00	172,0	171,8
2	1	1	-1	-13,1	-8,46	-1,40	24,5	58,0	13,4	-13,1	-8,46	-1,40	82,6	83,2
3	1	-1	1	-11,8	-6,54	-7,00	31,8	-12,4	67,1	-11,8	-6,54	-7,00	119,6	118,8
4	1	-1	-1	-9,13	-2,50	-1,40	47,2	76,0	13,4	-9,13	-2,50	-1,40	28,8	28,8
5	-1	1	1	-9,74	-12,5	-7,00	-36,3	38,0	67,1	-9,74	-12,5	-7,00	152,6	151,8
6	-1	1	-1	-7,08	-8,46	-1,40	-20,9	58,0	13,4	-7,08	-8,46	-1,40	62,1	61,0
7	-1	-1	1	-5,81	-6,54	-7,00	-13,6	-12,4	67,1	-5,81	-6,54	-7,00	107,4	106,0
8	-1	-1	-1	-3,15	-2,50	-1,40	1,82	7,60	13,4	-3,14	-2,50	-1,40	6,90	6,32
9	1,21	0	0	-13,1	-7,50	-4,20	32,9	22,8	40,2	-13,0	-7,50	-4,20	80,0	79,5
10	-1,21	0	0	-5,82	-7,50	-4,20	-22,0	22,8	40,2	-5,82	-7,50	-4,20	54,9	56,4
11	0	1,21	0	-11,8	-11,1	-4,20	-8,29	53,3	40,2	-11,8	-11,1	-4,20	107,9	107,5
12	0	-1,21	0	-7,06	-3,89	-4,20	19,2	-7,72	40,2	-7,06	-3,89	-4,20	43,0	44,3
13	0	0	1,21	-11,1	-9,94	-7,59	-3,86	-10,7	72,6	-11,1	-9,94	-7,59	139,1	140,4
14	0	0	-1,21	-7,84	-5,05	-0,81	-14,8	34,9	7,77	-7,82	-5,05	-0,81	29,7	29,1

Из значений (1.24) выбираем минимальное:

$$st[\delta x] \leq 0,0367.$$

По аналогии рассчитаем  $st[\delta x]$  для других допустимых вариаций целевой функции и ограничений. Результаты расчетов сведены в таблицу 1.4.

Таблица 1.4 – Допустимые вариации целевой функции и ограничений

Параметры	Допустимые вариации целевой функции и ограничений в %								
	10	9	8	7	6	5	4	3	2
$st[\delta x]$ ДЛЯ $C$	4,289	3,86	3,002	2,573	2,144	1,715	1,287	0,858	0,429
$st[\delta x]$ ДЛЯ $\sigma_{\theta r2}$	3,670	3,205	2,739	2,274	1,809	1,344	0,8784	0,4131	0,052
$st[\delta x]$ ДЛЯ $\sigma_{\theta r1}$	3,69	3,225	2,759	2,294	1,829	1,364	0,8984	0,433	0,032
$st[\delta x]$ ДЛЯ $S_i$ В %	3,67	3,205	2,74	2,27	1,809	1,344	0,8784	0,4131	0,032

На рисунке 1.13 приведен график зависимости точности электротехнической системы натяжения от допустимых отклонений целевой функции и ограничений.

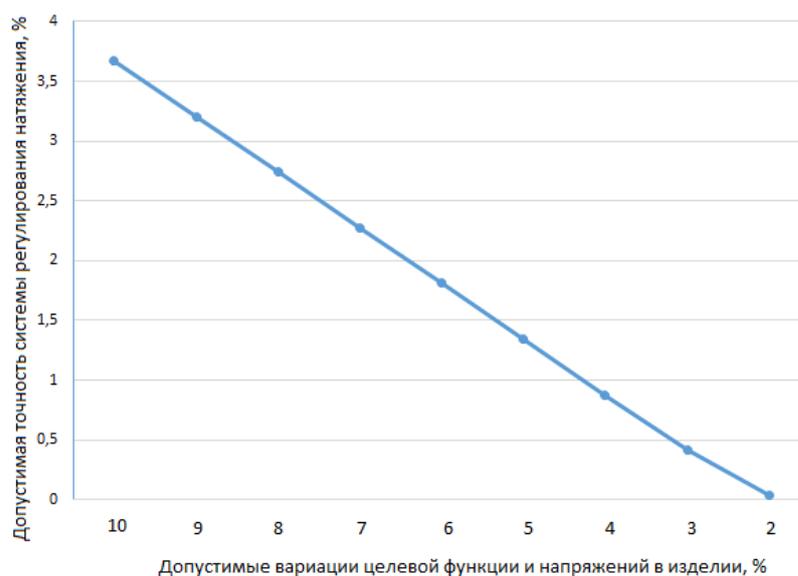


Рисунок 1.13 – Зависимость точности ЭТС натяжения в функции отклонений целевой функции и ограничений

Таким образом, допустимым 10 % вариаций целевой функции и ограничений соответствует допустимое среднеквадратичное отклонение натяжения от расчетной программы намотки на 3,67 %.

Отметим, что полученные результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в [49-51], и являющимися опытом разработки и эксплуатации ЭТС натяжения для химической промышленности во ВНИИ «Электропривод». Так точность стабилизации натяжения в зависимости от типа линии лежит в пределах 1-3% [49-51].

Анализируя полученную информацию, можно сделать вывод о том, что требования, предъявляемые к точности поддержания заданных значений натяжения в процессе намотки изделий, зависят от допустимых вариаций заданной целевой функции и напряжений в изделии. При намотке изделий:

- к которым не предъявляются особые требования по условиям эксплуатации, точность стабилизации натяжения может составлять 3-4 %;
- к которым предъявляются жесткие требования по условиям эксплуатации, точность стабилизации натяжения должна составлять 0,5-1 %.

К системам ЭТС натяжения, используемым при выкладке материалов, не предъявляются жесткие требования по стабилизации натяжения. Здесь следует обеспечивать натяжение препрега при нулевой скорости, и можно рекомендовать поддерживать натяжение с точностью 3-4 %.

### **Выводы по главе**

Таким образом, анализируя ЭТС натяжения и скорости движения ленточного материала, разработанные у нас в стране и за рубежом, можно сделать следующие выводы:

- электротехнические системы регулирования, 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;

- ЭТС, используемые в других отраслях промышленности, непосредственно применить для производства композиционных конструкций невозможно, потому, что они не учитывают специфических особенностей процесса намотки и выкладки изделий из композиционных материалов;

- систематизация изготавливаемых методом намотки изделий на классы и подклассы в зависимости от требований, предъявляемых к ним по условиям эксплуатации, и в зависимости от диапазона и скорости изменения параметров изделия при намотке позволяет обоснованно выбирать структуру и состав ЭТС натяжения и скорости движения композиционных лент, а также оптимальные алгоритмы управления такими системами;

- предложена методика определения требований к ЭТС натяжения по точности отработки программ намотки по критериям допустимого отклонения от заданного значения:

- у изделий, к которым не предъявляются особые требования по условиям эксплуатации, точность стабилизации натяжения может составлять 3-4 %;

- у изделий, к которым предъявляются жесткие требования по условиям эксплуатации, точность стабилизации натяжения должна составлять 0,5-1 %.

## **2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРУГОЙ “СУХОЙ” И “МОКРОЙ” ЛЕНТЫ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАТЯЖЕНИЯ**

### **2.1 Разработка и исследование математической модели “сухой” ленты**

#### ***2.1.1 Разработка математической модели упругой “сухой” ленты***

Перед разработкой математического описания упругой “сухой” ленты проанализируем математическую модель деформированного твердого тела. Здесь необходимо учитывать ряд гипотез теории упругости [126,127], таких как:

- гипотеза о сплошности строения тел (исследуемое тело является однородным и непрерывным как до начала деформации, так и после нее);

- гипотеза о естественном ненапряженном состоянии тела (до приложения нагрузки напряжения в теле считаются равными нулю);

- гипотеза об идеальной упругости (тело считается идеально упругим, процесс деформации является обратимым);

- гипотеза о шаровой изотропии (физико-механические свойства материала одинаковы во всех направлениях относительно взятой точки отсчета);

- гипотеза о совершенной однородности (во всех точках тела механические свойства материала одинаковые);

- принцип “автономной” прочности (напряженное состояние в данной точке тела зависит от состояния деформации только в этой точке);

- гипотеза о малости перемещения (перемещение точек тела при его деформации малы по сравнению с размерами тела).

В теории упругости показано, что для расчета упругого состояния ленты можно воспользоваться обобщенным законом Гука [58,126,127]. Используя его, получим дифференциальное уравнение, описывающее упругую 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 типа “Призма”. Учтем следующие допущения.

1. Из-за незначительного веса композиционной ленты (не более 5 Н на 1 метр длины), малой линейной скорости намотки (до 0,3 м/с), пренебрегаем инерционностью материала и считаем, что натяжение постоянно по длине  $l_1(t)$ , а вес материала не влияет на натяжение.

2. Так как технологическое натяжение при намотке ленты во много раз меньше разрывных усилий, малые деформации материала описываем законом Гука и полагаем, что площадь поперечного сечения в зоне деформации постоянна и не зависит от натяжения.

В произвольный момент времени  $t$  длина предварительно напряженной упругой ленты  $l(t)$  равна [58,126,127]:

$$l(t) = \frac{l_1(t)}{1 + \varepsilon_1(t)}, \quad (2.1)$$

где  $l_1(t)$  – длина тракта намотки ленты на изделие в момент времени  $t$  (рисунок 2.1);  $\varepsilon_1(t)$  – относительное упругое удлинение ленты в момент времени  $t$ .

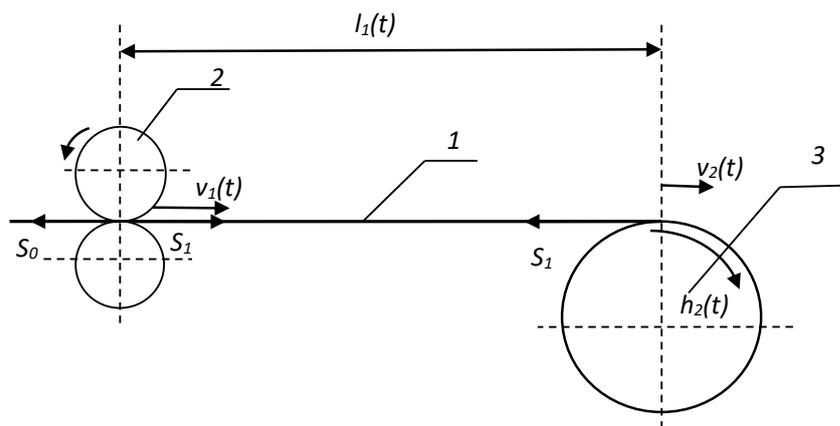


Рисунок 2.1 – Тракт намотки ленты

1 – наматываемая лента; 2 – натяжные ролики; 3 – изделие

Здесь под предварительно напряженной длиной ленты, понимаем длину ленты с относительным удлинением  $\varepsilon_0$ , создаваемым натяжением  $S_0$  на предыдущем участке катушки.

Из (2.1) получаем уравнение для определения относительного упругого удлинения:

$$\varepsilon_1(t) = \frac{l_1(t) - l(t)}{l(t)} = \frac{k(t)}{l(t)} = \frac{k(t)}{l_1(t) - k(t)}, \quad (2.2)$$

где  $k(t) = l_1(t) - l(t)$  – абсолютное упругое удлинение ленты, в м.

Предположим, что натяжение на рассматриваемом участке за время  $\Delta t$  изменится. Новое значение напряженной длины ленты равно

$$l_1(t + \Delta t) = l_1(t) + \Delta l(t) = l(t) + k(t) + \Delta l(t), \quad (2.3)$$

где  $\Delta l(t) = l_1(t + \Delta t) - l_1(t)$ , в м.

Новое значение предварительно напряженной длины ленты [58]:

$$l(t + \Delta t) = l(t) - (v_2^* - v_1) \cdot \Delta t, \quad (2.4)$$

где  $v_2^* = \frac{v_2}{1 + \varepsilon_1(t)}$ ;  $v_1, v_2$  – соответственно линейные скорости входа ленты в зону деформации и выхода из нее, в м/с.

Величину относительного упругого удлинения при малом  $\Delta t$  получим аналогично (2.2) с учетом уравнений (2.3), (2.4):

$$\varepsilon_1(t + \Delta t) = \frac{k(t + \Delta t)}{l(t + \Delta t)} = \frac{k(t) + \Delta l(t) + (v_2^* - v_1) \cdot \Delta t}{l_1(t) - (v_2^* - v_1) \cdot \Delta t - k(t)}. \quad (2.5)$$

Величина малого приращения относительно упругого удлинения на основании уравнений (2.2), (2.5) запишется в виде:

$$\Delta \varepsilon_1 = \varepsilon_1(t + \Delta t) - \varepsilon_1(t) = \frac{k(t) + \Delta l(t) + (v_2^* - v_1) \cdot \Delta t}{l_1(t) - (v_2^* - v_1) \cdot \Delta t - k(t)} - \varepsilon_1(t) = \frac{\Delta l(t) + (v_2^* - v_1) \cdot (1 + \varepsilon_1) \cdot \Delta t}{l_1(t) - (v_2^* + v_1) \cdot \Delta t - k(t)}.$$

Разделив обе части полученного уравнения на  $\Delta t$  и перейдя к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ , получим:

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = (1 + \varepsilon_1(t)) \cdot \frac{v_2 - v_1 \cdot (1 + \varepsilon_1(t)) + \frac{dl_1(t)}{dt}}{l_1(t)}. \quad (2.6)$$

Уравнение (2.6) описывает динамические свойства упругой ленты с учетом изменения длины участка намотки  $l_1(t)$ .

При намотке тел вращения, удовлетворяющих условию  $l_1(t) = \text{const}$ , уравнение (2.6) преобразуется в известное дифференциальное уравнение [58]:

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = (1 + \varepsilon_1(t)) \cdot \frac{v_2 - v_1 \cdot (1 + \varepsilon_1(t))}{l_1}. \quad (2.7)$$

Подставим в уравнения (2.6) выражение  $\varepsilon_1(t) = \frac{S_1(t) - S_0(t)}{EF}$ , связывающее относительное удлинение с упругими характеристиками ленты и натяжением, получим для случая  $l_1 = l_1(t)$  математическую модель упругой “сухой” ленты [128,129]:

$$\begin{aligned} \frac{dS_1}{dt} = & \frac{1}{l_1(t)} \cdot \frac{dl_1(t)}{dt} \cdot S_1 - \frac{(EF - S_0)^2}{l_1(t) \cdot EF} \cdot v_1 + \frac{EF - S_0}{l_1(t)} \cdot v_2 - \\ & - \frac{2 \cdot (EF - S_0)}{l_1(t) \cdot EF} \cdot v_1 \cdot S_1 + \frac{1}{l_1(t)} \cdot v_2 \cdot S_1 - \frac{1}{l_1(t) \cdot EF} \cdot v_1 \cdot S_1^2 + \\ & + \frac{EF - S_0}{l_1(t)} \cdot \frac{dl_1(t)}{dt} + \frac{dS_0}{dt}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

где  $S_1$  – натяжение ленты на участке намотки;  $S_0$  – натяжение ленты на предыдущем участке (см. рисунок 2.1);  $E$ ,  $F$  – соответственно модуль упругости и площадь поперечного сечения ленты.

Выражение (2.8) можно преобразовать к виду:

$$\frac{dS_1}{dt} = \frac{1}{l_1(t)} \cdot [(S_1 - S_0 + EF) \cdot (v_2 + \frac{dl_1(t)}{dt} - \frac{S_1 - S_0 + EF}{EF} \cdot v_1)] + \frac{dS_0}{dt}. \quad (2.9)$$

Если  $\frac{dl_1(t)}{dt} = 0$ , то выражение (2.9) упрощается:

$$\frac{dS_1}{dt} = \frac{1}{l_1} \cdot [(S_1 - S_0 + EF) \cdot (v_2 - \frac{S_1 - S_0 + EF}{EF} \cdot v_1)] + \frac{dS_0}{dt}. \quad (2.10)$$

Отметим, что функция  $l_1(t)$  может иметь разрывы первого рода. Так как функции  $\varepsilon_1(t)$  и  $S_1(t)$  непрерывны, решение дифференциального уравнения (2.6) осуществляется методом припасовывания.

Уравнение (2.6) может быть получено и другими путями, например, исходя из закона сохранения количества упругой ленты, входящего в зону деформации и выходящего из нее.

Структурная схема математической модели упругой “сухой” ленты при прохождении ее по направляющим тракта станка приведена на рисунке 2.2 при  $l_1 = l_1(t)$  и на рисунке 2.3 при  $l_1 = \text{const}$ . Структурная схема, приведенная на рисунке 2.3 соответствует процессу выкладки изделий.

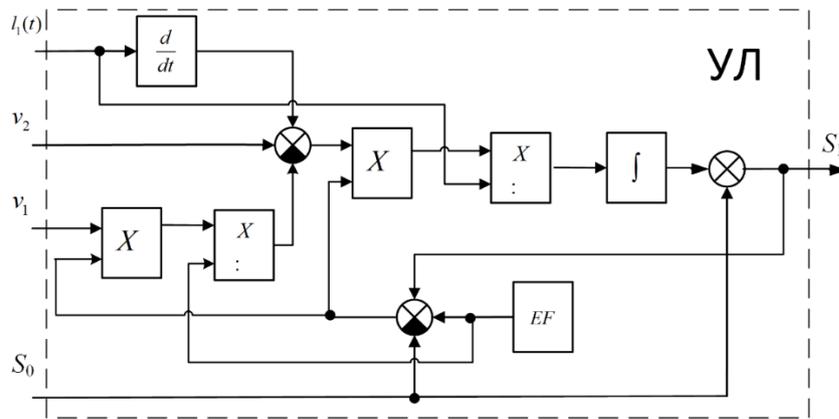


Рисунок 2.2 – Структурная схема математической модели упругой “сухой” ленты при прохождении ее по направляющим тракта станка при  $l_1 = l_1(t)$

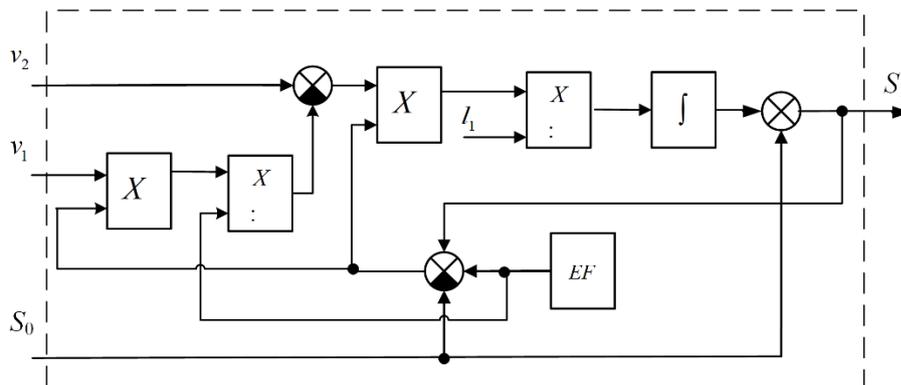


Рисунок 2.3 – Структурная схема математической модели упругой “сухой” ленты при прохождении ее по направляющим тракта станка при  $l_1 = \text{const}$  и при выкладке

На рисунках 2.2, 2.3 обозначено:  $\int$  – интегрирование переменной;  $X$  – умножение переменных;  $:$  – деление переменных;  $1$  – константа, равная единице;  $\frac{d}{dt}$  – дифференцирование переменной.

### 2.1.2 Линеаризация разработанного математического описания упругой “сухой” ленты

Как показано в подразделе 2.1.1, упругая “сухая” лента описывается нелинейными и нестационарными выражениями (2.9) и (2.10). Использовать их при синтезе ЭТС натяжения не представляется возможным. Данные выражения следует упростить, чтобы проработать методики синтеза, а исследовать синтезируемые системы следует на полной, не упрощенной модели.

С целью упрощения математического описания упругой ленты, произведем линеаризацию дифференциального уравнения (2.9).

Установившийся процесс в системе происходит при некоторых постоянных значениях  $l_1^*, S_1^*, S_0^*, v_2^*, v_1^*, \frac{dS_0^*}{dt} = \frac{dl_1^*}{dt} = 0$ , причем

$$\left. \begin{aligned} l_1(t) &= l_1^* + \Delta l_1(t); \\ \frac{dl_1(t)}{dt} &= \dot{l}_1^* + \Delta \dot{l}_1(t) \\ S_1(t) &= S_1^* + \Delta S_1(t); \\ S_0(t) &= S_0^* + \Delta S_0(t); \\ \frac{dS_0(t)}{dt} &= \dot{S}_0^* + \Delta \dot{S}_0(t); \\ v_2(t) &= v_2^* + \Delta v_2(t); \\ v_1(t) &= v_1^* + \Delta v_1(t). \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Введем функцию  $\Phi(x)$ :

$$\Phi(x) = \frac{dS_1}{dt} - \frac{1}{l_1(t)} \cdot [(S_1 - S_0 + EF)(v_2 + \frac{dl_1(t)}{dt} - \frac{S_1 - S_0 + EF}{EF} \cdot v_1)] - \frac{dS_0}{dt}. \quad (2.12)$$

Подставим в (2.12) выражения (2.11) и разложим функцию  $\Phi(x)$  в ряд по степеням указанных выше малых отклонений, рассматривая все производные тоже как самостоятельные переменные [104], получим:

$$\begin{aligned} & \frac{d\Delta S_1(t)}{dt} + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial S_1}\right)^* \cdot \Delta S_1(t) + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial v_2}\right)^* \cdot \Delta v_2(t) + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial v_1}\right)^* \cdot \Delta v_1(t) + \\ & + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial S_0}\right)^* \cdot \Delta S_0(t) + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial\left(\frac{dl_1}{dt}\right)}\right)^* \cdot \frac{d\Delta l_1(t)}{dt} - \frac{d\Delta S_0(t)}{dt} = 0. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Через  $\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x_i}\right)^*$  для краткости обозначены величины  $\frac{\partial\Phi}{\partial x_i}$ , взятые при

$$x_1 = S_1^*, \quad x_2 = v_2^*, \quad x_3 = v_1^*, \quad x_4 = S_0^*, \quad x_5 = \frac{dl_1^*}{dt}, \quad x_6 = \frac{dS_0^*}{dt}.$$

Точка сверху переменной обозначает дифференцирование по времени  $t$ .

Найдем производные  $\Phi(x)$  по основным переменным:

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial S_1}\right)^* = \frac{2(EF + S_1^* - S_0^*)}{l_1^* \cdot EF} v_1^* - \frac{v_2^*}{l_1^*};$$

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial v_2}\right)^* = -\frac{EF + S_1^* - S_0^*}{l_1^*};$$

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial v_1}\right)^* = \frac{(EF + S_1^* - S_0^*)^2}{l_1^* \cdot EF};$$

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial S_0}\right)^* = -\frac{2(EF + S_1^* - S_0^*) \cdot v_1^*}{l_1^* \cdot EF} + \frac{v_2^*}{l_1^*};$$

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial l_1}\right)^* = -\frac{1}{2 \cdot (l_1^*)^2} \left[ -\frac{dl_1^*(t)}{dt} \cdot (EF + S_1^* - S_0^*) + \frac{(EF - S_0^* + S_1^*)^2}{EF} \cdot v_1^* - (EF + S_1^* - S_0^*) \cdot v_2^* \right];$$

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial\left(\frac{dS_1}{dt}\right)}\right)^* = 1; \quad \left(\frac{\partial\Phi}{\partial\left(\frac{dS_0}{dt}\right)}\right)^* = -1; \quad \left(\frac{\partial\Phi}{\partial\left(\frac{dl_1}{dt}\right)}\right)^* = \frac{-(EF + S_1^* - S_0^*)}{l_1^*}.$$

Тогда линеаризованное уравнение примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta S_1(t)}{dt} = & -\left(\frac{\partial\Phi}{\partial S_1}\right)^* \cdot \Delta S_1(t) - \left(\frac{\partial\Phi}{\partial v_2}\right)^* \cdot \Delta v_2(t) - \left(\frac{\partial\Phi}{\partial v_1}\right)^* \cdot \Delta v_1(t) - \\ & - \left(\frac{\partial\Phi}{\partial S_0}\right)^* \cdot \Delta S_0(t) - \left(\frac{\partial\Phi}{\partial l_1}\right)^* \cdot \Delta l_1(t) - \left(\frac{\partial\Phi}{\partial\left(\frac{dl_1}{dt}\right)}\right)^* \cdot \frac{d\Delta l_1(t)}{dt} + \frac{d\Delta S_0}{dt}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Структурная схема линейризованного объекта регулирования (упругой ленты) приведена на рисунке 2.4.

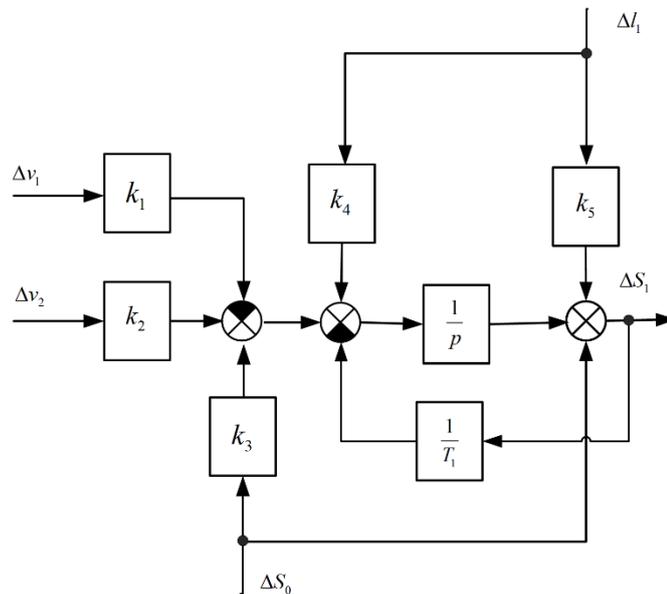


Рисунок 2.4 – Структурная схема линейризованного объекта регулирования

На рисунке 2.4 введены обозначения:

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \left(\frac{\partial\Phi}{\partial v_1}\right)^*; k_2 = \left(\frac{\partial\Phi}{\partial v_2}\right)^*; \\ k_3 &= \left(\frac{\partial\Phi}{\partial S_0}\right)^*; k_4 = \left(\frac{\partial\Phi}{\partial l_1}\right)^*; \\ k_5 &= \left(\frac{\partial\Phi}{\partial\left(\frac{dl_1}{dt}\right)}\right)^*; T_1 = \frac{1}{\left(\frac{\partial\Phi}{\partial S_1}\right)^*}. \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

Рассчитаем параметры структурной схемы для следующих значений объекта регулирования, характерных для процесса намотки изделий:

$$l_1^* = 1,1 \text{ м}; S_1^* = 1700 \text{ Н}; S_0^* = 300 \text{ Н}; v_2^* = 0,18 \text{ м/с}; v_1^* = 0,175 \text{ м/с}; \frac{dS_0^*}{dt} = 0; \frac{dl_1^*}{dt} = 0;$$

$EF = 10000 \text{ Н}$ , получим:

$$k_1 = 5,09 \cdot 10^4 \text{ Н/м}; k_2 = 5,8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}; k_3 = 0,469 \text{ 1/с}; k_4 = 115,4 \text{ Н/мс};$$

$$k_5 = 1,04 \cdot 10^4 \text{ Н/м}; T_1 = 4,91 \text{ с}.$$

Составим структурную схему линеаризованного объекта регулирования с учетом натяжного устройства и бобины с лентой. Очевидно, что математическое описание тракта станка на участке бобина – натяжное устройство будет аналогично, полученному ранее, но длина ленты между бобиной и натяжным устройством  $l_0$  изменяется незначительно и можно считать, что  $l_0 = \text{const}$ . Поэтому, имеем:

$$\Phi_1(x) = \frac{dS_0}{dt} + \frac{EF}{l_0(t)} \cdot (v_0 - v_1) + \frac{S_0}{l_0(t)} \cdot (2v_0 - v_1) + \frac{1}{l_0(t) \cdot EF} \cdot v_0 \cdot S_0^2. \quad (2.16)$$

Найдем производные  $\Phi_1(x)$  по основным переменным:

$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{\partial \Phi_1}{\partial S_0} \right)^* &= \frac{1}{l_0^*} (2v_0^* - v_1^*) + \frac{2v_0^* \cdot S_0^*}{l_0^* \cdot EF}; \\ \left( \frac{\partial \Phi_1}{\partial v_0} \right)^* &= \frac{(EF + S_0^*)^2}{l_0^*}; \\ \left( \frac{\partial \Phi_1}{\partial v_1} \right)^* &= -\frac{EF + S_0^*}{l_0^*}; \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

Тогда линеаризованное уравнение примет вид:

$$\frac{d\Delta S_0(t)}{dt} = -\left( \frac{\partial \Phi_1}{\partial S_0} \right)^* \cdot \Delta S_0(t) - \left( \frac{\partial \Phi_1}{\partial v_1} \right)^* \cdot \Delta v_1(t) - \left( \frac{\partial \Phi_1}{\partial v_0} \right)^* \cdot \Delta v_0(t). \quad (2.18)$$

Структурная схема линеаризованного объекта регулирования с учетом полученных выражений (2.16) – (2.18) и натяжного устройства показана на рисунке 2.5.

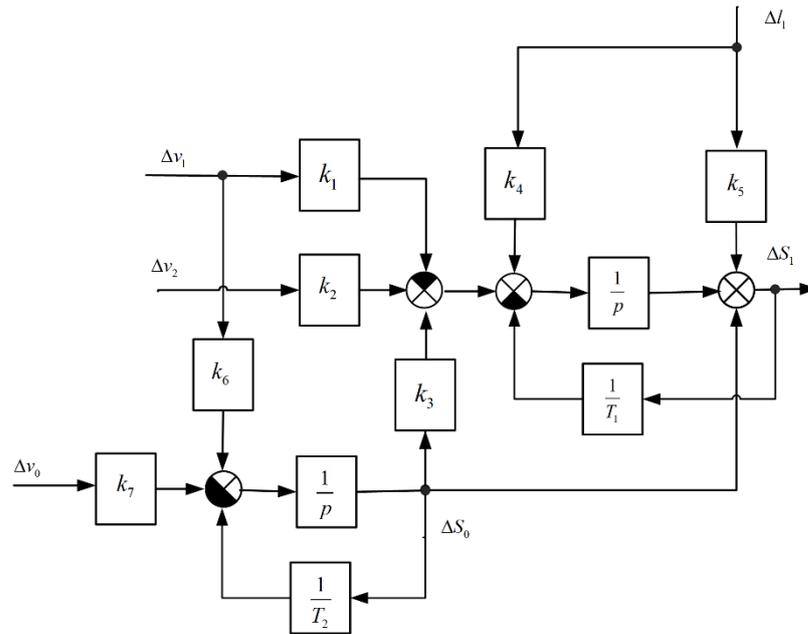


Рисунок 2.5 – Структурная схема линейризованного объекта регулирования с учетом натяжного устройства и бобины с лентой

Здесь введены обозначения:

$$\left. \begin{aligned} k_6 &= \left( \frac{\partial \Phi_1}{\partial v_1} \right)^*; k_7 = \left( \frac{\partial \Phi_1}{\partial v_0} \right)^*; \\ T_2 &= \frac{1}{\left( \frac{\partial \Phi_1}{\partial S_0} \right)^*}. \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

Рассчитаем параметры структурной схемы для следующих значений объекта регулирования, характерных для процесса смотки ленты с бобины:

$$l_0^* = 0,5 \text{ м}; S_0^* = 100 \text{ Н}; v_0^* = 0,2 \text{ м/с}; v_1^* = 0,2 \text{ м/с}; \frac{dS_0^*}{dt} = 0; EF = 10000 \text{ Н},$$

получим:

$$k_6 = 1,98 \cdot 10^4 \text{ Н/с}; k_7 = 4,04 \cdot 10^4 \text{ Н/м}; T_2 = 9,8 \text{ с}.$$

Полученное линейризованное описание объекта управления (упругой ленты) может быть использовано в дальнейшем для анализа и синтеза систем управления электроприводом натяжных устройств.

### ***2.1.3 Исследование зависимости коэффициентов линеаризации разработанного математического описания упругой “сухой” ленты от значения параметров технологического процесса изготовления изделий***

Отметим, что коэффициенты линеаризации полученных выражений (2.15), (2.17), (2.19) зависят от параметров намотки и выкладки изделия. Исследуем эту зависимость. Сначала отметим, что в процессе намотки и выкладки могут изменяться натяжения упругой ленты  $S_1$  и  $S_0$ , линейные скорости движения ленты  $v_2$ ,  $v_1$ ,  $v_0$  и длины упругой ленты  $l_1$ ,  $l_0$ . Возможные пределы изменения данных параметров приведены в таблице 2.1. Пределы изменения параметров выбраны на основании анализа доступных литературных источников, в которых рассматриваются процессы намотки изделий из “сухого” материала [4,11,20,34,35,39]. В [130] исследованы упруго-диссипативные свойства электропривода натяжного устройства станков для изготовления изделий из композиционных материалов. Показано, что на значение коэффициента демпфирования и постоянную времени оказывают влияние натяжение наматываемого материала, скорость движения КМ, длина тракта намотки, произведение модуля упругости материала на площадь его поперечного сечения и момент инерции натяжного механизма. Наиболее существенное влияние оказывают длина тракта намотки и скорость движения материала. В зависимости от параметров, при которых происходит намотка, объект управления описывается или апериодическим звеном второго порядка, или колебательным звеном. Сопрягающая частота изменяется от  $\omega = 0,020$  рад/с до  $\omega = 27,35$  рад/с, то есть более чем в 700 раз.

Таблица 2.1 – Параметры, которые могут изменяться  
во время намотки и выкладки

Параметр	Значение параметра		Изменение параметра, раз
	min	max	
$S_0$ (Н)	200	400	2
$S_1$ (Н)	400	3000	7,5
$v_0, v_1, v_2$ (м/с)	0,05	0,3	6
$l_1$ (м)	0,7	1,5	2,14
$l_0$ (м)	0,4	0,6	1,5

Используя выражения (2.15), (2.17) для параметров, приведенных в таблице 2.1, получим значения коэффициентов  $k_i$ ,  $T_i$ , приведенные в таблице 2.2.

Из полученных данных видно, что параметры линеаризованного объекта регулирования изменяются в широких пределах. Это необходимо учитывать при синтезе ЭТС натяжением композиционного материала.

Таблица 2.2 – Значения  $k_i$  и  $T_1$  и интервалов их варьирования

Параметр	Значение параметра		Изменение параметра, раз
	min	max	
$k_1$	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
$k_6$	6400	14000	3,75
$k_7$	72000	244000	3,39
$T_1$	1,5	30	20,1
$T_2$	2,24	28,85	12,9

## 2.2 Разработка и исследование математической модели “мокрой” ленты

### 2.2.1 Разработка математическая модель упругой “мокрой” ленты

В настоящее время при анализе и синтезе ЭТС натяжением “мокрой” ленты используются упрощенные выражения, что не позволяет создавать современные системы управления натяжением.

Аналогично, рассмотренному в разделе 2.1.1 получим дифференциальное уравнение, описывающие упругую ленту, полагая, что длина участка намотки  $l_1(t)$  является непрерывной функцией времени или функцией, имеющей разрывы первого рода. Отметим, что в отличие от “сухой” ленты деформация “мокрой” ленты происходит только при прохождении ее по не вращающимся направляющим тракта станка.

Учтем допущения, принятые в подразделе 2.1.1.

На рисунке 2.6 показана схема прохождения “мокрого” материала по направляющему тракту (невращающемуся ролику). Особенностью данного материала является то, что длина зоны деформации определяется длиной дуги  $AB$ .

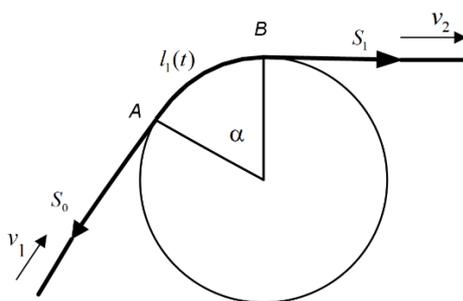


Рисунок 2.6 – Схема прохождения “мокрого” материала по направляющему тракту

В разделе 2.1.1 получено дифференциальное уравнение (2.6), связывающее относительное удлинение с упругими характеристиками ленты. Используем данное выражение для получения математического описания

упругой “мокрой” ленты. Учтем, что зоной деформации  $l_1(t)$  ленты в данном случае является дуга  $AB$  на невращающемся ролике тракта намотки станка.

Линейные скорости  $v_1$  и  $v_2$  связаны выражением:

$$v_1 = \frac{v_2}{1 + \varepsilon_1(t)}. \quad (2.20)$$

Относительное удлинение на участке  $AB$  равно:

$$\varepsilon_1(t) = \frac{S_1(t) - S_0(t)}{EF}. \quad (2.21)$$

Учитывая, что  $S_1 = S_0 \cdot e^{\alpha(t) \cdot f}$  получим из (2.21):

$$\varepsilon_1(t) = \frac{S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)}{EF}, \quad (2.22)$$

где  $\alpha(t)$  – угол охвата “мокрой” лентой направляющих тракта (см. рисунок 2.6);  $f$  – коэффициент вязкого трения композиционной ленты по неподвижному направляющему тракта намотки.

Отметим, что коэффициент вязкого трения зависит от многих факторов: натяжения ленты, температуры материала в зоне контакта, скорости движения композиционной ленты. В [55] приведены результаты исследований коэффициента  $f$  от параметров намотки. При малых скоростях, коэффициент трения пропорционален скорости движения тела, а при больших – квадрату скорости. Аналитическое описание зависимости коэффициента  $f$  от всех влияющих на него факторов при намотке изделий очень сложное. Однако, при работе системы регулирования натяжения достаточно знать только текущее значение коэффициента вязкого трения. Получить это значение можно с помощью использования дополнительного датчика натяжения и простого вычислительного устройства, описанного далее.

Подставим выражение (2.22) в (2.20), получим:

$$v_1 = \frac{v_2}{1 + \frac{S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)}{EF}} = \frac{EF \cdot v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)}. \quad (2.23)$$

Для получения математической модели упругой “мокрой” ленты воспользуемся уравнениями (2.6), (2.22), (2.23), с учетом того, что  $l_1(t) = r \cdot \alpha(t)$ , получим [131,132]:

$$\begin{aligned} \frac{dS_1}{dt} = & \frac{1}{\alpha(t)} \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt} \cdot S_1 + \frac{S_1 \cdot S_0 \cdot e^{\alpha(t) \cdot f}}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} - \frac{S_1^2}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} + \\ & + \frac{(EF - S_0) \cdot S_0 \cdot e^{\alpha(t) \cdot f}}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} - \frac{(EF - S_0) \cdot S_1}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} + \quad (2.24) \\ & + \frac{EF - S_0}{\alpha(t)} \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt} + \frac{dS_0}{dt}. \end{aligned}$$

Здесь  $r$  – радиус ролика, по которому скользит мокрая композиционная лента.

На рисунке 2.7 приведена структурная схема математической модели упругой ленты при прохождении ее по направляющим тракта станка с учетом изменения угла охвата лентой этих направляющих  $\alpha = \alpha(t)$ .

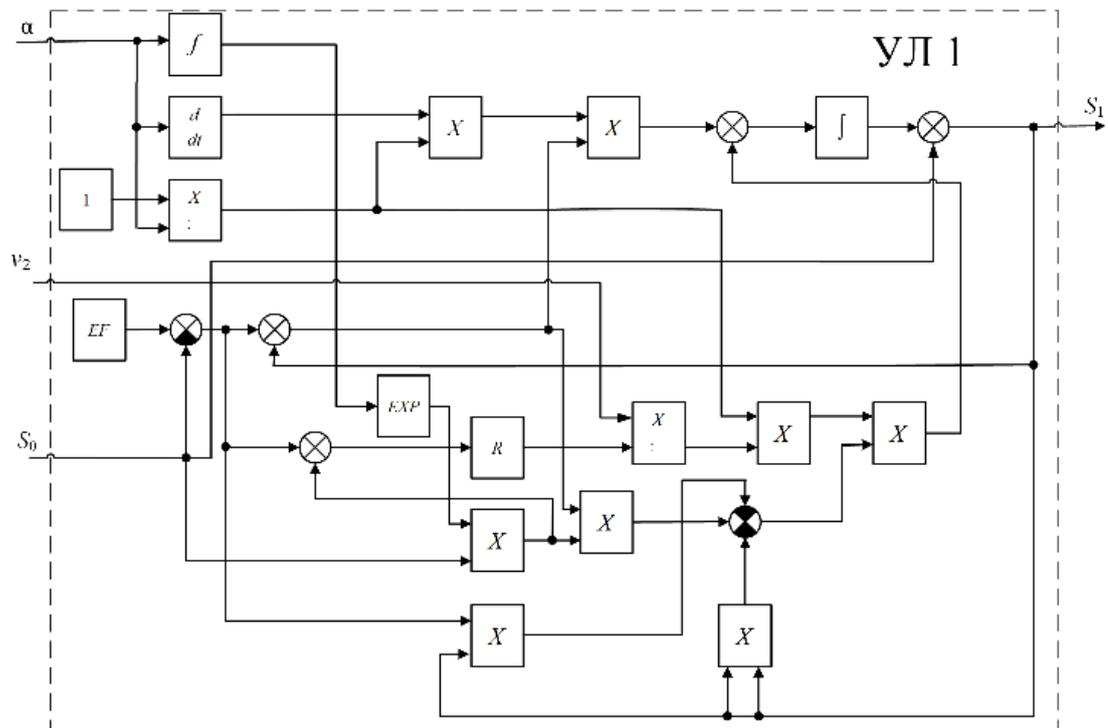


Рисунок 2.7 – Структурная схема математической модели “мокрой” упругой ленты при прохождении ее по направляющим тракта станка с учетом изменения угла охвата лентой этих направляющих  $\alpha = \alpha(t)$

При  $\alpha = \text{const}$  выражение (2.24) несколько упрощается:

$$\frac{dS_1}{dt} = \frac{1}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} [S_1 \cdot S_0 \cdot e^{\alpha(t) \cdot f} - S_1^2 + (EF - S_0) \cdot S_0 \cdot e^{\alpha(t) \cdot f} - (EF - S_0) \cdot S_1] + \frac{dS_0}{dt}. \quad (2.25)$$

На рисунке 2.8 приведена структурная схема математической модели упругой ленты при прохождении ее по направляющим тракта станка без учета изменения угла охвата лентой направляющих тракта.

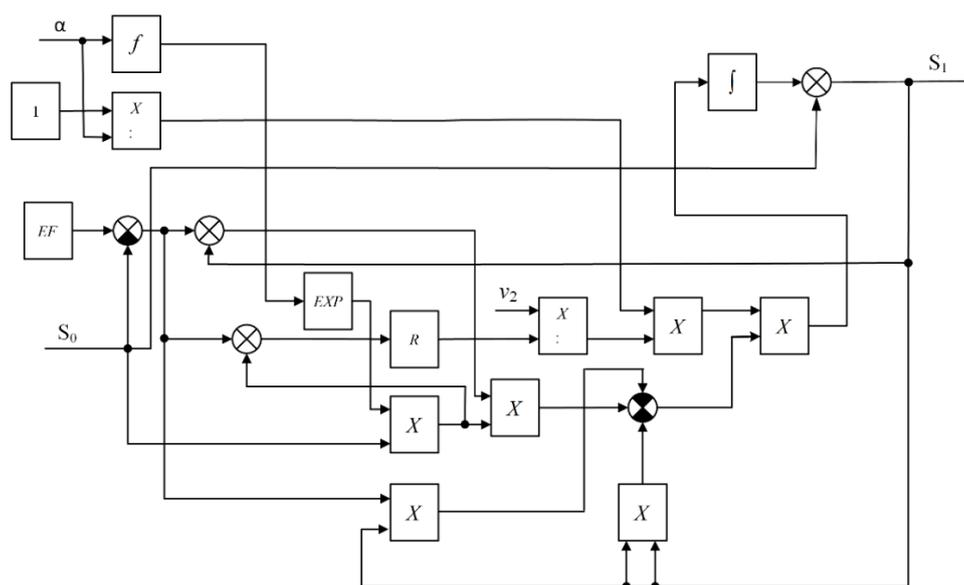


Рисунок 2.8 – Структурная схема математической модели “мокрой” упругой ленты при прохождении ее по направляющим тракта станка при  $\alpha = \text{const}$

Для вычисления коэффициента вязкого трения  $f$  необходима информация о натяжении ленты на участке намотки  $S_1$ , натяжении ленты, с которым лента попадает на участок намотки  $S_0$ , и угле охвата лентой роликов  $\alpha$ . Используя известное уравнение Эйлера, получаем:

$$f = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln\left(\frac{S_1}{S_0}\right).$$

На рисунке 2.9 показана структурная схема устройства вычисления коэффициента вязкого трения  $f$ . Для корректного вычисления коэффициента  $f$  сигналы  $S_1$  и  $S_0$  должны быть усреднены, например, при использовании аналоговых или цифровых фильтров.

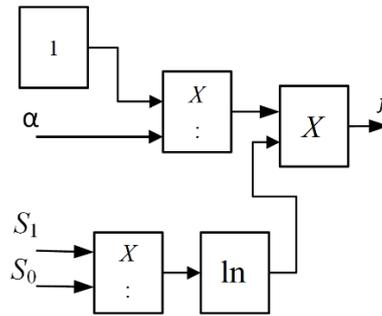


Рисунок 2.9 – Структурная схема устройства вычисления коэффициента вязкого трения  $f$

### 2.2.2 Линеаризация разработанного математического описания упругой “мокрой” ленты

Как показано в подразделе 2.2.1 упругая “мокрая” лента описывается нелинейными и нестационарными выражениями (2.24) и (2.25). Использовать их при анализе и синтезе ЭТС натяжения не представляется возможным. Данные выражения следует упростить, чтобы проработать методики синтеза, а исследовать синтезируемые системы следует на полной, не упрощенной модели.

С целью упрощения математического описаний упругой “мокрой” ленты, произведем линеаризацию выражений (2.24), (2.25). Из уравнения (2.24) имеем:

$$\begin{aligned} \Phi_2(x_i) = & \frac{dS_1}{dt} - \frac{1}{\alpha(t)} \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt} \cdot S_1 - \frac{S_1 \cdot S_0 \cdot e^{\alpha(t) \cdot f}}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} + \frac{S_1^2}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} - \\ & - \frac{(EF - S_0) \cdot S_0 \cdot e^{\alpha(t) \cdot f}}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} + \frac{(EF - S_0) \cdot S_1}{r \cdot \alpha(t)} \cdot \frac{v_2}{EF + S_0(e^{\alpha(t) \cdot f} - 1)} - \\ & - \frac{EF - S_0}{\alpha(t)} \cdot \frac{d\alpha(t)}{dt} - \frac{dS_0}{dt}. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Установившийся процесс в системе происходит при некоторых постоянных значениях  $\alpha^*, S_1^*, S_0^*, v_2^*, \frac{dS_0^*}{dt} = \frac{d\alpha^*}{dt} = 0$ . Тогда уравнение

установившегося состояния примет вид:

$$\Phi_2(0) = \frac{1}{r \cdot \alpha^*} \cdot \frac{v_2^*}{EF + S_0^*(e^{\alpha^* \cdot f} - 1)} (-S_1^* \cdot S_0^* \cdot e^{\alpha^* \cdot f} + (S_1^*)^2 - (EF - S_0^*) \cdot S_0^* \cdot e^{\alpha^* \cdot f} + (EF - S_0^*) \cdot S_1^*). \quad (2.27)$$

Точка сверху переменной обозначает дифференцирование.

Найдем производные  $\Phi_2(x_i)$  по основным переменным:

$$\left( \frac{\partial \Phi_2}{\partial S_1} \right)^* = \frac{1}{r \cdot \alpha^*} \cdot \frac{v_2^*}{EF + S_0^*(e^{\alpha^* \cdot f} - 1)} (S_0^* \cdot e^{\alpha^* \cdot f} + 2S_1^* + EF - S_0^*);$$

$$\left( \frac{\partial \Phi_2}{\partial v_2} \right)^* = \frac{1}{r \cdot \alpha^*} \cdot \frac{1}{EF + S_0^*(e^{\alpha^* \cdot f} - 1)} [-S_1^* \cdot S_0^* \cdot e^{\alpha^* \cdot f} + (S_1^*)^2 - (EF - S_0^*) \cdot S_0^* \cdot e^{\alpha^* \cdot f} + (EF - S_0^*) \cdot S_1^*];$$

$$\left( \frac{\partial \Phi_2}{\partial \alpha} \right)^* = -\frac{1}{r \cdot (\alpha^*)^2} \cdot \frac{v_2^*}{[EF + S_0^*(e^{\alpha^* \cdot f} - 1)]^2} \{ [S_1^* \cdot S_0^* + (EF - S_0^*) \cdot S_0^*] \cdot R \cdot \alpha^* \cdot [EF + S_0^*(e^{\alpha^* \cdot f} - 1)] \cdot (f - \frac{1}{\alpha^*} - 1) \cdot e^{\alpha^* \cdot f} + [(S_1^*)^2 + (EF - S_0^*) \cdot S_1^*] \cdot [EF \cdot (1 + \alpha^*) + S_0^* \cdot e^{\alpha^* \cdot f} \cdot (1 + \alpha^* \cdot f) - S_0^* \cdot (1 + \alpha^*)] \};$$

$$\left( \frac{\partial \Phi_2}{\partial S_0} \right)^* = \frac{[EF + S_0^*(e^{\alpha^* \cdot f} - 1)] \cdot (S_1^* \cdot e^{\alpha^* \cdot f} - EF \cdot e^{\alpha^* \cdot f} + 2 \cdot S_0^* \cdot e^{\alpha^* \cdot f} - 1)}{r \cdot \alpha^* \cdot \{ [EF + S_0^*(e^{\alpha^* \cdot f} - 1)]^2 - (S_1^* \cdot S_0^* \cdot e^{\alpha^* \cdot f} + S_1^* \cdot S_1^* - EF \cdot S_0^* \cdot e^{\alpha^* \cdot f} + S_0^* \cdot S_0^* \cdot e^{\alpha^* \cdot f} + EF - S_0^*) \cdot (e^{\alpha^* \cdot f} - 1) \}} \cdot v_2^*;$$

1

$$\left( \frac{\partial \Phi_2}{\partial (dS_1/dt)} \right)^* = 1;$$

$$\left( \frac{\partial \Phi_2}{\partial (dS_0/dt)} \right)^* = -1;$$

$$\left( \frac{\partial \Phi_2}{\partial (d\alpha^*/dt)} \right)^* = \frac{-S_1^* - EF + S_0^*}{\alpha^*}.$$

Тогда линеаризованное уравнение примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta S_1(t)}{dt} = & -\left(\frac{\partial\Phi_2}{\partial S_1}\right)^* \cdot \Delta S_1(t) - \left(\frac{\partial\Phi_2}{\partial v_2}\right)^* \cdot \Delta v_2(t) - \left(\frac{\partial\Phi_2}{\partial \alpha}\right)^* \cdot \Delta \alpha(t) - \\ & - \left(\frac{\partial\Phi_2}{\partial S_0}\right)^* \cdot \Delta S_0(t) + \left(\frac{\partial\Phi_2}{\partial(d\alpha/dt)}\right)^* \cdot \frac{d\Delta \alpha(t)}{dt} - \frac{d\Delta S_0}{dt}. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} k_{1.M} &= \left(\frac{\partial\Phi_2}{\partial \alpha}\right)^*; \\ k_{2.M} &= \left(\frac{\partial\Phi_2}{\partial v_2}\right)^*; \\ k_{3.M} &= \left(\frac{\partial\Phi_2}{\partial S_0}\right)^*; \\ k_{4.M} &= \left(\frac{\partial\Phi_2}{\partial(d\alpha/dt)}\right)^*; \\ T_{1.M} &= \frac{1}{\left(\frac{\partial\Phi_2}{\partial S_1}\right)^*}. \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

Структурная схема линейризованного объекта регулирования (упругой “мокрой” ленты) приведена на рисунке 2.10. На рисунке 2.11 приведена структурная схема объекта регулирования при неизменном угле охвата лентой направляющих тракта намотки.

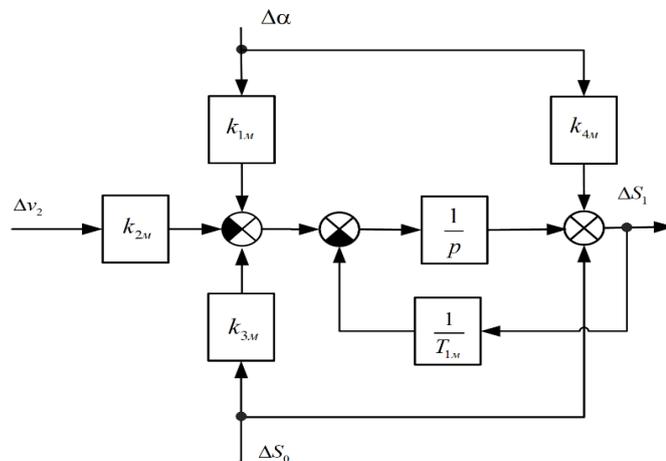


Рисунок 2.10 – Структурная схема линейризованного объекта регулирования (упругой “мокрой” ленты)

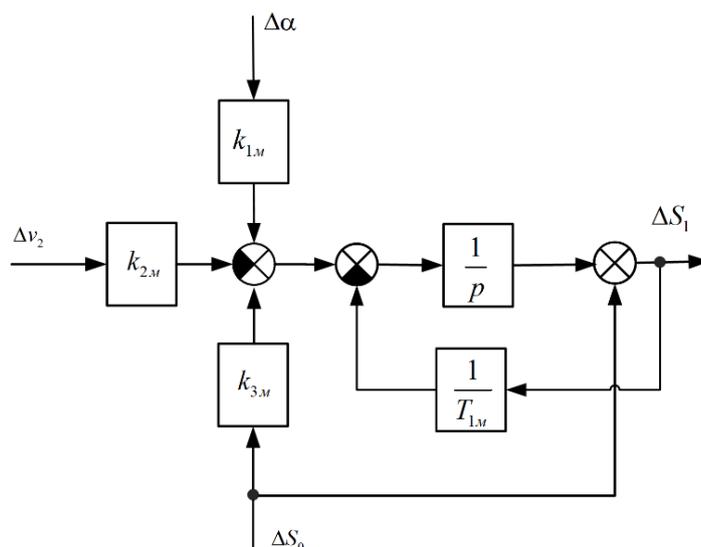


Рисунок 2.11 – Структурная схема линейризованного объекта регулирования при  $\alpha = \text{const}$

Полученные линейризованные описания объекта управления (упругой “мокрой” ленты) достаточно просты и могут быть использованы в дальнейшем для анализа и синтеза ЭТС натяжных устройств.

### ***2.3.3 Исследование зависимости коэффициентов линейризации разработанного математического описания упругой “мокрой” ленты от значения параметров технологического процесса изготовления изделий***

Отметим, что коэффициенты линейризации полученных выражений (2.29) зависят от параметров намотки изделия. Исследуем эту зависимость.

Сначала рассмотрим параметры, которые могут изменяться в процессе намотки, их значения приведены в таблице 2.3. Пределы изменения параметров выбраны на основании анализа доступных литературных источников, где рассматриваются процессы намотки изделий из “мокрого” композиционного материала [4,11,34,35,39,40].

Таблица 2.3 – Параметры, которые изменяются во время намотки

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

Используя выражения (2.29) для параметров, приведенных в таблице 2.3, получим значения коэффициентов, приведенные в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Значения  $k_i$  и  $T_i$  и интервалов их варьирования

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

Из полученных данных видно, что параметры объекта регулирования изменяются в широких пределах. Это необходимо учитывать при синтезе систем регулирования натяжения композиционного материала.

### Выводы по главе

Таким образом, в данной главе:

- разработана математическая модель “сухой” упругой ленты, которая, в отличие от известных, описывает процессы, происходящие при намотке как

простых изделий (“Цилиндр”, «Конус»), так и сложных (“Призма”, “Кокон”, «Шар»). Использование данной модели позволяет синтезировать ЭТС натяжения с учетом того, какие изделия будут наматываться на данном оборудовании, что в конечном итоге позволит изготавливать изделия с улучшенными качественными характеристиками;

- впервые разработана математическая модель “мокрой” упругой ленты, которая описывает динамические процессы, происходящие в ленте при ее намотке и позволяет использовать ее при анализе и синтезе ЭТС натяжения. Использование разработанной модели способствует повышению быстродействия ЭТС натяжения и улучшению качественных показателей при намотке;

- проведена линеаризация математического описания “сухой” и “мокрой” упругой ленты, что позволяет существенно упростить математические описания и использовать данные модели при анализе и синтезе современных ЭТС натяжения любой геометрической формы, что в конечном итоге позволяет повысить качественные показатели систем регулирования натяжения, используемые при намотке и выкладке;

- исследовано влияние параметров намотки на коэффициенты линеаризации. Исследования показали, что данные параметры могут существенно изменяться в процессе намотки или выкладки (до 20 раз при “сухой” намотке и до 30 раз при “мокрой”). Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке электротехнических систем натяжения.

### 3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАТЯЖНЫХ УСТРОЙСТВ

#### 3.1 Натяжные устройства, используемые при “сухой” намотке и выкладке

Для проектирования электротехнических систем управления необходимо иметь математическую модель неизменяемой части объекта управления (ОУ). Неизменяемой частью ОУ для намоточного станка и выкладки являются устройство намотки ленты на изделие, упругая лента, натяжное устройство и устройство смотки ленты (см. рисунок 1.2).

Математическая модель неизменяемой части объекта управления получена при следующих общепринятых допущениях:

- в механических передачах нет люфтов и зазоров;
- натяжение не оказывает влияния на радиус наматываемого изделия и диаметр натяжного ролика;
- параметры приводов не изменяются во времени.

Данные допущения практически не вносят погрешностей, но существенно упрощают процесс получения математической модели.

На рисунках 3.1 – 3.3 приведены наиболее типичные кинематические схемы намоточных станков и станков, используемых при выкладке изделий.

Бобина с “сухим” материалом (упругой лентой) 1 (см. рисунок 3.1) подтормаживается тормозным устройством 2 (устройством смотки ленты). Упругая лента 3 с бобины 1 проходит через натяжное устройство 4, состоящее из одного или двух обрезиненных роликов (на рисунке показано два ролика). Обрезиненные ролики связаны между собой и с приводом 5. Далее лента проходит измеритель натяжения 6, раскладчик 7 и укладывается на изделие 8. Изделие приводится во вращение приводом 9.

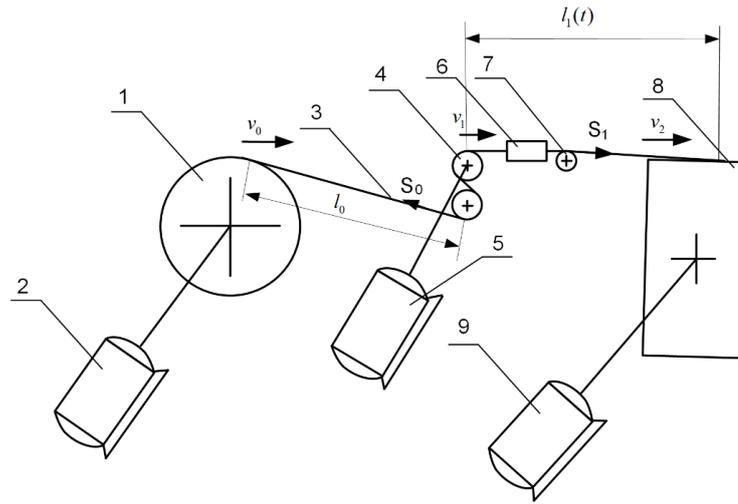


Рисунок 3.1 – Кинематическая схема намоточного станка с одним трактом  
намотки

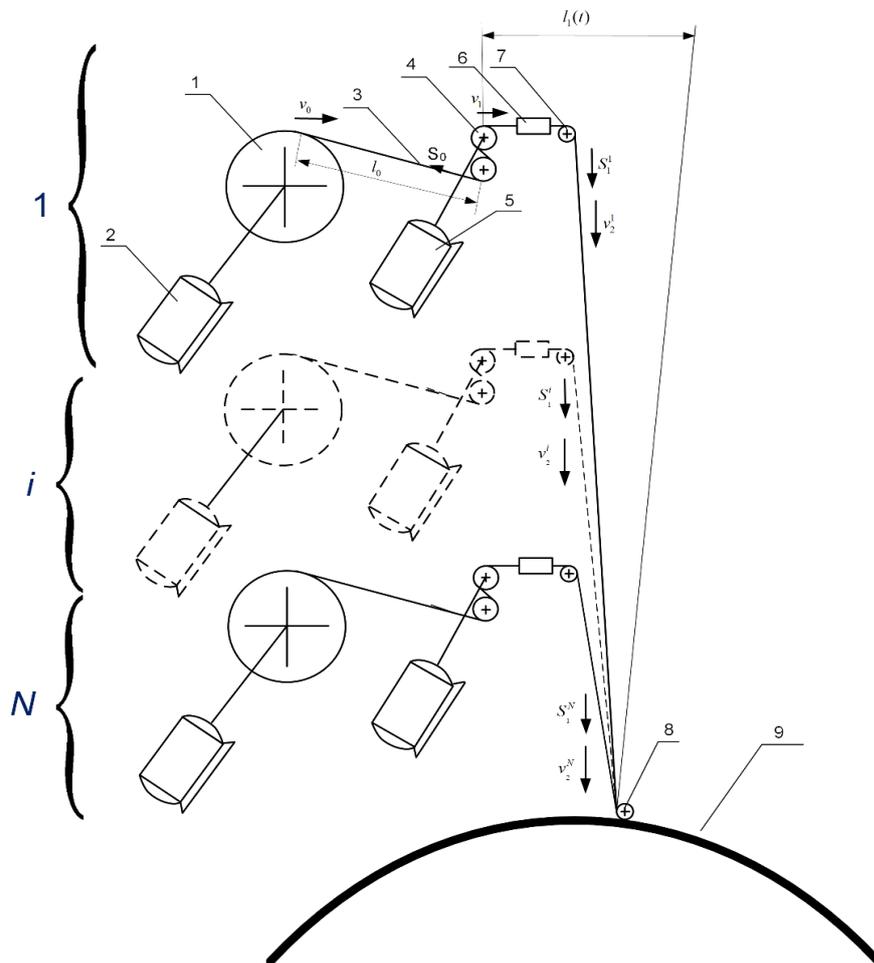


Рисунок 3.2 – Кинематическая схема станка для выкладки изделий

На рисунке 3.2 показан процесс выкладки изделий. Несколько бобин с лентой 1 (их число обозначим  $N$ ) установлены в шкафу или закреплены на выкладочной головке. Бобины 1 подтормаживаются тормозными устройствами 2. Упругая лента 3 с бобин 1 проходит через натяжные устройства 4, которые связаны с приводом 5. Далее лента проходит измеритель натяжения 6, ролик 7 и собирается в укладываемую ленту на прижимном ролике 8. Лента укладывается на изделие 9.

На рисунке 3.3 показана кинематическая схема намоточного станка с несколькими трактами намотки. Здесь натяжное устройство выполнено в виде одного обрезиненного ролика 4, связанного с приводом натяжного устройства 5.

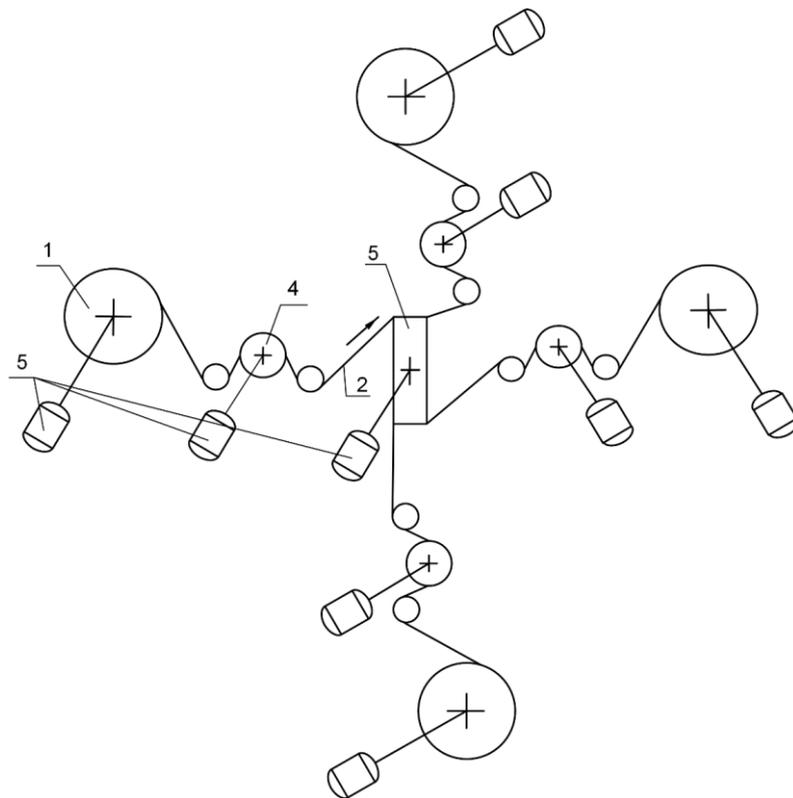


Рисунок 3.3 – Кинематическая схема намоточного станка с несколькими трактами намотки:

1 – наматываемое изделие; 2 – наматываемая лента; 3 – бобина с лентой;  
4 – натяжной ролик; 5 – двигатели

Рассмотрим бобину со сматываемой лентой на рисунках 3.4, 3.5 и натяжное устройство.

На рисунках 3.4, 3.5 показаны варианты исполнения участка смотки ленты с амортизатором и без него, а на рисунке 3.6 показаны варианты исполнения натяжного устройства с одним роликом, двумя роликами, с одним роликом и двумя направляющими.

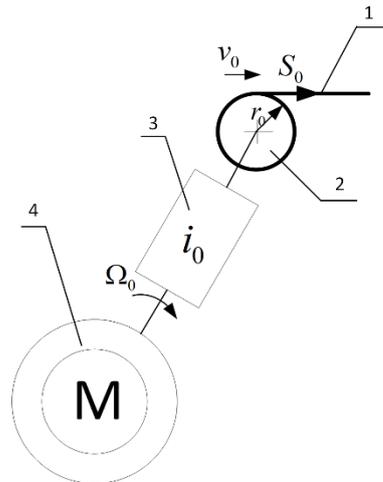


Рисунок 3.4 – Участок смотки ленты с бобины без амортизатора

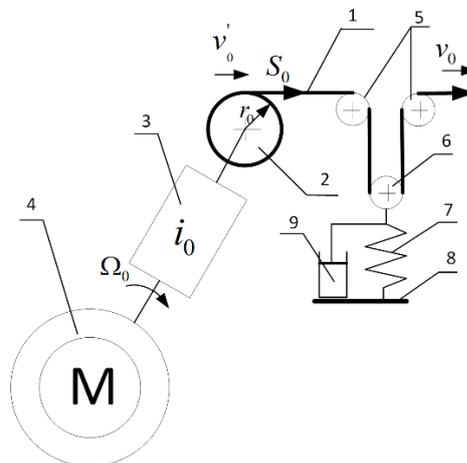


Рисунок 3.5 – Участок смотки ленты с бобины с амортизатором (демпфирующим элементом):

- 1 – наматываемая лента; 2 – бобина со сматываемой лентой; 3 – редуктор;
- 4 – тормозное устройство; 5 – направляющие ролики; 6 – ролик амортизатора;
- 7 – пружина амортизатора; 8 – крепление пружины к корпусу устройства;
- 9 – амортизирующее устройство (демпфирующий элемент)

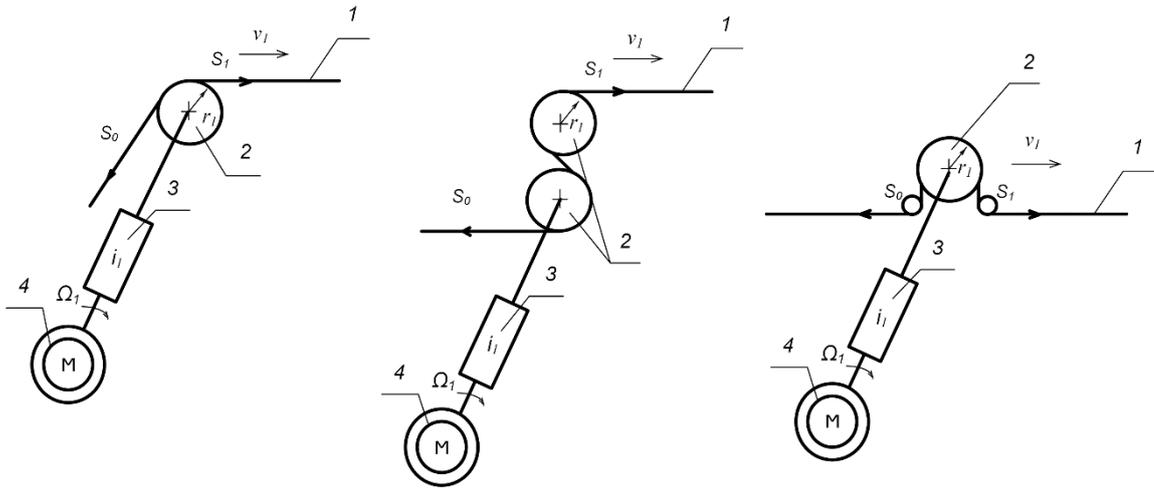


Рисунок 3.6 – Натяжные устройства “сухой” композиционной ленты:

1 – наматываемая лента; 2 – натяжной ролик; 3 – редуктор;

4 – тормозное устройство

С учетом перечисленных допущений выполним математическое описание объекта регулирования.

Опишем натяжное устройство, подтормаживающее бобину с лентой (далее будем называть “устройство смотки ленты с бобины”) (см. рисунок 3.4):

$$\left. \begin{aligned} J_0(t) \cdot \frac{d\Omega_0}{dt} &= -M_0 + M_{C0}; \\ M_{C0} &= \frac{r_0(t) \cdot \eta_0}{i_0} S_0; \\ v_0 &= \frac{r_0(t)}{i_0} \cdot \Omega_0, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

где  $M_{C0}$  – статический момент на валу привода тормозного устройства, вызванный натяжением ленты  $S_0$ ;  $M_0$  – момент на валу привода тормозного устройства;  $J_0(t)$  – приведенный момент инерции привода;  $\Omega_0$  – угловая скорость вала тормозного устройства, расположенного на бобине с лентой;  $v_0$  – линейная скорость движения ленты;  $r_0$  – радиус бобины с лентой;  $i_0$  – передаточное отношение редуктора;  $\eta_0$  – КПД редуктора.

Натяжное устройство, подтормаживающее бобину с лентой (устройство смотки ленты с бобины), с амортизатором имеет вид (см. рисунок 3.5):

$$\left. \begin{aligned} J_0(t) \cdot \frac{d\Omega_0}{dt} &= -M_0 + M_{C0}; \\ M_{C0} &= \frac{r_0(t) \cdot \eta_0}{i_0} S_0; \\ v_0 &= \frac{r_0(t)}{i_0} \cdot \Omega_0; \\ v_0 &= \dot{x} - \frac{dx}{dt}; \\ m \frac{d^2x}{dt^2} + h \frac{dx}{dt} + cx &= 2S_0, \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

где  $m$  – масса ролика б (см. рисунок 3.5);  $x$  – перемещение ролика б в процессе работы;  $h$  – демпфирующие свойства амортизатора;  $c$  – жесткость используемой пружины.

Опишем натяжное устройство, включающее в себя тормозной ролик, (рисунок 3.6):

$$\left. \begin{aligned} J_1 \cdot \frac{d\Omega_1}{dt} &= -M_1 + M_{C1}; \\ M_{C1} &= \frac{r_1 \cdot \eta_1}{i_1} (S_1 - S_0); \\ v_1 &= \frac{r_1}{i_1} \cdot \Omega_1, \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

где  $M_{C1}$  – статический момент на валу привода тормозного устройства, вызванный разностью натяжений  $S_1$  и  $S_0$ ;  $M_1$  – момент на валу привода тормозного устройства;  $J_1$  – приведенный момент инерции привода тормозного устройства;  $\Omega_1$  – угловая скорость вала тормозного устройства, связанного с тормозными роликами;  $v_1$  – линейная скорость движения ленты;  $r_1$  – радиус натяжного ролика;  $i_1$  – передаточное отношение редуктора;  $\eta_1$  – КПД редуктора.

Рассмотрим участок намотки ленты на изделие (рисунок 3.7).

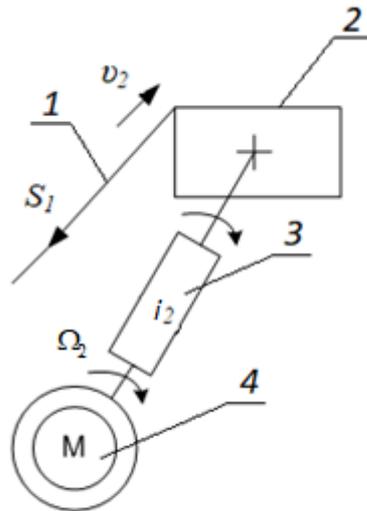


Рисунок 3.7 – Участок намотки ленты на изделие:

1 – наматываемая лента; 2 – наматываемое изделие; 3 – редуктор;  
4 – электродвигатель

По аналогии с ранее изложенным, имеем:

$$\left. \begin{aligned} J_2(t) \cdot \frac{d\Omega_2}{dt} &= M_2 - M_{C2}; \\ M_{C2} &= \frac{h_2(t) \cdot \eta_2}{i_2} S_1; \\ v_2 &= \frac{h_2(t)}{i_2} \cdot \Omega_2, \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

где  $M_2$  – момент на валу привода;  $J_2(t)$  – приведенный момент инерции привода;  $\Omega_2$  – угловая скорость вращения вала привода, связанного с наматываемым изделием;  $M_{C2}$  – статический момент на валу привода;  $v_2$  – линейная скорость намотки ленты на изделие;  $h_2(t)$  – текущий радиус изделия;  $i_2$  – передаточное отношение редуктора;  $\eta_2$  – КПД редуктора.

Полученное нелинейное математическое описание объекта управления (упругой “сухой” ленты и исполнительных механизмов) не может быть использовано при анализе и синтезе систем управления электроприводов наматываемых устройств. Поэтому в дальнейшем проведем линеаризацию полученных выражений.

В качестве тормозных устройств, которые осуществляют подтормаживание бобины с лентой или натяжного ролика, могут использоваться:

- механические фрикционные тормоза;
- электромагнитные тормозные устройства;
- различные электрические двигатели.

Далее не будем рассматривать пневматические и гидравлические устройства потому, что они в промышленности практически не используются.

В качестве механических тормозов обычно применяются фрикционные тормозные устройства с возможностью регулирования прижатия друг к другу фрикционных пластин с целью изменения момента трения.

В качестве электромагнитных тормозных устройств используют различные ферропорошковые муфты и тормоза с управлением, создаваемым специальной катушкой магнитным полем с целью изменения момента трения и соответственно момента на валу муфты или тормоза.

В натяжных устройствах используются различные электрические двигатели:

- постоянного тока с независимым возбуждением или с возбуждением от постоянных магнитов;
- асинхронные двигатели;
- синхронные двигатели с постоянными магнитами;
- вентильно-индукторные двигатели.

### **3.2 Анализ натяжных устройств и исполнительных механизмов, используемых при “сухой” намотке**

#### ***3.2.1 Тормозные устройство с механическими фрикционными тормозами***

Рассмотрим подробнее варианты использования различных тормозных устройств для подтормаживания бобины с лентой.

Фрикционные муфты и тормоза работают за счет сил трения, возникающих между половинками тормоза (муфты) [133]. По конструкции фрикционные муфты делятся на дисковые и конусные. В натяжных устройствах применяются дисковые муфты. Такие муфты работают без смазочных материалов, здесь используется сухое трение. Половинки муфт прижимаются друг к другу специальным механизмом, как правило, это пружина, усилие нажатия которой регулируется. Материалом муфт является или конструкционная сталь, или чугун. В качестве фрикционного материала используются ферродо, фрикционные пластмассы, порошковые материалы. Схематически управляемая фрикционная муфта показана на рисунке 3.8.

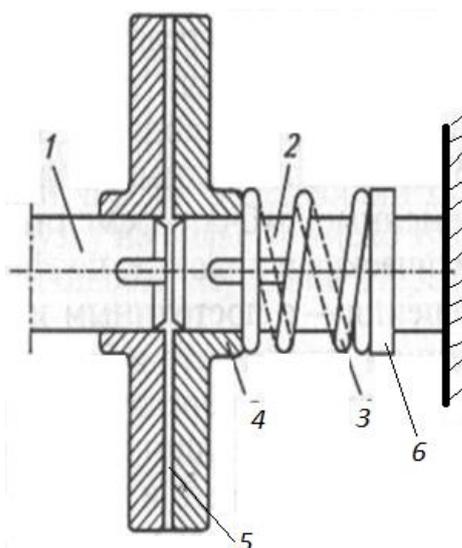


Рисунок 3.8 – Фрикционная управляемая муфта:

1,2 – соединяемые валы; 3 – пружина; 4 – диски; 5 – фрикционный материал;  
6 – устройство регулировки усилия прижатия пружины

Если фрикционная муфта соединена с бобиной, с которой сматывается композиционная лента, то данное устройство можно описать системой дифференциальных уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} M_0 &= k_0 \cdot F_0; \\ J_0 \cdot \frac{d\Omega_0}{dt} &= -M_0 + M_{C0}; \\ M_{C0} &= \frac{r_6 \cdot \eta_0}{i_0} S_0; \\ v_0 &= \frac{r_6}{i_0} \cdot \Omega_0, \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

где  $M_0$  – момент на валу тормоза;  $k_0$  – коэффициент, связывающий усилие сжатия пластин тормоза и момент на его валу;  $F_0$  – усилие сжатия пластин тормоза;  $J_0$  – приведенный момент инерции привода;  $\Omega_0$  – угловая скорость вала тормоза;  $M_{C0}$  – статический момент на валу тормоза;  $v_0$  – линейная скорость движения ленты;  $r_6$  – радиус бобины с лентой;  $i_0$  – передаточное отношение редуктора;  $\eta_0$  – КПД редуктора.

Если фрикционная муфта соединена с роликами натяжного устройства, то данное устройство можно описать системой дифференциальных уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= k_{1T} \cdot F_1; \\ J_1 \cdot \frac{d\Omega_1}{dt} &= -M_1 + M_{C1}; \\ M_{C1} &= \frac{r_1 \cdot \eta_1}{i_1} (S_1 - S_0); \\ v_1 &= \frac{r_1}{i_1} \cdot \Omega_1, \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

где  $M_1$  – момент на валу тормоза натяжного устройства;  $k_{1T}$  – коэффициент, связывающий усилие сжатия пластин тормоза и момент на его валу;  $F_1$  – усилие сжатия пластин тормоза;  $J_1$  – приведенный момент инерции привода;  $\Omega_1$  – угловая скорость вала тормоза;  $M_{C1}$  – статический момент на валу тормоза;  $v_2$  – линейная скорость намотки ленты на изделие;  $r_1$  – радиус ролика тормозного устройства;  $v_1$  – передаточное отношение редуктора;  $\eta_1$  – КПД редуктора.

Структурные схемы математической модели устройства смотки ленты с бобины и натяжного устройства с фрикционными управляемыми муфтами приведены на рисунках 3.9, 3.10.

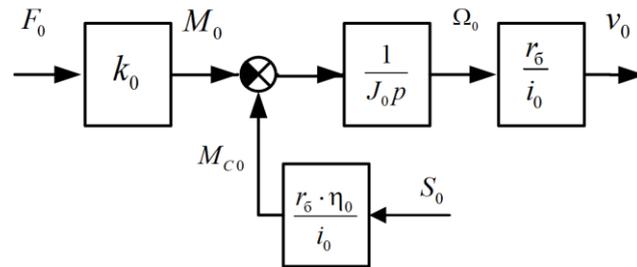


Рисунок 3.9 – Структурная схема математической модели устройства смотки ленты с бобины с фрикционной управляемой муфтой

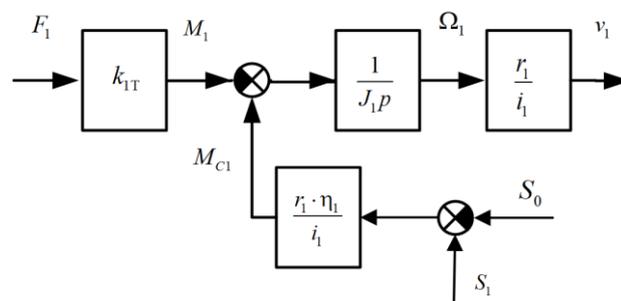


Рисунок 3.10 – Структурная схема математической модели натяжного устройства с фрикционной управляемой муфтой

Натяжные устройства с фрикционной муфтой очень дешевы, но обладают нестабильными характеристиками во времени. Вследствие этого натяжение в процессе намотки может существенно изменяться. Поэтому такие устройства не рекомендуется применять при намотке ответственных изделий сложной формы из композиционных материалов.

### 3.2.2 Смотывающее и натяжное устройства с ферропорошковым электромагнитным тормозом

Ферропорошковые тормоза (ФТ) с электромагнитным управлением состоят из ведущего вала 1 (рисунок 3.11), неподвижного корпуса 2, обмотки возбуждения 3, ферромагнитного порошка 4.

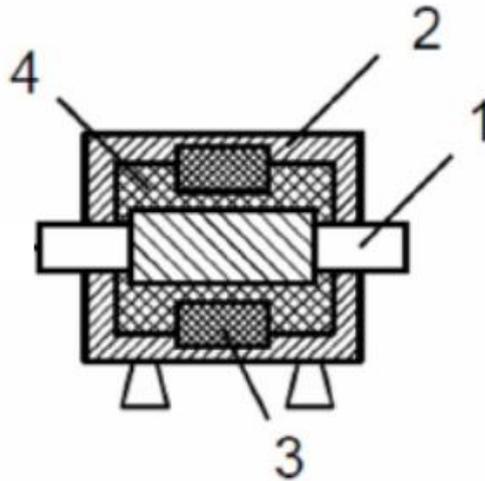


Рисунок 3.11 – Ферропорошковый тормоз

Данное устройство можно описать системой дифференциальных уравнений вида [134,135].

Если ферропорошковый тормоз соединен с бобиной, с которой сматывается композиционная лента, то данное устройство можно описать системой дифференциальных уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} T_{M_0} \cdot \frac{dM_0}{dt} + M_0 &= k_{T_0} \cdot U_0; \\ J_0 \cdot \frac{d\Omega_0}{dt} &= -M_0 + M_{C_0}; \\ M_{C_0} &= \frac{r_6 \cdot \eta_0}{i_0} S_0; \\ v_0 &= \frac{r_6}{i_0} \cdot \Omega_0, \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

где  $T_{M_0}$  – постоянная времени обмотки ФТ;  $k_{T_0}$  – коэффициент, связывающий напряжение на обмотке ферропорошкового тормоза с его моментом;  $U_0$  – напряжение, подаваемое на обмотку ФТ.

Если ферропорошковый тормоз соединен с роликом натяжного устройства, то данное устройство описывается системой дифференциальных уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} T_{M1} \cdot \frac{dM_1}{dt} + M_1 &= k_{T1} \cdot U_1; \\ J_1 \cdot \frac{d\Omega_1}{dt} &= -M_1 + M_{C1}; \\ M_{C1} &= \frac{r_1 \cdot \eta_1}{i_1} (S_1 - S_0); \\ v_1 &= \frac{r_1}{i_1} \cdot \Omega_1, \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

где  $T_{M1}$  – постоянная времени обмотки ФТ;  $k_{T1}$  – коэффициент, связывающий напряжение на обмотке тормоза натяжного устройства с ее моментом;  $U_1$  – напряжение, подаваемое на обмотку ФТ натяжного устройства.

Структурные схемы математической модели устройства смотки ленты с бобины и натяжного устройства с ферропорошковым тормозом приведены на рисунках 3.12, 3.13.

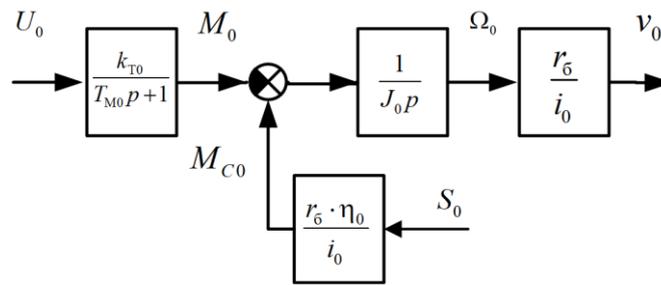


Рисунок 3.12 – Структурная схема математической модели устройства смотки ленты с ферропорошковым тормозом

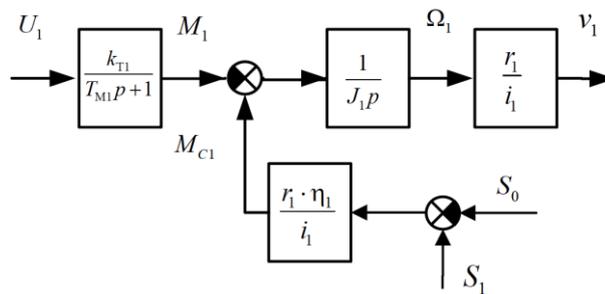


Рисунок 3.13 – Структурная схема математической модели натяжного устройства с ферропорошковым тормозом

Отметим, что натяжные устройства с ферропорошковыми тормозами достаточно недорогие, обладают стабильными характеристиками во времени,

допускают работу от простых преобразователей напряжения, имеют маленькие постоянные времени обмотки возбуждения, небольшой момент инерции. Поэтому такие приводы рекомендуется применять при намотке изделий из композиционных материалов, к условиям эксплуатации которых не предъявляются повышенные требования.

### 3.2.3 Смотывающее и натяжное устройства с двигателем постоянного тока

Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ) имеет две обмотки (якоря и обмотку возбуждения). Обмотка возбуждения питается от независимого источника постоянного напряжения. В последнее время обмотку возбуждения часто заменяют постоянными магнитами [136].

С точки зрения математического описания ДПТ можно использовать универсальные описания процессов электромеханического преобразования энергии [136,137].

Двухфазная модель ДПТ в системе координат статора ( $\alpha - \beta$ ) приведена на рисунке 3.14.

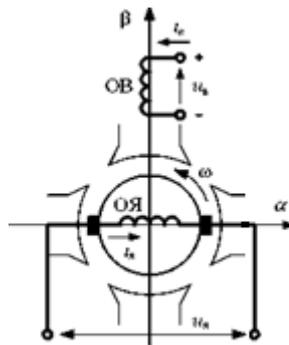


Рисунок 3.14 – Двухфазная модель двигателя постоянного тока

На рисунке 3.14 обозначено ОВ – обмотка возбуждения; ( $\alpha - \beta$ ) неподвижная система координат.

Система дифференциальных уравнений, описывающих электромеханические процессы в двигателе постоянного тока и его связь с натяжными устройствами, имеет вид [136,137]:

$$\left. \begin{aligned}
 T_{я0} \frac{dI_{я0}}{dt} + I_{я0} &= \frac{U_{я0} - \bar{E}_0}{R_{я0}}; \\
 \bar{E}_0 &= C_E \bar{\Phi}_0 \Omega_0; \\
 M_0 &= C_M \bar{\Phi}_0 I_{я0}; \\
 J_0 \frac{d\Omega_0}{dt} &= -M_0 + M_{C0}; \\
 M_{C0} &= \frac{r_0 \cdot \eta_0}{i_0} S_0; \\
 v_0 &= \frac{r_0}{i_0} \cdot \Omega_0.
 \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

$$\left. \begin{aligned}
 T_{я1} \frac{dI_{я1}}{dt} + I_{я1} &= \frac{U_{я1} - \bar{E}}{R_{я}}; \\
 \bar{E} &= C_E \bar{\Phi} \Omega_1; \\
 M_1 &= C_M \bar{\Phi} I_{я1}; \\
 J_1 \frac{d\Omega_1}{dt} &= -M_1 + M_{C1}; \\
 M_{C1} &= \frac{r_1 \cdot \eta_1}{i_1} (S_1 - S_0); \\
 v_1 &= \frac{r_1}{i_1} \cdot \Omega_1,
 \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

где  $T_{я0}$ ,  $T_{я1}$  – электромагнитные постоянные времени цепи якоря двигателя, связанного с бобиной или натяжным устройством;  $I_{я0}$ ,  $I_{я1}$  – ток в якорной цепи двигателей;  $U_{я0}$ ,  $U_{я}$  – напряжение на якорях двигателей;  $\bar{E}_0$ ,  $\bar{E}$  – противоЭДС двигателей;  $R_{я0}$ ,  $R_{я}$  – сопротивления якорной цепи двигателя;  $C_E$  и  $C_M$  – параметры двигателей;  $\bar{\Phi}_0$ ,  $\bar{\Phi}$  – магнитные потоки двигателей;  $\Omega_0$ ,  $\Omega_1$  – угловые скорости вращения валов двигателей;  $M_0$ ,  $M_1$  – активный момент на валах двигателей;  $J_0$ ,  $J_1$  – приведенные моменты инерции двигателей;  $M_{C0}$ ,  $M_{C1}$  – моменты статического сопротивления на валах двигателей.

Уравнение (3.9) описывает электропривод устройства смотки ленты с бобины, а (3.10) электропривод натяжного ролика.

Структурные схемы математической модели устройства смотки ленты с бобины и натяжного устройства с двигателем постоянного тока приведены на рисунках 3.15, 3.16.

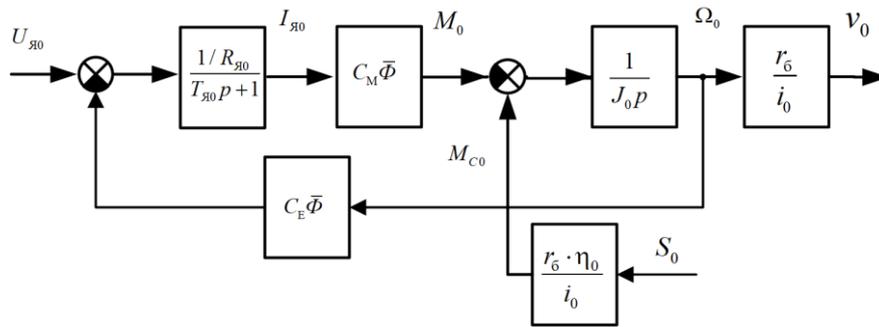


Рисунок 3.15 – Структурная схема математической модели устройства смотки ленты с бобины с двигателем постоянного тока

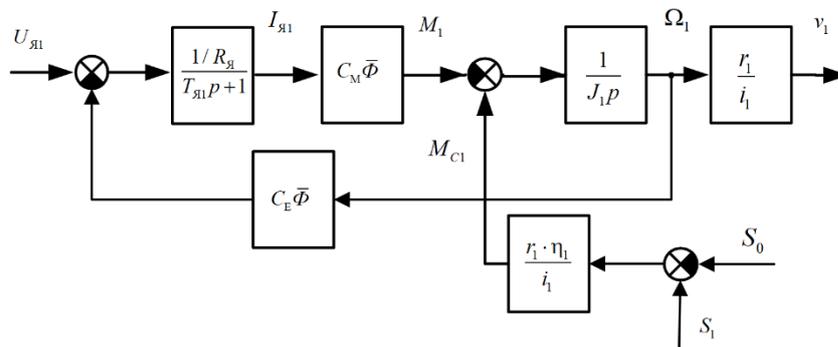


Рисунок 3.16 – Структурная схема математической модели натяжного устройства с двигателем постоянного тока

Отметим, что натяжные устройства с двигателями постоянного тока хотя и не очень дорогие, но наличие коллектора снижает надежность приводов и требует их периодического обслуживания.

### 3.2.4 *Сматывающее и натяжное устройства с асинхронным двигателем*

В связи с высокими требованиями к системам регулирования по точности отработки заданных значений натяжения, в таких системах целесообразно применять асинхронные двигатели (АД) с векторным управлением. С целью обеспечения максимальной перегрузочной способности АД и высокой динамики при регулировании управление

рекомендуется осуществлять в первой зоне регулирования скоростей с поддержанием потокосцепления ротора на номинальном уровне.

Анализ существующих вариантов математического описания асинхронного двигателя при векторном управлении [138-143], показал, что наличие в АД многофазной системы переменных напряжений и токов значительно усложняет математическое описание переходных процессов в них и приводит к большому количеству взаимосвязанных переменных, участвующих в формировании электромагнитного момента [138].

Рассматривая АД как идеализированную машину с линейной характеристикой намагничивания [138-143] запишем уравнения связей между потокосцеплениями  $\Psi_{1a}, \Psi_{1b}, \Psi_{1c}, \Psi_{2a}, \Psi_{2b}, \Psi_{2c}$  и токами  $i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}, i_{2a}, i_{2b}, i_{2c}$  [140]:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{1a} &= L_{1a}i_{1a} + L_{1a,1b}(\alpha_p)i_{1b} + L_{1a,1c}(\alpha_p)i_{1c} + L_{1a,2a}(\alpha_p)i_{2a} + L_{1a,2b}(\alpha_p)i_{2b} + L_{1a,2c}(\alpha_p)i_{2c}; \\ \Psi_{1b} &= L_{1b,1a}(\alpha_p)i_{1a} + L_{1b}i_{1b} + L_{1b,1c}(\alpha_p)i_{1c} + L_{1b,2a}(\alpha_p)i_{2a} + L_{1b,2b}(\alpha_p)i_{2b} + L_{1b,2c}(\alpha_p)i_{2c}; \\ \Psi_{1c} &= L_{1c,1a}(\alpha_p)i_{1a} + L_{1c,1b}(\alpha_p)i_{1b} + L_{1c}i_{1c} + L_{1c,2a}(\alpha_p)i_{2a} + L_{1c,2b}(\alpha_p)i_{2b} + L_{1c,2c}(\alpha_p)i_{2c}; \\ \Psi_{2a} &= L_{2a,1a}(\alpha_p)i_{1a} + L_{2a,1b}(\alpha_p)i_{1b} + L_{2a,1c}(\alpha_p)i_{1c} + L_{2a}i_{2a} + L_{2a,2b}(\alpha_p)i_{2b} + L_{2a,2c}(\alpha_p)i_{2c}; \\ \Psi_{2b} &= L_{2b,1a}(\alpha_p)i_{1a} + L_{2b,1b}(\alpha_p)i_{1b} + L_{2b,1c}(\alpha_p)i_{1c} + L_{2b,2a}(\alpha_p)i_{2a} + L_{2b}i_{2b} + L_{2b,2c}(\alpha_p)i_{2c}; \\ \Psi_{2c} &= L_{2c,1a}(\alpha_p)i_{1a} + L_{2c,1b}(\alpha_p)i_{1b} + L_{2c,1c}(\alpha_p)i_{1c} + L_{2c,2a}(\alpha_p)i_{2a} + L_{2c,2b}(\alpha_p)i_{2b} + L_{2c}i_{2c}, \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

где  $L_{1a}, L_{1b}, L_{1c}, L_{2a}, L_{2b}, L_{2c}$  – собственные индуктивности обмоток статора и ротора двигателя;  $L_{1a,1b}(\alpha_p) \dots L_{1c,1b}(\alpha_p)$  – взаимные индуктивности между соответствующими фазами, являющиеся функцией угла поворота ротора  $\alpha_p$  [138].

Анализируя уравнения (3.11), видим, что потокосцепление каждой обмотки зависит также от токов в других обмотках, и эти зависимости учитываются через взаимную индуктивность, которая является переменной и зависит от угла поворота ротора  $\alpha_p$ .

Несмотря на полное и строгое математическое описание, использование уравнений (3.11) на практике и при моделировании встречает серьезные трудности из-за большого количества взаимосвязанных уравнений (их 12) и количество коэффициентов (30 штук). Кроме этого, в уравнениях (3.11) присутствуют переменные коэффициенты взаимоиндукции между обмотками

статора и ротора, которые изменяются в зависимости от угла поворота ротора  $\alpha_p$  относительно статора [141].

Поэтому при составлении математического описания машин переменного тока рекомендуется использовать метод обобщенного пространственного вектора [138-143], суть которого заключается в том, что совокупное действие всех трех фаз выражается одним вектором. Благодаря этому удастся существенно сократить количество вышеприведенных уравнений, а также связать их в единую систему с векторными переменными состояния [140].

Наиболее удобным является использование модели двухфазной обобщенной электрической машины (ОЭМ), которая позволяет выразить векторные переменные через проекции на соответствующие оси декартовой системы координат.

При использовании модели двухфазной ОЭМ можно значительно сократить количество уравнений, описывающих электромагнитные процессы [138]. Однако коэффициенты взаимной индукции по-прежнему являются переменными, а их значения зависят от угла поворота ротора  $\varphi$  [138].

Для записи дифференциальных уравнений математической модели АД целесообразно использовать систему координат  $(x - y)$ , вращающуюся относительно неподвижной системы координат статора  $(\alpha_p - \beta)$  с частотой  $\omega_1$ , которая позволяет представить переменные токи, напряжения и потокосцепления в виде сигналов с постоянной амплитудой [138-143]. Систему дифференциальных уравнений, описывающую АД с векторным управлением, можно записать относительно переменных тока статора  $i_1$  и потокосцепления ротора  $\Psi_2$  в виде:

$$\left. \begin{aligned} i_{1x} &= \frac{1/R'_1}{T'_1 p + 1} \left( u_{1x} + \sigma L_1 \omega_1 i_{1y} + K_2 \omega \psi_{2y} + \frac{K_2}{T_2} \psi_{2x} \right); \\ i_{1y} &= \frac{1/R'_1}{T'_1 p + 1} \left( u_{1y} - \sigma L_1 \omega_1 i_{1x} - K_2 \omega \psi_{2x} + \frac{K_2}{T_2} \psi_{2y} \right); \\ \psi_{2x} &= \frac{L_m}{\bar{T}_2 p + 1} \left( i_{1x} + \frac{1}{K_2 R_2} (\omega_1 - \omega) \psi_{2y} \right); \\ \psi_{2y} &= \frac{L_m}{\bar{T}_2 p + 1} \left( i_{1y} - \frac{1}{K_2 R_2} (\omega_1 - \omega) \psi_{2x} \right). \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

При этом вычисление электромагнитного момента АД целесообразно осуществлять по выражению [138-143]:

$$M_1 = \frac{3}{2} Z_p K_2 (\psi_{2x} i_{1y} - \psi_{2y} i_{1x}). \quad (3.13)$$

Здесь  $K_2 = L_m/L_2$  – коэффициент электромагнитной связи ротора;  $T'_1 = \sigma L_1/R'_1$  – электромагнитная постоянная времени цепи статора;  $R'_1 = R_1 + K_2^2 R_2$  – эквивалентное активное сопротивление двигателя;  $\bar{T}_2 = L_2/R_2$  – электромагнитная постоянная времени ротора;  $\sigma = 1 - L_m^2/(L_1 L_2)$  – общий коэффициент рассеяния двигателя [141];  $R_1$  – активное сопротивление фазы статорной обмотки,  $R_2$  – активное сопротивление фазы роторной обмотки;  $L_m$  – коэффициент взаимной индуктивности;  $L_1 = L_{\sigma 1} + L_m$ ,  $L_2 = L_{\sigma 2} + L_m$  – полные индуктивности обмоток статора и ротора АД;  $L_{\sigma 1}$ ,  $L_{\sigma 2}$  – индуктивности рассеяния статора и ротора;  $\omega = Z_p \Omega_d$  – электрическая скорость вращения ротора;  $Z_p$  – число пар полюсов двигателя;  $\omega_1$  – частота вращения поля двигателя.

В современных ЭП с векторным управлением, для независимого управления составляющими электромагнитного момента, осуществляется ориентация вещественной оси  $x$  вращающейся системы координат  $(x - y)$  по направлению вектора потокосцепления ротора  $\psi_2$  [138-143]. В результате проекция потокосцепления ротора на мнимую ось  $y$  становится равной нулю

( $\psi_{2y} = 0$ ), и для исследования электромагнитных процессов в АД допустимо использовать математическую модель в упрощенном виде [138]:

$$\left. \begin{aligned} i_{1x} &= \frac{1/R_1'}{T_1'p+1} \left( u_{1x} + \sigma L_1 \omega_1 i_{1y} + \frac{K_2}{T_2} \psi_{2x} \right); \\ i_{1y} &= \frac{1/R_1'}{T_1'p+1} \left( u_{1y} - \sigma L_1 \omega_1 i_{1x} - K_2 \omega \psi_{2x} \right); \\ \psi_{2x} &= \frac{L_m}{T_2 p + 1} i_{1x}; \\ M_1 &= \frac{3}{2} Z_p K_2 \psi_{2x} i_{1y}; \\ \omega &= Z_p \Omega_1; \\ \Omega_1 &= \frac{1}{J_1 p} (M_1 - M_c). \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

Структурная схема математической модели АД при векторном управлении, в соответствии с уравнением (3.14), приведена на рисунке 3.17.

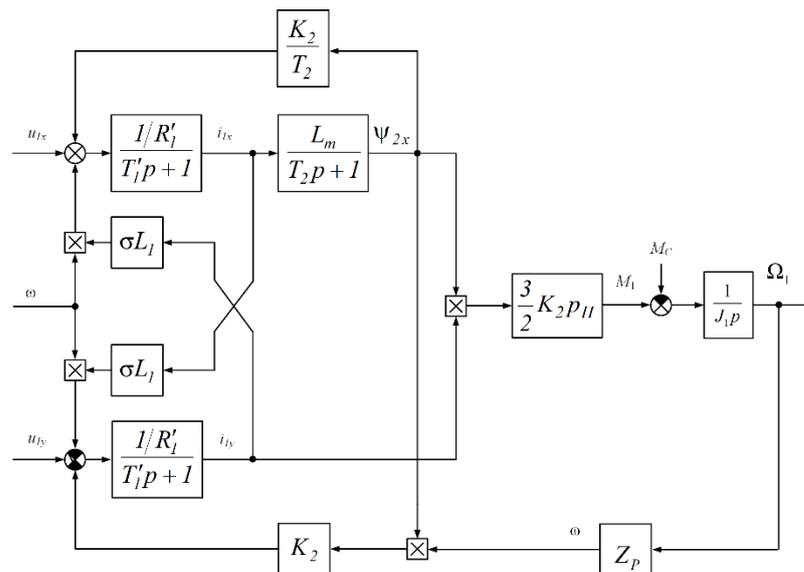


Рисунок 3.17 – Структурная схема математической модели АД при векторном управлении

Полученная математическая модель АД с короткозамкнутым ротором отражает основные силовые взаимодействия между электрическими переменными при векторном управлении. Входными переменными модели являются проекции вектора напряжения статора, электрическая скорость вращения поля статора и механическая скорость вращения вала двигателя [141].

Следует отметить, что в электромагнитных контурах тока статора имеется четыре перекрестные связи. Поэтому для получения высокого быстродействия при управлении электромагнитным моментом АД система управления ЭП должна осуществлять эффективную их компенсацию [138-143].

Структурные схемы математической модели устройства смотки ленты с бобины и натяжного устройства с АД при векторном управлении, соответствующие уравнениям (3.14), приведены на рисунках 3.18, 3.19.

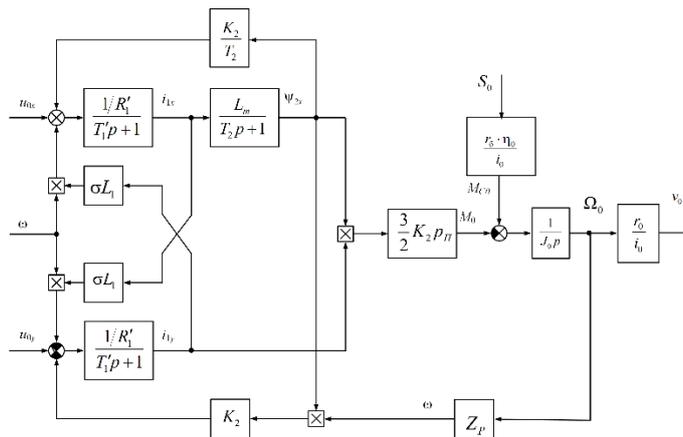


Рисунок 3.18 – Структурная схема математической модели устройства смотки ленты с бобины с АД при векторном управлении

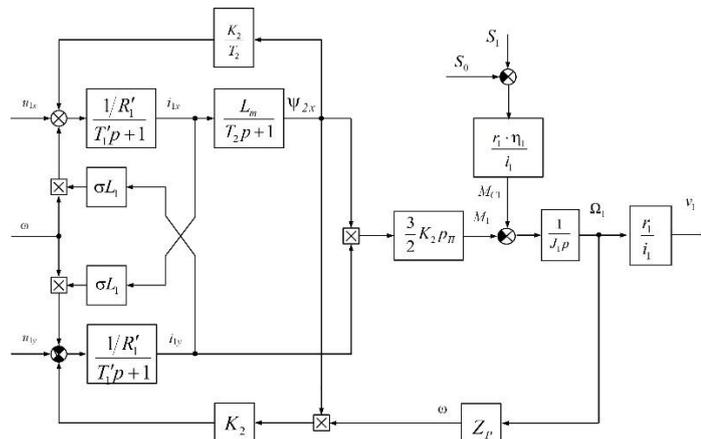


Рисунок 3.19 – Структурная схема математической модели натяжного устройства с АД при векторном управлении

Натяжные устройства с асинхронными двигателями с векторным управлением по многим показателям проигрывают синхронным двигателям с постоянными магнитами с векторным управлением.

### 3.2.5 Сматываемые и натяжные устройства с синхронным двигателем

При математическом описании процессов, происходящих в синхронном двигателе с постоянными магнитами (СДПМ) целесообразно использовать метод пространственного вектора [139-141].

При построении математической модели были приняты следующие допущения [138-143]:

- отсутствуют насыщение магнитной цепи, потери в стали, эффект вытеснения тока;
- обмотки статора симметричны;
- индуктивность рассеяния не зависит от положения ротора в пространстве.

Уравнения синхронной машины с постоянными магнитами также рассмотрим в ортогональной синхронной системе координат  $(d - q)$ , ось  $d$  которой ориентирована по магнитной оси ротора [138].

Уравнения статора в векторной форме имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \vec{u}_1 &= R_1 \vec{i}_1 + p\vec{\Psi}_1 + j\omega\vec{\Psi}_1; \\ \vec{\Psi}_1 &= L_{\sigma 1} \vec{i}_1 + \vec{\Psi}_f, \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

где  $p = d/dt$  – оператор дифференцирования;  $R_1$  – активное сопротивление обмотки статора;  $L_{\sigma 1}$  – индуктивность рассеяния обмотки статора;  $\Psi_f$  – потокосцепление, создаваемое постоянными магнитами на роторе двигателя;  $\omega$  – электрическая скорость вращения ротора;  $\vec{i}_1 = i_{1d} + ji_{1q}$ ,  $\vec{\Psi}_1 = \Psi_{1d} + j\Psi_{1q}$ ,  $\vec{u}_1 = u_{1d} + ju_{1q}$ ,  $\vec{\Psi}_f = \Psi_f$  – результирующие векторы соответствующих переменных, записанные в комплексной форме.

Записывая уравнение (3.15) относительно проекций векторов на координатные оси  $(d - q)$ , получим систему дифференциальных уравнений, описывающую электромагнитные процессы в СДПМ:

$$\left. \begin{aligned} p\Psi_{1d} &= u_{1d} - R_1 i_{1d} + \omega \Psi_{1q}; \\ p\Psi_{1q} &= u_{1q} - R_1 i_{1q} - \omega \Psi_{1d}; \\ i_{1d} &= \frac{1}{L_{\sigma 1}} (\Psi_{1d} - \Psi_f); \\ i_{1q} &= \frac{1}{L_{\sigma 1}} \Psi_{1d}. \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

Дополнив систему уравнений (3.16) выражениями

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \frac{3}{2} Z_p (\Psi_{1d} i_{1q} - \Psi_{1q} i_{1d}); \\ \omega &= Z_p \Omega_1; \\ \Omega_1 &= \frac{1}{J_1 p} (M_1 - M_{C1}), \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

получим структурную схему математической модели СДПМ (рисунок 3.20).

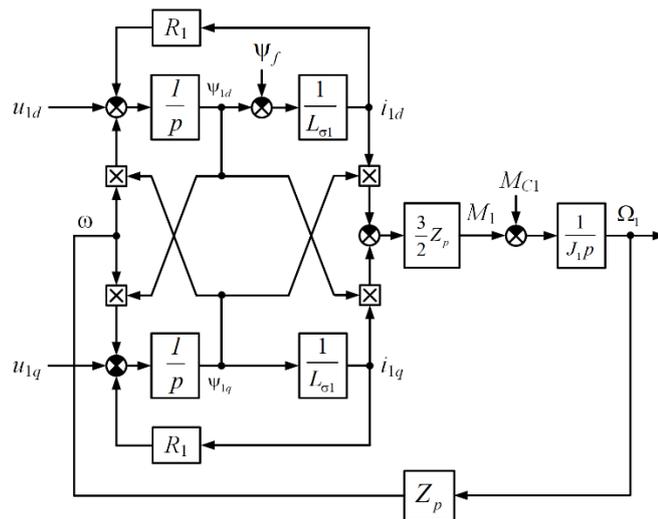


Рисунок 3.20 – Математическая модель СДПМ

При синтезе систем управления с натяжным устройством с использованием частотно – регулируемого СДПМ с векторным управлением, запишем систему уравнений (3.16), (3.17) в виде [138]:

$$\left. \begin{aligned}
 i_{1d} &= \frac{1/R_1}{T_1 p + 1} (u_{1d} + \omega \Psi_{1q}); \\
 i_{1q} &= \frac{1/R_1}{T_1 p + 1} (u_{1q} + \omega \Psi_{1d}); \\
 \Psi_{1d} &= L_{\sigma 1} i_{1d} + \Psi_f; \\
 \Psi_{1q} &= L_{\sigma 1} i_{1q}; \\
 M_1 &= \frac{3}{2} Z_p \Psi_f i_{1q}; \\
 \omega &= Z_p \Omega_1; \\
 \Omega_1 &= \frac{1}{J_1 p} (M_1 - M_{C1}).
 \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

Структурная схема СДПМ при векторном управлении приведена на рисунке 3.21.

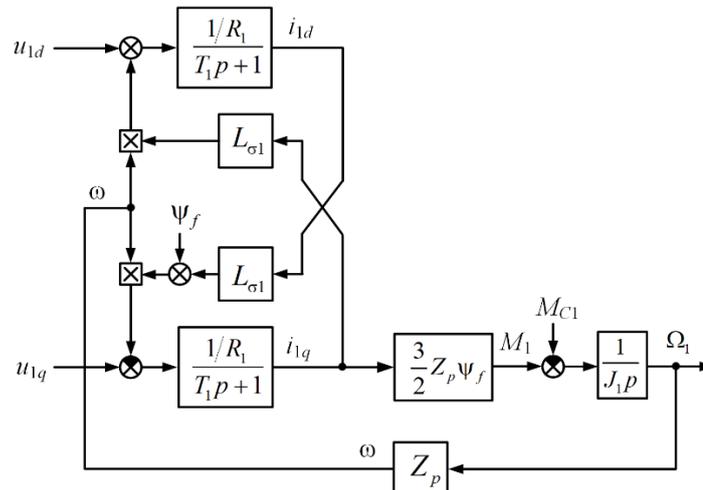


Рисунок 3.21 – Структурная схема СДПМ при векторном управлении

На основании приведенных математических моделей составим структурные схемы математической модели устройства смотки ленты с бобины и натяжного устройства с СД при векторном управлении, приведённые на рисунках 3.22, 3.23.

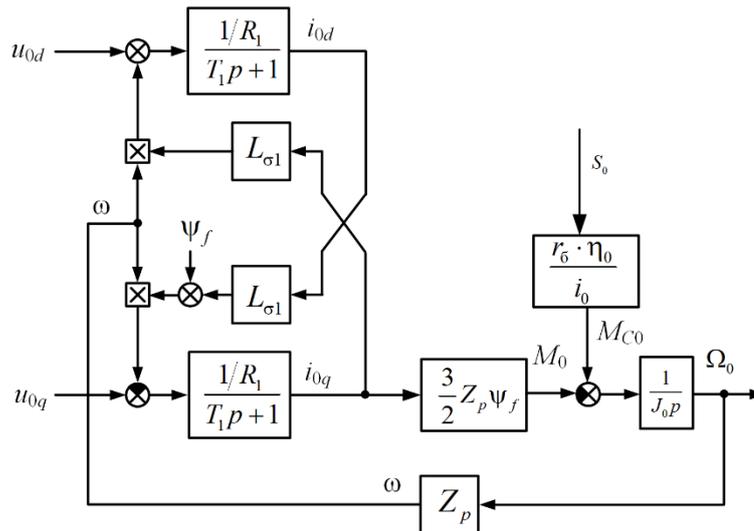


Рисунок 3.22 – Структурная схема математической модели устройства смотки ленты с бобины с СД при векторном управлении

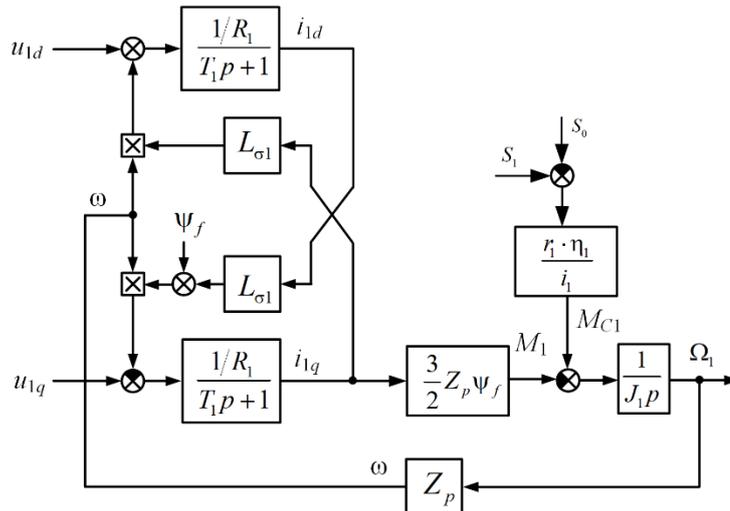


Рисунок 3.23 – Структурная схема математической модели натяжного устройства с СДПМ при векторном управлении

Натяжные устройства с синхронными двигателями с постоянными магнитами с векторным управлением самые дорогие из всех рассматриваемых, имеют наилучшие характеристики. Поэтому такие приводы рекомендуется применять при намотке изделий из композиционных материалов к которым предъявляются особые требования по условиям эксплуатации изготавливаемых конструкций [144,145].

### *3.2.6 Сматывающее и натяжное устройства с вентильно-индукторным двигателем*

Вентильно-индукторные двигатели (ВИД) появились сравнительно недавно, в начале 80-х годов прошлого века. ВИД - это новый тип электромеханического преобразователя, объединяющего в себе свойства электрической машины и интегрированной системы регулирования [147-162].

У ВИД существуют ряд преимуществ по сравнению с обычными двигателями:

- отсутствуют постоянные магниты, усложняющие технологию производства и существенно повышающие цену всего электропривода;

- отсутствует операция заливки ротора, неизбежная при производстве асинхронных двигателей;

- обмотки (катушки) статора хорошо приспособлены к машинному производству;

- простая сборка двигателя;

- пропитка осуществляется только собственно катушек, а не статора в целом, как у других типов машин, что также снижает долю технологических затрат;

- возможность работы в агрессивных средах;

- низкий момент инерции;

- низкие потери в роторе;

- низкая себестоимость ВИД;

- высокая ремонтпригодность.

Несмотря на все достоинства ВИД, у него существуют также и недостатки:

- наличие пульсаций электромагнитного момента;

- высокий уровень шумов и вибрации;

- плохое использование стали.

Номенклатура маломощных тихоходных ВИД ограничена, а отвечающие требованиям приводы представлены в виде мотор редукторов, требующих дополнительного обслуживания и имеющих большие габариты. Для ряда электроприводов систем натяжения целесообразно использовать новый, вентильно-индукторный привод.

Электромагнитные процессы в фазе вентильно-индукторной электрической машины (ЭМ) описываются с помощью уравнения составленного на основе закона электромагнитной индукции [149]:

$$\frac{d\Psi_{\phi}}{dt} = U_{\phi} - I_{\phi}R_{\phi}, \quad (3.19)$$

где  $\Psi_{\phi}$  и  $R_{\phi}$  – потокосцепление и активное сопротивление фазы;  $U_{\phi}$  и  $I_{\phi}$  – напряжение и ток фазы.

Потокосцепление фазы можно представить в виде произведения индуктивности фазы и ее тока. Тогда производная от потокосцепления по времени с учетом правила дифференцирования произведения может быть записана в виде [149]:

$$\frac{d\Psi_{\phi}}{dt} = \frac{d(L_{\phi}I_{\phi})}{dt} = L_{\phi} \frac{dI_{\phi}}{dt} + I_{\phi} \frac{dL_{\phi}}{dt}, \quad (3.20)$$

где  $L_{\phi} = \frac{d\Psi_{\phi}}{dI_{\phi}}$  – дифференциальная индуктивность фазы ЭМ.

Умножим числитель и знаменатель второго члена в правой части (3.20) на дифференциал вращения  $d\gamma$ , после преобразований, это выражение принимает вид:

$$\frac{d\Psi_{\phi}}{dt} = L_{\phi} \frac{dI_{\phi}}{dt} + \omega \frac{\partial \Psi_{\phi}}{\partial \gamma} \Big|_{I_{\phi}=\text{const}} = L_{\phi} \frac{dI_{\phi}}{dt} + E_{\phi}, \quad (3.21)$$

где  $\omega = \frac{d\gamma}{dt}$  – угловая скорость вращения ротора;  $\frac{\partial \Psi_{\phi}}{\partial \gamma} \Big|_{I_{\phi}=\text{const}}$  – производная

от потокосцепления по углу поворота при неизменном токе фазы;

$E_{\phi} = \omega \frac{\partial \Psi_{\phi}}{\partial \gamma} \Big|_{I_{\phi}=\text{const}}$  – ЭДС движения.

После подстановки (3.21) в (3.19) и преобразований дифференциальное уравнение относительно тока фазы, приведенное к форме Коши принимает вид:

$$\frac{dI_{\phi}}{dt} = \frac{1}{L_{\phi}} (U_{\phi} - R_{\phi} I_{\phi} - E_{\phi}), \quad (3.22)$$

где  $I_{\phi}$ ,  $U_{\phi}$ ,  $E_{\phi}$  являются функциями времени,  $E_{\phi}$ , кроме того, зависит от угловой скорости вращения ротора, а индуктивность  $L_{\phi}$  зависит от положения ротора и от тока фазы (в случае насыщения магнитной системы).

С учетом принятых допущений и уравнения (3.22) расчетная схема рассматриваемой вентильно-индукторной ЭМ имеет вид, приведенный на рисунке 3.24 [149].

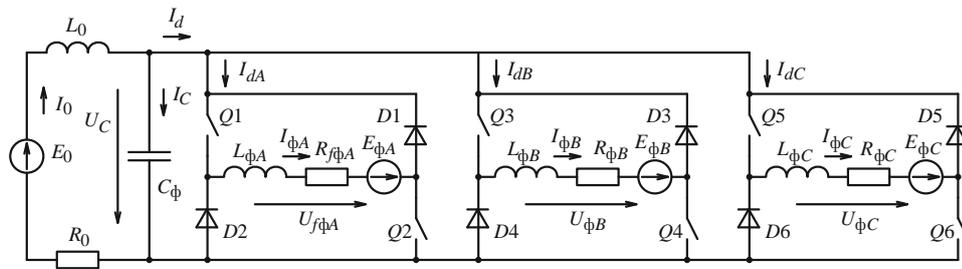


Рисунок 3.24 – Расчетная схема вентильно-индукторной ЭМ

Электромагнитные процессы в схеме, приведенной на рисунке 3.24, с учетом (3.21) описываются системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_{\phi A}}{dt} &= \frac{1}{L_{\phi A}(I_{\phi A}, \gamma)} (U_{\phi A} - R_{\phi A} I_{\phi A} - E_{\phi A}); \\ \frac{dI_{\phi B}}{dt} &= \frac{1}{L_{\phi B}(I_{\phi B}, \gamma)} (U_{\phi B} - R_{\phi B} I_{\phi B} - E_{\phi B}); \\ \frac{dI_{\phi C}}{dt} &= \frac{1}{L_{\phi C}(I_{\phi C}, \gamma)} (U_{\phi C} - R_{\phi C} I_{\phi C} - E_{\phi C}); \\ \frac{dI_0}{dt} &= \frac{1}{L_0} (E_0 - R_0 I_0 - U_C); \\ \frac{dU_C}{dt} &= \frac{1}{C_{\phi}} (I_0 - (I_{dA} + I_{dB} + I_{dC})). \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Здесь обозначено:  $E_0$  – ЭДС источника питания вентильно-индукторного двигателя;  $L_0$  – индуктивность источника питания ВИД;  $C_\Phi$  – емкость конденсатора фильтра источника питания ВИД;  $U_C$  – напряжение на выходе источника питания вентильно-индукторного двигателя;  $I_0$  – ток источника питания вентильно-индукторного двигателя;  $I_{dA,B,C}$  – ток фаз  $A, B, C$  вентильно-индукторного двигателя.

В соответствии с описанным выше алгоритмом формирования напряжения и принятыми допущениями, величина напряжения, приложенного к фазе, определяется в соответствии со следующими условиями [149]:

$$U_\Phi = \begin{cases} U_C, & \text{если } \left( I_\Phi \in \left[ 0, I_m - \frac{\Delta I}{2} \right] \right) \vee \left( I_\Phi \in \left[ I_m - \frac{\Delta I}{2}, I_m + \frac{\Delta I}{2} \right] \right) \wedge \left( \frac{dI_\Phi}{dt} > 0 \right); \\ 0, & \text{если } \left( I_\Phi \in \left[ I_m - \frac{\Delta I}{2}, I_m + \frac{\Delta I}{2} \right] \right) \wedge \left( \frac{dI_\Phi}{dt} \leq 0 \right); \\ -U_C, & \text{если } (I_\Phi = 0) \wedge (I_\Phi > 0), \end{cases} \quad (3.24)$$

Токи, потребляемые фазами от звена постоянного тока, при используемом принципе формирования тока фазы определяются в соответствии с выражением:

$$I_{dA,B,C} = \text{sign}(U_{\Phi A,B,C}) I_{\Phi A,B,C},$$

$$\text{где } \text{sign}(x) = \begin{cases} -1, & \text{если } x < 0; \\ 0, & \text{если } x = 0; \\ 1, & \text{если } x > 0; \end{cases} \text{ – функция выделения знака.}$$

В систему уравнений (3.23), кроме параметров элементов звена постоянного тока, входят параметры исследуемой ЭМ – активное сопротивление, индуктивность и потокосцепление фазы. Эти величины, исходя из целей моделирования, необходимо определять расчетным путем, по результатам решения серии задач расчета электромагнитного поля при различных значениях тока фазы и положениях ротора [149].

Для расчёта параметров вентильно-индукторного электродвигателя можно воспользоваться методом, позволяющим представить электромагнитные процессы в виде систем магнитосвязанных контуров,

соответствующих обмоткам, взаимное положение которых друг относительно друга изменяется в пространстве [147-162]. Для расчёта параметров и характеристик статических магнитных полей использован пакет программ FEMM.

На рисунке 3.25 представлен суммарный момент, развиваемый ВИД при симметричной одиночной коммутации [149].

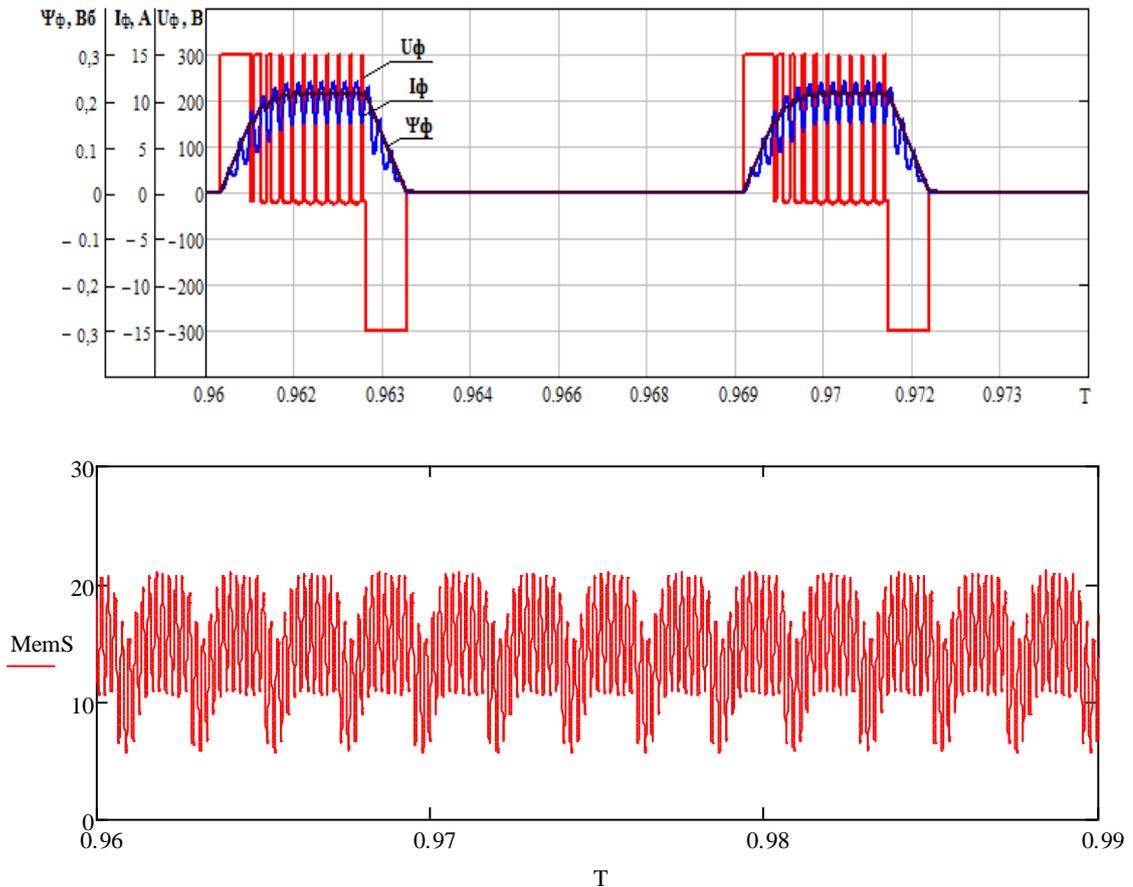


Рисунок 3.25 – Процессы, протекающие в фазе двигателя и суммарный момент развиваемый ВИД при симметричной одиночной коммутации

На рисунке 3.25 обозначено:  $U_\phi$  и  $I_\phi$  – напряжение и ток в фазе двигателя;  $\Psi_\phi$  – потокосцепление фазы двигателя; MemS – суммарный момент, развиваемый двигателем.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что момент ВИД не является величиной постоянной и характеризуется пульсациями. Однако снизить пульсации момента ВИД можно за счет изменения угла

коммутации фаз и изменения ширины импульсов от преобразователя. В результате экспериментальным путем была подобрана оптимальная ширина импульса, которая составила  $100^\circ$  при увеличении или уменьшении ширины импульса пульсации увеличивались, что негативно сказывалось на стабильности работы.

Полный учет процессов, происходящих в ВИД, чрезвычайно сложен из-за несинусоидального графика изменения потока, автономности и дискретности работы фаз, взаимного влияния электромагнитных процессов, происходящих в фазах. Допущение об отсутствии влияния фаз позволяет без существенной потери в точности расчетов упростить математическое описание ВИД. При этом, предполагается, что источники напряжения не имеют пульсации. С учетом этих допущений в [159] предложена структурная схема ВИД (рисунок 3.26).

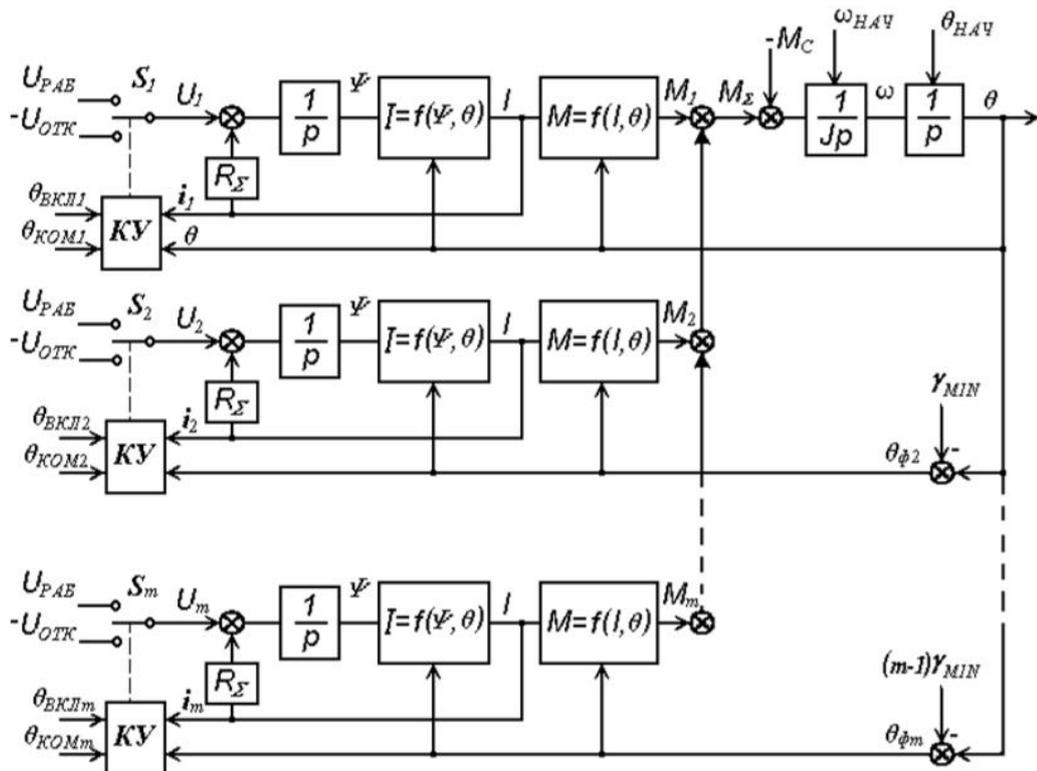


Рисунок 3.26 – Структурная схема ВИД

В этой модели каждая фаза представлена независимым фрагментом, состоящим из логического коммутирующего устройства КУ и ключа  $S_i$ , интегратора и блока преобразования потокосцепления в ток  $i = f(\Psi, \Theta)$ , охваченных отрицательной обратной связью через сопротивление фазы  $R$ , а также блока преобразования тока в момент  $M = f(i, \Theta)$ . Суммарный момент всех фаз  $M_\Sigma$  воздействует на механическую часть в виде двух интегрирующих звеньев, выходная координата которой  $\Theta$  используется в каждой фазе для управления процессом коммутации, а также в функциональных преобразователях. Сигнал тока фазы  $i$  присутствует на входе коммутирующего устройства КУ для того, чтобы в конце интервала отключения снять со входа интегратора напряжение  $-U_{\text{отк}}$  в момент спада тока до нуля. После этого происходит вычисление новых уставок углов управления для следующего цикла коммутации [159]:

$$\left. \begin{aligned} \Theta_{\text{вкл}}(k) &= \Theta_{\text{вкл}}(k-1) + \tau_R; \\ \Theta_{\text{откл}}(k) &= \Theta_{\text{откл}}(k-1) + \tau_R. \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

Структурная схема ВИП может быть представлена и с использованием координаты электрического угла  $\Theta_{\text{эл}}$ , связанного с механическим углом  $\Theta_{\text{мех}}$  соотношением  $\Theta_{\text{эл}} = Z_p \Theta_{\text{мех}} - 2\pi \text{INT}\left(\frac{Z_p \Theta_{\text{мех}}}{2\pi}\right)$ . В этом случае углы управления  $\Theta_{\text{вкл}}$  и  $\Theta_{\text{ком}}$  не будут изменяться, если при преобразовании  $\Theta_{\text{мех}}$  и  $\Theta_{\text{эл}}$  отбрасывать для  $k$ -го интервала коммутации целое число периодов  $2\pi(k-1)$ . Приведенная структурная схема учитывает все этапы цикла коммутации для каждой фазы и позволяет исследовать разнообразные переходные процессы: пуск, работу на установившейся скорости, приложение нагрузки, изменение углов управления. Однако она сложна, и если сделать допущение о достаточной инерционности механической части, позволяющей пренебречь изменением скорости на интервале работы одной фазы, все фазы идентичны и математическое описание их идентично, то структурная схема ВИП существенно упрощается (рисунок 3.27) [159].

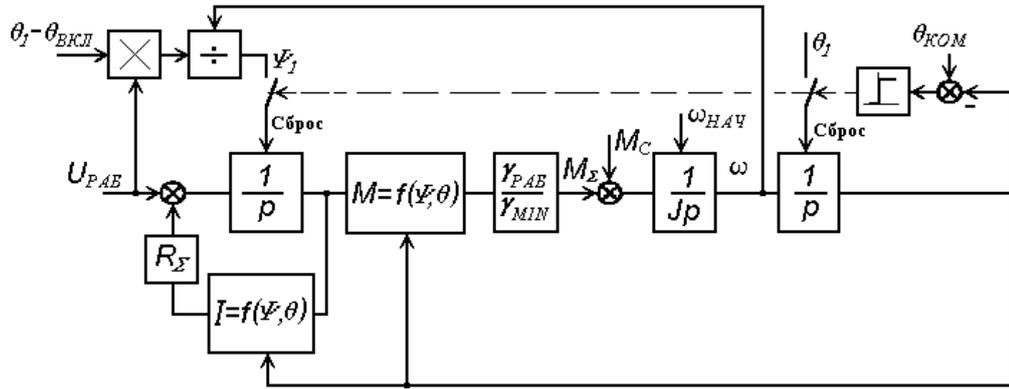


Рисунок 3.27 – Упрощенная структурная схема ВИД

Математическое описание упрощенной модели ВИП для одной фазы имеет вид [159]:

$$\left. \begin{aligned} M_1 - M_{CI} &= J_1 \frac{d\Omega_1}{dt}; \\ U &= i \cdot R + \frac{d\Psi}{dt}; \\ \frac{d\Upsilon}{dt} &= \Omega_1; \\ M_1 &= \frac{\partial W_{МАГ}}{\partial \Upsilon}; \\ W_{МАГ} &= \frac{i \cdot \Psi}{2}; \\ \Psi &= L(\Upsilon) \cdot i, \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

где  $\Upsilon$  – угол поворота ротора;  $\Psi$  – потокосцепление обмотки;  $L$  – индуктивность обмотки;  $W_{МАГ}$  – энергия магнитного поля.

После ряда преобразований получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{i^2 k_L}{2} - M_{CI} &= J_1 \frac{d\Omega_1}{dt}; \\ U &= i \cdot R + \Omega_1 \cdot i \cdot k_L. \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

Из уравнения (3.27) после линеаризации, получим передаточную функцию ВИД:

$$W_{ВИД} = \frac{\frac{1}{i_0 \cdot k_L}}{\frac{J_1}{2 \cdot (i_0 \cdot k_L)^2 \cdot (R + W_0 \cdot k_L)} \cdot p + 1} = \frac{k_{ВИД}}{T_{ВИД} \cdot p + 1}, \quad (3.28)$$

где  $R = R_e + R_f$  – полное сопротивление обмотки фазы статора;

$R_e$  – сопротивление источника питания;  $R_f$  – сопротивление обмотки статора;

$$k_{\text{вид}} = \frac{1}{i_0 \cdot k_L}; \quad T_{\text{вид}} = \frac{J_1}{2 \cdot (i_0 \cdot k_L)^2 \cdot (R + W_0 \cdot k_L)}.$$

Анализируя приведенные выше данные по вентильно-индукторному двигателю следует отметить, что при всех положительных характеристиках, а именно, высокой надежности, дешевизне, простоте конструкции и управления, у них существует пульсация электромагнитного момента. В [160–162] анализируются причины появления пульсаций электромагнитного момента в вентильно-индукторном двигателе и приводятся рекомендации по их снижению за счет управления режимами коммутации фаз двигателя. При этом отмечается, что пульсации момента могут быть снижены до 7–8 %.

Для подтверждения технических характеристик вентильно-индукторного привода и принятия окончательного решения об области его рационального использования нами был произведен расчет ВИД со следующими параметрами:

- максимальная частота вращения  $n = 40$  об/мин, с диапазоном изменения частоты вращения приводного вала в пределах от 5 до 40 об/мин;
- максимальный момент на валу ВИД  $M = 10$  Нм;
- работа в условиях агрессивной окружающей среды;
- взрывозащищённое и химостойкое исполнение;
- малые пульсаций момента на валу;
- стабильность характеристик;
- малые габаритные размеры привода: диаметр - 200 мм; длина - 125 мм.

На данный двигатель разработана проектная документация, он изготовлен и успешно испытан в течение года на прядильной машине ПН- 300- В2 ОАО Каменскволокно, г. Каменск Шахтинский.

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

- двигатель имеет высокую надежность;
- обеспечивает заданный диапазон регулирования частоты вращения;
- обеспечивает необходимый момент на валу двигателя;
- имеет пульсации электромагнитного момента.

Наличие такой пульсации момента, можно предполагать, не будет оказывать существенного влияния на натяжение “мокрого” наматываемого материала. Однако, здесь возникают трудности с адекватным математическим описанием вентильно-индукторного двигателя. После его появления приводы, оснащённые вентильно-индукторными двигателями, рекомендуется использовать при намотке изделия “мокрым” способом. В настоящее время для этой цели следует использовать синхронные двигатели с постоянными магнитами или двигатели постоянного тока.

При намотке изделий из “сухой” композиционной ленты даже небольшие пульсации момента вызывают достаточно большие пульсации натяжения. Поэтому данный двигатель использовать здесь нецелесообразно.

### ***3.2.7 Методика выбора мощности привода натяжного устройства при “сухой” намотке***

При синтезе электротехнической системы натяжения большое значение имеет правильный выбор мощности привода исполнительного механизма. В случае, если мощность привода выбрана неправильно, система может не обеспечить заданного быстродействия или оказаться дороже, чем необходимо, и потреблять большее количество энергии.

До настоящего времени электродвигатель натяжного устройства выбирался из условия обеспечения заданного максимального натяжения композиционной [56, 102, 103] ленты без учета специфических особенностей наматываемого изделия. Однако, при намотке изделия сложной геометрической формы в электроприводе возникают динамические моменты, вызывающие дополнительный нагрев двигателя. Проверку выбранного

привода на соответствие требуемому быстродействию ЭТС натяжения можно было осуществить лишь на одной из последних стадий проектирования – при моделировании системы регулирования натяжения. В случае, если привод был выбран неправильно, необходимо было повторить весь расчет заново.

Выбор мощности привода натяжных устройств предлагается производить по следующей методике [163,164], учитывающей особенности работы привода натяжных устройств при намотке изделий из композиционных материалов:

- рассчитать мощность привода исходя из условий намотки изделия при максимальном натяжении намотки, минимальном предварительном натяжении и максимальной линейной скорости намотки;

- проверить, обеспечит ли выбранный двигатель требуемые динамические показатели электротехнической системы. Если это не так, выбираем двигатель с большей мощностью;

- для процесса намотки наиболее сложного изделия на данном намоточном оборудовании найти эквивалентный момент, создаваемый двигателем и проверить, обеспечит ли выбранный двигатель условия нагрева. Если нет, то выбирать двигатель с большей мощностью.

Поскольку условием выбора двигателя является нагрев, в качестве эквивалентного момента целесообразно выбрать среднеквадратическое значение момента за один рабочий цикл, определяемое по нагрузочной диаграмме.

Перед рассмотрением всех этапов предложенной методики остановимся на возможности и необходимости учета сил трения в натяжном устройстве. Зависимость реальной силы трения от скорости движения вала двигателя является нелинейной и неоднозначной [143].

Для определения мощности привода в процессе намотки воспользуемся выражениями (3.3). Момент на валу тормозного устройства в установившемся режиме и его частота вращения равны:

$$\left. \begin{aligned} M_{Cl} &= \frac{r_1 \cdot \eta_1}{i_1} (S_1 - S_0) + M_{TP}; \\ \Omega_1 &= \frac{i_1}{r_1} v_1. \end{aligned} \right\}$$

Здесь  $M_{TP}$  – усредненное значение момента трения в механизме натяжного устройства.

Момент трения  $M_{TP}$  складывается из двух составляющих: момента трения самого двигателя и момента трения редуктора. Известно, что момент трения двигателя является величиной нелинейной и не превышает обычно 3 % от номинального значения момента. Момент трения редуктора, как правило, указан в справочной литературе и поэтому известен. На рисунке 3.28 приведен график зависимости момента трения синхронного двигателя с постоянными магнитами фирмы Siemens 1FK7060-2AF71-1CH1 с номинальным моментом 4,7 Нм, номинальной скоростью вращения 314,16 рад/с, мощностью 1,5 кВт (пунктирная кривая) и второй график (сплошная кривая) – момент трения данного двигателя, работающего с планетарным редуктором фирмы Siemens SP100S-MF1-5-1G1-2S с передаточным числом редуктора 10.

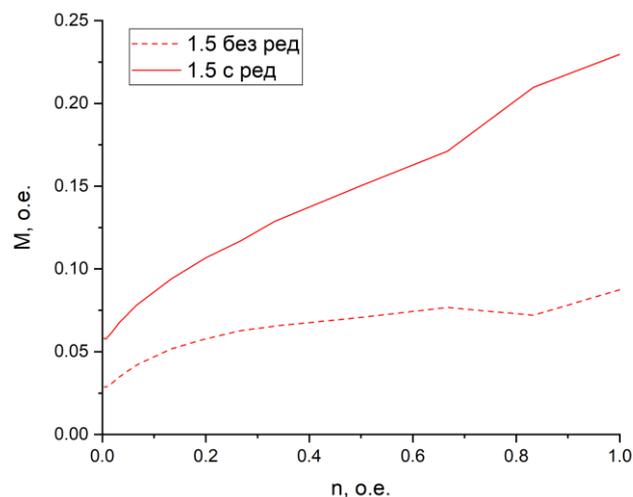


Рисунок 3.28 – Зависимость момента трения без редуктора и с редуктором

В каталожных данных на редуктор приведено значение среднего крутящего момента холостого хода. Для данного редуктора он равно 0,9 Нм,

что в относительных единицах составляет 0,19. Анализируя рисунок 3.28, нужно отметить, что как раз на эту величину увеличился суммарный момент трения двигателя и редуктора при номинальной скорости вращения двигателя. Таким образом, в дальнейшем рекомендовано при выборе мощности привода добавлять момент трения в редукторе и в конечном итоге увеличивать расчетную мощность на 5%.

Очевидно, что мощность привода натяжного устройства в статическом режиме равна:

$$P_1 = M_{Cl} \cdot \Omega_1 = (S_{1max} - S_{0min}) \cdot v_{1max} \cdot \eta_1, \quad (3.29)$$

где  $S_{1max}$  – максимальное значение натяжения, с которым лента наматывается на изделие (точнее максимальное значение натяжения, на которое рассчитан данный намоточный станок);  $S_{0min}$  – минимальное значение натяжения, с которым лента сматывается с бобины;  $v_{1max}$  – максимальное значение скорости намотки ленты на изделие.

Полученное значение  $P_1$  увеличиваем за счет действия сил трения на 3–5 %.

Полученные выражения позволяют рассчитать мощность привода натяжного устройства в статическом режиме, максимальный момент на валу привода, но не учитывают вопросы его динамики.

Для решения поставленной задачи рассмотрим ЭТС натяжения композиционного материала, имеющую внутренний контур тока. Решим задачу о выборе мощности привода натяжных устройств так, чтобы система смогла перейти из одного состояния  $S_1(0), \frac{dS_1(0)}{dt}$  в другое  $S_1(t_1), \frac{dS_1(t_1)}{dt}$  за заданное время  $t_1$ . Для решения поставленной задачи получим аналитические выражения, связывающие требуемые динамические характеристики системы регулирования натяжения с максимально допустимым моментом электропривода и моментом его инерции.

Примем следующие допущения.

1. Во время переходного процесса момент или ток привода натяжного устройства – величина постоянная и равна своему максимальному значению.

2. Справедливы допущения, сделанные при получении уравнений, описывающих динамические свойства композиционной ленты и приводных устройств.

3. За время работы токового ограничения длина тракта намотки остается постоянной.

Данные допущения не вносят существенных погрешностей в расчеты, так как в реальных системах регулирования при больших рассогласованиях ток исполнительного механизма быстро достигает своего максимального значения и затем поддерживается на заданном уровне токовой отсечкой или контуром тока. Влияние допущений, сделанных при описании неизменяемой части объекта регулирования, как показано в разделе 2, также незначительно. Влияние на расчеты изменения длины тракта намотки легче учесть исходя из самых тяжелых условий работы привода.

Для получения выражений, учитывающих динамические свойства привода натяжных устройств, подставим уравнения из системы (3.2) в упрощенное выражение (2.7)

$$\frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{v_2 - v_1 \cdot (1 + \varepsilon_1(t))}{l_1}, \quad (3.30)$$

получим:

$$\frac{d^2(S_1 - S_0)}{dt^2} + f_1(S_1, S_0) \left[ \frac{d(S_1 - S_0)}{dt} \right]^2 + g_1(S_1, S_0, v_2, t) \frac{d(S_1 - S_0)}{dt} + h_1(S_1, S_0, v_2, t) = 0, \quad (3.31)$$

$$\text{где } f_1(S_1, S_0) = \frac{1}{(EF + S_1 - S_0)}; \quad g_1(S_1, S_0, v_2, t) = \frac{EF \cdot v_2}{l_1(EF + S_1 - S_0)};$$

$$h_1(S_1, S_0, v_2, t, M) = -\frac{EF}{l_1} \frac{dv_2}{dt} + \frac{r_1}{l_1 \cdot J_1 \cdot i_1} (EF + S_1 - S_0) \left( \frac{r_1}{J_1 \cdot i_1} (S_1 - S_0) - M_{\max} \right); \quad M_{\max} - \text{момент,}$$

развиваемый приводом натяжного устройства при переходном процессе.

Нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка (3.31) при известных функциях  $v_2(t)$  и  $S_0(t)$  можно решить только численным методом.

Для получения достаточно простых выражений, с помощью которых можно было бы связывать требуемые динамические характеристики системы регулирования натяжения с максимально допустимым моментом электропривода и его моментом инерции примем допущения, что в процессе изменения натяжения момент на валу двигателя остается постоянным и равен:

$$M_{\Sigma} = M_{\max} - \frac{r_1 \cdot \eta_1}{i_1} (S_{1\max} - S_{0\min}), \quad (3.32)$$

где  $M_{\max}$  – максимальный (пусковой) момент на валу двигателя.

Введем новую переменную  $y(t) = 1 + \varepsilon_1$ . Подставим ее в (3.30) и после несложных преобразований получим:

$$\frac{dy}{dt} + \frac{v_1}{l_1} y = \frac{1}{l_1} v_2. \quad (3.33)$$

Введем дополнительные переменные:

$$y = U \cdot V. \quad (3.34)$$

Подставим выражение (3.34) в (3.33), получим:

$$\frac{dU}{dt} \cdot V + U \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{v_1}{l_1} \cdot U \cdot V = \frac{1}{l_1} v_2. \quad (3.35)$$

Из выражения (3.35) запишем:

$$\frac{dV}{dt} + \frac{v_1}{l_1} \cdot V = 0. \quad (3.36)$$

Отсюда имеем:

$$V = e^{-\frac{v_1}{l_1} t}. \quad (3.37)$$

Подставив значение (3.37) в (3.36), получим:

$$e^{-\frac{v_1}{l_1} t} \cdot \frac{dU}{dt} = \frac{1}{l_1} v_2. \quad (3.38)$$

Отсюда имеем:

$$dU = \frac{v_2}{l_1} \cdot e^{\frac{v_1 t}{l_1}} \cdot dt, \quad (3.39)$$

$$U = \int_0^{t_k} \frac{v_2}{l_1} \cdot e^{\frac{v_1 t}{l_1}} \cdot dt, \quad (3.40)$$

где  $t_k$  – конечное значение времени разгона привода.

С учетом (3.34) и (3.40), получим:

$$y = e^{-\left(\frac{v_1 t}{l_1}\right)^{t_k}} \int_0^{t_k} \frac{v_2}{l_1} \cdot e^{\frac{v_1 t}{l_1}} \cdot dt, \quad (3.41)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{v_2}{l_1} \cdot e^{-\left(\frac{v_1 t}{l_1}\right)^{t_k}} \int_0^{t_k} e^{\frac{v_1 t}{l_1}} \cdot dt. \quad (3.42)$$

Отметим, что в выражении (3.42) скорость  $v_2$  можно принять равной постоянному значению, а скорость  $v_1$  найдем из выражения:

$$M_{\max} - M_C = J_1 \frac{d\Omega_1}{dt} = J_1 \frac{i_1}{r_1} \frac{dv_1}{dt}. \quad (3.43)$$

Отсюда:

$$v_1 = \frac{r_1 \cdot M_{\Sigma}}{J_1 \cdot i_1} t. \quad (3.44)$$

С учетом выражения (3.44) и того, что  $\varepsilon_1 = \frac{S_1 - S_0}{EF}$ , окончательно имеем:

$$S_1(t_k) = S_0 + EF \cdot \left( \frac{v_2}{l_1} \cdot e^{-b \cdot t^2} \int_0^{t_k} e^{b \cdot t^2} \cdot dt \right), \quad (3.45)$$

где  $b = \frac{r_1 \cdot M_{\Sigma}}{J_1 \cdot i_1}$ .

В полученном выражении интеграл не берется в явном виде, поэтому в выражении (3.45) разложим экспоненциальную функцию в ряд Тейлора, оставим только первые два члена ряда и возьмем интеграл, получим:

$$\int_0^{t_k} e^{b \cdot t^2} \cdot dt = \int_0^{t_k} (1 + b \cdot t^2 + \dots) \cdot dt = t_k + b \cdot \frac{t_k^3}{3} + \dots \quad (3.46)$$

Подставим (3.46) в (3.45):

$$S_1(t_k) = S_0 + EF \cdot \left[ \frac{v_2}{l_1} \cdot \left( t_k + b \cdot \frac{t_k^3}{3} \right) \cdot e^{-b \cdot t_k^2} \right]. \quad (3.47)$$

Найдем производную от выражения (3.47):

$$\frac{dS_1(t_k)}{dt} = EF \cdot \frac{v_2}{l_1} \cdot e^{-b \cdot t_k^2} \cdot [1 + 2 \cdot b \cdot t_k^2 - \frac{2 \cdot b^2}{3} \cdot t_k^4]. \quad (3.48)$$

Условия для выбора мощности привода:

$$\left. \begin{aligned} S_1(t_k) &\geq \Theta_1; \\ \frac{dS_1(t_k)}{dt} &\geq \frac{d\Theta_1}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (3.49)$$

где  $\Theta_1$  и  $\frac{d\Theta_1}{dt}$  – заданные допустимые значения натяжения и скорости его изменения.

Проверку выбранного двигателя следует произвести, используя метод эквивалентного момента. Очевидно, что момент, развиваемый двигателем натяжного устройства, будет складываться из статического момента, который можно рассчитать, используя выражение (3.32), и динамического момента, связанного с изменением линейной скорости намотки материала. Из (3.32) получаем выражение для расчета статического момента привода:

$$M_{Cl} = \frac{(S_{1max} - S_{0min}) \cdot r_1 \cdot \eta_l}{i_1}. \quad (3.50)$$

Развиваемый приводом динамический момент привода определяется формой наматываемых изделий.

*Намотка изделий «Цилиндр».* При намотке изделий «Цилиндр» (изделие *a*, «Цилиндр», см. рисунок 1.11, таблицу 1.1) диаметр намотки изменяется незначительно и можно считать, что линейная скорость намотки остается постоянной. Динамические моменты привод развивает очень редко, только при пуске оборудования. Оборудование останавливается для смены бобин ленты или при каких-то непредвиденных обстоятельствах. Такие ситуации возникают, как правило, не чаще одного раза в несколько часов. Поэтому их учитывать не будем. Таким образом, условием выбора двигателя по нагреву является:

$$M_{дв} \geq M_{эКВ} = M_{Cl} = \frac{(S_{1max} - S_{0min}) \cdot r_1 \cdot \eta_l}{i_1}, \quad (3.51)$$

где  $M_{\text{ЭКВ}}$  – эквивалентный момент двигателя.

Рассмотрим намотку цилиндрического изделия с переменным диаметром (изделие  $b$ , “Конус”, см. рисунок 1.11, таблицу 1.1).

Диаметр намотки изменяется значительно, до трех раз за один проход. Приведем тахограмму работы привода при условии, что частота вращения оправки постоянная. Пусть каретка станка перемещается вдоль изделия со скоростью  $v_{\text{кар}}$ . Время намотки участка длиной  $L_i$  равно  $t_i = \frac{L_i}{v_{\text{кар}}}$ . На участках

$L_1$  и  $L_3$  скорость движения ленты постоянна, а на  $L_2$  увеличивается при движении каретки вправо и уменьшается, при движении каретки влево.

Скорость движения ленты на различных участках изделия:

$$\left. \begin{aligned} v_{\text{лин min}} &= \Omega_{\text{опр}} \cdot h_{2\text{min}}; \\ v_{\text{лин}} &= \Omega_{\text{опр}} \left[ h_{2\text{min}} + \frac{h_{2\text{max}} - h_{2\text{min}}}{L_2} \cdot v_{\text{каретки}} \cdot (t - t_1) \right]; \\ v_{\text{лин max}} &= \Omega_{\text{опр}} \cdot h_{2\text{max}}, \end{aligned} \right\} \quad (3.52)$$

где  $\Omega_{\text{опр}}$  – угловая скорость вращения оправки.

На рисунке 3.29 показан график изменения линейной скорости движения ленты при намотке изделия типа  $b$ .

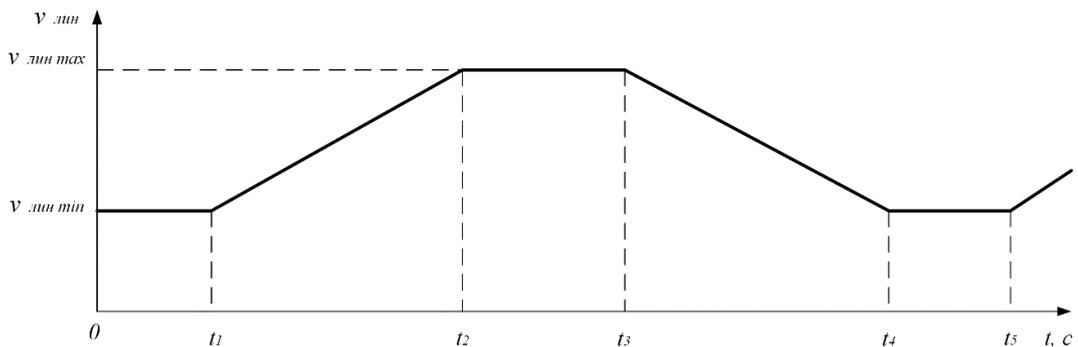


Рисунок 3.29 – Линейная скорость движения ленты при намотке изделий типа  $b$  (“Конус”)

Рассчитаем момент привода на участках намотки с учетом основного уравнения динамики привода  $M - M_c = J \frac{d\Omega}{dt}$ . Тогда отдельно на каждом участке получим:

- на первом участке от 0 до  $t_1$  он равен:

$$M_{c1} = \frac{(S_{1\max} - S_{0\min}) \cdot r_1 \cdot \eta_1}{i_1};$$

- на втором участке от  $t_1$  до  $t_2$  заменим производную на приращение:

$$M_{c2} = J_1 \frac{(v_{\text{лин max}} - v_{\text{лин min}}) \cdot i_1}{(t_2 - t_1) \cdot r_1} + \frac{(S_{1\max} - S_{0\min}) \cdot r_1 \cdot \eta_1}{i_1};$$

- на третьем участке от  $t_2$  до  $t_3$ :

$$M_{c3} = \frac{(S_{1\max} - S_{0\min}) \cdot r_1 \cdot \eta_1}{i_1}.$$

Отсюда имеем:

$$M_{\text{дв}} \geq M_{\text{эКВ}} = \sqrt{\frac{M_{c1}^2 t_1 + M_{c2}^2 (t_2 - t_1) + M_{c3}^2 (t_3 - t_2) + M_{c2}^2 (t_4 - t_3)}{t_4}}. \quad (3.53)$$

Намотка изделий “Призма” (прямоугольник). Рассмотрим процесс намотки изделия, имеющего форму прямоугольника (рисунок 3.30), со сторонами равными  $a$  и  $b$ , расстояние между осью вращения изделия и точкой схода материала  $OO_1$  [165-168].

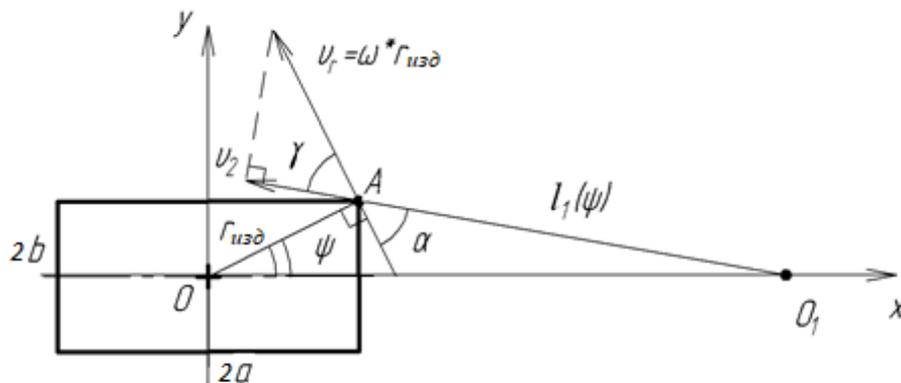


Рисунок 3.30 – Геометрическое представление процесса намотки изделия “Призма”

Определим зависимость длины ленты  $l_1$  и скорости  $v_2$  от угла поворота  $\Psi$ . Из треугольника  $ОАО_1$  имеем:

$$l_1(\Psi) = \sqrt{r_{\text{изд}}^2 + L^2 - 2 \cdot L \cdot r_{\text{изд}} \cdot \cos(\Psi)}, \quad (3.54)$$

где  $r_{\text{изд}} = \sqrt{a^2 + b^2}$ ;  $ОО_1=L$ .

Скорость  $v_2$  найдем как производную  $l_1$ :

$$v_2(\Psi) = \frac{dl_1(\Psi)}{dt} = \frac{\Omega_{\text{опр}} \cdot L \cdot r_{\text{изд}} \cdot \sin(\Psi)}{\sqrt{r_{\text{изд}}^2 + L^2 - 2 \cdot L \cdot r_{\text{изд}} \cdot \cos(\Psi)}}. \quad (3.55)$$

Определим углы  $\Psi_i$ , при которых осуществляется переход ленты с одного ребра на другое:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_1 &= \arccos\left(\frac{a^2 + b \cdot \sqrt{L^2 - a^2}}{L \cdot r_{\text{изд}}}\right); \\ \Psi_2 &= \arccos\left(\frac{b^2 - a \cdot \sqrt{L^2 - b^2}}{L \cdot r_{\text{изд}}}\right); \\ \Psi_3 &= \arccos\left(\frac{b^2 + a \cdot \sqrt{L^2 - b^2}}{L \cdot r_{\text{изд}}}\right); \\ \Psi_4 &= \arccos\left(\frac{a^2 - b \cdot \sqrt{L^2 - a^2}}{L \cdot r_{\text{изд}}}\right). \end{aligned} \right\} \quad (3.56)$$

Для определения эквивалентного момента продифференцируем выражение (3.55):

$$\frac{dv_2(\Psi)}{d\Psi} = \frac{2\Omega_{\text{опр}} \cdot L \cdot r_{\text{изд}} \cdot (r_{\text{изд}}^2 + L^2) \cos(\Psi) - 4 \cdot \Omega_{\text{опр}} \cdot L^2 \cdot r_{\text{изд}}^2 + 3 \cdot \Omega_{\text{опр}} \cdot L \cdot r_{\text{изд}} \cdot (\cos(\Psi))^2}{r_{\text{изд}}^2 + L^2 - 2 \cdot L \cdot r_{\text{изд}} \cdot \cos(\Psi)}. \quad (3.57)$$

На рисунке 3.31 показаны графики изменения  $l_1(\Psi)$ ,  $v_2(\Psi)$  и  $\frac{dv_2(\Psi)}{d(\Psi)}$ , рассчитанные по (3.54), (3.55), (3.57).

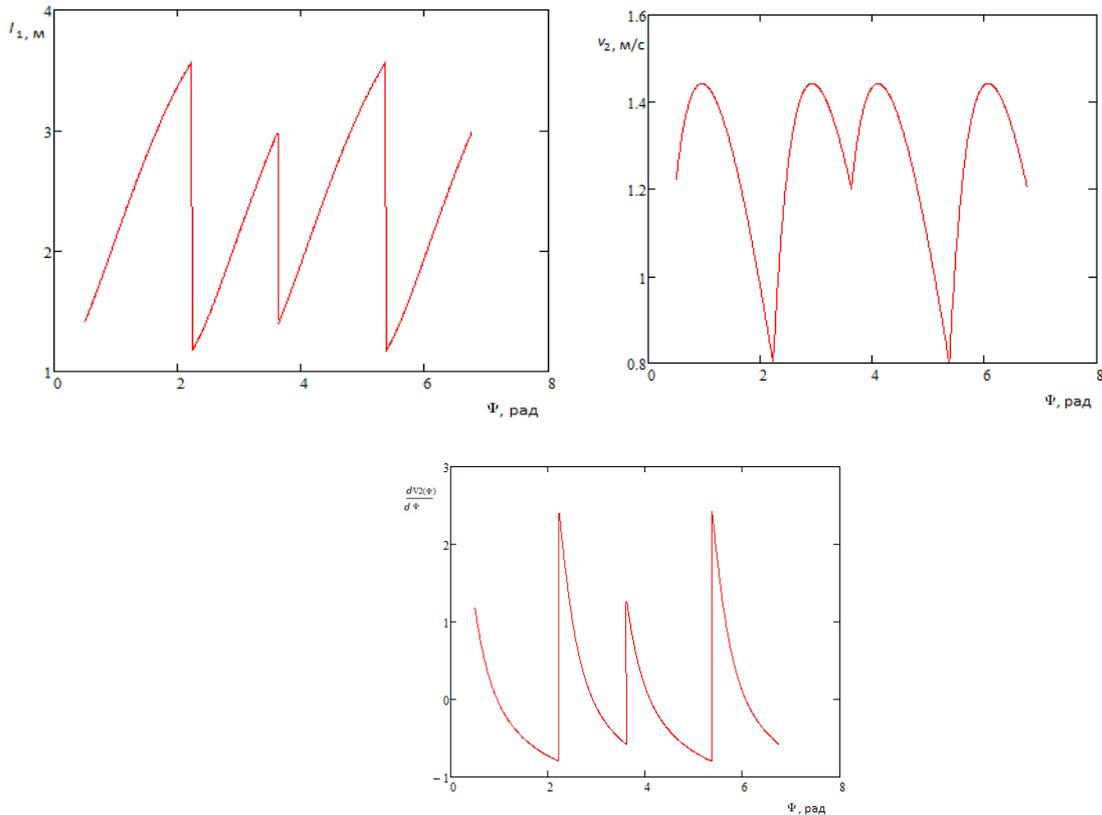


Рисунок 3.31 – Графики зависимости длины тракта катушки, скорости катушки и ее производной от угла поворота изделия

Графики получены для изделия, имеющего следующие параметры:  
 $a = 1,2$  м,  $b = 0,8$  м,  $OO_1 = 2,5$  м при  $\Omega_{\text{опр}} = 1$  рад/с.

Подставив полученное выражение в основное уравнение динамики, получим в интегральном виде:

$$M_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_{\text{цик}}} \left[ \left( \frac{S_{1\text{max}} - S_{0\text{min}}}{i_1} \right) \cdot r_1 \cdot \eta_1 + J_1 \frac{i_1}{r_1} \cdot \left( \frac{2\Omega_{\text{опр}} \cdot L \cdot r_{\text{изд}} \cdot (r_{\text{изд}}^2 + L^2) \cos(\Omega_{\text{опр}} \cdot t) - 4 \cdot \Omega_{\text{опр}} \cdot L^2 \cdot r_{\text{изд}}^2 + 3 \cdot \Omega_{\text{опр}} \cdot L \cdot r_{\text{изд}} \cdot (\cos(\Omega_{\text{опр}} \cdot t))^2}{r_{\text{изд}}^2 + L^2 - 2 \cdot L \cdot r_{\text{изд}} \cdot \cos(\Omega_{\text{опр}} \cdot t)} \right)^2 dt}{t_{\text{цик}}} \right]}{}} \quad (3.58)$$

где  $t_{\text{цик}}$  – время, в течение которого изделие совершает половину оборота.

Условием правильного выбора мощности привода является:

$$M_{\text{ДВ}} \geq M_{\text{ЭКВ}}. \quad (3.59)$$

Очевидно, что эквивалентный момент двигателя зависит от наматываемого изделия, размеров станка и угловой скорости вращения оправки. Все эти параметры должны быть выбраны исходя из наиболее тяжелых режимов работы привода.

Рассмотрим возможность учета нагрева двигателя при воздействии случайных нагрузок. Будем полагать, что полный момент на валу привода  $M_{\Sigma}(t)$  состоит из детерминированного воздействия  $M_C(t)$  и случайной величины  $M_{CC}(t)$ :

$$M_{\Sigma}(t) = M_C(t) + M_{CC}(t). \quad (3.60)$$

Первая составляющая определяется наматываемым изделием и параметрами процесса намотки. Случайная величина  $M_{CC}(t)$  – с неизвестным законом распределения. Чтобы узнать, какой вклад  $M_{CC}(t)$  дает в нагрев электродвигателя, нужно определиться с законом распределения и его параметрами. Проверка гипотезы – это задача математической статистики. Для ее решения требуется большое число измерений с последующей обработкой.

Будем полагать, что случайная величина имеет нормальный закон распределения. Она характеризуется математическим ожиданием  $a(t)$  и дисперсией  $\sigma(t)$ . В этом случае можно полагать:

$$M_{CC}(t) = a(t). \quad (3.61)$$

Подставив (3.60) и (3.61) в выражение для определения эквивалентного момента привода, получим:

$$M_{\Theta} = \sqrt{\frac{1}{t_{ц}} \int_0^{t_{ц}} M_{\Sigma}^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{t_{ц}} \int_0^{t_{ц}} [M_C(t) + M_{CC}(t)]^2 dt}. \quad (3.62)$$

Выражение (3.61) позволяет рассчитать эквивалентный момент на валу двигателя при случайном воздействии.

### 3.2.8 Разработка обобщенной структурной схемы электротехнического преобразователя натяжного устройства при “сухой” намотке

В настоящее время в натяжных устройствах, используемых при намотке и выкладке изделий “сухим” композиционным материалом, используются все перечисленные выше тормозные устройства. При намотке изделий целесообразно использовать СДПМ или ферропорошковые тормозные устройства. Особенностью оборудования, используемого для выкладки изделий, особенностью является то, что натяжение должно поддерживаться на заданном уровне при нулевой скорости движения материала. Поэтому, здесь можно рекомендовать использовать СДПМ или двигатели постоянного тока. С целью унификации математического описания натяжного устройства целесообразно разработать обобщенную математическую модель натяжного устройства. Так как электромагнитная постоянная времени привода меньше электромеханической постоянной времени, противоЭДС не учитываем.

Обобщенная структурная схема электротехнического преобразователя натяжного устройства в изображении по Лапласу приведена на рисунке 3.32.

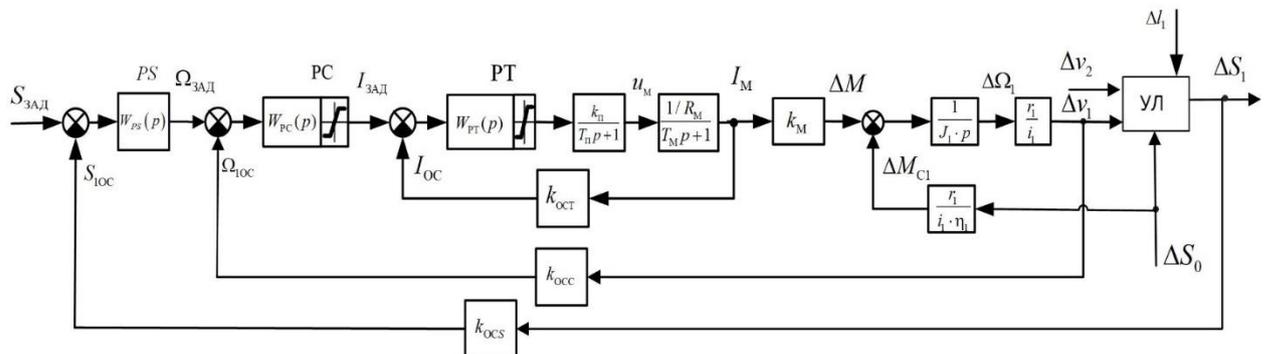


Рисунок 3.32 – Обобщенная структурная схема электротехнического преобразователя “сухой” композиционной ленты

На рисунке 3.32 использованы следующие обозначения:  $T_{\Pi}$  – постоянная времени преобразователя;  $k_{\Pi}$  – 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;  $W_{PS}(p)$  – 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;  $k_{OCS}$  – коэффициент передачи обратной связи по натяжению;  $\Delta M$  – электромагнитный момент электродвигателя;  $\Delta M_{C1}$  – 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;  $I_{3AD}$  – сигнал задания на ток электродвигателя;  $S_{1OC}$  – сигнал обратной связи по натяжению;  $S_{3AD}$  – сигнал задания на натяжение;  $J_1$  – приведенный момент инерции привода;  $\Omega_1$  – частота вращения вала двигателя;  $\alpha$  – угол охвата лентой невращающегося ролика;  $r_1$  – радиус тормозного ролика;  $i_1$  – передаточное отношение редуктора, расположенного между тормозным роликом и двигателем;  $\eta_1$  – КПД редуктора.

Изображенную на рисунке 3.32 обобщенную структурную схему электротехнического преобразователя натяжного устройства рекомендуется применять при синтезе систем ЭТС натяжения при намотке изделий “сухой” композиционной лентой.

### **3.3 Анализ натяжных устройств и исполнительных механизмов, используемые при “мокрой” намотке**

#### **3.3.1 Натяжные устройства, используемые при “мокрой” намотке**

До настоящего времени 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.

Вопросам выбора натяжного устройства посвящена малочисленная литература. Удалось найти только несколько работ на эту тему [48,102]. Однако в этих работах отсутствует учет специфики намотки композиционных изделий, не приведены математические выражения, позволяющие рассчитать моменты, возникающие на валу привода натяжного устройства, получить передаточные функции натяжного устройства как объекта управления.

Поэтому необходимо выполнить анализ наиболее распространенных натяжных устройств, используемых при намотке изделий из “мокрого” композиционного материала, разработку их математических моделей, а также сформулировать рекомендации по выбору натяжных устройств.

При намотке изделий “мокрой” композиционной лентой все ролики тракта намотки не вращаются. Лента скользит по направляющим тракта, и в соответствии с уравнением Эйлера  $S = S_0 e^{\alpha f}$  натяжение возрастает. Очевидно, что натяжение, с которым лента наматывается на изделие, зависит от коэффициента трения  $f$  ленты по направляющим тракта станка, суммарного угла охвата лентой всех направляющих тракта  $\alpha$  и натяжения  $S_0$ , с которым лента входит в тракт намотки.

Таким образом, натяжные устройства при “мокрой” намотке могут строиться на эффектах изменения коэффициента трения и изменения угла охвата лентой направляющих тракта намотки.

Изменять коэффициент трения  $f$  в процессе намотки теоретически возможно [169], но этот процесс очень инерционный.

Наиболее просто регулировать натяжение путем изменения угла охвата лентой  $\alpha$  направляющих тракта. Для этого в тракт намотки последовательно устанавливают ролики, при изменении положения которых в пространстве

изменяется угол охвата лентой данных роликов, а следовательно, и натяжение ленты при ее намотке на изделие.

Существует несколько конструкций натяжных устройств, используемых в промышленности. На рисунке 3.33 – 3.35 приведены конструкции наиболее часто используемых натяжных устройств [1,10,48,102].

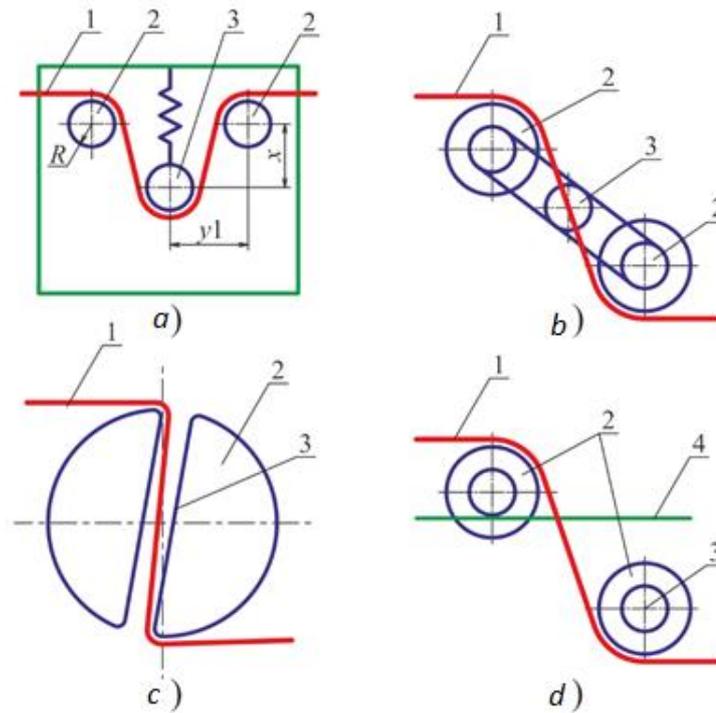


Рисунок 3.33 – Конструкции натяжных устройств для “мокрой” намотки

Мокрая лента *1* (рисунок 3.33 *a*) проходит через не вращающиеся ролики *2* и *3*. Причем ролики *2* неподвижные, а ролик *3* может перемещаться с помощью специального устройства вверх или вниз. При этом изменяется угол охвата лентой роликов *2,3* и, следовательно, натяжение на выходе устройства. В конструкциях, приведенных на рисунке 3.33, *b–c*, не вращающиеся ролики *2* изменяют свое положение в пространстве, вращаясь вдоль оси *3*. Изменение положение роликов в пространстве изменяет угол охвата их лентой *1* и, следовательно, натяжение на выходе устройства. В натяжном устройстве, изображенном на рисунке 3.33, *d*, нижний ролик *2* жестко закреплен в пространстве, а верхний ролик *2* перемещается вдоль натяжного устройства по направляющей *4*.

Исполнительные устройства *a* и *d* назовем исполнительными устройствами с “линейным перемещением” ролика, а исполнительные устройства *b* и *c* – устройствами с “угловым перемещением” ролика или роликов.

Для уменьшения момента на валу двигателя, вызванного действием натяжения ленты, используется так называемая “сложная” конструкция, состоящая из двух, связанных между собой “восьмерок” (рисунок 3.34), или натяжное устройство с комбинированным приводом (электрическим двигателем и другим приводом, например, пневматическим) – рисунок 3.35.

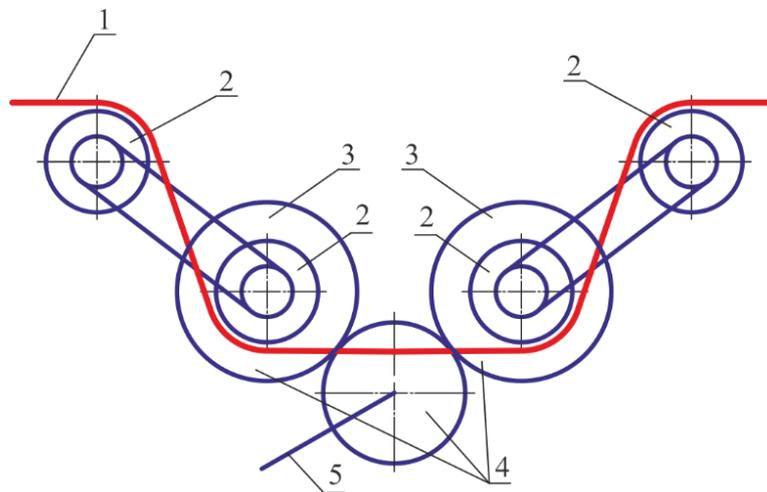


Рисунок 3.34 – Конструкция натяжного устройства, состоящего из двух связанных между собой “восьмерок” с “угловым перемещением роликов”

На рисунке 3.34 обозначены: *1* – упругая лента; *2* – неврещающиеся ролики; *3* – центр вращения восьмерок; *4* – три связанные шестерни; *5* – ось вращения ведущей шестерни.

В данном устройстве усилия от натяжения, создаваемого упругой лентой при прохождении верхних роликов *2*, вычитаются, что позволяет существенно уменьшить мощность двигателя, осуществляющего перемещение роликов.

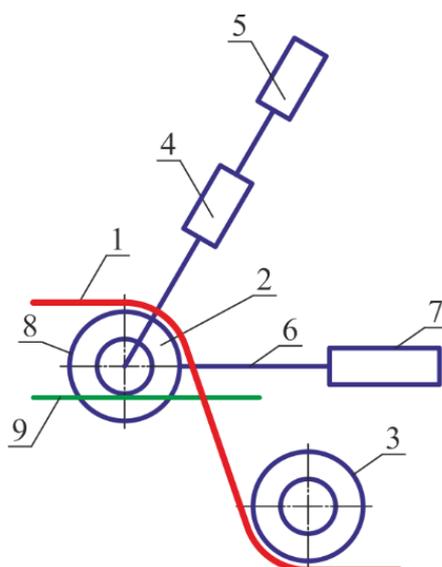


Рисунок 3.35 – Конструкция натяжного устройства с “линейным перемещением” ролика и дополнительным пневматическим приводом

На рисунке 3.35 приведена конструкция натяжного устройства с “линейным перемещением” ролика и дополнительным пневматическим приводом. Здесь обозначены: 1 – упругая лента; 2, 3 – натяжные ролики; 4 – редуктор; 5 – электродвигатель; 6 – шток пневмоцилиндра 7; 8 – шестерня, связанная с редуктором 4; 9 – зубчатая рейка, по которой перемещается шестерня 8.

Такое натяжное устройство, разработано в ООО “НПП ВИУС” (г. Новочеркасск) [89] и использовано на намоточном станке СНП-36. Общий вид натяжного устройства показан на рисунке 3.36.

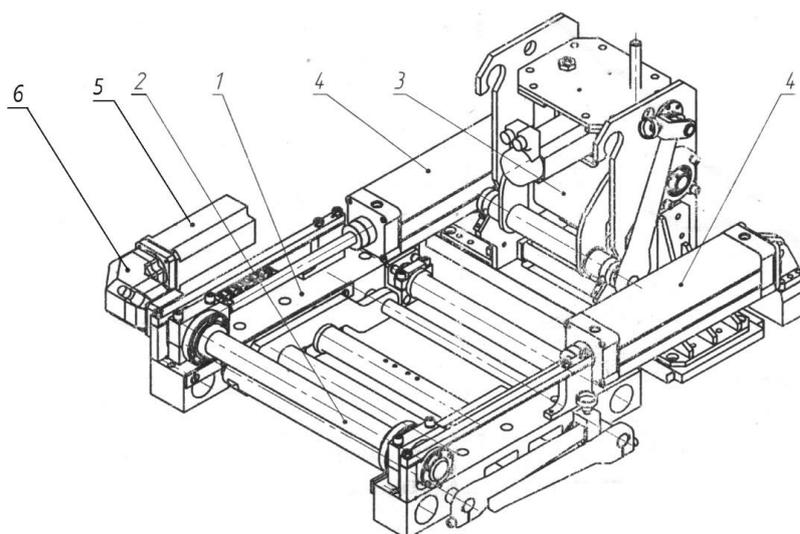


Рисунок 3.36 – Общий вид натяжного устройства с “линейным перемещением” ролика и дополнительным пневматическим приводом [89]:  
 1 – рама; 2 – ролики, через которые проходит лента; 3 – отжимное устройство;  
 4 – пневмоцилиндры; 5 – электродвигатель; 6 – редуктор.

Сформулируем основные требования, предъявляемые к натяжным устройствам:

- обеспечение заданного диапазона создаваемых натяжений на выходе натяжного устройства, который зависит от его конструктивных особенностей;
- поддержание необходимой скорости перемещения роликов натяжного устройства (в том числе из одного крайнего положения в другое);
- по возможности, наиболее линейная регулировочная характеристика натяжного устройства;
- простота конструкции, ее стоимость;
- минимальная мощность привода натяжного устройства.

Рассмотрим приведенные выше натяжные устройства. Получим зависимости угла охвата двух роликов натяжного устройства от их положения в пространстве [170-174]. Схематическое расположение роликов приведено на рисунке 3.37.

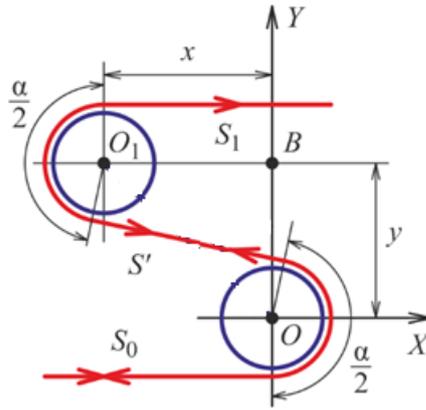


Рисунок 3.37 – Натяжное устройство с двумя роликами

Для данного натяжного устройства аналитическое выражение, связывающее угол охвата лентой роликов  $\alpha$  от взаимного положения роликов, имеет вид [170-174]:

$$\frac{\alpha}{2}(x) = \arccos\left\{-\frac{2 \cdot r \cdot y}{x^2 + y^2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{(x^2 + y^2) \cdot (4 \cdot r^2 - x^2)}{4 \cdot r^2 \cdot y^2}}\right)\right\}, \quad (3.63)$$

где  $r$  – радиусы роликов;  $x$ ,  $y$  – координаты положения роликов.

Знак в формуле (3.63) зависит от взаимного расположения роликов.

Следует рассмотреть два наиболее характерных случая изменения взаимного положения натяжных роликов.

*Первый случай:* ролики жестко связаны между собой и вращаются около некоторой оси  $O$  (“угловое перемещение” ролика, рисунок 3.38).

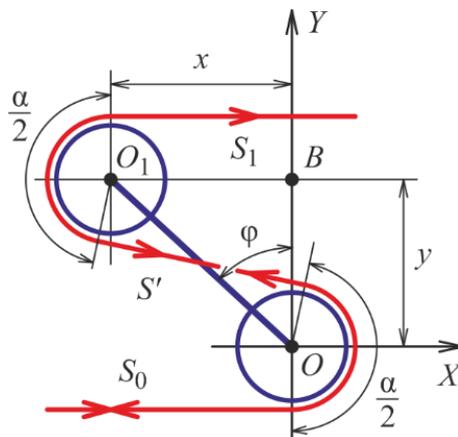


Рисунок 3.38 – Натяжное устройство

Обозначим угол между линией, соединяющей ролики и осью  $y$  через  $\varphi$ .  
Из треугольника  $OO_1B$  получим:

$$\left. \begin{aligned} y &= L \cdot \cos \varphi; \\ x &= L \cdot \sin \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (3.64)$$

где  $L$  – расстояние между осями роликов  $O$  и  $O_1$ .

Подставив выражения (3.64) в (3.63), получим:

$$\frac{\alpha}{2}(\varphi) = \begin{cases} \arccos\left\{-\frac{2 \cdot r \cdot \cos \varphi}{L} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot r^2 - L^2 \cdot \sin^2 \varphi}{4 \cdot r^2 \cdot \cos^2 \varphi}}\right)\right\}, & \text{если } \varphi \leq \arcsin\left(\frac{2r}{L}\right); \\ \arccos\left\{-\frac{2 \cdot r \cdot \cos \varphi}{L} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot r^2 - L^2 \cdot \sin^2 \varphi}{4 \cdot r^2 \cdot \cos^2 \varphi}}\right)\right\}, & \text{если } \varphi > \arcsin\left(\frac{2r}{L}\right). \end{cases} \quad (3.65)$$

Угол  $\varphi$ , при котором в выражении (3.65) происходит переход с одного уравнения на другое, равен  $\arcsin\left(\frac{2r}{L}\right)$ .

Линеаризуем полученное выражение:

$$\Delta\alpha(t) = k_{5,м\varphi} \cdot \Delta\varphi(t), \quad (3.66)$$

где  $k_{5,м\varphi} = \left(\frac{\partial\alpha}{\partial\varphi^*}\right)^*$ ,  $\varphi^*$  – значение положения верхнего ролика, в котором производится линеаризация.

Линеаризуем функцию  $\alpha(\varphi)$  в окрестности точки  $\varphi^* = \arcsin\left(\frac{2r}{L}\right)$ . Для этого воспользуемся рядом Тейлора, его двумя первыми членами:

$$\frac{\alpha}{2}(\varphi) \approx \alpha^* + \frac{(\alpha^*)'}{1!} \cdot \varphi.$$

В свою очередь,  $\alpha^*$  равно:

$$\left. \begin{aligned} \alpha^* &= \arccos\left(-\frac{2 \cdot r}{L}\right); \\ (\alpha^*)' &= \frac{1}{L}. \end{aligned} \right\}$$

Окончательно имеем:

$$\Delta\alpha(\varphi) \approx \frac{2}{L} \cdot \Delta\varphi. \quad (3.67)$$

На рисунке 3.39 показаны графики изменения угла  $\alpha$  от угла  $\varphi$  (график 1). Данный график получен при  $L = 0,25$  м,  $r = 30$  мм.

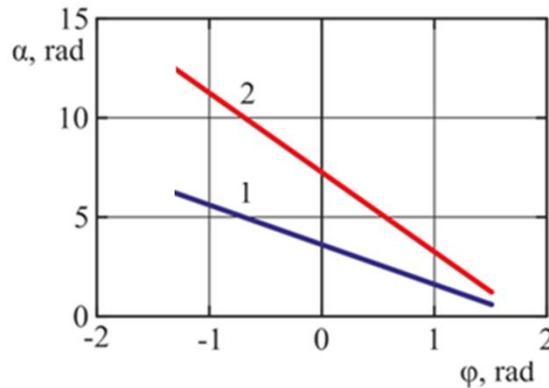


Рисунок 3.39 – График зависимости угла охвата лентой роликов натяжного устройства с “угловым перемещением” от угла поворота  $\varphi$

Отметим, что такие натяжные устройства обладают практически линейной зависимостью угла охвата лентой натяжных роликов от угла поворота роликов. Пределы изменения угла охвата лентой роликов натяжного устройства составляют от 0,5 до 6 рад при изменении положения оси, соединяющей ролики от -1,5 до 1,5 рад.

Рассмотрим натяжное устройство с “угловым перемещением” двух пар роликов, приведенное на рисунке 3.34. Очевидно, что кинематически оно представляет из себя два последовательных натяжных устройства, имеющих по два ролика. Поэтому, из (3.64) и (3.65) имеем:

$$\alpha(\varphi) = \begin{cases} \arccos\left\{-\frac{2 \cdot r \cdot \cos \varphi}{L} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot r^2 - L^2 \cdot \sin^2 \varphi}{4 \cdot r^2 \cdot \cos^2 \varphi}}\right)\right\}, & \text{если } \varphi \leq \arcsin\left(\frac{2r}{L}\right); \\ \arccos\left\{-\frac{2 \cdot r \cdot \cos \varphi}{L} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot r^2 - L^2 \cdot \sin^2 \varphi}{4 \cdot r^2 \cdot \cos^2 \varphi}}\right)\right\}, & \text{если } \varphi > \arcsin\left(\frac{2r}{L}\right), \end{cases} \quad (3.68)$$

$$\Delta\alpha(\varphi) \approx \frac{4}{L} \cdot \Delta\varphi. \quad (3.69)$$

На рисунке 3.39 показан график 2 изменения угла  $\alpha$  от угла  $\varphi$ . Данный график получен при  $L = 0,25$  м,  $r = 30$  мм.

Отметим, что такие натяжные устройства, как и рассмотренное ранее, обладают практически линейной зависимостью угла охвата лентой натяжных

роликов от угла поворота роликов. Пределы изменения угла охвата лентой роликов натяжного устройства составляют от 1 до 12 рад при изменении положения оси, соединяющей ролики от -1,5 до 1,5 рад.

Второй случай: натяжное устройство с “линейным перемещением” ролика, (см. рисунки 3.33, з, 3.35, 3.36). В этих устройствах один ролик неподвижен, а другой перемещается по направляющим вдоль оси  $x$ . Данное натяжное устройство изображено на рисунке 3.40.

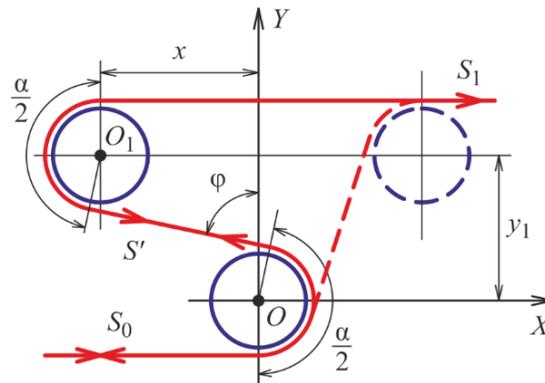


Рисунок 3.40 – Натяжное устройство с “линейным перемещением” ролика  
вдоль оси  $x$

Из выражения (3.68) получим:

$$\frac{\alpha}{2}(x) = \begin{cases} \arccos\left\{-\frac{2 \cdot r \cdot y_1}{x^2 + y_1^2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{(x^2 + y_1^2) \cdot (4 \cdot r^2 - x^2)}{4 \cdot r^2 \cdot y_1^2}}\right)\right\}, & \text{если } x \leq 2r; \\ \arccos\left\{-\frac{2 \cdot r \cdot y_1}{x^2 + y_1^2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{(x^2 + y_1^2) \cdot (4 \cdot r^2 - x^2)}{4 \cdot r^2 \cdot y_1^2}}\right)\right\}, & \text{если } x > 2r. \end{cases} \quad (3.70)$$

Линеаризуем полученные выражения (3.70), получим:

$$\Delta\alpha(t) = k_{5_{mx}} \cdot \Delta x(t), \quad (3.71)$$

где  $k_{5_{mx}} = \left(\frac{\partial\alpha}{\partial x^*}\right)^*$ ,  $x^*$  – значение положения подвижного ролика, в котором производится линеаризация.

Линеаризуем функцию  $\alpha(x)$  в окрестности точки  $x^* = 2r$ . Для этого воспользуемся рядом Тейлора, его двумя первыми членами:

$$\frac{\alpha}{2}(x) \approx \alpha^* + \frac{(\alpha^*)'}{1!} \cdot x.$$

В свою очередь,  $\alpha^*$  равно:

$$\left. \begin{aligned} \alpha^* &= \arccos\left(-\frac{2 \cdot r}{y_1}\right); \\ (\alpha^*)' &= \frac{1}{y_1}. \end{aligned} \right\}$$

Окончательно имеем:

$$\Delta\alpha(x) \approx \frac{2}{y_1} \cdot \Delta x. \quad (3.72)$$

На рисунке 3.41 показан график изменения угла  $\alpha$  от перемещения ролика  $x$  на 0,25 м относительно неподвижного ролика. Результаты получены при  $y_1 = 0,15$  м,  $r = 30$  мм,  $r_{\text{ш}} = 40$  мм.

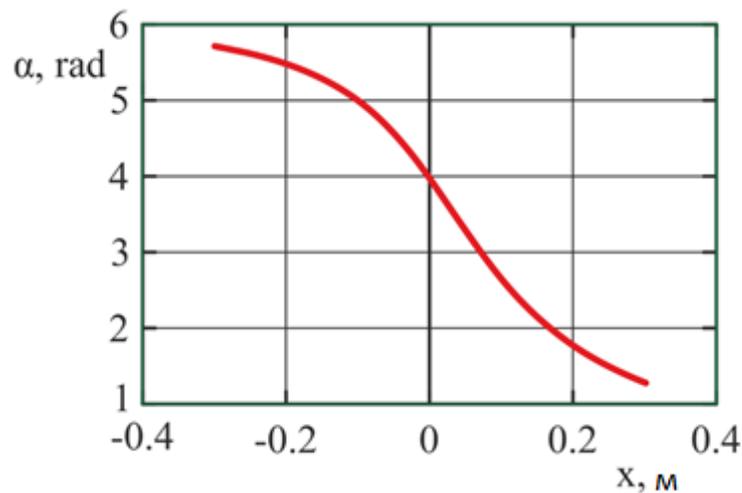


Рисунок 3.41 – График изменения угла  $\alpha$  от перемещения ролика  $x$

Отметим, что данное натяжное устройство имеет также практически линейную зависимость угла охвата лентой натяжных роликов от их перемещения  $x$ . Так угол охвата натяжных роликов изменяется от 1,5 до 5,5 рад при изменении положения подвижного ролика на 0,2 м относительно нулевого положения.

Рассчитаем усилия и моменты, возникающие в натяжном устройстве на подвижном ролике.

Для натяжного устройства с “угловым перемещением” ролика это усилия, которые создаются натяжениями  $S_1$  и  $S'$  (см. рисунок 3.37). Отметим, что  $S' = S_0 \cdot e^{\alpha \cdot f/2}$ . Тогда усилие на ролик равно:

$$\Sigma S = S_1 + S_0 \cdot e^{\alpha \cdot f/2} \cdot \cos(\pi - \alpha / 2). \quad (3.73)$$

Момент на валу двигателя, вызванный приложенными к роликам усилиями, будет равен:

$$M_C = \frac{\Sigma S \cdot (y + r)}{k_{6,m}} + M_{\text{ТР}}, \quad (3.74)$$

где  $k_{6,m}$  – передаточное отношение редуктора, установленного между двигателем и роликами натяжного устройства;  $M_{\text{ТР}}$  – приведенный к валу двигателя момент трения в механической части натяжного устройства.

Величина  $M_{\text{ТР}}$  определяется моментами трения, возникающими в редукторе и двигателе. В натяжных устройствах могут использоваться два вида редукторов: червячные, самотормозящиеся и планетарные. Вопросы выбора наиболее целесообразного редуктора рассмотрены нами ниже.

Из выражения (3.74) получим:

$$M_C = \begin{cases} \frac{[S_1 + S_0 \cdot e^{\frac{\alpha(\varphi) \cdot f}{2}} \cdot \cos(\pi - \frac{\alpha(\varphi)}{2})] \cdot (L \cdot \cos \varphi + r)}{k_{6,m}} + M_{\text{ТР}}, & \text{если } \varphi \leq \arcsin(\frac{2r}{L}); \\ \frac{[S_1 - S_0 \cdot e^{\frac{\alpha(\varphi) \cdot f}{2}} \cdot \cos(\pi - \frac{\alpha(\varphi)}{2})] \cdot (L \cdot \cos \varphi + r)}{k_{6,m}} + M_{\text{ТР}}, & \text{если } \varphi > \arcsin(\frac{2r}{L}). \end{cases} \quad (3.75)$$

На рисунке 3.41 показан график зависимости  $M_C$  и натяжения  $S_1$  от угла поворота  $\varphi$ . Графики получены при  $S_0 = 400$  Н,  $f = 0,14$ ,  $k_{6,m} = 40$ ,  $M_{\text{ТР}} = 0$  Н. На первых стадиях исследования моменты трения не учитываем.

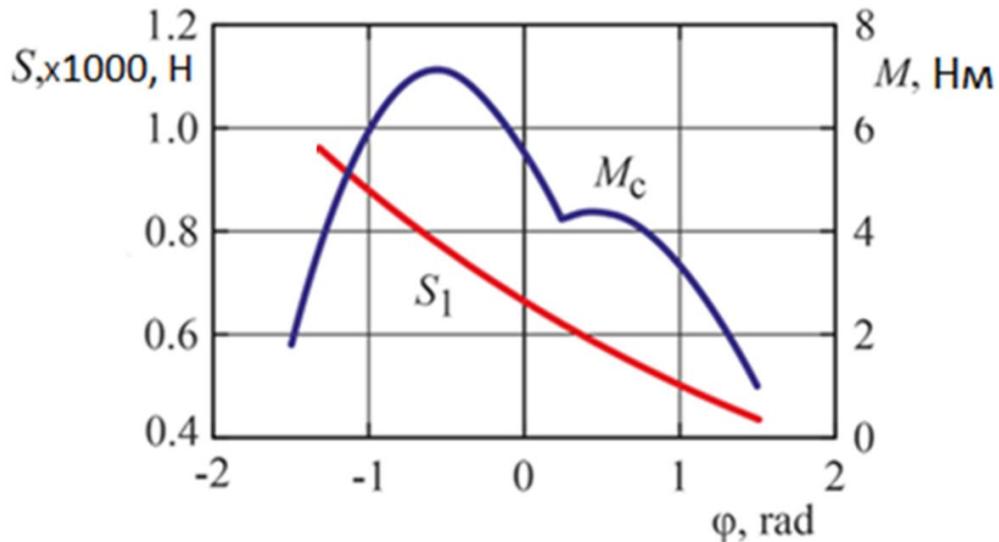


Рисунок 3.42 – График зависимости момента на валу двигателя исполнительного механизма с “угловым перемещением” и натяжения  $S_1$  от угла поворота  $\varphi$

Нелинейная зависимость момента  $M_C$  объясняется особенностью конструкции натяжного устройства. Во-первых, при перемещении роликов из одного крайнего положения в другое изменяется величина  $u$  от малого значения до максимального, а потом опять до малого значения. Во-вторых, при перемещении исполнительного механизма усилия  $S_1$  и  $S'$  на одном участке складываются, на другом – вычитаются. Натяжение на выходе исполнительного механизма изменяется линейно относительно угла его поворота.

Для исполнительного механизма с “линейным перемещением” ролика, изображенного на рисунках 3.35, 3.36, момент на валу двигателя будет равен:

$$M_C = \frac{\Sigma S \cdot r_{III}}{k_{б.м}} + M_{ТР} \quad , \quad (3.76)$$

где  $r_{III}$  – радиус шестерни реечного передаточного механизма.

Тогда имеем:

$$M_c = \begin{cases} \frac{[S_1 - S_0 \cdot e^{-\frac{f \cdot \alpha(x)}{2}} \cdot \cos(\pi - \frac{\alpha(x)}{2})] \cdot r_{III}}{k_{6M}} + M_{TP}, & \text{если } x < 2r; \\ \frac{[S_1 + S_0 \cdot e^{-\frac{f \cdot \alpha(x)}{2}} \cdot \cos(\pi - \frac{\alpha(x)}{2})] \cdot r_{III}}{k_{6M}} + M_{TP}, & \text{если } x \geq 2r. \end{cases} \quad (3.77)$$

На рисунке 3.43 изображены зависимость момента на валу двигателя при перемещении ролика натяжного устройства на  $\pm 0,2$  м относительно нейтрального положения при передаточном отношении редуктора  $k_{6M}$  соответственно 40 (зеленая линия), 8 (синяя линия) и зависимость  $S_1$  (красная линия). Здесь значение  $r_{III}$  равно 0,04 м,  $M_{TP}$  равно 0 Нм.

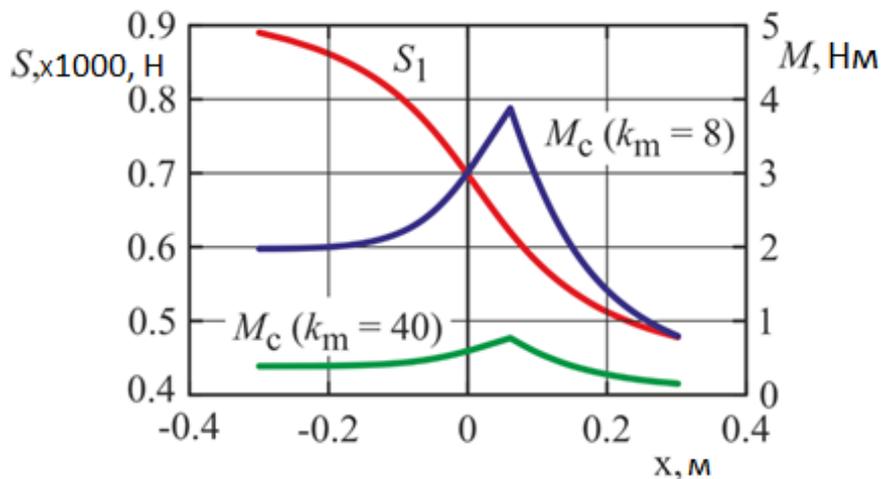


Рисунок 3.43 – Зависимость момента на валу двигателя от положения натяжного ролика и передаточного отношения редуктора  $k_{6M}=40$  (зеленая кривая),  $k_{6M}=8$  (синяя кривая) и зависимость натяжения  $S_1$  на выходе натяжного устройства (красная линия)

Отметим, что графики, изображённые на рисунке 3.43, получены при одинаковых значениях натяжения, диаметрах роликов натяжных устройств, основных габаритных размерах, передаточном отношении редуктора. Однако, величина момента на валу двигателя натяжного устройства с “угловым перемещением” ролика существенно ниже момента, полученного для натяжного устройства с “линейным перемещением” ролика.

Диапазон же изменения натяжения на выходе обоих натяжных устройств практически одинаков.

Сравним скорости изменения углов  $\alpha$  от частоты вращения электродвигателя  $\Omega_1$  для этих двух натяжных устройств.

Для устройства с “угловым перемещением” ролика:

$$\alpha = \frac{k_{5,м}}{k_{6,м}} \cdot \int \Omega_1 \cdot dt = \frac{k_{5,м}}{k_{6,м}} \cdot \Omega_1 \cdot t. \quad (3.78)$$

Для устройства с “линейным перемещением” ролика:

$$\alpha = \frac{k_{5,м}}{k_{6,м}} \cdot r_{III} \int \Omega_1 \cdot dt = \frac{k_{5,м}}{k_{6,м}} \cdot r_{III} \cdot \Omega_1 \cdot t. \quad (3.79)$$

Сравним полученные выражения (3.78) и (3.79). При одинаковых:

- передаточном отношении редуктора  $k_{6,м}$ ;
- коэффициентах  $k_{5,м}$  ( $L=y_1$  хотя реально  $L>y_1$ );
- частотах вращения двигателя  $\Omega_1$ .

Отметим, что уравнения (3.78) и (3.79) отличаются только тем, что в последнее в качестве множителя входит радиус шестерни  $r_{III}$ , величина которого существенно меньше 1 м. Таким образом, при прочих равных условиях второе натяжное устройство в 25 раз медленнее изменяет угол охвата лентой натяжных роликов, но требует от двигателя почти в 5 раз меньшего момента на валу. При уменьшении передаточного отношения редуктора в 5 раз второе натяжное устройство становится быстродействующим, но и возрастает момент на валу двигателя.

Однако, с точки зрения энергетических характеристик еще более интересным является использование натяжного устройства с “угловым перемещением” роликов, изображенного на рисунке 3.34. В этом случае усилия, возникающие в устройстве, вычитаются:

$$\Sigma S = S_1 - S_0 + S_0 \cdot e^{\frac{3 \cdot f \cdot \alpha(\varphi)}{2}} \cdot \cos\left(\pi - \frac{3}{2} \cdot \alpha(\varphi)\right) - S_0 \cdot e^{\frac{f \cdot \alpha(\varphi)}{2}} \cdot \cos(\pi - \alpha(\varphi)/2). \quad (3.80)$$

С учетом выражения (3.74) получим:

$$M_C = \begin{cases} \frac{[S_1 - S_0 + S_0 \cdot e^{\frac{3 \cdot f \cdot \alpha(\varphi)}{2}} \cdot \cos(\pi - \frac{3}{2} \cdot \alpha(\varphi)) - S_0 \cdot e^{\frac{f \cdot \alpha(\varphi)}{2}} \cdot \cos(\pi - \frac{\alpha(\varphi)}{2})]}{k_{6M}} \times \\ \times (L \cdot \cos \varphi + r) + M_{\text{ТР}}, & \text{если } \varphi < \arcsin\left(\frac{2r}{L}\right); \\ \frac{[S_1 - S_0 - S_0 \cdot e^{\frac{3 \cdot f \cdot \alpha(\varphi)}{2}} \cdot \cos(\pi - \frac{3}{2} \cdot \alpha(\varphi)) + S_0 \cdot e^{\frac{f \cdot \alpha(\varphi)}{2}} \cdot \cos(\pi - \frac{\alpha(\varphi)}{2})]}{k_{6M}} \times \\ \times (L \cdot \cos \varphi + r) + M_{\text{ТР}}, & \text{если } \varphi \geq \arcsin\left(\frac{2r}{L}\right). \end{cases} \quad (3.81)$$

На рисунке 3.44 показаны графики зависимости  $M_C$  и натяжения  $S_1$  от угла поворота  $\varphi$ . Графики получены при  $S_0 = 400$  Н,  $f = 0,14$ ,  $k_{6M} = 40$ ,  $M_{\text{ТР}} = 0$  Нм. На первых стадиях исследования моменты трения не учитываем.

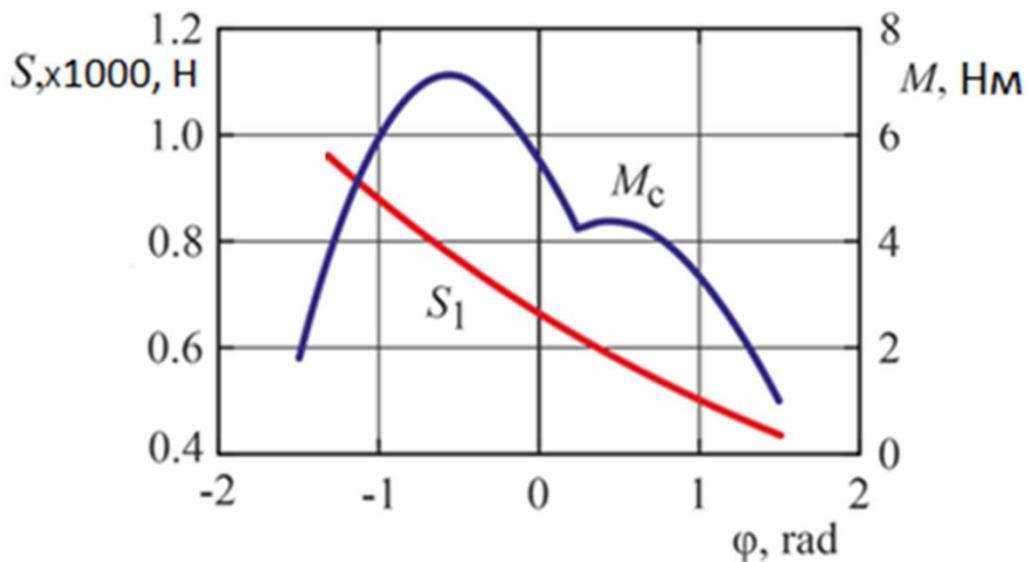


Рисунок 3.44 – График зависимости момента на валу двигателя исполнительного механизма с “угловым перемещением” и натяжения  $S_1$  от угла поворота  $\varphi$

Анализ полученных результатов приведен в таблице 3.1. На данном этапе исследований принято  $M_{\text{ТР}} = 0$  Нм,  $S_0 = 400$  Н.

Таблица 3.1 – 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	
			$k_{6,м} = 40$	$k_{6,м} = 8$
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
Максимальное время перемещения роликов из одного крайнего положения в другое, с	0,51	0,51	2,56	0,51

Анализ приведенных в таблице 3.1 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 при использовании натяжного устройства с “линейным перемещением” требуется момент в 3,7 раза меньше. Диапазон изменения натяжения на выходе устройства изменяется с 420 до 950 Н, а для устройства с двумя парами роликов с 450 до 2300 Н. То есть верхний предел натяжения увеличился в 2,4 раза.

### *3.3.2 Анализ вариантов приводов, используемых в исполнительных механизмах при “мокрой” намотке*

Приведем возможные варианты использования различных приводов в исполнительных механизмах при намотке изделий “мокрым” способом. Здесь возможно применение пневматического привода, электродвигателей постоянного тока, асинхронных и синхронных двигателей с постоянными магнитами, вентильно-индукторных двигателей и комбинированного привода, состоящий из электрического и пневматического приводов.

По аналогии с материалом, приведенным в разделе 3.1 проанализируем возможные варианты использования различных приводов в исполнительных механизмах регуляторов натяжения. Отметим, что использование пневматического привода, асинхронных двигателей в системах регулирования натяжения нецелесообразно. Пневматический привод не обеспечивает требуемое быстродействие системы, обладает невысокой надежностью, асинхронные двигатели с векторным управлением уступают по своим характеристикам синхронным двигателям с постоянными магнитами с векторным управлением и вентильно – индукторным двигателям.

Поэтому в системах регулирования натяжения, установленных на оборудовании, используемом при намотке изделий с высокими требованиями к условиям эксплуатации следует применять СДПМ с векторным управлением, а при намотке изделий, где к условиям эксплуатации изделий не предъявляются жесткие требования, использовать в качестве привода двигатели постоянного тока. Отметим, что в ряде случаев целесообразно использовать и комбинированный привод.

$$\left. \begin{aligned}
 i_{1d} &= \frac{1/R_1}{T_1 p + 1} (u_{1d} + \omega \Psi_{1q}); \\
 i_{1q} &= \frac{1/R_1}{T_1 p + 1} (u_{1q} + \omega \Psi_{1d}); \\
 \Psi_{1d} &= L_{\sigma 1} i_{1d} + \Psi_f; \\
 \Psi_{1q} &= L_{\sigma 1} i_{1q}; \\
 M_1 &= \frac{3}{2} Z_p \Psi_f i_{1q}; \\
 \omega &= Z_p \Omega_1; \\
 \Omega_1 &= \frac{1}{J_1 p} (M_1 - M_{C1}); \\
 \varphi &= \frac{1}{k_{6m} \cdot p} \Omega_1 \text{ или } x = \frac{r_{III}}{k_{6m} \cdot p} \Omega_1; \\
 \alpha &= k_{5m\alpha} x \text{ или } \alpha = k_{5m\varphi} \varphi; \\
 M_{C1} &= \frac{S_1}{k_{6m}} \pm \frac{k_{7m}(x) \cdot S_0}{k_{6m}} \text{ или } M_{C1} = \frac{S_1}{k_{6m}} \pm \frac{k_{7m}(\varphi) \cdot S_0}{k_{6m}}.
 \end{aligned} \right\} \quad (3.82)$$

Здесь  $k_{7m}$  от  $x$  или  $\varphi$  – коэффициент, учитывающий изменение влияния натяжения  $S_0$  на момент на валу привода натяжного устройства при перемещении или повороте самого натяжного устройства.

Используя приведенные ранее выражения (3.18) и структурную схему СДПМ при векторном управлении (см. рисунок 3.21), составим структурную схему математической модели натяжного устройства с СДПМ при векторном управлении (рисунок 3.45).

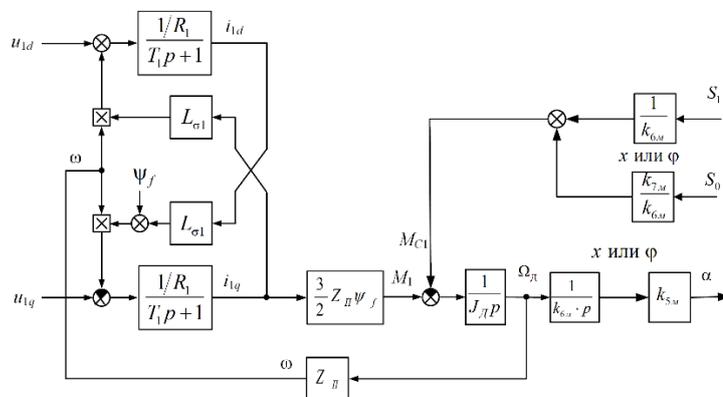


Рисунок 3.45 – Структурная схема математической модели натяжного устройства с СДПМ при векторном управлении

В соответствии с выражениями (3.27), (3.28):

$$\left. \begin{aligned} \frac{i^2 k_L}{2} - M_{Cl} &= J_1 \frac{d\Omega_1}{dt}; \\ U &= i \cdot R + \Omega_1 \cdot i \cdot k_L; \\ \varphi &= \frac{1}{k_{6.m} \cdot p} \Omega_1 \text{ или } x = \frac{r_{III}}{k_{6.m} \cdot p} \Omega_1; \\ \alpha &= k_{5.m\varphi} x \text{ или } \alpha = k_{5.m\varphi} \varphi; \\ M_{Cl} &= \frac{S_1}{k_{6.m}} \pm \frac{k_{7.m}(x) \cdot S_0}{k_{6.m}} \text{ или } M_{Cl} = \frac{S_1}{k_{6.m}} \pm \frac{k_{7.m}(\varphi) \cdot S_0}{k_{6.m}}, \end{aligned} \right\} (3.83)$$

составим структурную схему математической модели натяжного устройства с двигателем постоянного тока, представленную на рисунке 3.46.

Для различных исполнительных механизмов получим зависимость  $k_{7.m}(\varphi)$ ,  $k_{7.m}(x)$ :

- с “угловым перемещением”:

$$k_{7.m}(\varphi) = [e^{\frac{\alpha(\varphi) \cdot f}{2}} \cdot \cos(\pi - \frac{\alpha(\varphi)}{2})] \cdot (L \cdot \cos \varphi + r); \quad (3.84)$$

- с “линейным перемещением”:

$$k_{7.m}(\varphi) = [S_0 \cdot e^{\frac{f \cdot \alpha(x)}{2}} \cdot \cos(\pi - \frac{\alpha(x)}{2})] \cdot r_{III}; \quad (3.85)$$

- с “угловым перемещением” и двумя восьмерками:

$$M_c = [S_0 - S_0 \cdot e^{\frac{3 \cdot f \cdot \alpha(\varphi)}{2}} \cdot \cos(\pi - \frac{3}{2} \cdot \alpha(\varphi)) + S_0 \cdot e^{\frac{f \cdot \alpha(\varphi)}{2}} \cdot \cos(\pi - \frac{\alpha(\varphi)}{2})] \cdot (L \cdot \cos \varphi + r). \quad (3.86)$$

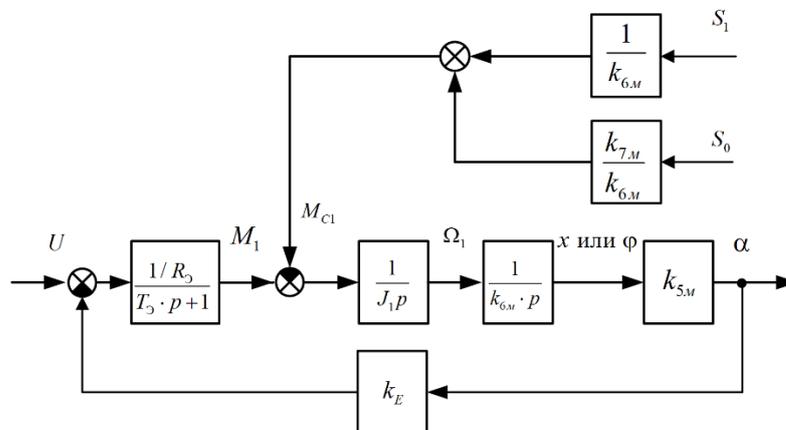


Рисунок 3.46 – Структурная схема математической модели натяжного устройства с двигателем постоянного тока

### ***3.3.3 Методика расчёта мощности двигателя натяжного устройства при “мокрой” намотке***

Синтез электротехнической системы натяжения включает выбор мощности привода исполнительного механизма. Данный вопрос нами рассмотрен для “сухой” намотки в разделе 3.1.7. Однако при выборе мощности привода исполнительного механизма, работающего в оборудовании, предназначенном для “мокрой” намотки, полученными ранее результатами воспользоваться невозможно. Это объясняется абсолютно разной конструкцией натяжных устройств и условий намотки. Поэтому в данном разделе рассмотрим особенности выбора мощности привода натяжного устройства, учитывающего специфические особенности изготовления изделий “мокрым” методом.

Мощность привода натяжных устройств до настоящего времени определялась из условия нагрева по классической теории методом эквивалентного тока, момента, мощности или по эмпирическим выражениям [48,102]. Проверку выбранного привода на соответствие требуемому быстродействию ЭТС натяжения можно было осуществить лишь на одной из последних стадий проектирования – при моделировании ЭТС. В случае, если привод был выбран неправильно, необходимо было повторить весь расчет заново.

Поэтому в работе произведен анализ наиболее распространенных натяжных устройств, используемых при намотке изделий из “мокрого” композиционного материала, разработана их математическая модель, а также сформулированы рекомендации по выбору натяжных устройств.

Выбор мощности привода натяжных устройств предлагается производить по следующей методике, учитывающей особенности работы привода натяжных устройств при намотке изделий из композиционных материалов:

- исходя из требуемых динамических характеристик ЭТС натяжения определяем скорость изменения положения роликов натяжного устройства;
- по найденной скорости изменения положения роликов натяжного устройства и предварительно выбранной скорости вращения двигателя, определяем передаточное отношение редуктора и другие элементы кинематической схемы натяжного устройства;
- предварительно рассчитываем мощность двигателя натяжного устройства в статическом режиме;
- выбираем двигатель;
- проверяем, обеспечит ли данный двигатель требуемую скорость изменения положения ролика натяжного устройства, если это не так, вновь выбираем двигатель бóльшей мощности и повторяем расчет;
- рассчитываем динамические моменты, вызванные намоткой изделия, находим эквивалентный момент привода при намотке изделия;
- проверяем, обеспечит ли выбранный двигатель требуемое значение эквивалентного и максимального моментов, если это не так, выбираем двигатель бóльшей мощности и повторяем расчет.

Рассмотрим процесс намотки изделий “Цилиндр” (см. рисунок 1.11, изделия *a*), где перемещение неподвижных роликов натяжного устройства осуществляется только для компенсации возмущающих воздействий, вызванных неравномерностью прилипания ленты при прохождении неподвижных направляющих тракта намоточного станка. Эти возмущающие воздействия не очень велики. Основной момент, развиваемый электродвигателем, вызван уровнем натяжением “мокрого” материала.

Для определения взаимосвязи требуемых динамических характеристик натяжного устройства  $\frac{d\alpha(t)}{dt}$  с его параметрами: передаточным отношением редуктора и других элементов кинематического механизма ( $k_{\text{ПЕР}}$ ) – необходимо задаться временем перемещения натяжного устройства из одного

крайнего положения в другое ( $T_{\text{НУ}}$ ). В общем случае, зависимость угла перемещения от частоты вращения двигателя  $\Omega_1$ ,

$$\Delta\alpha_{\text{max}} = \int_0^{T_{\text{НУ}}} \frac{\Omega_1(t)}{k_{6.м}} \cdot dt. \quad (3.87)$$

Для наискорейшего перемещения  $\Omega_1(t)$  должно быть постоянным и равным своему максимальному значению, поэтому из (3.87) получим:

$$\Delta\alpha_{\text{max}} = \frac{\Omega_{1\text{max}}}{k_{6.м}} \cdot T_{\text{НУ}}. \quad (3.88)$$

Отсюда имеем, что передаточное отношение редуктора должно быть меньше или равно:

$$k_{6.м} \leq \frac{\Omega_{1\text{max}} \cdot T_{\text{НУ}}}{\Delta\alpha_{\text{max}}}. \quad (3.89)$$

В зависимости от вида натяжного устройства в него входят: для натяжных устройств с “угловым перемещением” самотормозящийся редуктор с передаточным отношением  $k_{6.м}$  или для натяжных устройств с “линейным перемещением” – самотормозящийся редуктор и шестерня, связанная с редуктором и движущаяся по зубчатой рейке. В этом случае общее передаточное отношение равно  $k_{6.м} \cdot r_{\text{ш}}$ .

Усилие  $M_C$ , которое необходимо прикладывать со стороны приводного устройства (см. рисунок 3.37) рассчитывается, в зависимости от исследуемого натяжного устройства по выражениям (3.65), (3.67), (3.63). Очевидно, что выбранный двигатель должен иметь номинальный момент больший, чем максимальное значение  $M_C$ .

При использовании натяжного устройства с “угловым перемещением” максимальное значение  $M_C$  равно:

$$M_{C\text{max}} = \frac{[S_1 + S_0 \cdot e^{\frac{f \cdot \arccos(\frac{2 \cdot r}{L})}{2}} \cdot \frac{r}{L}] \cdot (L + r)}{k_{6.м}} + M_{\text{ТР}}. \quad (3.90)$$

С “линейным перемещением” равно:

$$M_{C \max} = \frac{[S_1 + S_0 \cdot e^{\frac{f \cdot \arccos(-\frac{2r}{y_1})}{2}} \cdot \frac{r}{y_1}] \cdot r_{\text{ш}}}{k_{6,м}} + M_{\text{ТР}}. \quad (3.91)$$

С двумя восьмерками:

$$M_{C \max} = \frac{[S_1 - S_0 + S_0 \cdot e^{\frac{3 \cdot f \cdot \arccos(-\frac{2r}{L})}{2}} \cdot \frac{3 \cdot r}{L} - S_0 \cdot e^{\frac{f \cdot \arccos(-\frac{2r}{L})}{2}} \cdot \frac{r}{L}] \cdot (L + r)}{k_{6,м}} + M_{\text{ТР}}. \quad (3.92)$$

Условием выбора мощности двигателя исходя из максимального момента на валу двигателя является выполнение соотношения:

$$M_{\text{д}} = k_3 \cdot M_{C \max}, \quad (3.93)$$

где  $k_3$  – коэффициент запаса.

При намотке изделий сложной геометрической формы “Кокон” или “Призма” (см. рисунок 1.11, изделия  $c - f$ ) за счет работы укладчика существенно изменяется суммарный угол охвата “мокрой” лентой направляющих тракта станка, и как следствие, натяжение, с которым лента наматывается на изделие. Компенсацию данного возмущающего воздействия осуществляет натяжное устройство за счет изменения своего угла охвата так, чтобы суммарный угол охвата лентой направляющих тракта станка оставался постоянным. Здесь следует отметить, что привод должен обеспечить такую скорость перемещения исполнительного органа, чтобы натяжение на участке укладки ленты на изделие не изменялось. Эта скорость определяется конструкцией натяжного устройства, передаточным отношением редуктора, установленного между исполнительным механизмом и электродвигателем, максимальной скоростью вращения вала двигателя. Кроме того, привод должен обеспечить требуемый момент на валу исполнительного механизма и требуемое значение ускорения.

Для учета влияния укладчика на работу станка в [52, 53, 102] предложено использовать “расширенную кинематическую схему”, которая включает в себя весь тракт намоточного оборудования. На основании данной кинематической схемы можно получить для рассчитанных траекторий

движения раскладчика график изменения усилия натяжения при намотке, а, следовательно, график угла поворота исполнительных роликов натяжного устройства от времени  $\varphi(t) = \Lambda(t)$  для натяжных устройств типа *b*, *c* (см. рисунок 3.33) или перемещения роликов вдоль направляющих  $x(t) = \Lambda(t)$  (см. рисунок 3.33, *a*, *d*, рисунок 3.34). Используем данные графики и соответствующие кинематические схемы натяжных устройств станка для получения величины динамического момента, развиваемого приводом.

Расчет проводим в следующей последовательности.

По известной функции  $\Lambda(t)$  для выбранного исполнительного механизма рассчитываем  $\alpha(t) = \Lambda'(t)$ .

Для известного  $\alpha(t)$  рассчитываем  $M_c(t) = \Lambda''(t)$ .

Рассчитываем  $\Omega_1(t)$  по известным  $\alpha(t)$ .

По основному уравнению динамики привода находим момент, развиваемый приводом в процессе перемещения роликов исполнительного механизма:

$$M_{\text{д}} = M_c(t) + J_1 \frac{d\Omega_1}{dt}. \quad (3.94)$$

Вычисляем эквивалентный момент двигателя:

$$M_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_{\text{ц}}} M_{\text{д}}^2(t) dt}{t_{\text{ц}}}}, \quad (3.95)$$

где  $t_{\text{ц}}$  – время одного полного цикла работы станка (одного витка ленты на изделии).

Сравниваем полученное значение  $M_{\text{ЭКВ}}$  с номинальным моментом двигателя  $M_{\text{НОМ}}$ . Если  $M_{\text{НОМ}} > M_{\text{ЭКВ}}$ , то двигатель выбран правильно, если нет, то необходимо выбрать двигатель бóльшей мощности.

Очевидно, что на выбор мощности привода существенное влияние оказывает наматываемое изделие. Для расчетов необходимо выбирать наиболее сложные, с точки зрения работы привода, изделия.

Следует отметить, что при создании натяжных устройств традиционно используются самотормозящиеся червячные редукторы. Особенностью работы данных механизмов является невозможность вращения приводного двигателя за счет усилий, создаваемых лентой при прохождении направляющих тракта натяжного устройства, и низкий КПД передаточного механизма, порядка (45–50) % [175,176]. Данное решение объясняется отсутствием до настоящего времени надежных электродвигателей, которые могут стоять длительное время (часы) под полной нагрузкой без перегрева. Поэтому целесообразно использовать в натяжных устройствах обычные планетарные редукторы с КПД (85–95) % и синхронные двигатели с постоянными магнитами.

#### ***3.3.4 Разработка обобщенной структурной схемы электротехнического преобразователя натяжного устройства при “мокрой” намотке***

В настоящее время в натяжных устройствах, используемых при намотке изделий “мокрым” композиционным материалом, используются все перечисленные выше тормозные устройства. С целью унификации математического описания натяжного устройства целесообразно разработать обобщенную математическую модель натяжного устройства. Так как электромагнитная постоянная времени привода меньше электромеханической постоянной времени, противоЭДС не учитываем.

Обобщенная структурная схема электротехнического преобразователя натяжного устройства в изображении по Лапласу приведена на рисунке 3.47.

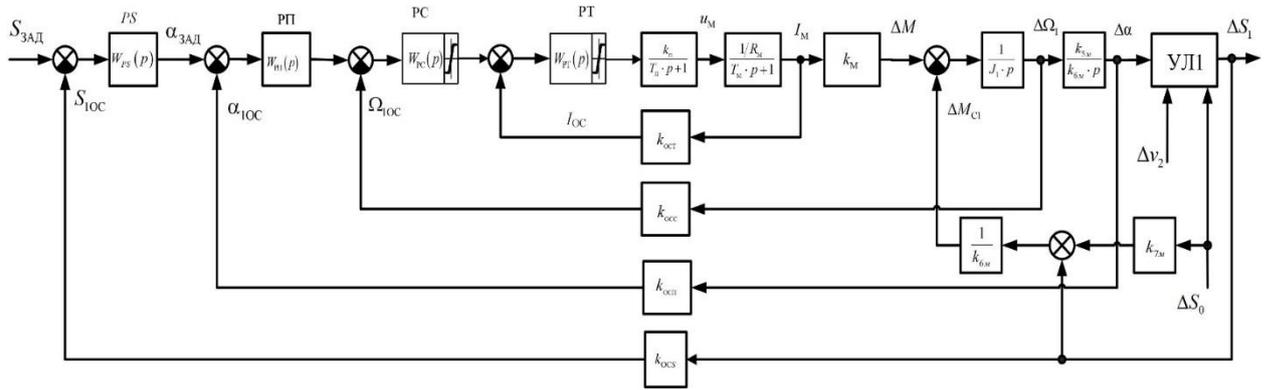


Рисунок 3.47 – Обобщенная структурная схема электротехнического преобразователя натяжного устройства при “мокрой” намотке

На рисунке 3.47 использованы следующие обозначения:  $T_{\Pi}$  – постоянная времени преобразователя;  $k_{\Pi}$  – 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 натяжения натяжного устройства;  $k_{ост}$  – коэффициент передачи обратной связи по току электродвигателя;  $k_{осс}$  – коэффициент передачи обратной связи по частоте вращения двигателя;  $k_{осп}$  – коэффициент передачи обратной связи по положению натяжного устройства;  $k_{осс}$  – коэффициент передачи обратной связи по натяжению;  $\Delta M$  – электромагнитный момент электродвигателя;  $\Delta M_{ст}$  – момент статического сопротивления на валу двигателя;  $T_M$  – электромагнитная постоянная времени статора СДПМ или двигателя постоянного тока;  $R_M$  – эквивалентное сопротивление СДПМ или ДПТ;  $k_M$  – коэффициенты передачи для СДПМ или ДПТ;  $I_{ос}$  – сигнал обратной связи по току электродвигателя;  $I_{зад}$  – сигнал задания на ток электродвигателя;  $S_{10c}$  – сигнал обратной связи по натяжению;  $S_{зад}$  – сигнал задания на натяжение;  $J_1$  – приведенный момент инерции привода;  $\Omega_1$  – частота вращения вала двигателя;  $\alpha$  – угол охвата лентой невращающегося ролика;  $r_1$  – радиус тормозного ролика;  $k_{5m}$  – коэффициент,

связывающий перемещение ролика исполнительного механизма ( $x$  или  $\varphi$ ) с углом охвата “мокрой” лентой роликов исполнительного механизма ( $\alpha$ );  $k_{6m}$  – 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.

Приведенную на рисунке 3.47 обобщенную структурную схему электротехнического преобразователя натяжного устройства рекомендуется применять при синтезе систем регулирования натяжения при намотке изделий “мокрой” композиционной лентой.

### 3.4 Анализ натяжных устройств активного шпулярника

Шпулярник – это устройство, предназначенное для размещения паковок с армирующим материалом и служат для подачи его в тракт станка с заданным натяжением.

В процессе изготовления композиционных изделий шпулярник используется при производстве предварительно пропитанной композиционной ленты на ленточных установках, при намотке изделий “мокрым” методом. Существует два вида шпулярника: пассивный и активный.

В пассивном шпулярнике количество ниток доходит до 1200 и натяжение создается механическими тормозными устройствами. Очевидно, что натяжение каждой нити существенно зависит от многих неконтролируемых факторов (количество замасливателя на нити, механического износа тормозного механизма, диаметра паковки с нитью, скорости движения нити и т.д.). Это приводит к тому, что нити в изделии имеют разный предварительный “натяг” и работают неравномерно.

Активные шпулярники появились сравнительно недавно и в настоящее время уже широко используются при намотке композиционных материалов. Этому способствовало появление на рынке композиционных материалов

жгутиков, состоящих из нескольких десятков элементарных нитей. Активный шпулярник содержит, как правило, ограниченное число шпуль (до 48 штук). В этих шпулярниках при сматывании жгутика шпуля вращается. Шпуля связывается с тормозным механизмом. Тормозной механизм может быть механическим, или могут использоваться различные электро - механические устройства. Рассмотрим возможные варианты исполнения натяжного устройства в активном шпулярнике. Это могут быть механические тормозные устройства, ферропорошковые тормоза, асинхронные двигатели, синхронные двигатели с постоянными магнитами, вентильно-индукторные двигатели.

В настоящее время наиболее часто активные шпулярники изготавливаются с механическим управлением или с двигателями постоянного тока. В первом случае используется механическое слежение за диаметром шпули. При этом изменяется тормозное воздействие на валу шпули по мере ее сматывания. При использовании электронной системы устанавливаются датчики натяжения на каждом жгуте, вал, на котором закреплена шпуля, связан с электродвигателем. Двигатель, работая в тормозном режиме, подтормаживает шпулю, обеспечивая заданное по технологии натяжение. Двигатель питается от преобразователя напряжения.

Отметим прежде всего, что шпулярники, оснащенные механическими тормозными устройствами, даже при наличии слежения за диаметром, не могут обеспечить точность поддержания натяжения не выше  $\pm(10-15) \%$  от заданного уровня. Кроме этого, они не могут устранять провисание материала в период пуска и торможения станка, что тоже негативно влияет на качество наматываемых изделий.

Шпулярники, оснащенные тормозными устройствами с ферропорошковыми тормозами, при наличии обратных связей по натяжению каждого жгутика, имеют высокую точность поддержания заданного натяжения, до  $\pm(1-5) \%$ , простую конструкцию, но также не могут устранить провисание материала в период пуска и торможения оборудования.

Шпулярники, оснащённые электродвигателями могут иметь те же характеристики, что и шпулярники, оснащенные ферропорошковыми тормозами, но в отличие от них они могут устранять провисание материала в момент стоянки станка, торможения процесса намотки или его начала. Здесь, в зависимости от требований к точности поддержания натяжения, наиболее целесообразно использовать или дешевые двигатели постоянного тока, или синхронные двигатели с постоянными магнитами.

### **3.5 Анализ натяжных устройств, используемых при выкладке**

При выкладке используется несколько бобин с предварительно пропитанной лентой, 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. Наличие в технологическом процессе нулевой скорости (при перемещении выкладочной головки из одного места пространства в другое без процесса самой выкладки) делает невозможным применение различных механических подтормаживающих устройств, ферропорошковых тормозов или асинхронных двигателей. Для удовлетворения поставленных требований каждая бобина с лентой оснащается индивидуальным электромеханическим тормозным устройством. При этом в таких системах могут использоваться или только тормозные устройства, связанные с бобинами с лентой, или дополнительно тракт смотки может оснащаться промежуточным натяжным устройством. Возможно и использование амортизаторов, уменьшающих динамические нагрузки на привод. В этом случае в приводе бобин с лентой можно использовать и вентильно – индукторные двигатели, имеющие некоторые пульсации момента на своем валу.

Рассмотрим возможные варианты натяжных устройства при выкладке. Прежде всего следует отметить, что здесь следует отметить, что натяжное

устройство может устанавливаться только на бобине с лентой или могут использоваться два натяжных устройства – на бобине с лентой и на промежуточном ролике. Для обоих случаев могут применяться гидромеханические амортизаторы или они могут отсутствовать. В этих устройствах могут использоваться двигатели постоянного тока, синхронные двигатели с постоянными магнитами или вентильно – индукторные двигатели.

### **Выводы по главе**

1. Рассмотрены варианты возможных натяжных устройств при намотке изделий из “сухого” композиционного материала. Показано, что при намотке изделий с высокими требованиями к условиям эксплуатации изделия целесообразно применять синхронные двигатели с постоянными магнитами с векторным управлением. При изготовлении изделий, к которым не предъявляются особые требования к условиям эксплуатации конструкций, целесообразно использовать ферропорошковые тормозные устройства.

2. Рассмотрены варианты возможных натяжных устройств, которыми оснащены бобины с “сухим” композиционным материалом. Показано, что данные устройства могут оснащаться любыми механизмами – от простых механических тормозных устройств до электроприводов переменного тока с векторным управлением.

3. Выявлены недостатки существующей методики выбора мощности привода натяжных устройств, учитывающего только статический момент намотки, приводящий к перегреву двигателя. Предложена новая методика выбора мощности привода натяжных устройств, учитывающая динамические моменты, связанные с изменением параметров при намотке композиционных изделий, позволяющая обоснованно выбирать двигатель натяжного устройства.

4. Получена обобщенная структурная схема электротехнического преобразователя натяжного устройства при намотке изделий из “сухого”

композиционного материала, позволяющая сократить время на разработку и исследование системы регулирования натяжения с заданными параметрами.

5. Проанализированы натяжные устройства, используемые при намотке изделий из “мокрого” композиционного материала. По конструктивным особенностям впервые проведена их систематизация на изделия с угловым перемещением роликов и с линейным перемещением роликов. Сформулированы основные требования, предъявляемые к натяжным устройствам, что позволяет на ранних стадиях проектирования обоснованно выбрать конструкцию натяжного устройства.

6. Впервые получены аналитические выражения для натяжных устройств, связывающие угол охвата “мокрой” лентой роликов натяжного устройства, статического и динамического моментов, возникающих на валу двигателя натяжного устройства, максимального статического момента от угла поворота роликов или их перемещения, что дает возможность при проектировании ЭТС натяжения обоснованно выбрать натяжное устройство.

7. Впервые предложена методика расчета мощности двигателя натяжного устройства при намотке изделий из “мокрого” композиционного материала с учётом формы и размеров наматываемого изделия. Проанализировано влияние на мощность двигателя типа выбранного редуктора. Установлено, что использование червячного редуктора не оказывает существенного влияния как на мощность используемого электродвигателя, так и на динамические характеристики электропривода, но позволяет использовать различные электродвигатели, так как при нулевой скорости момент на валу двигателя равен нулю.

8. Показано, что при намотке изделий с высокими требованиями к условиям эксплуатации целесообразно применять синхронные двигатели с постоянными магнитами с векторным управлением. При изготовлении изделий, к которым не предъявляются высокие требования к условиям эксплуатации изделий, целесообразно использовать ферропорошковые тормозные устройства.

9. Показано, что среди натяжных устройств наиболее целесообразно использовать натяжное устройство с угловым перемещением и двумя последовательно включенными восьмерками с точки зрения создания наибольшего диапазона регулирования натяжения и уменьшения статического момента на валу привода.

## 4 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И СТРУКТУРНЫХ СХЕМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАТЯЖЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЕГО НАМОТКЕ И ВЫКЛАДКЕ

### 4.1 Подходы к структурно-параметрическому синтезу электротехнических систем натяжения композиционного материала

При синтезе ЭТС возможны три варианта.

*Первый вариант.* Первым этапом проектирования систем управления является определение структурной схемы ЭТС. Здесь наиболее целесообразно использовать стандартные, традиционные структурные схемы.

*Второй вариант.* Структурная схема ЭТС не задается, а определяется на основании некоторых математических вычислений [104-107, 114-119]. Данный вариант целесообразно использовать при построении электротехнических систем натяжения с функциональной неопределенностью.

*Третий вариант* заключается в создании алгоритмов работы регуляторов. Здесь разрабатываются алгоритмы вычисления управляющего воздействия. Создание таких алгоритмов необходимо при динамически изменяющихся параметрах объектов управления в больших диапазонах.

Следует отметить, что возможна и комбинация рассмотренных вариантов.

При структурно-параметрическом синтезе ЭТС натяжения композиционной ленты при намотке и выкладке используются все варианты. Выбор того или иного варианта определяется:

- требованиями к условиям эксплуатации изготавливаемых изделий (см. раздел 1.5);

- классом, к которому относятся изготавливаемые изделия (см. раздел 1.5).

Все варианты рассмотрены далее в разделах 4–6.

## **4.2 Разработка функциональных схем электротехнических систем натяжения при “сухой” намотке и выкладке**

Перед разработкой функциональных схем электротехнических систем натяжения при “сухой” намотке и выкладке рассмотрим возможную классификацию таких систем. Основной сложностью при классификации современных ЭТС является определение основных классификационных признаков. Благодаря внедрению новой элементной базы (вычислительной техники, современных преобразователей энергии) увеличивается число реализуемых классов систем регулирования натяжения. По итогам анализа современного состояния вопроса нами предложены систематизация и возможные варианты построения ЭТС натяжения натяжного устройства и бобины с препрегом при намотке и выкладке, которые приведены на рисунке 4.1.

Прежде всего в предлагаемой классификации учтено использование различных исполнительных механизмов от механических тормозов до синхронных двигателей с постоянными магнитами. В зависимости от используемых механизмов рассматриваемые системы могут выполняться без регулирования, с механическим регулированием или с регулированием с использованием электронных устройств. В последнем случае может быть косвенное регулирование (оно возможно и при механическом тормозном устройстве), электронное регулирование с использованием одного или нескольких контуров (в последнем случае наиболее целесообразно использовать принцип подчиненного регулирования).

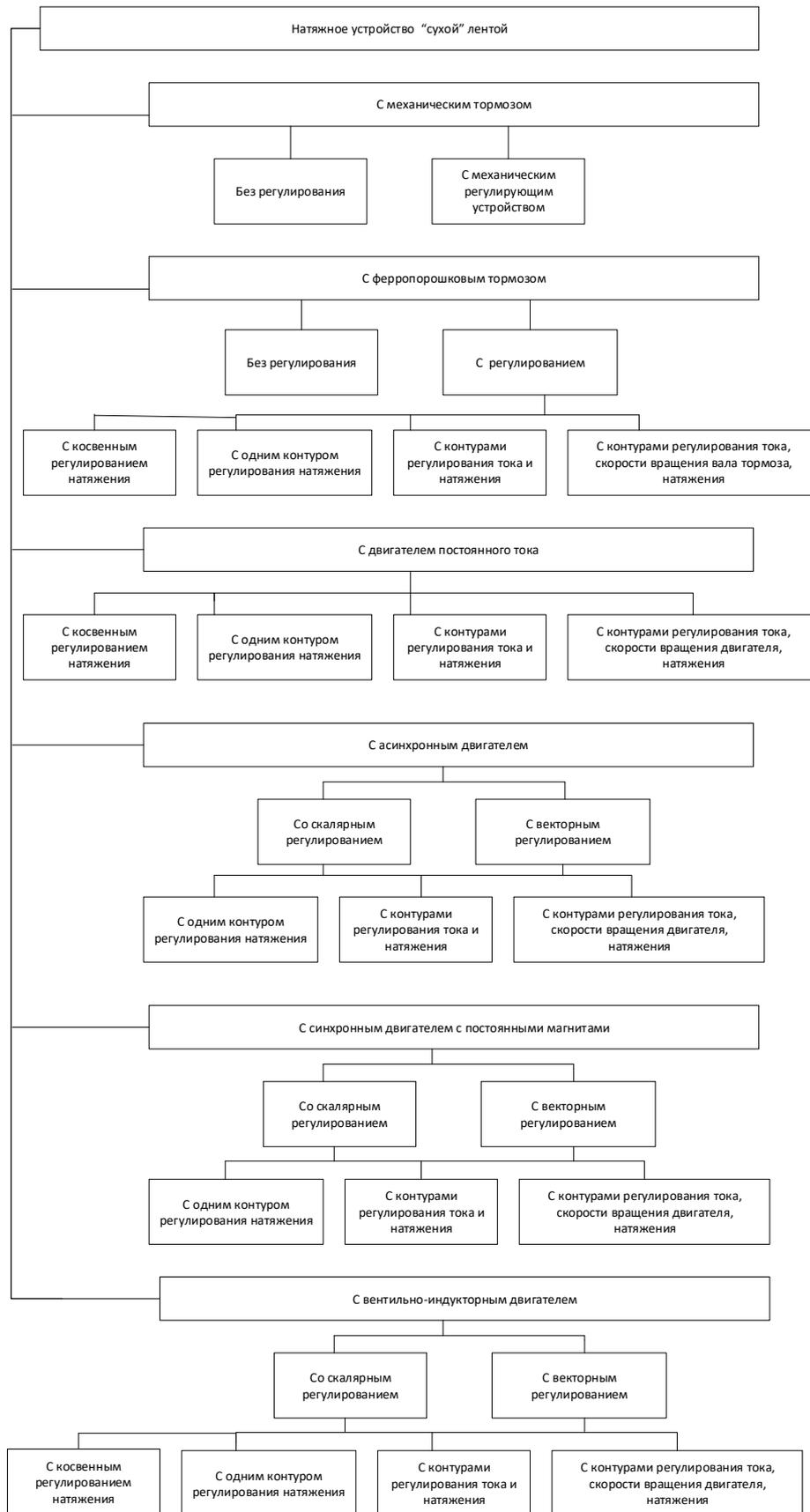


Рисунок 4.1 – Классификация и возможные варианты построения систем регулирования натяжения натяжного устройства и бобины с препрегом при намотке и выкладке

Рассмотрев все многообразие возможных вариантов ЭТС натяжения при намотке и выкладке, выделим, на наш взгляд, наиболее перспективные варианты.

На рисунках 4.2 – 4.4. показаны ЭТС натяжения и скорости намотки при использовании в процессе намотки одной бобины с композиционной лентой.

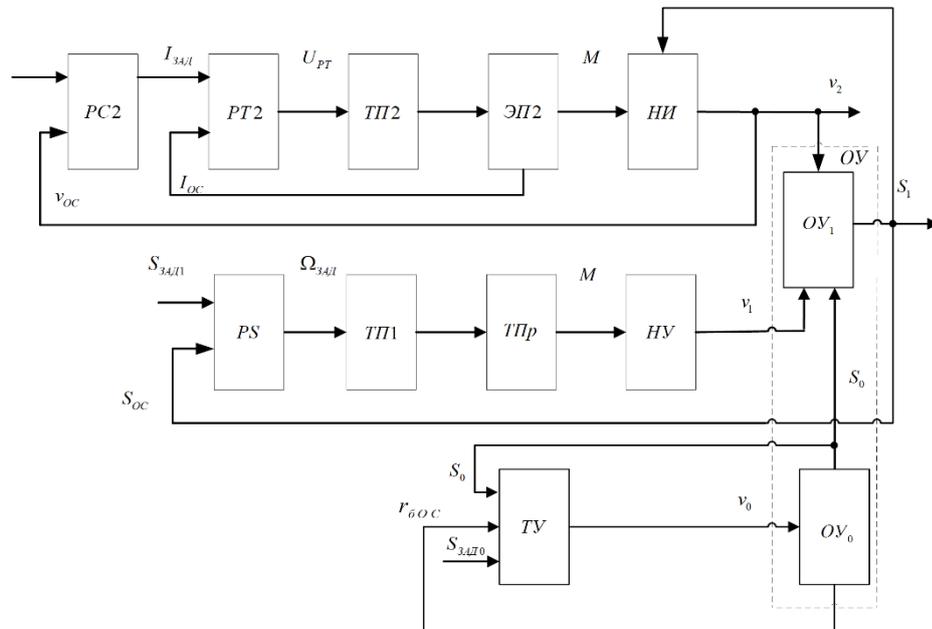


Рисунок 4.2 – Функциональная схема ЭТС натяжения и скорости намотки с одноконтурной системой регулирования натяжения и одной бобиной с лентой

Упругая лента  $OU_0$  сматывается с бобины. Бобина с лентой подтормаживается тормозным устройством ТУ. В зависимости от исполнения, ТУ работает с учетом информации о натяжении  $S_0$ , радиусе бобины с лентой  $r_{бос}$  или без их учета (на рисунках 4.2 – 4.4 на ТУ приведены эти сигналы). Натяжное устройство подтормаживается тормозным приводом ТПр. Привод питается от преобразователя ТП1, связанного регулятором натяжения PS. На вход данного регулятора подаются сигналы о требуемом натяжении  $S_{зад}$  и о реальном натяжении  $S_{oc}$ .

Скорость намотки ленты на наматываемое изделие НИ  $v_2$  определяется частотой вращения электропривода ЭП2 и радиусом наматываемого изделия.

На вход ЭП2 подается напряжение с преобразователя ТП2. Последний связан с регулятором тока РТ2. На вход регулятора тока подается сигнал с регулятора скорости РС2. На вход данного регулятора подаются сигналы о требуемом значении скорости  $v_{зад}$  и о реальном значении скорости  $v_{ос}$ .

На рисунке 4.3 показана функциональная схема ЭТС натяжения и скорости катушки с двухконтурной системой регулирования натяжения и одной бобиной с лентой. В отличие от одноконтурной системы, в системе регулирования натяжения, присутствует внутренний контур тока с регулятором РТ1. На РТ1 поступают сигналы с регулятора натяжения  $RS$  и сигнал о реальном значении тока исполнительного механизма с ТПр.

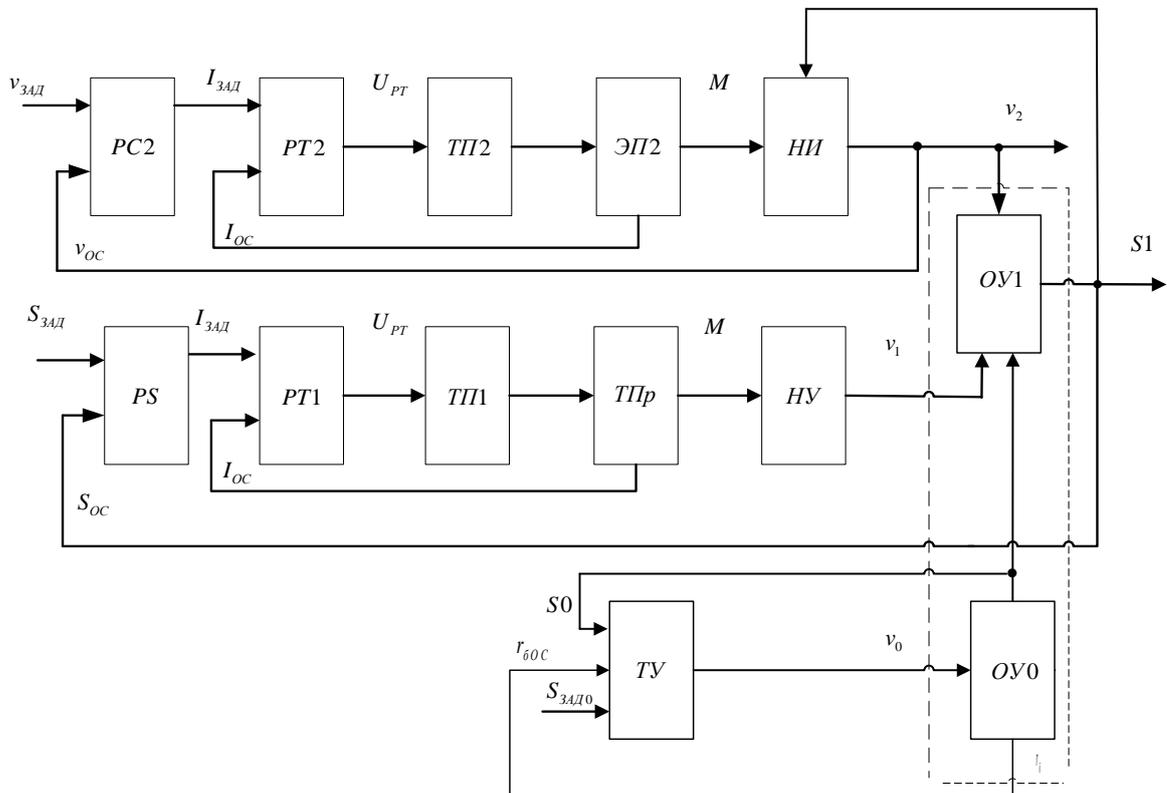


Рисунок 4.3 – Функциональная схема ЭТС натяжения и скорости катушки с двухконтурной системой регулирования натяжения и одной бобиной с лентой

На рисунке 4.4 приведена функциональная схема ЭТС натяжения и скорости катушки с трехконтурной системой регулирования натяжения и одной бобиной с лентой.

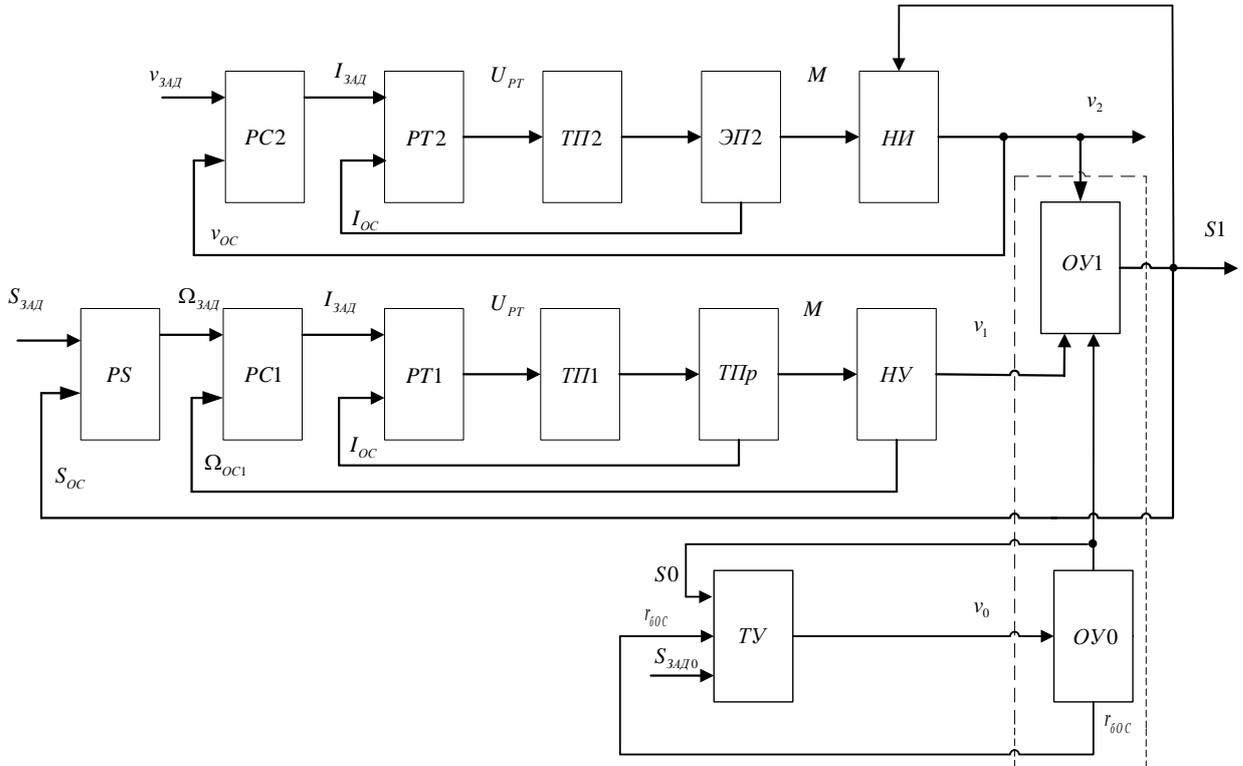


Рисунок 4.4 – Функциональная схема ЭТС натяжения и скорости катушки с трехконтурной системой регулирования натяжения и одной бобиной с лентой

В контуре регулирования натяжения добавлен еще внутренний контур скорости с регулятором PC1. Регулятор скорости PC1 связан с регулятором натяжения PS. Сигнал о реальном значении частоты вращения привода поступает с НУ.

Рассмотрим достоинства и недостатки приведенных схем.

Одноконтурная ЭТС натяжения теоретически позволяет получить максимальное быстродействие при регулировании натяжения наматываемого материала. Однако, практически регулятор данной системы сложно рассчитать и тяжело реализовать в связи с высоким порядком дифференциального уравнения, описывающего данную ЭТС натяжения.

Поэтому, обеспечить высокое быстродействие (малое время переходного процесса при реакции на управляющее и возмущающее воздействия) ЭТС при использовании только одного контура регулирования натяжения не удастся, регулятор становится сложным.

Двухконтурная ЭТС натяжения теоретически имеет более низкое быстродействие, чем одноконтурная система, но и более простой регулятор. Однако и в этом случае регулятор получается достаточно сложным и его трудно настроить.

Трехконтурная ЭТС натяжения теоретически имеет быстродействие в четыре раза хуже, чем одноконтурная система регулирования. Однако в этом случае получается достаточно простой регулятор, и система просто настраивается [49-51,54,57-59,108-112,136-140]. Отметим, что современный сервопривод с векторным управлением имеет полосу пропускания порядка 1000 Гц. В трехконтурной системе полоса пропускания, таким образом, будет 250 Гц. С такой полосой пропускания теоретически можно добиться времени переходного процесса в ЭТС натяжения 0,02 с. Таким образом, анализируя приведенные функциональные схемы, считаем, что наиболее перспективно создание электротехнических систем, построенных по принципу подчиненного регулирования, имеющих три контура: внутренний контур тока, следующий контур скорости и внешний контур натяжения. Такие системы будут легко настраиваться и иметь достаточное быстродействие.

В таблице 4.1 приведены основные данные рассмотренных ЭТС натяжения. Данные получены на основе анализа литературных источников [49-51,54,57-59,108-112,136-140].

Таблица 4.1 – Основные данные систем регулирования натяжения

Параметр сравнения	Количество контуров в системе регулирования натяжения		
	Одноконтурная	Двухконтурная с внутренним контуром тока	Трехконтурная с внутренними контурами тока и скорости
Быстродействие (теоретическое),с	0,0047	0,0094	0,0188
Полоса пропускания, Гц	1000	500	250
Наличие датчиков обратной связи	Один датчик: натяжения ленты	Два датчика: тока двигателя; натяжения ленты	Три датчика: тока двигателя; скорости вращения двигателя; натяжения ленты
Количество регуляторов	Один регулятор: натяжения ленты	Два регулятора: тока двигателя; натяжения ленты	Три регулятора: тока двигателя; скорости вращения двигателя; натяжения ленты
Сложность настройки регуляторов	Очень высокая	Высокая	Низкая

Анализируя полученные результаты, можно сделать выводы о том, что трехконтурная ЭТС натяжения имеет высокое быстродействие, простые регуляторы и наиболее целесообразна для использования в системах регулирования натяжения при намотке изделий из “сухого” композиционного материала.

Рассмотрим возможности построения систем, подтормаживающих бобину с “сухой” лентой (см. рисунок 4.1). Функциональные схемы таких

систем представлены на рисунках 4.5 –4.9. Такие схемы используются в намоточных станках и в выкладочном оборудовании.

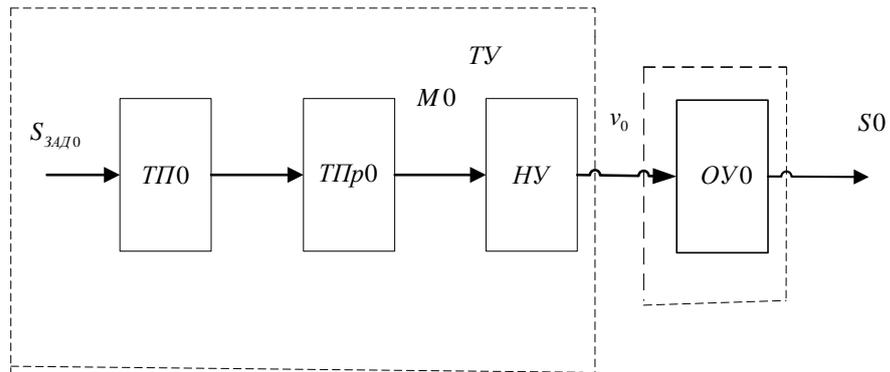


Рисунок 4.5 – Функциональная схема устройства сматывания ленты с бобины без контуров регулирования

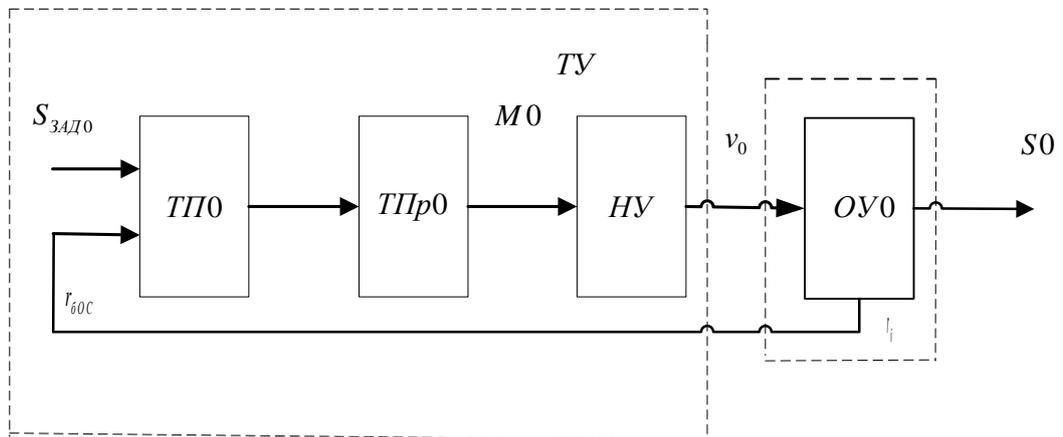


Рисунок 4.6 – Функциональная схема устройства сматывания ленты с бобины с регулированием момента в функции радиуса сматываемой бобины

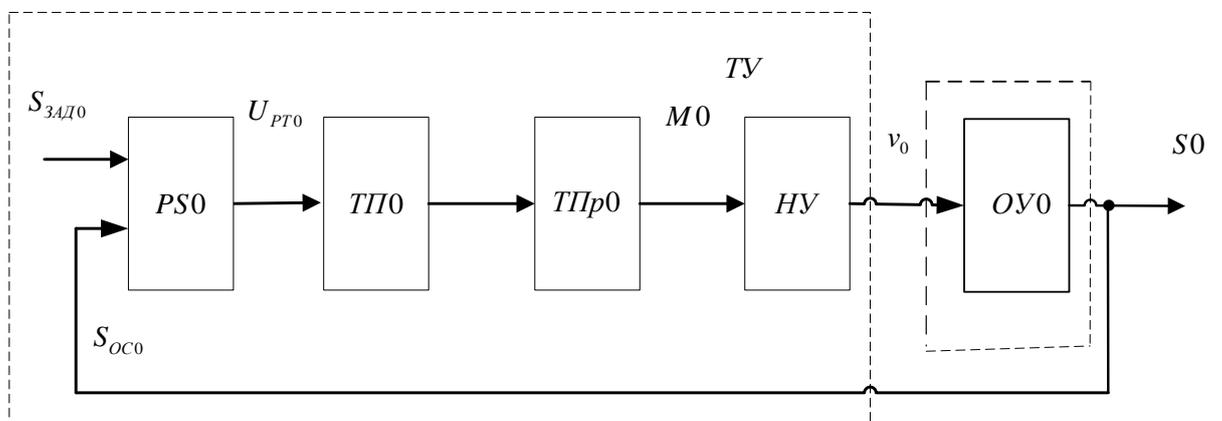


Рисунок 4.7 – Функциональная схема устройства сматывания ленты с бобины с одним контуром регулирования натяжения

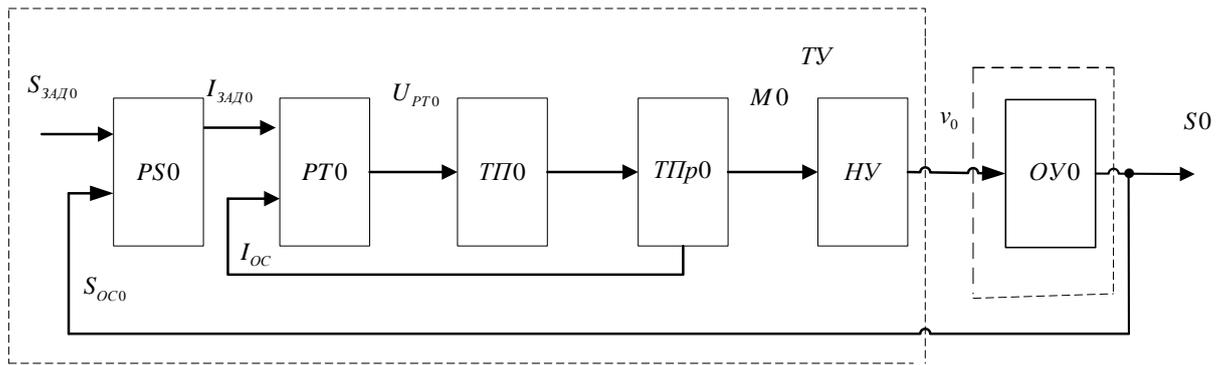


Рисунок 4.8 – Функциональная схема устройства сматывания ленты с бобины с контурами регулирования тока и натяжения

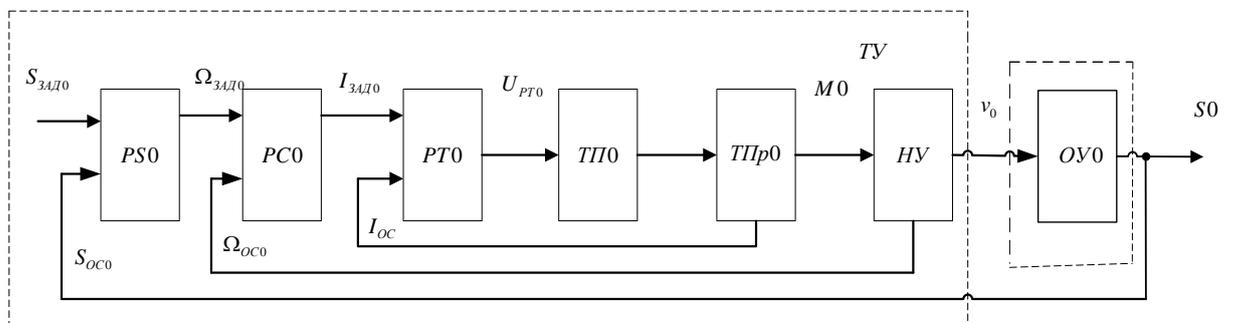


Рисунок 4.9 – Функциональная схема устройства сматывания ленты с бобины с контурами регулирования тока, скорости и натяжения

К ЭТС натяжения, сматываемой с бобины ленты на намоточных станках, предъявляются более мягкие требования как по точности поддержания заданного значения натяжения, так и по времени переходного процесса. Точность стабилизации натяжения, как отмечалось в разделе 1, в этом случае лежит в пределах (1–10) %, время переходного процесса может достигать значения 0,5 с. Данные требования удовлетворяются практически всеми исполнительными механизмами. Следует отметить, что использование в рассматриваемых устройствах дорогих приводов экономически нецелесообразно. Здесь следует применять либо разомкнутые ЭТС по натяжению с обратной связью по диаметру сматываемой ленты, либо простые “грубые” одноконтурные ЭТС натяжения с “простыми” регуляторами.

Отдельным вопросом применения рассмотренных систем в выкладочном оборудовании являются большие динамические моменты, вызванные процессами начала выкладки и ее завершением. Для их компенсации следует использовать быстродействующие системы регулирования, специальные корректирующие устройства или амортизаторы. Корректирующие устройства и амортизаторы позволяют получить удовлетворительное качество регулирования натяжения при выкладке и незначительно увеличивают стоимость оборудования.

В настоящее время существуют технологические процессы намотки изделий одновременно несколькими лентами. Так при производстве лонжеронов на вертолеты на намоточных станках типа НЛ-3А и на станках производства Македонии, одновременно наматываются четыре “сухих” композиционных ленты [20,76]. На рисунках 4.10–4.12 показаны функциональные схемы ЭТС, использующих при намотке одновременно несколько бобин с лентой. Здесь, аналогично описанному ранее, приведены одноконтурные, двухконтурные и трехконтурные системы регулирования натяжения. Характерной особенностью данного процесса намотки является возможное влияние контуров регулирования друг на друга через наматываемую конструкцию. Более детально данный вопрос рассмотрен в разделе 4.2. Отметим, как и ранее, что здесь целесообразно применять трехконтурную систему регулирования натяжения. Данная система обеспечивает требуемую динамику привода и проста в настройке приводов.

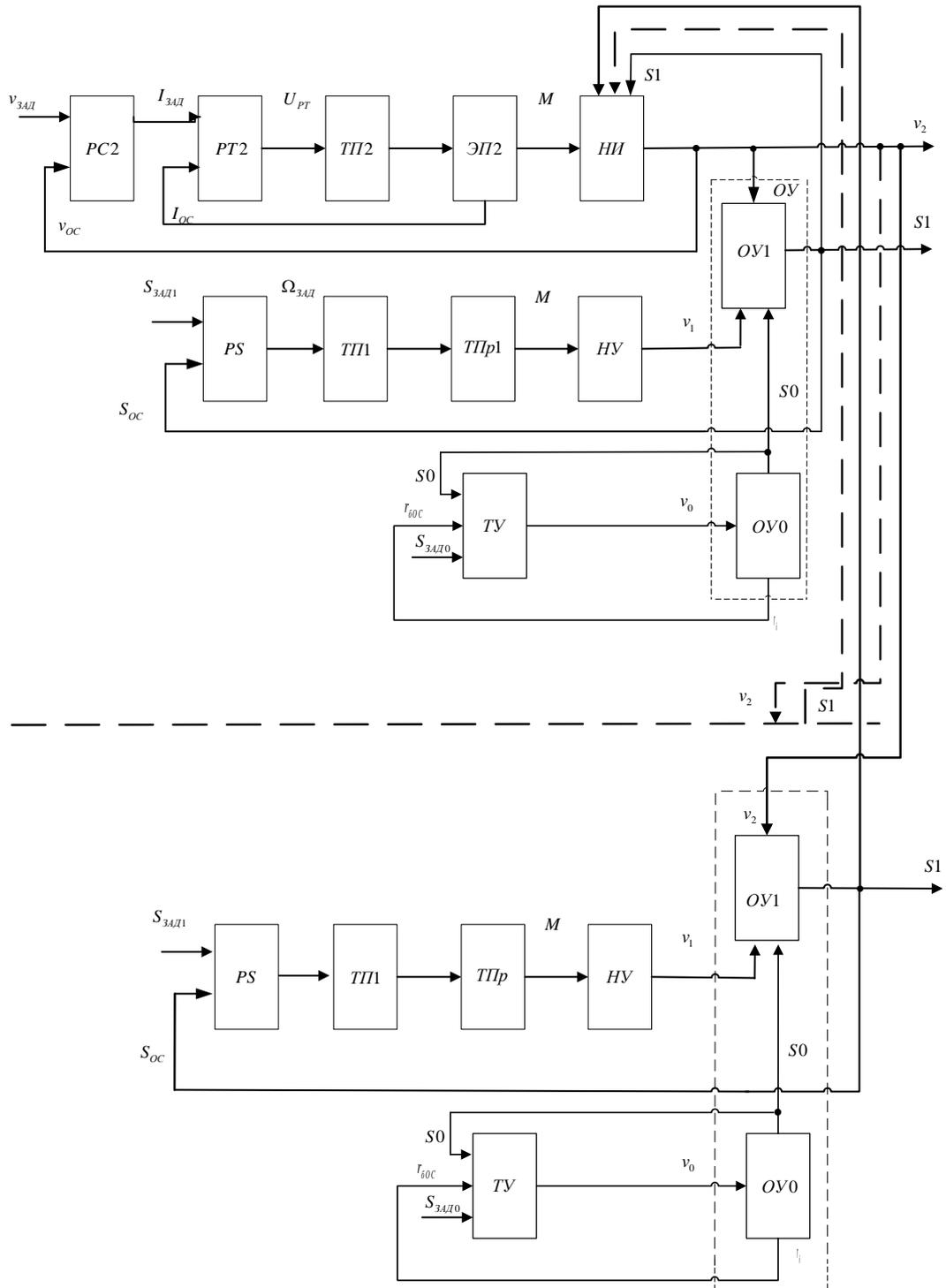


Рисунок 4.10 – Функциональная схема ЭТС натяжения и скорости катушки с одноконтурной системой регулирования натяжения и несколькими бобинами с лентой

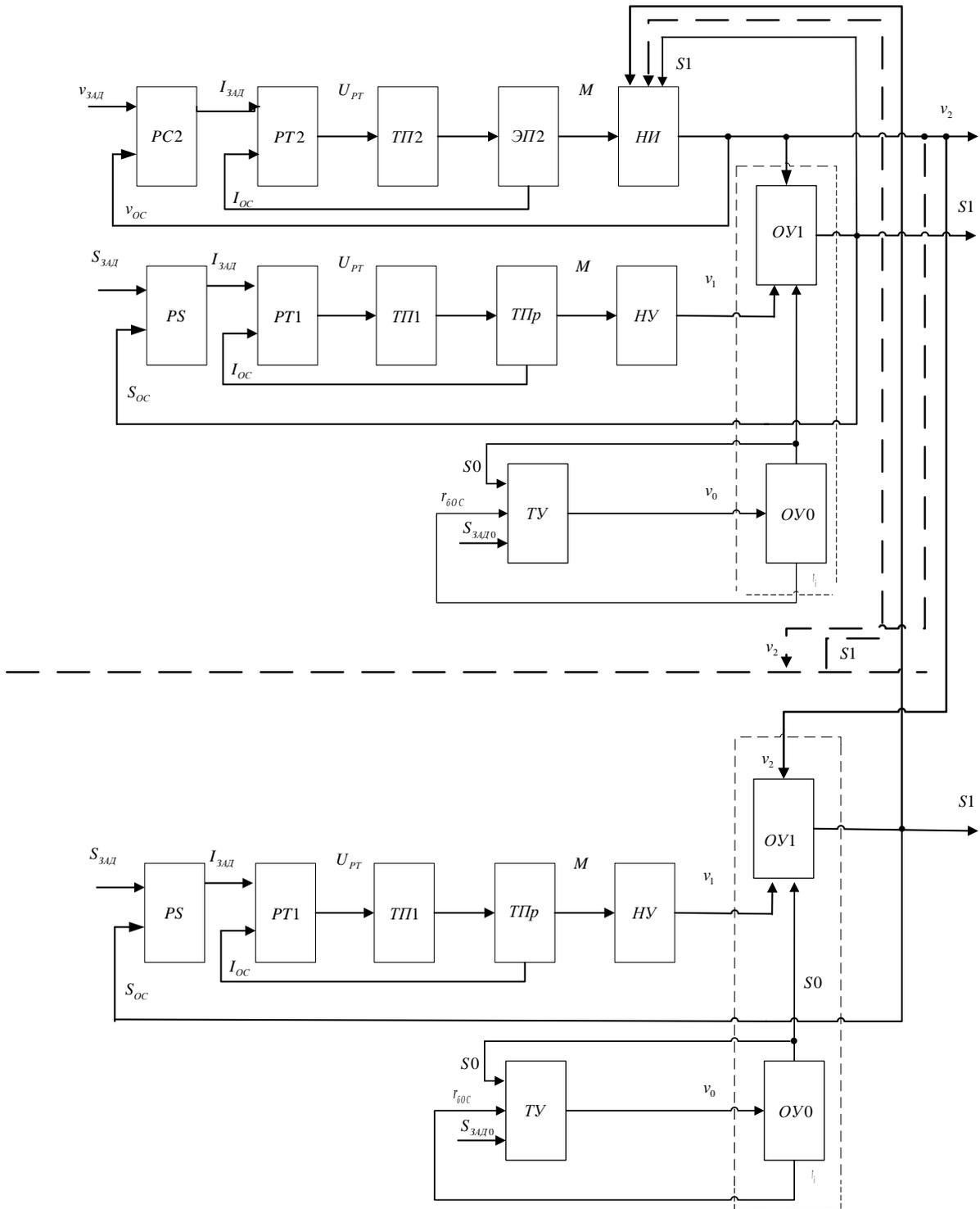


Рисунок 4.11 – Функциональная схема ЭТС натяжения и скорости намотки с двухконтурной системой регулирования натяжения и несколькими бобинами с лентой

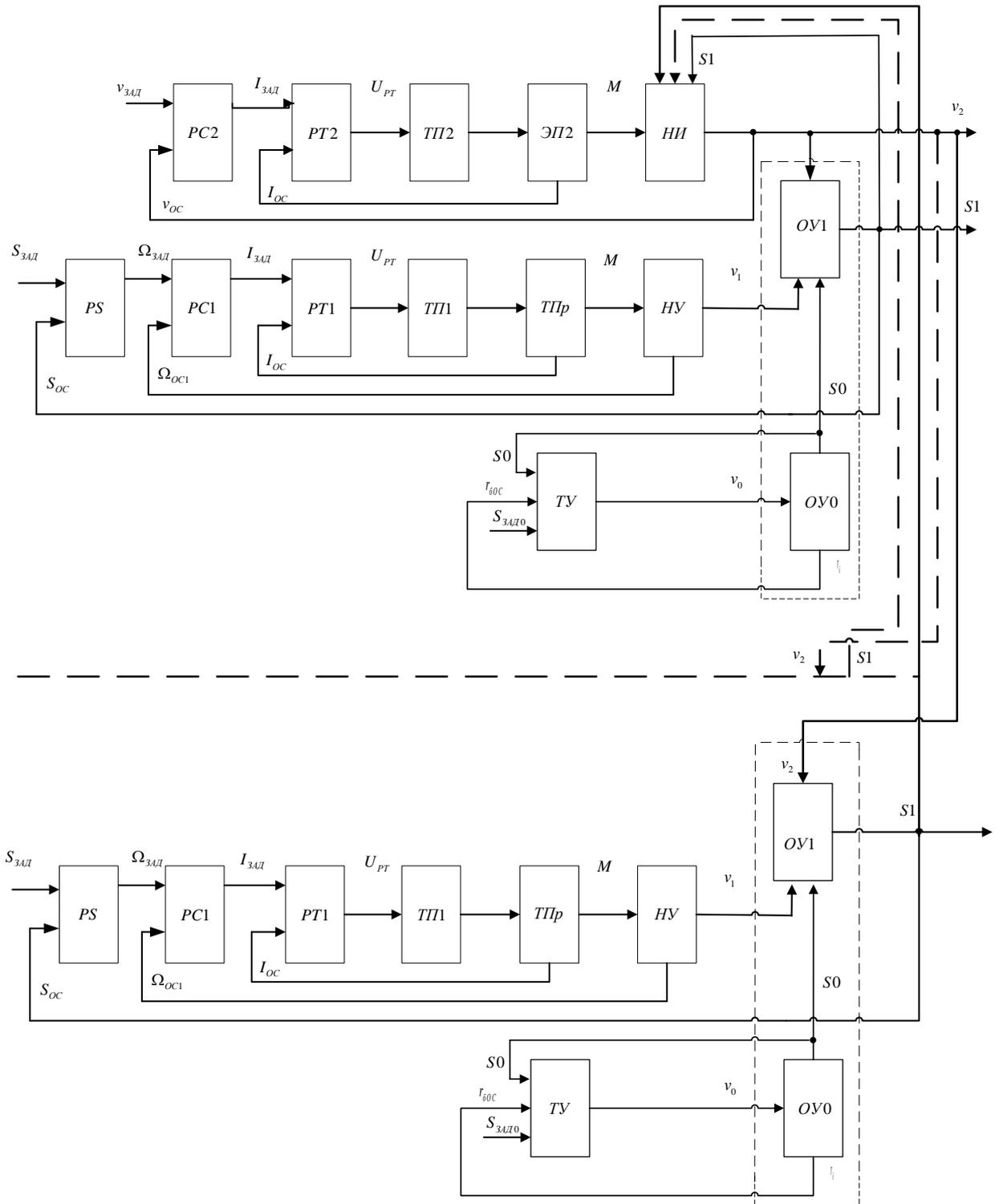


Рисунок 4.12 – Функциональная схема ЭТС натяжения и скорости катушки с трехконтурной системой регулирования натяжения и несколькими бобинами с лентой

### 4.3 Разработка структурных схем электротехнических систем регулирования натяжения при “сухой” намотке и выкладке

В соответствии с полученными в разделе 4.1 функциональными схемами ЭТС натяжения “сухой” композиционной ленты (см. рисунок 4.5), приведем разработанную нами структурную схему трехконтурной системы ЭТС натяжения и одной бобиной с лентой (рисунок 4.13) [164,177].

На данной структурной схеме обозначено:  $\Omega_{3АД2}$  – задание на регулятор скорости РС2 электропривода, осуществляющего вращение наматываемого изделия;  $W_{РС2}(p)$  – передаточная функция регулятора скорости;  $I_{3АД2}$  – задание на регулятор тока РТ2;  $W_{РТ2}(p)$  – передаточная функция регулятора тока;  $k_{П2}$  – коэффициент усиления полупроводникового преобразователя;  $T_{П2}$  – постоянная времени преобразователя;  $U_{М2}$  – напряжение, подаваемое на двигатель;  $R_{М2}$  – сопротивление якоря электродвигателя;  $T_{М2}$  – постоянная времени обмотки двигателя;  $I_{М2}$  – ток якоря двигателя;  $k_{М2}$  – коэффициент усиления двигателя;  $M_2$  – момент, развиваемый двигателем;  $M_{С2}$  – момент статического сопротивления на валу двигателя;  $J_2$  – момент инерции двигателя;  $\Omega_2$  – частота вращения якоря двигателя;  $h_2$  – радиус наматываемого изделия;  $i_2$  – передаточное отношение редуктора;  $v_2$  – линейная скорость намотки ленты на изделие или укладки ленты на изделие;  $\eta_2$  – КПД редуктора.

На рисунке 4.14 показана структурная схема ЭТС натяжения “сухой” композиционной ленты с несколькими трактами намотки. Каждый тракт намотки оснащен своей системой регулирования. Они связаны между собой через общее наматываемое изделие и привод, вращающий данное изделие.

На рисунках 4.15 – 4.18 приведены структурные схемы ЭТС натяжения композиционной ленты при ее выкладке с использованием амортизаторов и без них [209].

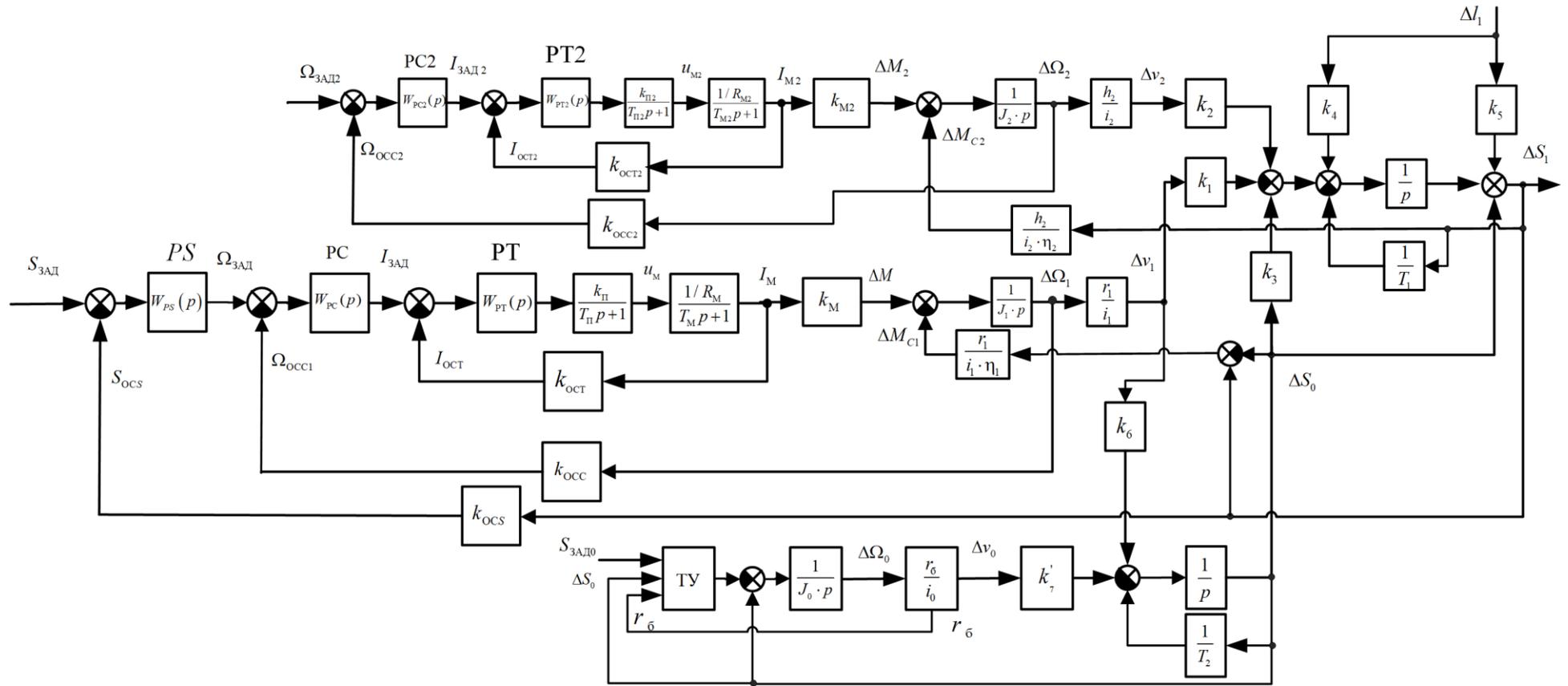


Рисунок 4.13 – Структурная схема электротехнической системы регулирования натяжения и скорости катушки с трёхконтурной системой регулирования натяжения и одной бобиной с лентой

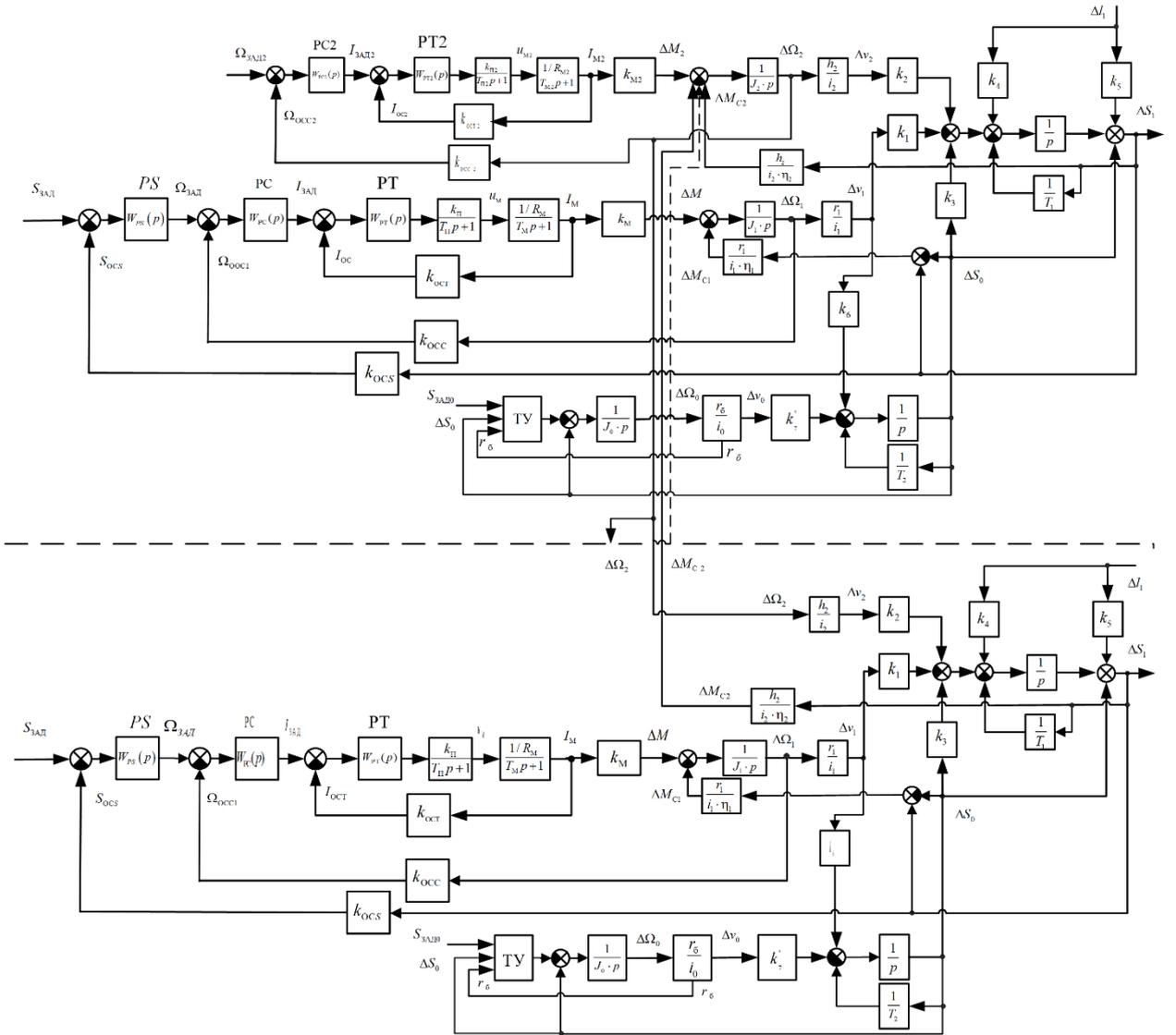


Рисунок 4.14 – Структурная схема ЭТС натяжения и скорости катушки с трёхконтурными системами регулирования натяжения и несколькими бобинами с лентой

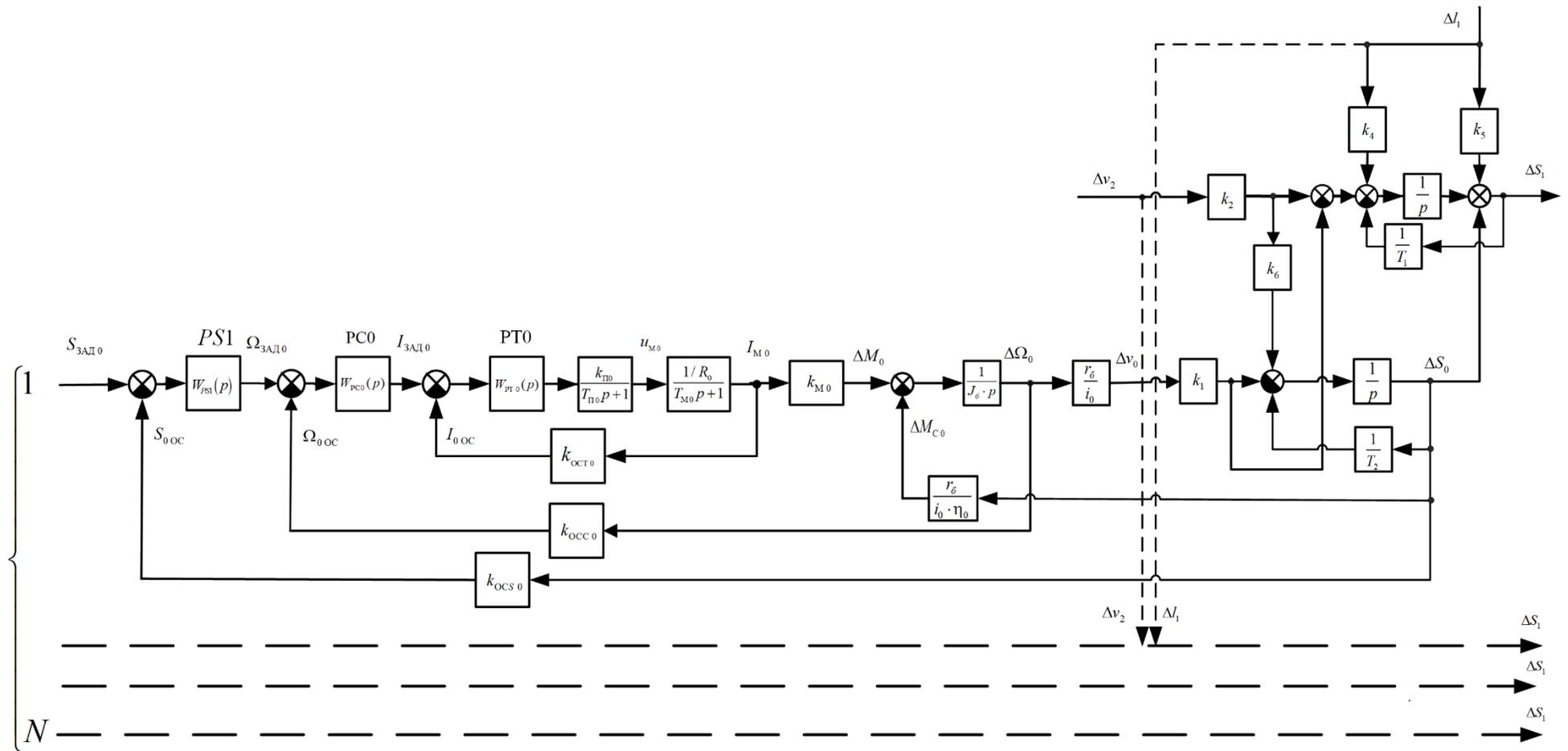


Рисунок 4.15 – Структурная схема электротехнической системы регулирования натяжения выкладки с трёхконтурной системой регулирования натяжения с воздействием на бобину с лентой без амортизатора

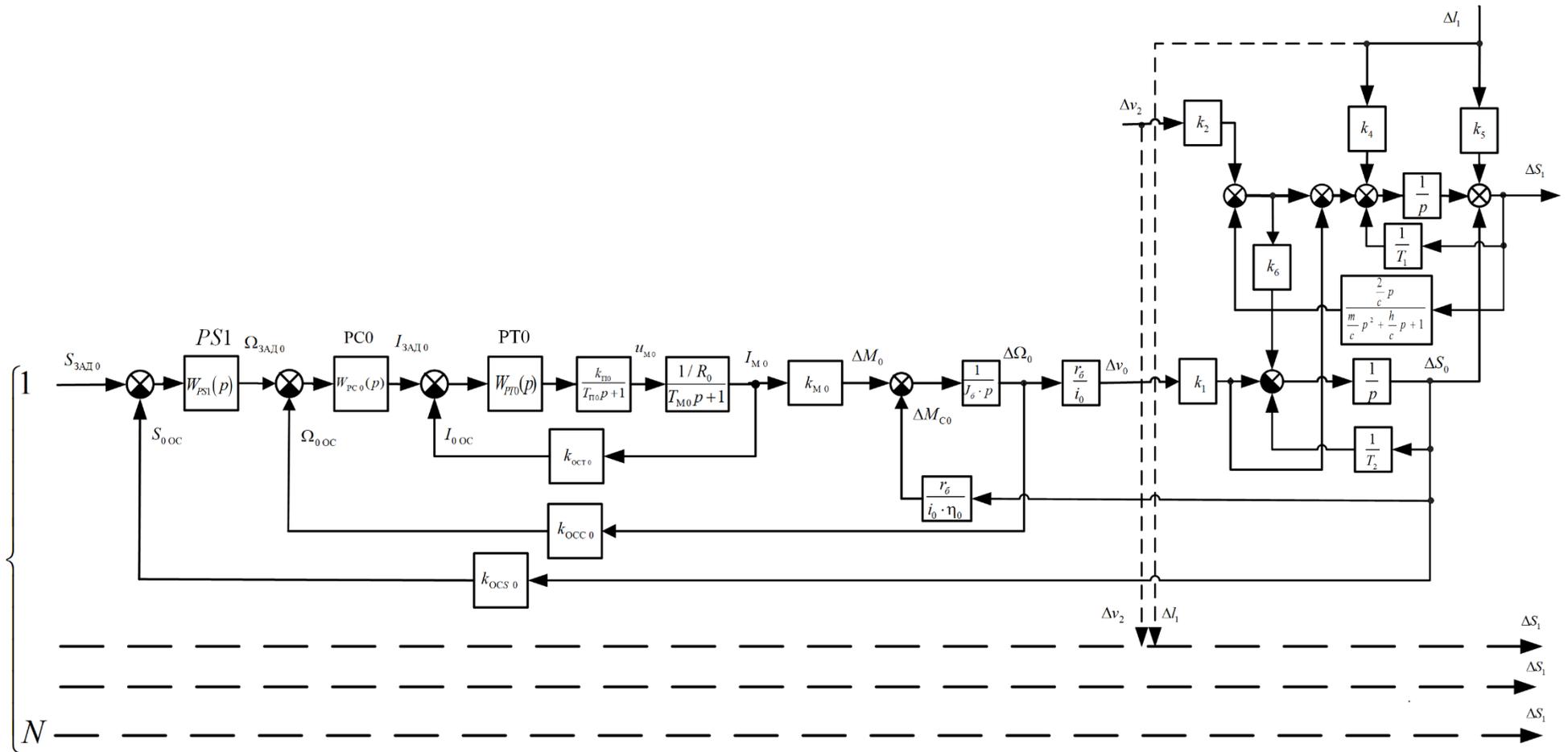


Рисунок 4.16 – Структурная схема ЭТС натяжения выкладки с трёхконтурной системой регулирования натяжения с воздействием на бобину с лентой с амортизатором

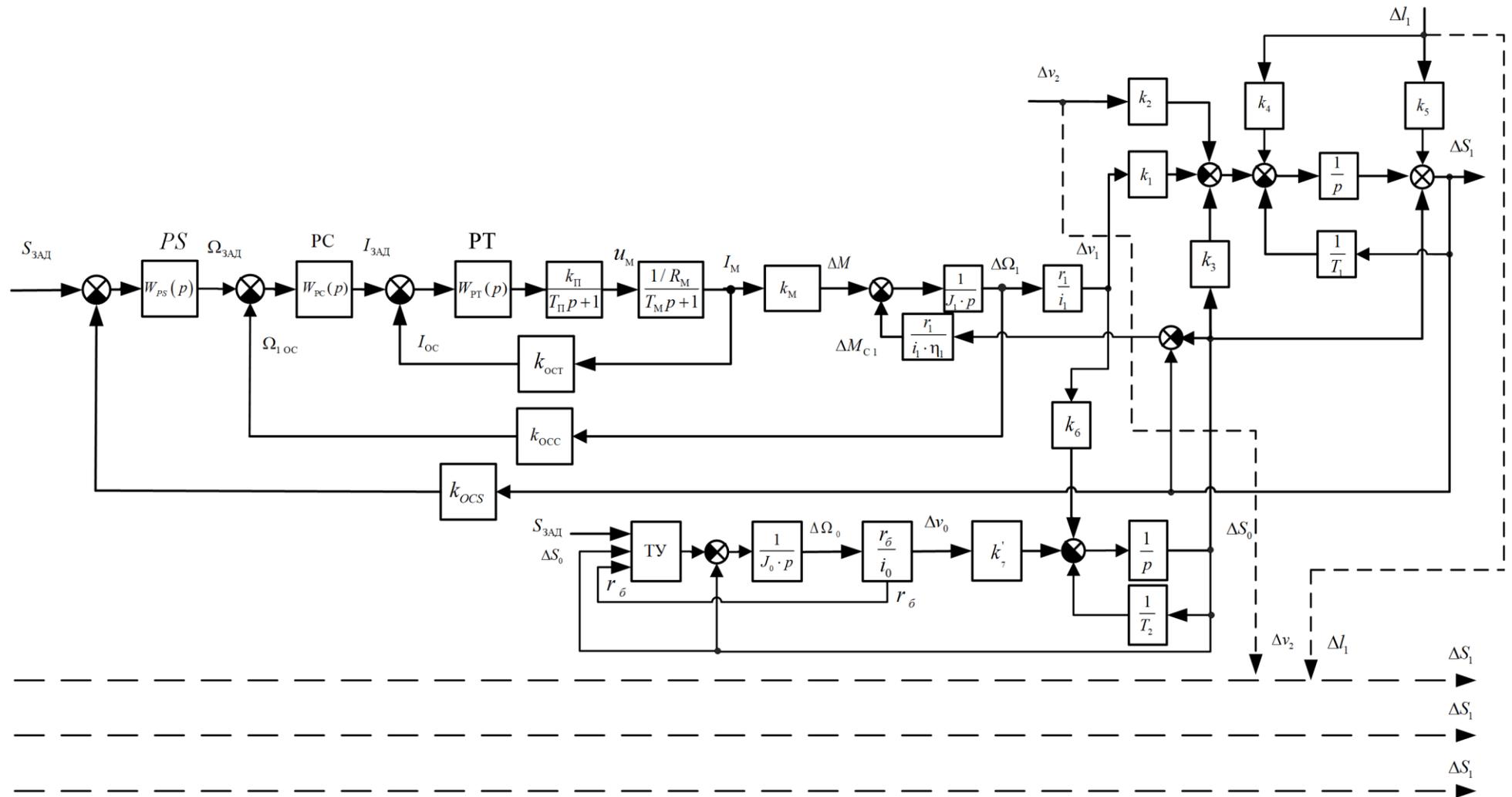


Рисунок 4.17 – Структурная схема электротехнической системы регулирования натяжения выкладки с трёхконтурной системой регулирования натяжения с воздействием на промежуточный натяжной ролик без амортизатора

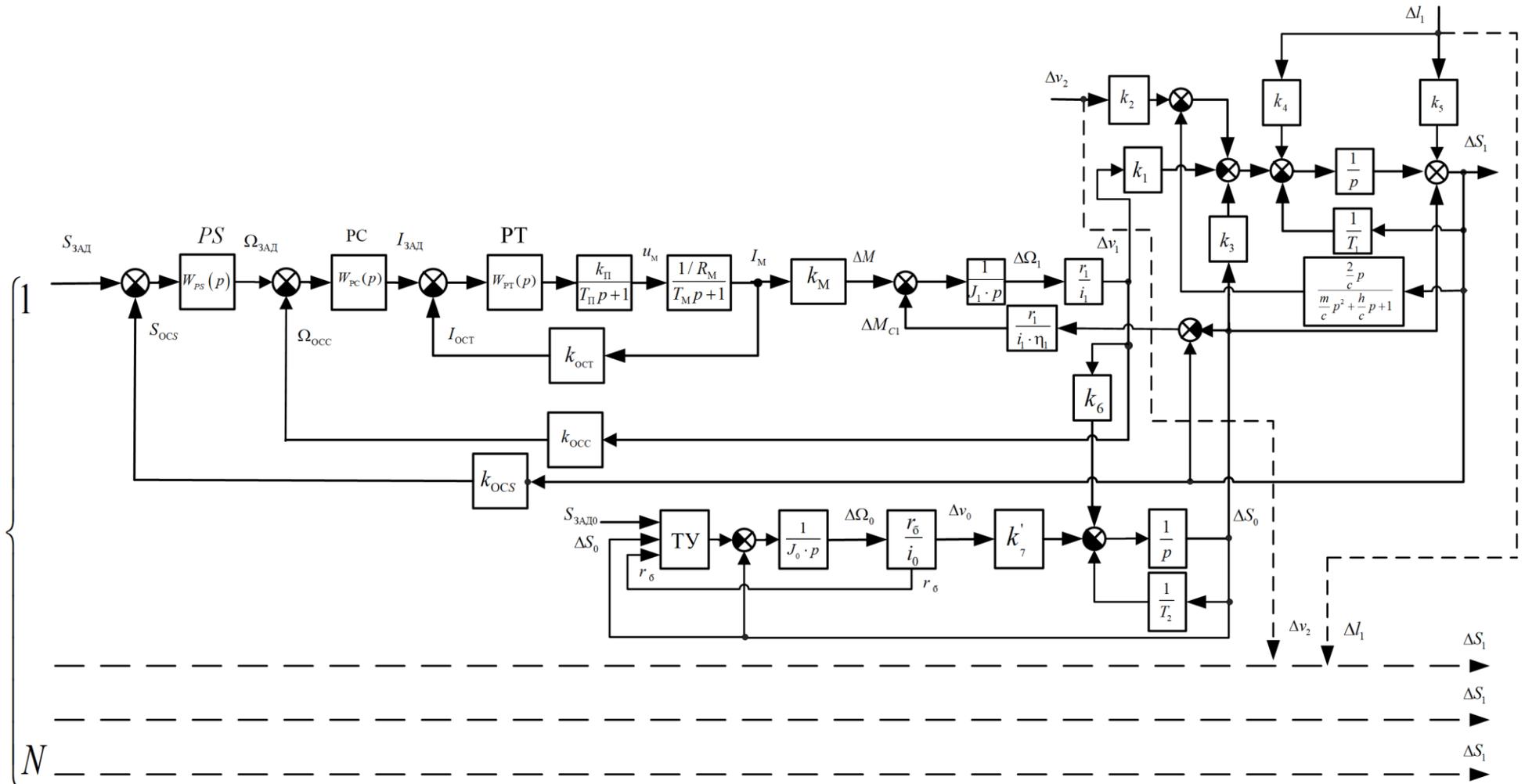


Рисунок 4.18 – Структурная схема ЭТС натяжения выкладки с трёхконтурной системой регулирования натяжения с воздействием на бобину с лентой с амортизатором

Разработанные структурные схемы (см. рисунки 4.13, 4.14) имеют стандартные настройки внутренних контуров и могут быть упрощены с целью синтеза регуляторов [49-51,54,57-59,108-112,136-140]. Рассмотрим последовательно контур тока, контур скорости. Будем полагать, что малая постоянная времени  $T_\mu$  равна постоянной времени преобразователя  $T_\Pi$  плюс небольшая постоянная времени датчика тока.

Запишем передаточную функцию регуляторов тока и скорости при настройке контуров на модульный оптимум:

$$W_{PT}(p) = \frac{(T_M p + 1)}{p \cdot 2T_\mu \cdot k_\Pi \cdot k_{OCT} / R_M}; \quad (4.1)$$

$$W_{PC}(p) = \frac{k_{OCT} \cdot J_1}{4 \cdot T_\mu \cdot k_{OCC} \cdot k_M}. \quad (4.2)$$

Регулятор скорости выбран пропорциональным, так как требования к внутреннему контуру скорости по статизму невысоки.

Преобразуем данную структурную схему с учетом того, что внутренние контуры тока и скорости можно заменить апериодическим звеном первого порядка. Преобразованная упрощенная структурная схема изображена на рисунке 4.19.

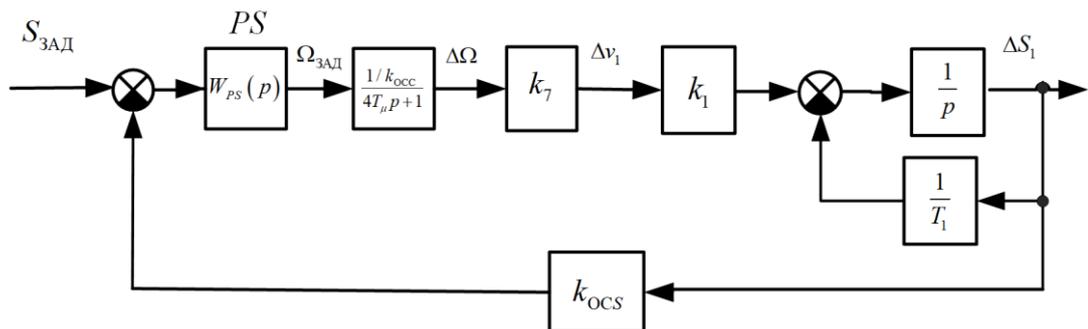


Рисунок 4.19 – Упрощенная структурная схема ЭТС натяжения

С учетом этого, запишем передаточную функцию регулятора натяжения:

- при настройке контура на модульный оптимум:

$$W_{PS}(p) = k_{PM} \left(1 + \frac{1}{T_1 p}\right); \quad (4.3)$$

- на симметричный оптимум:

$$W_{PS}(p) = k_{PC} \left(1 + \frac{1}{T_{CO1} \cdot p} + \frac{1}{T_{CO2}^2 \cdot p^2}\right). \quad (4.4)$$

Здесь введено обозначение:  $k_7 = \frac{r_1}{i_1}$ ,  $k_{PC}$  – коэффициент усиления регулятора, настроенного симметричный оптимум;  $T_{CO1}$ ,  $T_{CO2}$  – постоянные времени регулятора:

$$\left. \begin{aligned} k_{PM} &= \frac{k_{OCC}}{8T_\mu \cdot k_1 \cdot k_7 \cdot k_{OCS}}; \\ k_{PC} &= \frac{16T_\mu T_1}{128T_\mu^2 (1/k_{OCC}) k_7 k_1 T_1 k_{OCS}}; \\ T_{CO1} &= \frac{16T_\mu T_1}{16T_\mu + T_1}; \\ T_{CO2} &= 4\sqrt{T_\mu T_1}. \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

На рисунках 4.15, 4.17 приведены структурные схемы ЭТС натяжения при выкладке ленты с воздействием на бобину с лентой, с воздействием на промежуточный ролик без амортизатора, а на рисунках 4.16, 4.18 – с использованием амортизатора.

На рисунках 4.20, 4.21 приведены упрощенные структурные схемы ЭТС натяжения при выкладке ленты с воздействием на бобину с лентой, с воздействием на промежуточный ролик без амортизатора, а на рисунках 4.22, 4.23 – с использованием амортизатора.

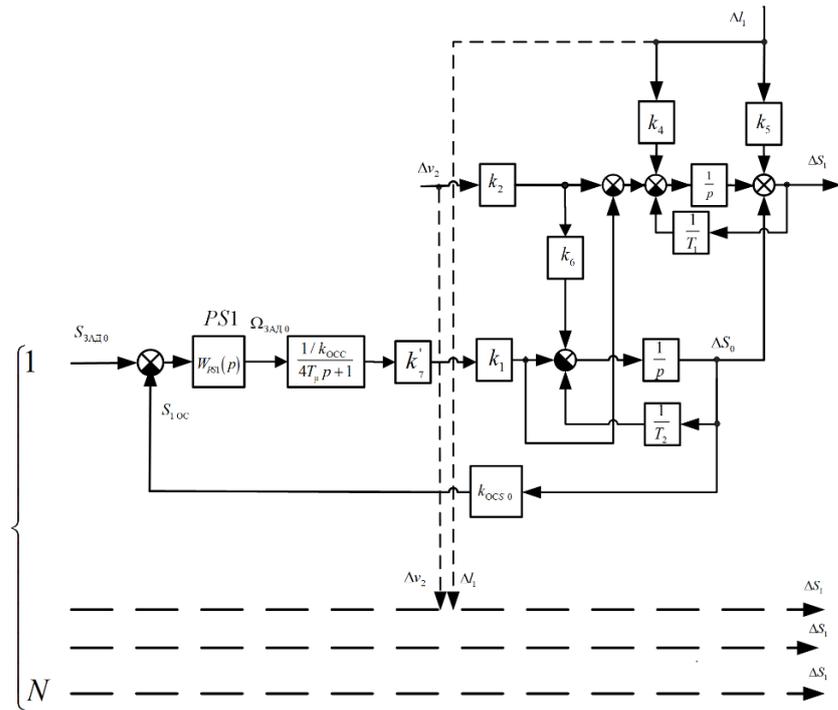


Рисунок 4.20 – Упрощенная структурная схема электротехнической системы регулирования натяжения при выкладке ленты с воздействием на бобину с лентой без амортизатора

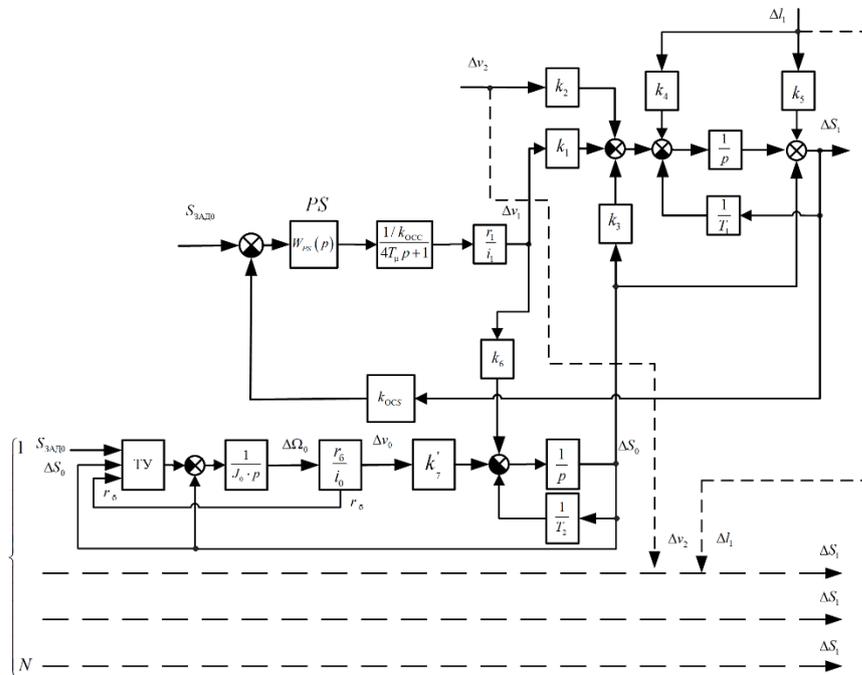


Рисунок 4.21 – Упрощенная структурная схема ЭТС натяжения при выкладке ленты с воздействием на промежуточный ролик без амортизатора

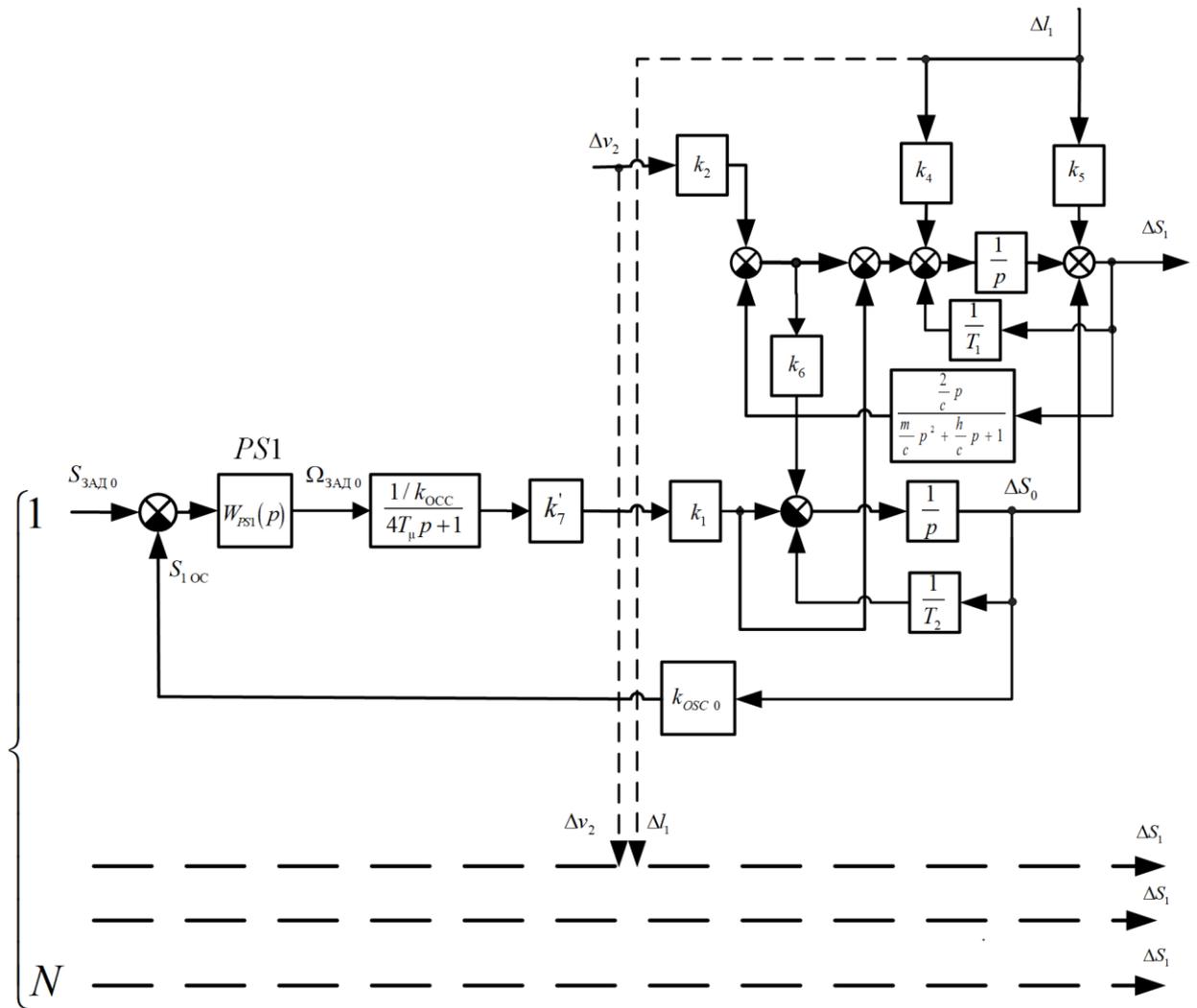


Рисунок 4.22 – Преобразованная структурная ЭТС натяжения выкладки с трёхконтурной системой регулирования натяжения с воздействием на бобину с лентой с амортизатором

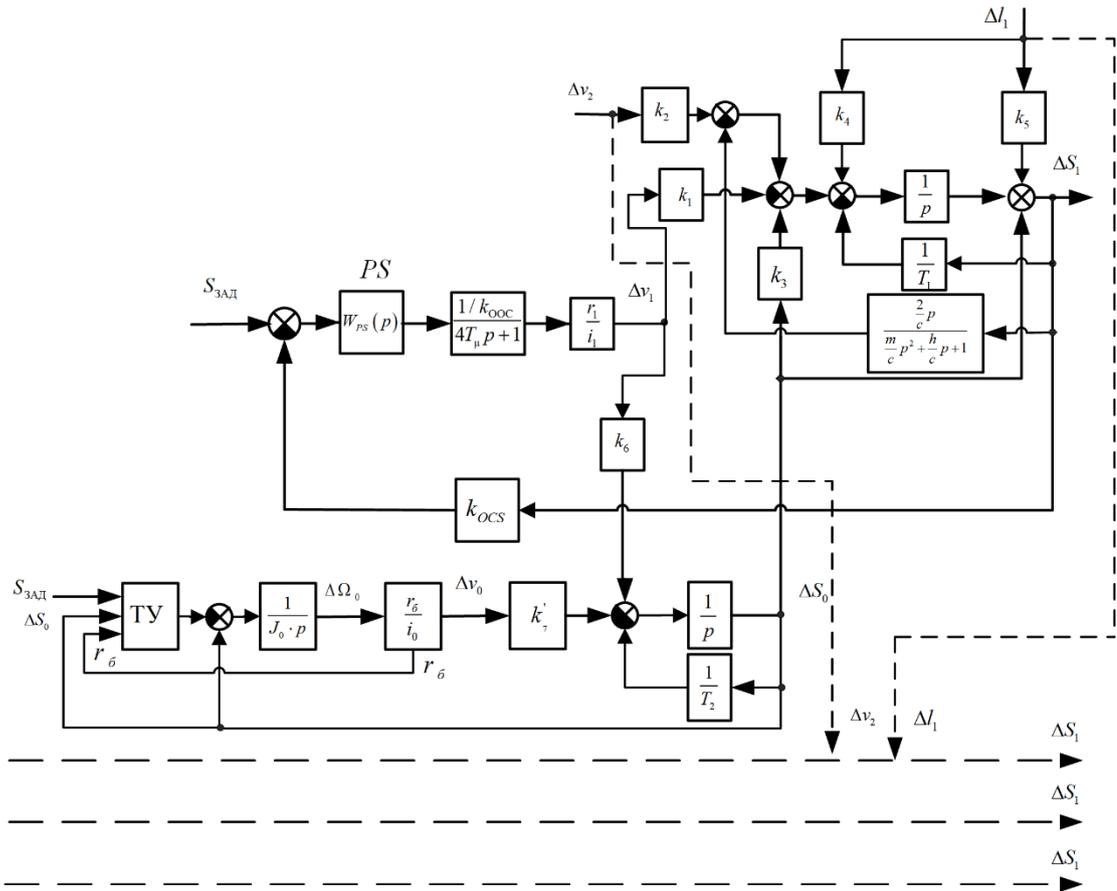


Рисунок 4.23 – Преобразованная структурная схема ЭТС натяжения выкладки с трёхконтурной системой регулирования натяжения с воздействием на промежуточный ролик натяжного устройства лентой с амортизатором

Передаточные функции регулятора натяжения примут перечисленный ниже вид.

Для системы ЭТС натяжения с воздействием на бобину с лентой:

$$W_{PS}(p) = \frac{T_2 p + 1}{p \cdot 8T_\mu \cdot T_2 \cdot k_1 \cdot k_7' \cdot k_{OCS0} / k_{OCC0}} \tag{4.6}$$

Для систем ЭТС натяжения с воздействием на ролик промежуточного натяжного устройства:

$$W_{PS}(p) = \frac{T_2 p + 1}{p \cdot 8T_\mu \cdot T_2 \cdot k_1 \cdot k_7 \cdot k_{OCS0} / k_{OCC0}} \tag{4.7}$$

Здесь введено обозначение:  $k_7' = \frac{r_6}{i_0}$ . В выражении (4.6) находится коэффициент  $k_7'$ , величина которого зависит от радиуса бобины с лентой  $r_6$ . Поэтому при практической реализации регулятора натяжения необходимо иметь информацию о величине радиуса препрега на бобине и корректировать значения передаточной функции.

Для уменьшения динамической составляющей в работе привода, особенно в начале процесса выкладки, в тракте часто используются амортизаторы. Такие амортизаторы достаточно широко применяют в промышленности, в частности, в бумажной промышленности ими оснащаются рулонные печатные машины [60]. В этих же работах предложено заменять передаточную функцию пружинно-масляного амортизатора на апериодическое звено первого порядка:

$$W_{AM} \approx \frac{k_{AM}}{T_{AM}p + 1}, \quad (4.8)$$

где  $k_{AM}$  – коэффициент усиления пружинно-масляного амортизатора;  $T_{AM}$  – постоянная времени амортизатора.

Вопросы влияния амортизатора на процесс выкладки материала и коррекцию регуляторов системы регулирования натяжения рассмотрены в разделе 6.

#### **4.4 Разработка функциональных схем электротехнических систем натяжения при “мокрой” намотке и обоснование наиболее рациональных схем**

Возможные, на наш взгляд, варианты построения ЭТС натяжения “мокрого” композиционного материала и систем регулирования активного шпулярика приведены на рисунках 4.24, 4.25.

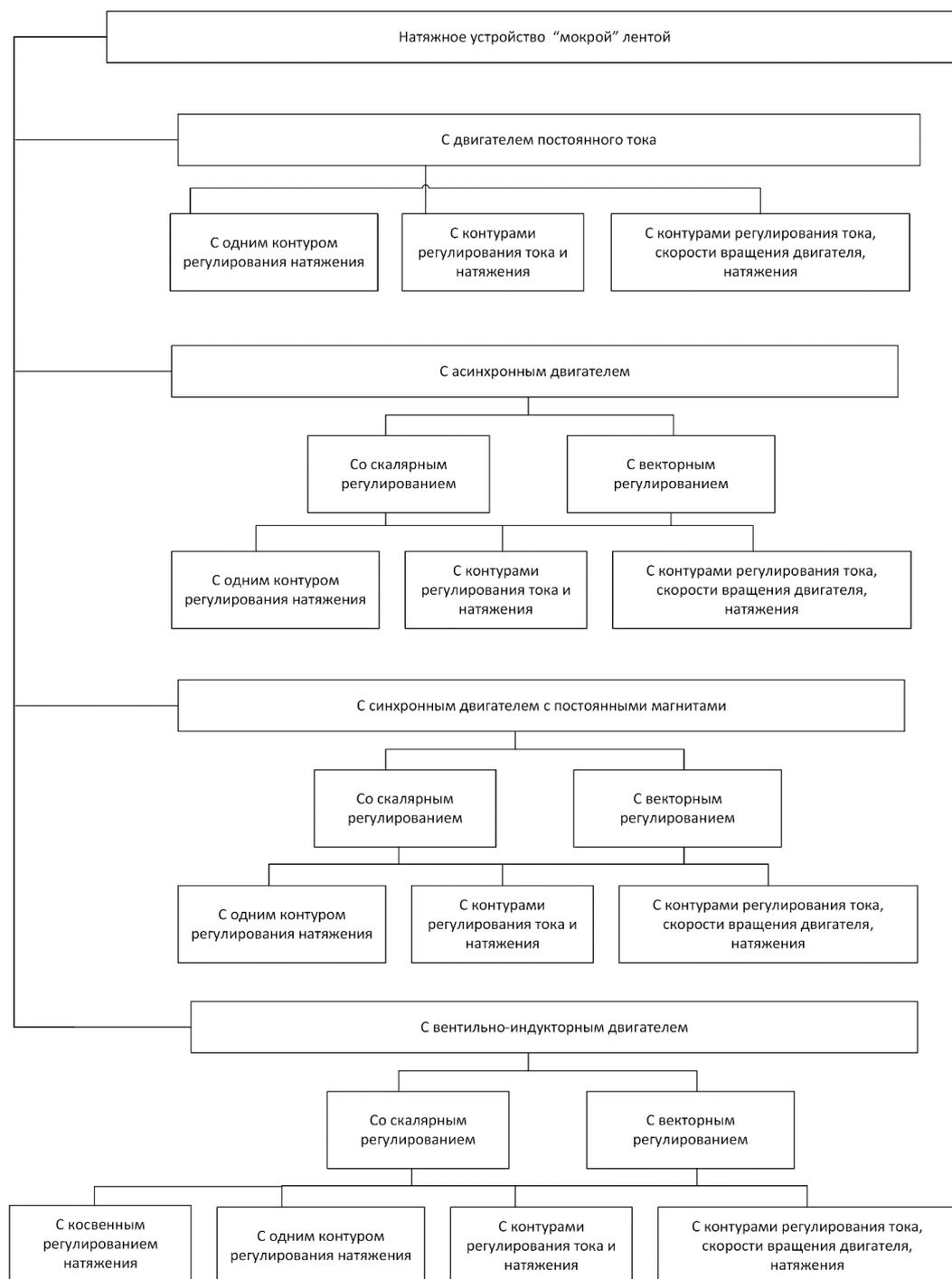


Рисунок 4.24 – Возможные варианты построения ЭТС натяжения “мокрого” композиционного материала

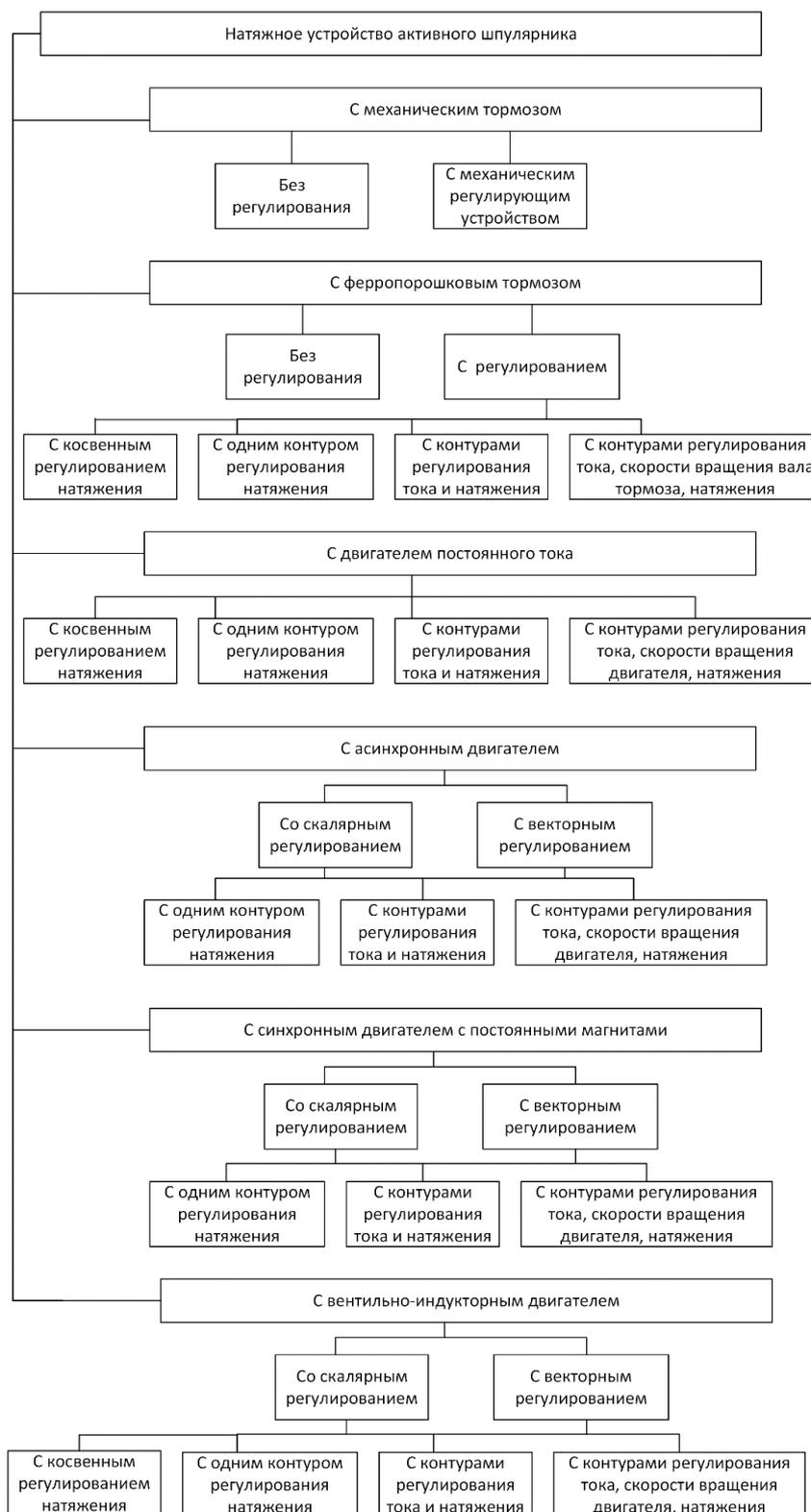


Рисунок 4.25 – Возможные варианты построения ЭТС  
натяжения активного шпулярика

Функциональные схемы возможных вариантов ЭТС натяжения показаны на рисунках 4.26 – 4.30.

На рисунке 4.26 показана функциональная схема ЭТС натяжения при “мокрой” намотке с одноконтурной системой регулирования натяжения

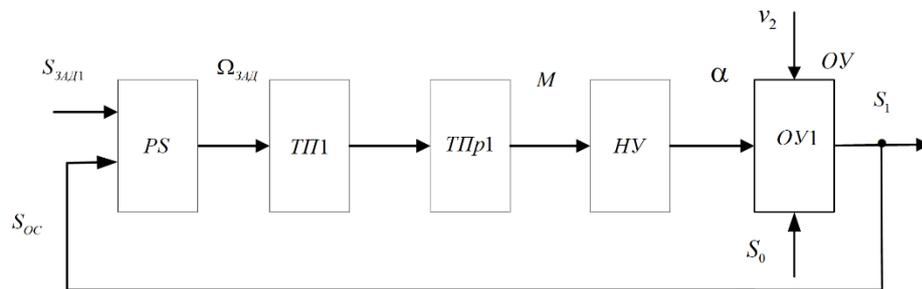


Рисунок 4.26 – Функциональная схема электротехнической системы натяжения при “мокрой” намотке с одноконтурной системой регулирования натяжения

Упругая лента ОУ1 после пропитки попадает на ролики натяжного устройство НУ. Привод ТПр перемещает в пространстве ролики и изменяет их угол охвата “мокрой” лентой  $\alpha$ . Привод ТПр питается от преобразователя ТП1, связанного с регулятором тока РТ1 (рисунки 4.27 – 4.29) или регулятором натяжения  $PS$  (см. рисунок 4.26). Задание на РТ1 поступает с регулятора положения РП или регулятора угла РУ (рисунок 4.28), с регулятора частоты вращения РС (см. рисунок 4.29) или с регулятора натяжения  $RS$  (см. рисунок 4.27). На вход регулятора положения подается сигнал о реальном положении натяжных роликов  $x_{OC1}$ . Регулятор положения РП1 связан с регулятором натяжения  $PS$  (рисунок 4.31). На вход данного регулятора подаются сигналы о требуемом натяжении  $S_{Зад}$  и о реальном натяжении  $S_{OC}$ .

Скорость намотки ленты на изделие НИ  $v_2$  определяется частотой вращения электропривода оправки и радиусом наматываемого изделия.

На рисунке 4.27 показана функциональная схема ЭТС натяжения “мокрого” композиционного материала с двухконтурной системой регулирования натяжения

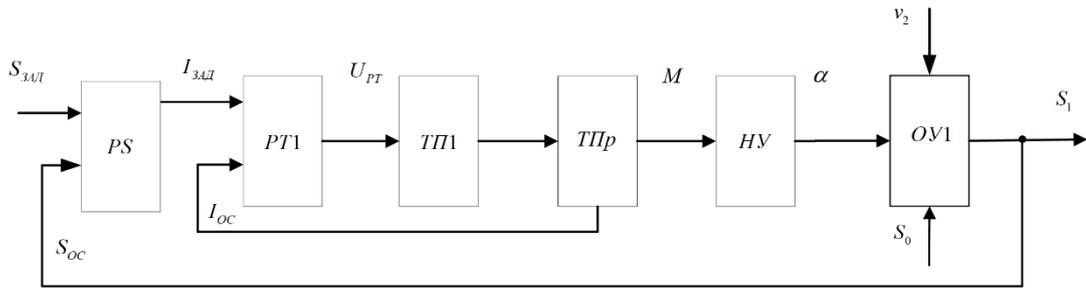


Рисунок 4.27 – Функциональная схема ЭТС натяжения “мокрого” композиционного материала с двухконтурной системой регулирования натяжения

Перед тем, как рассмотреть трехконтурную ЭТС, следует отметить особенности ее построения. Во-первых, это система со средним контуром положения исполнительного механизма  $x$  или  $\varphi$  в зависимости от применяемого натяжного устройства. Во-вторых, это система со средним контуром частоты вращения привода  $\Omega$ . Функциональная схема первой системы изображена на рисунке 4.28, а второй на рисунке 4.29.

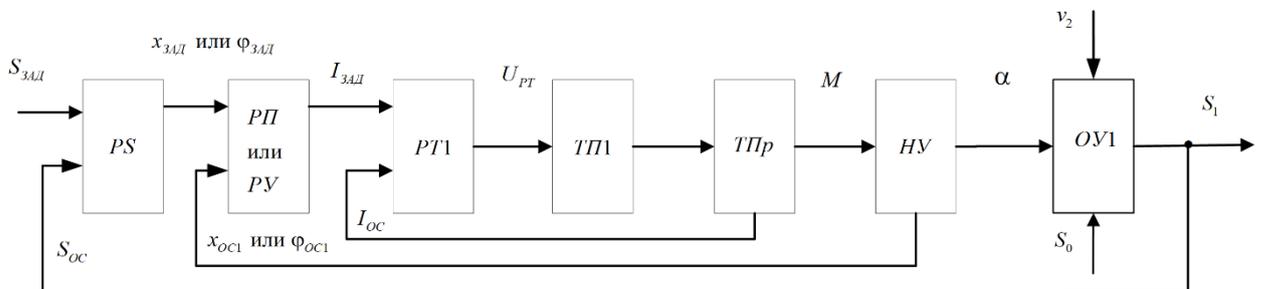


Рисунок 4.28 – Функциональная схема ЭТС натяжения “мокрого” композиционного материала с трехконтурной системой регулирования натяжения

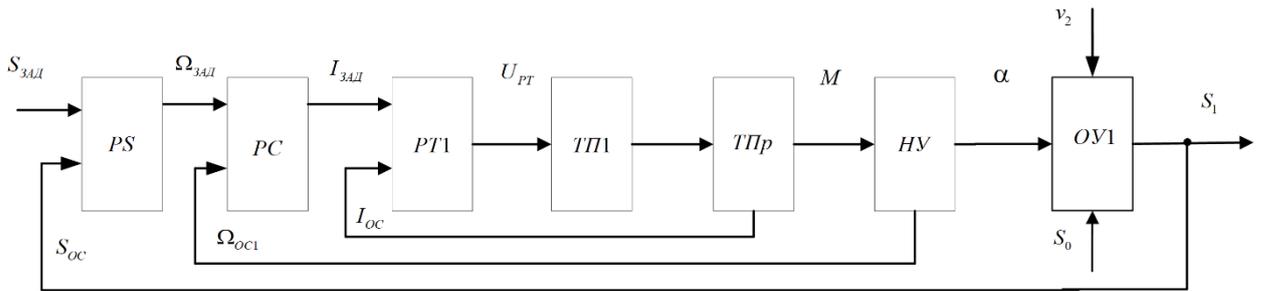


Рисунок 4.29 – Функциональная схема ЭТС регулирования натяжения “мокрого” композиционного материала с трехконтурной системой регулирования натяжения

Рассмотрим возможность построения четырехконтурной системы. Здесь дополнительно с регулятором скорости введен регулятор положения или угла натяжного устройства. Функциональная схема такой системы изображена на рисунке 4.30.

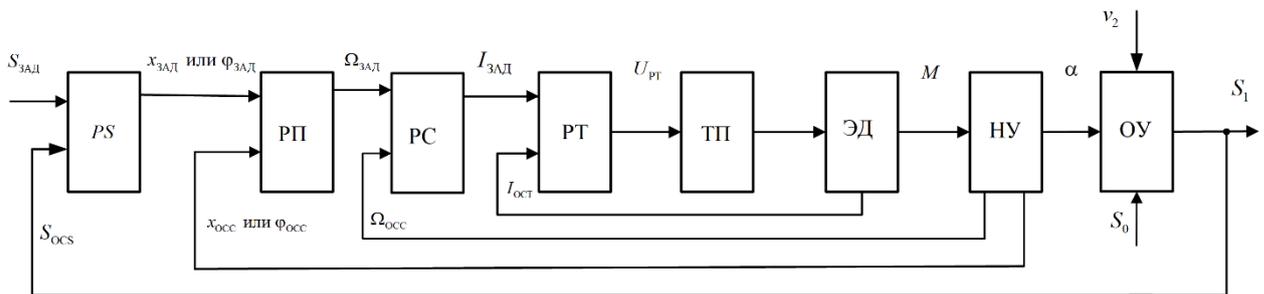


Рисунок 4.30 – Функциональная схема ЭТС натяжения “мокрого” композиционного материала с четырехконтурной системой регулирования натяжения

Рассмотрим достоинства и недостатки приведенных функциональных схем ЭТС натяжения “мокрого” композиционного материала.

Одноконтурная ЭТС натяжения теоретически позволяет получить максимальное быстродействие при регулировании натяжения наматываемого материала. Однако, практически данную систему тяжело настроить в связи с высоким порядком дифференциального уравнения, описывающего данную систему регулирования натяжения. Поэтому, обеспечить высокое

быстродействие в данном случае не удастся, да и регулятор становится достаточно сложным.

Двухконтурная ЭТС натяжения теоретически имеет более низкое быстродействие, чем одноконтурная система, но и более простой регулятор. Однако и в этом случае регулятор получается достаточно сложным и его трудно настроить.

Трехконтурная ЭТС натяжения теоретически имеет быстродействие в четыре раза хуже, чем одноконтурная система регулирования. Однако и в этом случае получаются нестандартные регуляторы, что усложняет настройку системы. Здесь целесообразно использовать четырехконтурную систему. Это объясняется более сложным по сравнению с математическим описанием исполнительного механизма, используемого при намотке “сухой” композиционной ленты, математическим описанием исполнительного механизма.

Четырехконтурная система регулирования натяжения имеет быстродействие в 8 раз хуже, чем одноконтурная. Однако в этом случае получается достаточно простой регулятор, и система просто настраивается. Отметим, что современный сервопривод с векторным управлением имеет полосу пропускания порядка 1000 Гц. В четырехконтурной системе полоса пропускания, таким образом, будет 125 Гц. С такой полосой пропускания теоретически можно добиться времени переходного процесса в ЭТС натяжения 0,0376 с.

Таким образом, анализируя приведенные функциональные схемы, считаем, что наиболее перспективно создание ЭТС натяжения, построенных по принципу подчиненного регулирования, имеющих четыре контура: внутренний контур тока, следующий – контур скорости, затем контур положения и внешний контур натяжения. Такие ЭТС будут легко настраиваться и иметь достаточное быстродействие.

В таблице 4.2 приведены основные данные рассмотренных ЭТС натяжения.

Таблица 4.2 – Основные данные электротехнических систем регулирования натяжения

	Одноконтурная	Двухконтурная с внутренним контуром тока	Трехконтурная с внутренними контурами тока и скорости	Четырехконтурная с внутренними контурами тока, скорости и положения
Быстродействие (теоретическое),с	0,0047	0,0094	0,0188	0,0376
Полоса пропускания, Гц	1000	500	250	125
Наличие датчиков обратной связи	Один датчик: натяжения ленты	Два датчика: тока двигателя; натяжения ленты	Три датчика: тока двигателя; скорости вращения двигателя; натяжения ленты	Четыре датчика: тока двигателя; скорости вращения двигателя; положения натяжного устройства; натяжения ленты
Количество регуляторов	Один регулятор: натяжения ленты	Два регулятора: тока двигателя; натяжения ленты	Три регулятора: тока двигателя; скорости вращения двигателя; натяжения ленты	Четыре регулятора: тока двигателя; скорости вращения двигателя; положения натяжного устройства; натяжения ленты
Сложность настройки регуляторов	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что в ЭТС натяжения “мокрой” композиционной ленты наиболее целесообразно использовать четырёхконтурные системы регулирования натяжения с

внутренними контурами тока, скорости вращения двигателя и положения натяжного устройства.

Рассмотрим возможные варианты построения приводов активного шпулярика (см. рисунок 4.25). Отметим, что в связи с тем, что со шпулярика сходит “сухая” лента, функциональные схемы очень похожи на функциональные схемы ЭТС натяжения “сухой” композиционной ленты. Однако особенностью данных приводов являются невысокие требования, предъявляемые к ЭТС натяжения. Объясняется это тем, что далее по тракту намотки стоит ЭТС натяжения “мокрого” композиционного материала. Функциональные схемы активного шпулярика показаны на рисунках 4.31–4.33.

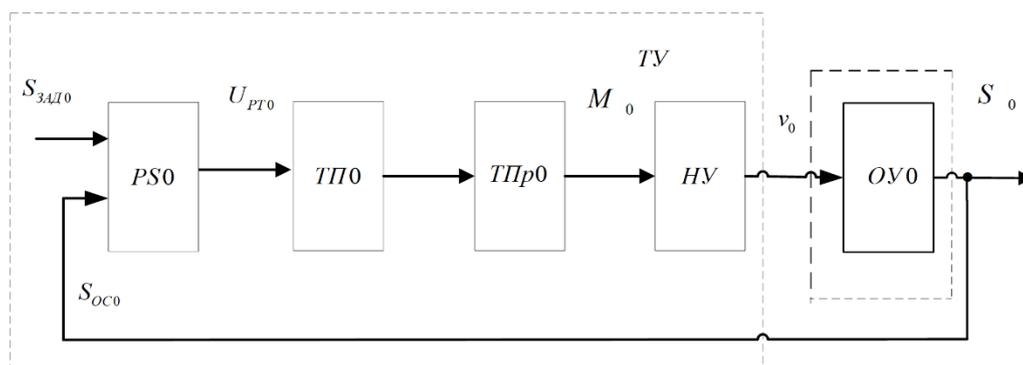


Рисунок 4.31 – Функциональная схема устройства намотки “мокрой” композиционной ленты. Активный шпулярик, один контур

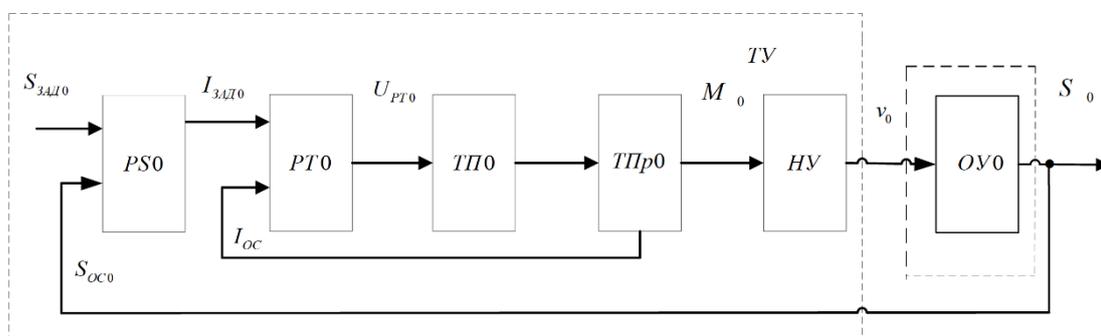


Рисунок 4.32 – Функциональная схема устройства намотки “мокрой” композиционной ленты. Активный шпулярик, два контура

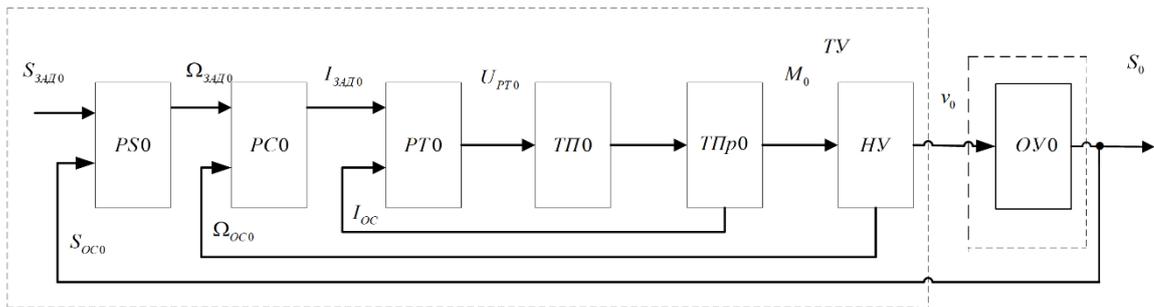


Рисунок 4.33 – Функциональная схема устройства намотки “мокрой” композиционной ленты. Активный шпулярник, три контура

К ЭТС натяжения активного шпулярника предъявляются более мягкие требования по точности поддержания заданного значения натяжения. Точность стабилизации натяжения, как отмечалось в разделе 1, в этом случае лежит в пределах (1–10) %, время переходного процесса может достигать значения 0,5 с. Данные требования удовлетворяются практически всеми исполнительными механизмами. Следует отметить, что использовать в подобных устройствах дорогие приводы нецелесообразно. Здесь следует применять трехконтурные системы регулирования натяжения жгутика при его смотке с бобины.

Приведем функциональную схему ЭТС натяжения при намотке изделий из “мокрой” композиционной ленты с активным шпулярником (рисунок 4.34).

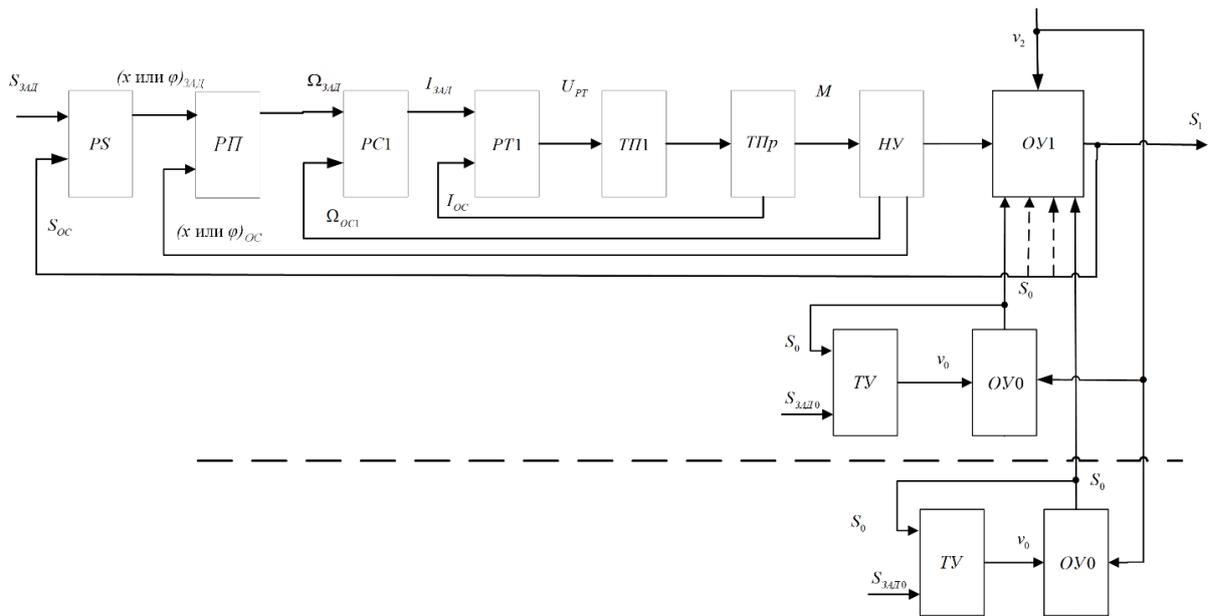


Рисунок 4.34 – Функциональная схема электротехнической системы регулирования натяжения катушки с четырехконтурной системой регулирования натяжения и активным шпуляриком

#### 4.5 Разработка структурных схем электротехнических систем регулирования натяжения “мокрой” композиционной ленты

В соответствии с полученными в разделе 4.3 функциональными схемами ЭТС натяжения “мокрой” композиционной ленты, приведем их структурную схему [178-180].

С целью дальнейшего использования полученных структурных схем для синтеза ЭТС натяжения упростим их. Рассмотрим последовательно контур тока, контур скорости, контур положения. Будем полагать, что малая постоянная времени  $T_{\mu}$  равна постоянной времени преобразователя  $T_{П}$ .

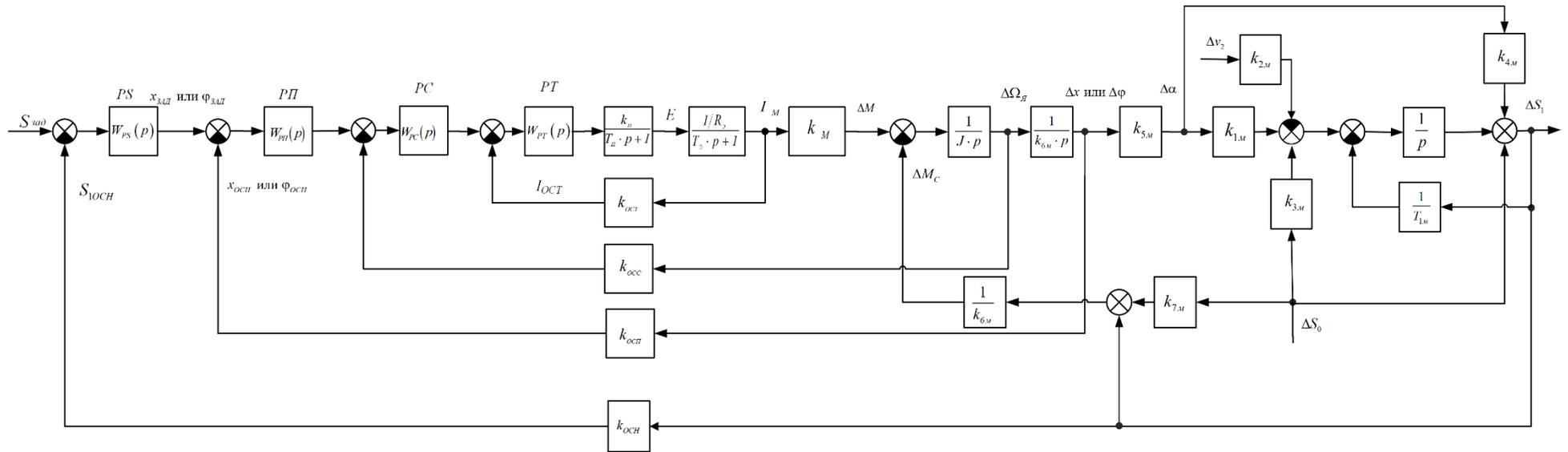


Рисунок 4.35 – Структурная схема электротехнической системы регулирования натяжения “мокрой” катушки с четырехконтурной системой регулирования натяжения

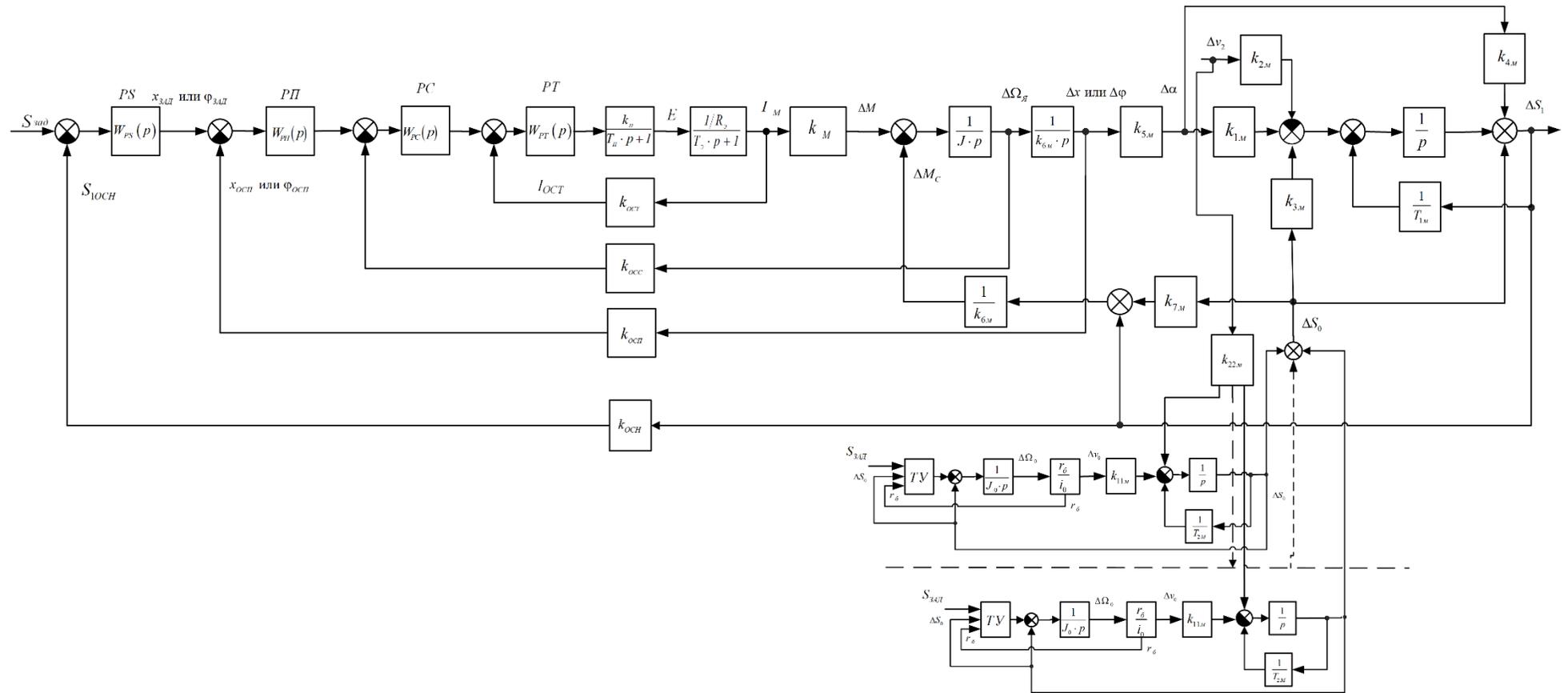


Рисунок 4.36 – Структурная схема электротехнической системы регулирования натяжения “мокрой” катушки с четырехконтурной системой регулирования натяжения и активным шпуплярником

Запишем передаточную функцию регуляторов тока, скорости и положения исполнительного механизма при настройке контуров на модульный оптимум [49-51,54,57-59,105-112,136-140]:

$$W_{PT}(p) = \frac{(T_M p + 1)}{p \cdot 2T_\mu \cdot k_{\Pi} \cdot k_{OCT} / R_M}; \quad (4.9)$$

$$W_{PC}(p) = \frac{k_{OCT} \cdot J_1}{4 \cdot T_\mu \cdot k_{OCC} \cdot k_M}; \quad (4.10)$$

$$W_{PI}(p) = \frac{k_{OCC} \cdot k_{6M}}{8 \cdot T_\mu \cdot k_{OCP}}. \quad (4.11)$$

Регуляторы скорости и положения выбраны пропорциональными, так как требования к внутренним контурам скорости и положения по статизму невысоки.

Преобразуем данную структурную схему с учетом того, что внутренние контура тока, скорости и положения можно заменить апериодическим звеном первого порядка. Преобразованная схема изображена на рисунке 4.37.

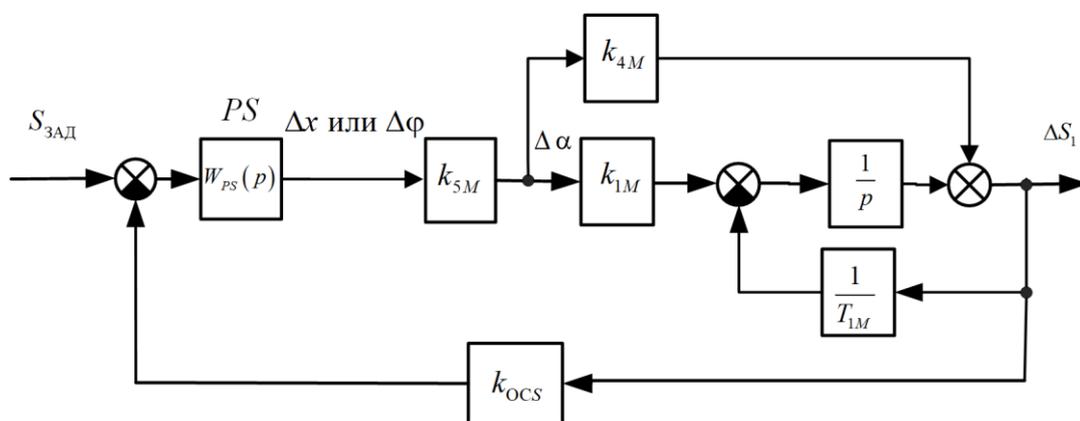


Рисунок 4.37 – Преобразованная структурная схема электротехнической системы регулирования натяжения

С учетом этого, запишем передаточную функцию регулятора натяжения - при настройке контура на модульный оптимум:

$$W_{PS}(p) = k_{PM} \left( 1 + \frac{1}{T_{1M} p} \right); \quad (4.12)$$

- на симметричный оптимум:

$$W_{PS}(p) = k_{pc} \left( 1 + \frac{1}{T_{CO1} \cdot p} + \frac{1}{T_{CO2}^2 \cdot p^2} \right). \quad (4.13)$$

Параметры регуляторов:

$$\left. \begin{aligned} k_{PM} &= \frac{k_{OСП}}{16T_{\mu} \cdot k_{1,М} \cdot k_{5,М} \cdot k_{OCS}}; \\ k_{PC} &= \frac{32T_{\mu} \cdot k_{OСП}}{512T_{\mu}^2 \cdot k_{1,М} \cdot k_{5,М} \cdot k_{OCS}}; \\ T_{CO1} &= \frac{32T_{\mu} T_{1,М}}{32T_{\mu} + T_{1,М}}; \\ T_{CO2} &= \sqrt{32T_{\mu} T_{1,М}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

### Выводы по главе

1. Анализ вариантов построения электротехнических систем регулирования натяжения показал, что целесообразно использовать системы подчиненного управления при построении функциональных схем систем регулирования натяжения как при “сухой”, так и при “мокрой” намотке, при выкладке.
2. Сопоставление ЭТС натяжения с различными контурами показало, что наиболее целесообразно использовать три контура регулирования при “сухой” намотке (контур скорости, контур частоты вращения привода, контур натяжения) и четыре контура при “мокрой” (контур скорости, контур частоты вращения привода, контур положения исполнительного механизма, контур натяжения).
3. Получены передаточные функции регуляторов натяжения для “сухой” и “мокрой” намотки, позволяющие рассчитать уставки регуляторов при настройке их на модульный и симметричный оптимум.
4. Получены упрощенные структурные схемы электротехнических систем регулирования натяжения для “сухой” и “мокрой” намотки, которые

используются для проведения моделирования и исследования работы ЭТС натяжения на этапах разработки таких систем.

## **5 РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАТЯЖЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОЙ ЛЕНТЫ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ**

### **5.1 Анализ и сопоставление возможных вариантов к расчету и синтезу электротехнических систем для изготовления изделий из композиционных материалов методом намотки и выкладки**

Синтез электротехнических систем – это направленный расчет, имеющий целью отыскание рациональной структуры ЭТС, определение оптимальных значений параметров регуляторов по заданным показателям качества регулирования.

Основными этапами методов синтеза систем регулирования являются [104,136-138].

1. Формулирование требований, предъявляемых к ЭТС натяжения, определение исходных параметров для проведения синтеза. Исследуется объект регулирования с целью составления математической модели объекта регулирования, определения параметров, характеристик и условий работы объекта.
2. Обоснованный выбор принципа управления, определение функциональной и структурной схем.
3. Выбор элементов функциональной электротехнической системы регулирования с учетом статических, динамических, энергетических, эксплуатационных и др. требований. Выбор типа и расчет мощности исполнительного механизма электротехнической системы регулирования натяжения.
4. Синтез регуляторов ЭТС натяжения, включающий выбор методик синтеза регуляторов, расчет корректирующих и управляющих устройств, обеспечивающих заданные требования к системе регулирования. Расчет уставок регуляторов.

5. Математическое (компьютерное) моделирование разработанной электротехнической системы.
6. Разработка конструкторской документации, включающая в себя разработку структурных, принципиальных, монтажных схем на электротехническую систему.

Новизна нового метода заключается в том, что:

- в пункте 1 при формулировании требований, предъявляемых к электротехнической системе регулирования натяжения, анализируется продукция, которая будет изготавливаться с применением разрабатываемой ЭТС натяжения, учитываются форма изготавливаемых изделий (см. п. 1.5) и требования к условиям эксплуатации изделий (к какому классу они относятся, см. п. 1.5);

- в п. 2 на основании сформулированных в первом пункте требований к электроприводу и с учетом формы выпускаемой продукции обоснованно выбираем из предложенных автором математическое описание объекта управления и структуру ЭТС натяжения;

- в 3 пункте на основании информации о параметрах наматываемых изделий осуществляем выбор типа исполнительного механизма, в том числе типа электродвигателя, мощности электропривода;

- в п 4 на основании информации о параметрах наматываемых изделий и точности отработки электроприводом заданных законов намотки выбираем структуру ЭТС. При выборе систем подчиненного регулирования учтем, что внутренним контуром является контур тока, затем следует контур частоты вращения привода для систем регулирования “сухого” композиционного материала и выкладки, а для систем регулирования “мокрой” композиционной ленты – контур тока, контур частоты вращения привода, контур положения исполнительного механизма, контур натяжения. Внешним контуром является контур натяжения.

При синтезе систем регулирования натяжения будем рассматривать только синтез регулятора натяжения, его структуру и настроечные параметры.

Синтез остальных, внутренних регуляторов, довольно подробно описан в литературе [49-51,54,57-59,105-112,136-140];

- пункты 5 и 6 нами не рассматриваются, они подробно описаны в литературе.

Следует отметить, что для разных групп объектов п. 2 – 5 объединены в методики, описанные ниже, так как отличаются по требуемым вариантам к синтезу ЭТС натяжения. Пункт 4 состоит из четырех методик, из них три разработаны автором.

Поясним предлагаемый метод синтеза ЭТС натяжения для изготовления изделий из КМ.

Рассмотрим изделия, к эксплуатации которых предъявляются жесткие требования (изделия первого класса). Используемые методики синтеза приведены на рисунке 5.1 [181,182].

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

П о д к л а с с ы    и з д е л и й				
<b>1- Цилиндрические</b>	<b>2 - Бобины с материалом</b>	<b>3 - Конические</b>	<b>4 - Кокон, Шар</b>	<b>4 - Призма</b>
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)

П о д к л а с с ы    и з д е л и й				
<b>1 – Цилиндрические</b>	<b>2 – Бобины с материалом</b>	<b>3 – Конические</b>	<b>4 - Кокон, Шар</b>	<b>5 - Призма</b>
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 5.1 - Методики синтеза ЭТС натяжения наматываемых изделий

Теперь рассмотрим изделия, к эксплуатации которых не предъявляются жесткие требования (изделия второго класса). Используемые методики синтеза также приведены на рисунке 5.1.

Рассмотрим приведенные методики синтеза ЭТС натяжения.

При намотке изделий “Цилиндр”, когда для намотки используется только один материал и наматывается только одно изделие определенных габаритных размеров, можно использовать стандартные настройки контуров регулирования. В таких ЭТС параметры объекта регулирования практически не изменяются, в ЭТС натяжения удастся получить максимально возможное быстродействие и соответственно прочность будущих изделий. Для этих случаев в настоящее время разработаны методики синтеза регуляторов [49-51,54,57-59,108-112,136-140]. По ним можно рассчитывать электротехническую систему регулирования для намотки изделий первого и второго классов.

На практике на одном оборудовании наматываются изделия с использованием различных композиционных лент с разными модулями упругости и площадью поперечного сечения ленты, сами изделия могут иметь различные габаритные размеры. Такие изделия следует отнести к изделиям типа “Конус”. Методика синтеза регуляторов ЭТС натяжения данных изделий рассмотрена далее.

При намотке изделий “Конус” или “Цилиндр”, когда используются при намотке несколько материалов, при намотке изделий “Кокон” второго класса использовать стандартные настройки нельзя. В данном случае технологический процесс характеризуется медленным изменением параметров объекта регулирования (радиуса наматываемого изделия, длины участка намотки, приведенного момента инерции, скорости намотки). При не высоких требованиях к условиям эксплуатации наматываемых изделий, можно применить метод “замороженных” коэффициентов объекта регулирования и синтезировать “грубую” (робастную) ЭТС, показатели качества регулирования которой не будут зависеть от изменения параметров объекта регулирования. Недостатком таких систем является более низкое быстродействие по сравнению с адаптивными системами.

*Первая разработанная методика.* В работах отечественных и зарубежных ученых предложено использовать “стандартные” формы (нормированные передаточные функции, нормированные уравнения). Известны уравнения, удовлетворяющие критерию наибольшей ровности частотной характеристики системы, заданному проценту перерегулирования, минимуму интегрального критерия качества и др. [104-107]. Разработана методика синтеза систем с заданным порядком астатизма при действии случайного стационарного сигнала. В [106,107] приведен ряд нормированных уравнений и делается попытка оценить чувствительность системы, описанной этим уравнением, к изменению коэффициентов дифференциального уравнения. Допустимые границы вариации коэффициентов нелинейных уравнений определены в предположении, что изменяется только один коэффициент. Это предположение не всегда приемлемо на практике. Поэтому в [56,120-122] получены аналитические выражения, позволяющие определить изменения ошибки регулирования и запаса устойчивости при изменении параметров объекта регулирования. Однако, в перечисленных работах рассматривались линейные или линеаризованные системы регулирования без учета возможных насыщений регулятора и изменения параметров объекта регулирования в широких пределах. Данные обстоятельства не позволяют использовать стандартные методики синтеза регуляторов систем регулирования натяжения при намотке изделий из композиционных материалов.

*Вторая разработанная методика.* При намотке изделий “Конус”, “Кокон” первого класса (с высокими требованиями к условиям эксплуатации наматываемых изделий), следует применять адаптивные электротехнические системы регулирования натяжения. Такие системы смогут обеспечить максимальное быстроедействие в широком диапазоне изменения параметров объекта регулирования. В настоящее время нам не известны методики синтеза таких ЭТС при намотке изделий из композиционных материалов.

*Третья разработанная методика.* При намотке изделий “Призма”, первого класса параметры объекта регулирования изменяются очень быстро, соизмеримо с длительностью переходного процесса. В доступной литературе отсутствуют рекомендации по синтезу систем управления при быстрых, соизмеримых с длительностью переходного процесса, изменениях параметров объекта регулирования в широких пределах. Практически не изучены и вопросы управления ЭТС с прогнозом состояния системы. Здесь рассмотрено построение ЭТС с прогнозом состояния системы.

Все варианты синтеза электротехнических систем регулирования натяжения при намотке композиционных изделий изложены далее.

## **5.2 Анализ известных методик синтеза регуляторов электротехнических систем регулирования натяжения при намотке и выкладке**

При намотке изделий “Цилиндр”, первого и второго класса, когда для намотки используется только один материал, можно применять стандартные настройки контуров регулирования. В таких системах параметры объекта регулирования практически не изменяются. Для таких случаев в настоящее время разработаны методики синтеза. Синтезированные таким образом регуляторы используются в устройствах намотки в черной металлургии, химическом машиностроении и целлюлозно-бумажной промышленности. Здесь широко применяются системы подчиненного управления электроприводами.

Существуют два вида стандартных настроек систем подчиненного регулирования – на модельный (МО) и симметричный (СО) оптимум. Недостатком данных методик является идеализация объекта управления в виде описания линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, характеристическое уравнение которых имеет отрицательные действительные корни.

Известны работы, в которых нашли отражение вопросы настройки регуляторов и разработаны средства коррекции систем при наличии упругих (резонансных) свойств объекта регулирования [54,105,142,143,183].

### 5.3 Разработка методики синтеза регуляторов электротехнических систем натяжения при намотке изделий “Конус”

При намотке изделий “Кокон”, второго класса использовать стандартные настройки нельзя. Также нельзя их использовать при намотке изделий “Цилиндр”, когда для намотки используются несколько материалов. В данном случае технологический процесс характеризуется медленным изменением параметров объекта регулирования (радиуса наматываемого изделия, длины участка намотки, приведенного момента инерции, скорости намотки). При невысоких требованиях к условиям эксплуатации изделий, можно применить при синтезе метод “замороженных” коэффициентов объекта регулирования и синтезировать “грубую” (робастную) ЭТС, показатели качества регулирования которой не будут зависеть от изменения параметров объекта регулирования.

Задача синтеза ставится следующим образом: по известной структурной схеме ЭТС рассчитать параметры регуляторов, обеспечивающих заданные показатели качества работы электропривода при медленном изменении параметров объекта регулирования и с учетом ограничений, вызванных действием насыщения регуляторов.

Запишем передаточную функцию замкнутой линеаризованной системы регулирования натяжения в виде [56,120-122]:

$$W(p) = \frac{k}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}. \quad (5.1)$$

Коэффициенты  $a_i$  и  $k$ , входящие в передаточную функцию (5.1), существенно зависят от используемого материала при намотке, момента инерции и радиуса изготавливаемого изделия.

Покажем возможность расчета регулятора натяжения с использованием метода нормированных уравнений (стандартных переходных характеристик). При этом будем учитывать возможные насыщения регуляторов.

Дополнительные движения, вызванные изменением параметров объекта регулирования, могут быть рассчитаны по формулам [56,120-122]:

$$\left. \begin{aligned} \delta\Theta_y &= \frac{a_1(\Delta a_1 - \Delta k) - a_2\Delta k}{\tau_H^2 A_1} t_0^2; \\ \delta C &= \frac{2A_1 A_2 - 1}{A_1 A_2 - 1} \Delta k + \frac{A_2 a_1 (\Delta a_1 - \Delta k)}{(A_1 A_2 - 1)\tau_H^2} t_0^2 + \frac{A_1 a_2 (\Delta a_2 - \Delta k)}{(A_1 A_2 - 1)\tau_H} t_0, \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

где  $\delta\Theta_y$  – значение ошибки регулирования;  $\delta C$  – изменение запаса устойчивости;  $\Delta a_i, \Delta k$  – изменение параметров  $a_i, k$ ;  $t_0, \tau_H$  – реальное и нормированное времена переходного процесса системы;  $A_i$  – коэффициенты нормированного уравнения системы.

При отсутствии насыщения система регулирования описывается линейным или линеаризованным уравнением третьего порядка, а при действии ограничения – дифференциальным уравнением вида:

$$Z(t) = 0. \quad (5.3)$$

Здесь введено обозначение  $Z(t)$  – оператор динамической системы при действии насыщения.

Решение линейного дифференциального уравнения при отсутствии кратных корней запишем в виде:

$$y_1(t) = \sum_i^3 c_i e^{-h_i t} + c_4, \quad (5.4)$$

где  $c_i$  – коэффициенты, полученные при заданных начальных условиях;  $c_4$  – значение выходной координаты при  $t \rightarrow \infty$ ;  $h_i$  – корни характеристического уравнения системы регулирования (в общем случае комплексные);  $i = 1, 2, 3$ .

Таким образом,  $y_1(t)$  – переходный процесс в системе при отсутствии ограничения.

Пусть дано  $N$  нормированных уравнений третьего порядка (стандартных передаточных функций замкнутой системы), имеющих характеристическое уравнение вида  $p^3 + A_2 p^2 + A_1 p + 1$ . Каждому уравнению соответствует определенная комбинация коэффициентов  $A_1, A_2$ , нормированное время переходного процесса  $\tau_H$  и дифференциальное уравнение системы (5.1) с коэффициентами  $a_i, b_i$ . Требуется выбрать из данных уравнений такое, которое обеспечивает максимальное быстродействие ЭТС при ограничении на дополнительные движения, вызванные действием насыщения и изменением параметров объекта регулирования.

Для решения поставленной задачи необходимо найти функциональную зависимость, позволяющую определить норму указанных дополнительных движений в системе.

Для нахождения нормы дополнительных движений, вызванным насыщением, примем следующие допущения, не вносящие существенных погрешностей в расчет.

1. Действие насыщения начинается сразу после подачи на вход системы входного воздействия.
2. В насыщение входит только регулятор тока.
3. Насыщение в системе происходит один раз.

С учетом перечисленных допущений разобьем весь переходный процесс на два этапа. На первом этапе действует ограничение в ЭТС, и выходная координата изменяется по кривой  $y_2(t)$  ( $y_2(t)$  – решение уравнения (5.1)). На втором этапе “восстанавливается” первоначальная структура системы, следовательно, система описывается линейным дифференциальным уравнением (5.1) с коэффициентами  $a_i$  и переходный процесс продолжается на отрезке времени  $(t_1 \div \infty)$  по кривой

$$y_2(t) = \tilde{c}_1 e^{-h_1 t} + \tilde{c}_2 e^{-h_2 t} + \tilde{c}_3 e^{-h_3 t} + \tilde{c}_4, \quad (5.5)$$

где  $\tilde{c}_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – коэффициенты, полученные из условия непрерывности функции  $y_2(t)$  и ее производных в момент времени  $t_1$ ;  $t_1$  – время, в течение которого действует насыщение.

Дополнительные движения  $\Delta y(t)$ , вызванные действием насыщения регулятора, находим из выражения [184]:

$$\Delta y(t) = \begin{cases} \Delta y_1(t) = y_2(t) - y_1(t) & \text{при } t < t_1; \\ \Delta y_2(t) = y_2(t) - y_1(t) & \text{при } t \geq t_1. \end{cases} \quad (5.6)$$

Как отмечалось ранее, переходный процесс в ЭТС с насыщением состоит из двух отрезков кривой:  $y_2(t)$  при  $t < t_1$  и  $y_2(t)$  при  $t \geq t_1$  (рисунок 5.2). На отрезке времени  $(0 \div t_1)$  переходный процесс определяется только оператором динамической системы  $Z$  и начальными условиями. На отрезке  $(t_1 \div \infty)$  переходный процесс зависит как от значения функции  $y_2(t)$  и ее производных в момент времени  $t_1$ , так и от корней  $h_i$  характеристического уравнения системы. Поэтому, выбирая определенным образом нормированное уравнение, можно изменить норму дополнительных движений при  $t \geq t_1$ .

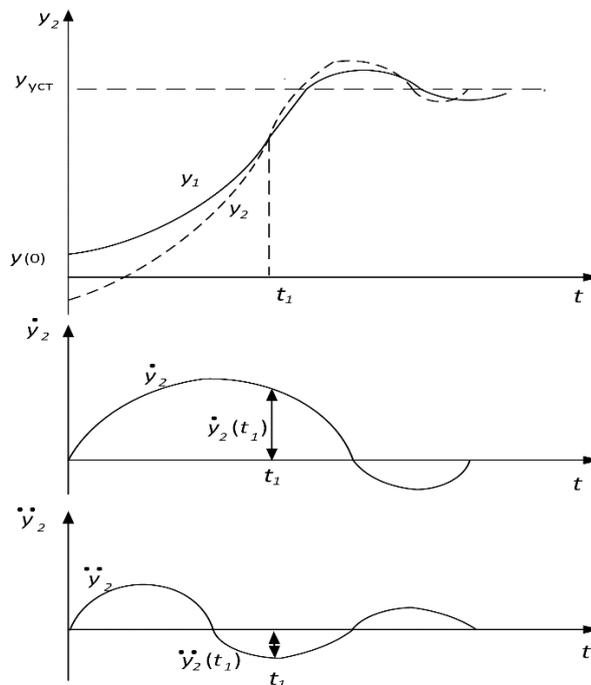


Рисунок 5.2 – Графики переходных процессов ЭТС с насыщением

Запишем условие непрерывности функции  $y_2(t)$  и ее производных в момент окончания действия ограничения:

$$\left. \begin{aligned} y_2(t_1 - 0) &= y_2(t_1 + 0); \\ \dot{y}_2(t_1 - 0) &= \dot{y}_2(t_1 + 0); \\ \ddot{y}_2(t_1 - 0) &= \ddot{y}_2(t_1 + 0). \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

Подставив уравнение (5.5) в систему (5.7), получим:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{c}_1 &= \frac{h_2 h_3 \tilde{y}_2(t_1 - 0) + (h_2 + h_3) \dot{y}_2(t_1 - 0) + \ddot{y}_2(t_1 - 0)}{(h_3 - h_1)(h_2 - h_1)} e^{h_1 t_1}; \\ \tilde{c}_2 &= \frac{h_1 h_3 \tilde{y}_2(t_1 - 0) + (h_1 + h_3) \dot{y}_2(t_1 - 0) + \ddot{y}_2(t_1 - 0)}{(h_2 - h_3)(h_2 - h_1)} e^{h_2 t_1}; \\ \tilde{c}_3 &= \frac{h_1 h_2 \tilde{y}_2(t_1 - 0) + (h_1 + h_2) \dot{y}_2(t_1 - 0) + \ddot{y}_2(t_1 - 0)}{(h_3 - h_2)(h_3 - h_1)} e^{h_3 t_1} \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

где  $h_3 > h_2 > h_1$ ,  $\tilde{y}_2(t_1 - 0) = y_2(t_1 - 0) - c_4$ .

В свою очередь, значения коэффициентов  $c_i$  уравнения (5.4) при заданных начальных условиях  $y_1(0)$ ,  $\dot{y}_1(0)$ ,  $\ddot{y}_1(0)$  равны:

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{h_2 h_3 \tilde{y}_1(0) + (h_2 + h_3) \dot{y}_1(0) + \ddot{y}_1(0)}{(h_3 - h_1)(h_2 - h_1)}; \\ c_2 &= \frac{h_1 h_3 \tilde{y}_1(0) + (h_1 + h_3) \dot{y}_1(0) + \ddot{y}_1(0)}{(h_2 - h_3)(h_2 - h_1)}; \\ c_3 &= \frac{h_1 h_2 \tilde{y}_1(0) + (h_1 + h_2) \dot{y}_1(0) + \ddot{y}_1(0)}{(h_3 - h_2)(h_3 - h_1)} \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

где  $\tilde{y}_1(0) = y_1(0) - c_4$ .

Из второго уравнения (5.6) определим дополнительные движения, вызванные действием насыщения:

$$\Delta y_2(t) = (\tilde{c}_1 - c_1) e^{-h_1 t} + (\tilde{c}_2 - c_2) e^{-h_2 t} + (\tilde{c}_3 - c_3) e^{-h_3 t}.$$

Найдем норму  $\Delta y_2(t)$  в метрическом пространстве  $L_2$ , используя системы уравнений (5.8), (5.9) и неравенства Миньковского:

$$\begin{aligned}
\|\Delta y_2(t)\|_{L_2} \leq & \frac{h_2 h_3 (\tilde{y}_2(t_1-0)e^{h_2 t_1} - \tilde{y}_1(0)) + (h_2 + h_3)(\dot{y}_2(t_1-0)e^{h_2 t_1} - \dot{y}_1(0)) + \ddot{y}_2(t_1-0)e^{h_2 t_1} - \ddot{y}_1(0)}{\sqrt{2h_1(h_3 - h_1)(h_2 - h_1)}} | e^{-h_2 t_1} + \\
& + \frac{h_1 h_3 (\tilde{y}_2(t_1-0)e^{h_3 t_1} - \tilde{y}_1(0)) + (h_1 + h_3)(\dot{y}_2(t_1-0)e^{h_3 t_1} - \dot{y}_1(0)) + \ddot{y}_2(t_1-0)e^{h_3 t_1} - \ddot{y}_2(0)}{\sqrt{2h_2(h_3 - h_2)(h_2 - h_1)}} | e^{-h_3 t_1} + \\
& + \frac{h_1 h_2 (\tilde{y}_2(t_1-0)e^{h_3 t_1} - \tilde{y}_1(0)) + (h_1 + h_2)(\dot{y}_2(t_1-0)e^{h_3 t_1} - \dot{y}_1(0)) + \ddot{y}_2(t_1-0)e^{h_3 t_1} - \ddot{y}_1(0)}{\sqrt{2h_3(h_3 - h_2)(h_3 - h_1)}} | e^{-h_3 t_1}.
\end{aligned} \tag{5.10}$$

Учитывая связь корней  $x_i$  нормированного характеристического уравнения системы регулирования с реальными корнями  $h_i$  синтезируемой системы, получим из (5.10):

$$\begin{aligned}
\|\Delta y_2(t)\|_{L_2} \leq & E_1 \sqrt{t_g} (\tilde{y}_2(t_1) - \tilde{y}_1(0)) e^{-\chi_1 \frac{\tau_H t_1}{t_0}} + G_1 t_0 \sqrt{t_g} (\dot{y}_2(t_1) - \dot{y}_1(0)) e^{-\chi_1 \frac{\tau_H t_1}{t_0}} + \\
& + H_1 t_0^2 \sqrt{t_0} (\ddot{y}_2(t_1) - \ddot{y}_1(0)) e^{-\chi_1 \frac{\tau_H t_1}{t_0}} + | E_2 \sqrt{t_0} (\tilde{y}_2(t_1) - \tilde{y}_1(0)) e^{-\chi_1 \chi_2 \frac{\tau_H t_1}{t_0}} + \\
& + G_2 t_0 \sqrt{t_0} (\dot{y}_2(t_1) - \dot{y}_1(0)) e^{-\chi_1 \chi_2 \frac{\tau_H t_1}{t_0}} + H_2 t_0^2 \sqrt{t_0} (\ddot{y}_2(t_1) - \ddot{y}_1(0)) e^{-\chi_1 \chi_2 \frac{\tau_H t_1}{t_0}} | + \\
& + | E_3 \sqrt{t_0} (\tilde{y}_2(t_1) - \tilde{y}_1(0)) e^{-\chi_1 \chi_2 \chi_3 \frac{\tau_H t_1}{t_0}} + G_3 t_0 \sqrt{t_g} (\dot{y}_2(t_1) - \dot{y}_1(0)) e^{-\chi_1 \chi_2 \chi_3 \frac{\tau_H t_1}{t_0}} + \\
& + H_3 t_0^2 \sqrt{t_0} (\ddot{y}_2(t_1) - \ddot{y}_1(0)) e^{-\chi_1 \chi_2 \chi_3 \frac{\tau_H t_1}{t_0}} |,
\end{aligned} \tag{5.11}$$

$$\begin{aligned}
\text{где } E_1 &= \frac{x_2^2 x_3}{(x_2 x_3 - 1)(x_2 - 1)\sqrt{2x_1 \tau_H}}; \quad E_2 = \frac{x_3}{(x_3 - 1)(x_2 - 1)\sqrt{2x_1 x_2 \tau_H}}; \\
E_2 &= \frac{1}{(x_3 - 1)(x_2 x_3 - 1)\sqrt{2x_1 x_2 x_3 \tau_H}}; \quad G_1 = \frac{x_2(x_3 + 1)}{(x_2 x_3 - 1)(x_2 - 1)x_1 \tau_H \sqrt{2x_1 \tau_H}}; \\
G_2 &= \frac{x_2 x_3 + 1}{(x_3 - 1)(x_2 - 1)x_1 x_2 \tau_H \sqrt{2x_1 x_2 \tau_H}}; \quad G_3 = \frac{x_2 + 1}{(x_3 - 1)(x_2 x_3 - 1)x_1 \tau_H \sqrt{2x_1 \tau_H}}; \\
H_1 &= \frac{1}{(x_2 x_3 - 1)(x_2 - 1)x_1^2 \tau_H^2 \sqrt{2x_1 \tau_H}}; \quad H_2 = \frac{1}{(x_3 - 1)(x_2 - 1)x_1^2 x_2 \tau_H^2 \sqrt{2x_1 x_2 \tau_H}}; \\
H_3 &= \frac{1}{(x_3 - 1)(x_2 x_3 - 1)x_1^2 x_2 \tau_H^2 \sqrt{2x_1 x_2 x_3 \tau_H}}.
\end{aligned}$$

Значения коэффициентов  $E_i, G_i, H_i$  ( $i=1,2,3$ ) рассчитаны по выражениям, приведенным в (5.11). Результаты расчетов сведены в таблицу 5.1. Номера нормированных уравнений даны из [106,107], где приведены их основные характеристики ( $\tau_H, x_i$ , перерегулирование, коэффициенты  $A_1, A_2$  и т.п.).

Таблица 5.1 – Значения коэффициентов  $E$ ,  $G$ ,  $H$  для нормированных уравнений с вещественными корнями

№ уравнения	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$\tau_H$
27	1,776	1,074	0,3508	0,4268	0,5034	0,1265	0,02457	0,03344	0,001092	6,9
29	0,6263	0,1607	0,0077	0,0767	0,0492	0,0028	0,00351	0,00136	0,00196	11,0
30	0,5053	0,0542	0,0008	0,0365	0,0169	0,00029	0,00037	0,00019	$0,15 \cdot 10^{-6}$	16,6
31	0,4743	0,0165	0,00007	0,0186	0,0059	0,00003	0,00006	0,00002	$0,80 \cdot 10^{-8}$	28,0

В случае, если характеристическое уравнение системы регулирования имеет комплексные корни, то уравнение (5.8) запишется в виде:

$$y_1(t) = (c_1 \cdot \cos \omega t + c_2 \sin \omega t)e^{-h_1 t} + c_3 e^{-h_2 t} + c_4, \quad (5.12)$$

где  $-h_2, -h_1 \pm j\omega$  – корни характеристического уравнения системы регулирования.

Аналогично полученному ранее, найдём норму  $\Delta y_2(t)$  в метрическом пространстве  $L_2$ :

$$\begin{aligned} \|\Delta y_2(t)\|_{L_2} \leq & \frac{1}{\omega[(h_2 - h_1)^2 + \omega^2]} \cdot \\ & \cdot \left\{ \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{h_1} + \frac{\omega \sin 2\omega t_1 - h_1 \cos 2\omega t_1}{h_1^2 + \omega^2}} \cdot |\omega[h_2(h_2 - 2h_1)(\tilde{y}_2(t_1) \cos \omega t_1 - \tilde{y}_1(0)e^{-h_1 t_1})] - \right. \\ & - 2h_1(\dot{y}_2(t_1) \cos \omega t_1 - \dot{y}_1(0)e^{-h_1 t_1}) - (\ddot{y}_2(t_1) \cos \omega t_1 - \ddot{y}_1(0)e^{-h_1 t_1})| + \\ & + (h_1^2 - h_2^2 - \omega^2)(h_2 \tilde{y}_2(t_1) \sin \omega t_1 + \dot{y}_2(t_1) \sin \omega t_1) + (h_1 - h_2)(\ddot{y}_2(t_1) \sin \omega t_1)| + \\ & + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{h_1} - \frac{\omega \sin 2\omega t_1 - h_1 \cos 2\omega t_1}{h_1^2 + \omega^2}} \cdot |h_2(\omega^2 - h_1^2 + h_1 h_2)(\tilde{y}_2(t_1) \cos \omega t_1 - \tilde{y}_1(0)e^{-h_1 t_1}) + \\ & + (h_2^2 - h_1^2 - \omega^2)(\dot{y}_2(t_1) \cos \omega t_1 - \dot{y}_1(0)e^{-h_1 t_1}) + (h_2 - h_1)(\ddot{y}_2(t_1) \cos \omega t_1 - \ddot{y}_1(0)e^{-h_1 t_1}) + \\ & + h_2 \omega(h_2 - 2h_1)(\tilde{y}_2(t_1) \sin \omega t_1 - 2h_1 \dot{y}_2(t_1) \sin \omega t_1) - \omega(\ddot{y}_2(t_1) \sin \omega t_1)| + \\ & + \frac{2}{\sqrt{2h_2}} |\omega(h_1^2 + \omega^2)(\tilde{y}_2(t_1) - \tilde{y}_1(0)e^{-h_2 t_1}) + 2h_1 \omega(\dot{y}_2(t_1) - \dot{y}_1(0)e^{-h_2 t_1}) + \\ & \left. + \omega(\ddot{y}_2(t_1) - \ddot{y}_1(0)e^{-h_2 t_1})| \right\}. \quad (5.13) \end{aligned}$$

Учитывая связь корней нормированного характеристического уравнения системы с реальными корнями синтезируемой системы, получим:

$$\begin{aligned} \|\Delta y_2(t)\|_{L_2} \leq & [E_4 \sqrt{t_\theta} (\tilde{y}_2(t_1) \cos(\tilde{\mu}_1 x_1 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1) - \tilde{y}_1(0) e^{-x_1 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1}) + G_4 t_\theta \sqrt{t_\theta} (\dot{y}_2(t_1) \cos(\tilde{\mu}_1 x_1 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1) - \dot{y}_1(0) e^{-x_1 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1}) + \\ & + H_4 t_\theta^2 \sqrt{t_\theta} (\ddot{y}_2(t_1) \cos(\tilde{\mu}_1 x_1 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1) - \ddot{y}_1(0) e^{-x_1 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1}) + (E_5 \sqrt{t_\theta} \tilde{y}_2(t_1) + G_5 t_\theta \sqrt{t_\theta} \dot{y}_2(t_1) + \\ & + H_5 t_\theta^2 \sqrt{t_\theta} \ddot{y}_2(t_1)) \sin(\tilde{\mu}_1 x_1 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1)] K_1(t_1) + |[E_6 \sqrt{t_\theta} (\tilde{y}_2(t_1) \cos(\tilde{\mu}_1 x_1 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1) - \tilde{y}_1(0) e^{-x_1 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1}) + \\ & + G_6 t_\theta \sqrt{t_\theta} (\dot{y}_2(t_1) \cos(\tilde{\mu}_1 x_1 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1) - \dot{y}_1(0) e^{-x_1 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1}) + H_6 t_\theta^2 \sqrt{t_\theta} (\ddot{y}_2(t_1) \cos(\tilde{\mu}_1 x_1 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1) - \ddot{y}_1(0) e^{-x_1 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1}) + \\ & + (E_7 \sqrt{t_\theta} \tilde{y}_2(t_1) + G_7 t_\theta \sqrt{t_\theta} \dot{y}_2(t_1) + H_7 t_\theta^2 \sqrt{t_\theta} \ddot{y}_2(t_1)) \sin(\tilde{\mu}_1 x_1 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1)] K_2(t_1) + \\ & + |E_8 \sqrt{t_\theta} (\tilde{y}_2(t_1) - \tilde{y}_1(0) e^{-x_1 x_2 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1}) + G_8 t_\theta \sqrt{t_\theta} (\dot{y}_2(t_1) - \dot{y}_1(0) e^{-x_1 x_2 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1}) + H_8 t_\theta^2 \sqrt{t_\theta} (\ddot{y}_2(t_1) - \ddot{y}_1(0) e^{-x_1 x_2 \frac{\tau_H}{t_\theta} t_1})|. \quad (5.14) \end{aligned}$$

Рассмотрим два случая:

-два младших корня комплексные сопряженные;

-младший корень вещественный.

В первом случае имеем:

$$\begin{aligned}\tilde{\mu}_1 &= \mu_1; E_4 = \frac{x_2(x_2-2)}{2[(x_2-1)^2 + \mu_1^2]\sqrt{x_1}} \sqrt{\frac{1}{\tau_H}}; G_4 = -\frac{1}{[(x_2-1)^2 + \mu_1^2]\sqrt{x_1^3}} \sqrt{\frac{1}{\tau_H^3}}; \\ H_4 &= \frac{1}{2[(x_2-1)^2 + \mu_1^2]\sqrt{x_1^5}} \sqrt{\frac{1}{\tau_H^5}}; E_5 = \frac{x_2(1-x_2-\mu_1^2)}{2\mu_1[(x_2-1)^2 + \mu_1^2]\sqrt{x_1}} \sqrt{\frac{1}{\tau_H}}; \\ G_5 &= \frac{1-x_2^2-\mu_1^2}{2\mu_1[(x_2-1)^2 + \mu_1^2]\sqrt{x_1^3}} \sqrt{\frac{1}{\tau_H^3}}; H_5 = \frac{1-x_2}{2\mu_1[(x_2-1)^2 + \mu_1^2]\sqrt{x_1^5}} \sqrt{\frac{1}{\tau_H^5}}; \\ K_1(t_1) &= \sqrt{1 + \frac{\mu_1 \sin(2\mu_1 x_1 \frac{\tau_H t_1}{t_\partial}) - \cos(2\mu_1 x_1 \frac{\tau_H t_1}{t_\partial})}{1 + \mu_1^2}}; E_6 = -E_5; G_6 = -G_5; H_6 = -H_5; \\ E_7 &= E_4; G_7 = G_4; H_7 = H_4; K_2(t_1) = \sqrt{1 - \frac{\mu_1 \sin(2\mu_1 x_1 \frac{\tau_H t_1}{t_\partial}) - \cos(2\mu_1 x_1 \frac{\tau_H t_1}{t_\partial})}{1 + \mu_1^2}}; \\ E_8 &= \frac{1 + \mu_1^2}{\sqrt{2x_1 x_2} [(x_2-1)^2 + \mu_1^2]} \sqrt{\frac{1}{\tau_H}}; G_8 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{x_1^3 x_2} [(x_2-1)^2 + \mu_1^2]} \sqrt{\frac{1}{\tau_H^3}}; \\ H_8 &= \frac{1}{\sqrt{2x_1^5 x_2} [(x_2-1)^2 + \mu_1^2]} \sqrt{\frac{1}{\tau_H^5}}.\end{aligned}$$

Во втором случае

$$\begin{aligned}\tilde{\mu}_1 &= \mu_2 x_2; E_4 = \frac{1-2x_2}{2[(x_2-1)^2 + \mu_2^2 x_2^2]\sqrt{x_1 x_2}} \sqrt{\frac{1}{\tau_H}}; G_4 = -\frac{x_2}{[(x_2-1)^2 + \mu_2^2 x_2^2]\sqrt{x_1^3 x_2}} \sqrt{\frac{1}{\tau_H^3}}; \\ H_4 &= \frac{1}{2[(x_2-1)^2 + \mu_2^2 x_2^2]\sqrt{x_1^5 x_2}} \sqrt{\frac{1}{\tau_H^5}}; E_5 = \frac{x_2 - \mu_2^2 x_2 - 1}{2\mu_2[(x_2-1)^2 + \mu_2^2 x_2^2]\sqrt{x_1 x_2}} \sqrt{\frac{1}{\tau_H}}; \\ G_5 &= \frac{x_2^2(1-\mu_2^2) - 1}{2\mu_2[(x_2-1)^2 + \mu_2^2 x_2^2]\sqrt{x_1^3 x_2^3}} \sqrt{\frac{1}{\tau_H^3}}; H_5 = \frac{x_2 - 1}{2\mu_2[(x_2-1)^2 + \mu_2^2 x_2^2]\sqrt{x_1^5 x_2^5}} \sqrt{\frac{1}{\tau_H^5}}; \\ K_1(t_1) &= \sqrt{1 + \frac{\mu_1 \sin(2\mu_1 x_1 \frac{\tau_H t_1}{t_\partial}) - \cos(2\mu_1 x_1 \frac{\tau_H t_1}{t_\partial})}{1 + \mu_1^2}}; E_6 = -E_5; G_6 = -G_5; H_6 = -H_5;\end{aligned}$$

$$E_7 = E_4; G_7 = G_4; H_7 = H_4; E_8 = \frac{x_2(1+\mu_2^2)}{\sqrt{2x_1x_2[(x_2-1)^2 + \mu_2^2x_2^2]}} \sqrt{\frac{1}{\tau_H}};$$

$$G_8 = \frac{\sqrt{2}x_2}{\sqrt{x_1^3x_2[(x_2-1)^2 + \mu_2^2x_2^2]}}; H_8 = \frac{1}{\sqrt{2x_1^5x_2[(x_2-1)^2 + \mu_2^2x_2^2]}} \sqrt{\frac{1}{\tau_H}}.$$

По полученным уравнениям (5.14) рассчитаем значения коэффициентов  $E_i, G_i, H_i$  ( $i=4, \dots, 8$ ) для нормированных уравнений, приведенных в [106,107], которые даны в таблице 5.2. Среди нормированных уравнений есть буквенные обозначения:  $C$  – уравнение, рекомендованное Соколовым Т.Н.;  $B$  – уравнение, полученное по рекомендации Бутерверта;  $GL$  – уравнение, рекомендованное Грехемом и Летропом. Отметим, что уравнение  $GL$  обеспечивает минимум квадратичного критерия качества и из всех опубликованных в [106,107] уравнений имеет минимальное нормированное время переходного процесса.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что выбор нормированного уравнения при расчете ЭТС натяжения существенно влияет на норму дополнительных движений  $\|\Delta y_2(t)\|_{L_2}$ , так как каждому уравнению поставлена в соответствии определенная комбинация коэффициентов  $E_i, G_i, H_i$  ( $i=1,2,3$  для нормированных уравнений с вещественными корнями и  $i=4, \dots, 8$  для нормированных уравнений с комплексными корнями).

Для нормированных уравнений с вещественными корнями выдерживаются соотношения:

$$\text{если } \tau_{H,m} < \tau_{H,n}, \quad \text{то} \quad \left. \begin{array}{l} E_{l,m} > E_{l,n}; \\ G_{l,m} > G_{l,n}; \\ H_{l,m} > H_{l,n}; \end{array} \right\} \quad (5.15)$$

где  $l = 1,2,3$ ;  $E_{l,m} = E_l, G_{l,m} = G_l, H_{l,m} = H_l, \tau_{H,m} = \tau_H$  нормированного уравнения номер  $m$ ;  $E_{l,n} = E_l, G_{l,n} = G_l, H_{l,n} = H_l, \tau_{H,n} = \tau_H$  нормированного уравнения номер  $n$ .

У нормированных уравнений с комплексными корнями условие (5.15) не выполняется. Так, коэффициенты  $E_4, \dots, E_8$  уравнения 8, имеющего  $\tau_H = 8,2$

(в 2,28 раза больше, чем у уравнения  $GL$ ), больше аналогичных коэффициентов уравнения  $GL$ . Поэтому, в таблице 5.2 приведены нормированные уравнения, все коэффициенты  $E_i, G_i, H_i$  ( $i=4, \dots, 8$ ) которых меньше коэффициентов уравнения  $GL$ .

Полученные результаты легли в основу создания методики расчета электротехнической системы регулирования натяжения при намотке изделий “простой” формы.

Методика предусматривает выбор нормированного уравнения, использование которого при расчете регулятора ЭТС натяжения, позволяет обеспечить заданные динамические характеристики и дополнительные движения, вызванные изменением параметров объекта регулирования и действием насыщения.

Рассмотрим алгоритм расчета ЭТС натяжения.

Исходными данными при расчете являются: значения коэффициентов дифференциального уравнения  $a_1, a_2$  и их относительные изменения  $\Delta a_1, \Delta a_2$ ; максимально допустимые значения  $\delta C_{дон}, \delta \Theta_{y дон}, \|\Delta y\|_{дон}, k_{дон}$ ; характеристики нормированных уравнений (см. таблицы 5.1, 5.2).

Расчет производим в следующей последовательности.

1. Предварительно задаемся требуемым временем переходного процесса  $t_\theta$ .
2. Выбираем из таблицы 5.1 или таблицы 5.2 нормированное уравнение с минимальным значением  $\tau_H$  (это уравнение  $GL$  из таблицы 5.2). Вычисляем дополнительные движения в ЭТС, вызванные изменением параметров объекта регулирования, по выражению (5.2).

Таблица 5.2 – Значения коэффициентов  $E$ ,  $G$ ,  $H$  для нормированных уравнений с комплексными сопряженными корнями

№ уравнения	$E_4, E_7$	$E_5, -E_6$	$E_8$	$G_4, G_7$	$G_5, -G_6$	$G_8$	$H_4, H_7$	$H_5, -H_6$	$H_8$	$\tau_H$
1	0,23370	-0,66200	0,01230	-0,00800	-0,19360	0,00510	-0,00110	-0,00820	0,00070	7,2
2	-0,35840	-1,07500	0,68970	-0,21820	-0,32730	0,25190	-0,02490	-0,02490	-0,02890	5,4
3	0,30290	-0,24620	0,00850	-0,00320	-0,08090	0,05330	-0,00070	-0,02930	0,00030	8,9
4	0,24000	-0,32140	0,05080	-0,01330	0,09290	0,00840	-0,00270	-0,00550	0,00170	7,1
5	0,0	-0,33160	0,33160	-0,05830	-0,10210	0,05840	-0,01280	-0,00640	0,01280	4,9
6	-0,08200	-0,18670	0,55820	-0,07300	-0,07690	0,09850	-0,01610	-0,00080	0,02170	4,0
7	0,25530	-0,21710	0,03710	-0,00290	-0,03630	0,00130	-0,00070	-0,00120	0,00030	14,0
8	0,14360	-0,27760	0,15740	-0,01180	-0,05780	0,00750	-0,00360	-0,00290	0,00230	8,2
9	0,04040	-0,21820	0,28600	-0,01650	-0,05430	0,01340	-0,00510	-0,00200	0,00410	7,0
10	0,0	-0,15150	0,37880	-0,01670	-0,04680	0,01670	-0,00480	-0,00090	0,00480	6,5
11	-0,01060	-0,10860	0,42610	-0,02280	-0,03830	0,01680	-0,00370	-0,00040	0,00043	6,6
$C$	-0,12030	-0,16130	0,58960	-0,08470	-0,06650	0,11970	-0,01490	0,0	0,02080	4,3
$B$	0,0	-0,33660	0,29110	-0,05350	-0,08560	0,05350	-0,00840	-0,00480	0,00840	5,9
$GL$	0,07340	-0,25510	0,53170	-0,08990	-0,11070	0,10890	-0,01390	-0,00420	0,02910	3,6

Продолжение таблицы 5.2

№ уравнения	$E_4, E_7$	$E_5, -E_6$	$E_8$	$G_4, G_7$	$G_5, -G_6$	$G_8$	$H_8$	$\tau_H$
12	0,38630	0,02430	0,00070	-0,05020	0,03070	0,24660	-0,01720	10,2
13	0,02620	0,05800	0,00270	-0,12210	0,06110	0,38870	-0,04090	8,0
14	0,03850	0,10880	0,00620	-0,25320	0,08440	0,59690	-0,07690	7,5
15	0,04170	0,19280	0,01290	-0,45110	0,05640	0,89720	-0,13640	7,0
16	-0,02450	0,45330	0,04310	-0,83690	-0,24410	1,4920	-0,32050	5,5
17	-0,00020	0,01300	0,00040	-0,02710	-0,00300	0,21290	-0,00920	12,1
18	-0,00120	0,03160	0,00160	-0,06130	-0,01230	0,34160	-0,02440	8,6
19	-0,00600	0,06820	0,00530	-0,11770	-0,03920	0,33290	-0,04820	6,5
20	-0,01650	0,10520	0,00990	-0,17420	-0,08710	0,55430	-0,07440	5,8
21	-0,05250	0,17980	0,02280	-0,24800	-0,2060	0,70720	-0,12710	4,8
22	-0,00280	0,00520	0,00020	-0,00990	-0,00890	0,19550	-0,00360	15,2
23	-0,01270	0,02200	0,00180	-0,03570	-0,04170	0,33660	-0,01560	8,3
24	-0,01370	0,02380	0,00210	-0,03660	-0,04280	0,34550	-0,01680	6,5
25	-0,02350	0,04990	0,00680	-0,0645	-0,11550	-0,4596	-0,03530	6,1

3. Полученные ошибки  $\delta\Theta_y$  регулирования и изменения запаса устойчивости сравниваем с максимально допустимыми значениями. Если  $|\delta\Theta_y| > \delta\Theta_{y\text{ доп}}$  или  $|\delta C| > \delta C_{\text{доп}}$ , то выбираем уравнение с бóльшим  $\tau_H$  и повторяем расчет с пункта 2.

Если  $|\delta\Theta_y| \leq \delta\Theta_{y\text{ доп}}$  или  $|\delta C| \leq \delta C_{\text{доп}}$ , то вычисляем коэффициент усиления разомкнутого тракта ЭТС  $a_0 = k = \left(\frac{\tau_H}{t_0}\right)^3$ , который должен быть меньше физически реализуемого. При  $k > k_{\text{доп}}$  увеличиваем  $t_0$  и переходим к пункту 2.

4. Определяем параметры регулятора ЭТС натяжения.

5. Решаем уравнение (5.3) и находим величину  $t_1$  при которой  $|U_3 - U_{OC}| < \xi_1$ . Здесь напряжение обратной связи вычисляем по формуле:

$$U_{OC} = k_{OC} \cdot y_2(t), \quad (5.16)$$

где  $y_2(t)$  – решение уравнения (5.3),  $U_3 = U_{3M}$ .

6. Находим норму дополнительных движений  $\|\Delta y_2(t)\|_{L_2}$  в зависимости от характера корней характеристического уравнения из неравенств (5.11) и (5.14).

Если  $\|\Delta y_2(t)\|_{L_2} > \|\Delta y\|_{\text{доп}}$ , то выбираем новое уравнение с бóльшим  $\tau_H$  и повторяем расчет с пункта 2.

Если  $\|\Delta y_2(t)\|_{L_2} \leq \|\Delta y\|_{\text{доп}}$ , то считаем расчет расчёт окончанным.

Результатом расчета являются: номер нормированного уравнения  $N_j$ , значения  $t_0$ ,  $\delta C$ ,  $\delta\Theta_y$ ,  $k_1$ ,  $t_1$ ,  $\|\Delta y_2(t)\|_{L_2}$ .

На рисунке 5.3 приведен рассмотренный алгоритм расчета электротехнической системы регулирования.

## АЛГОРИТМ РАСЧЕТА

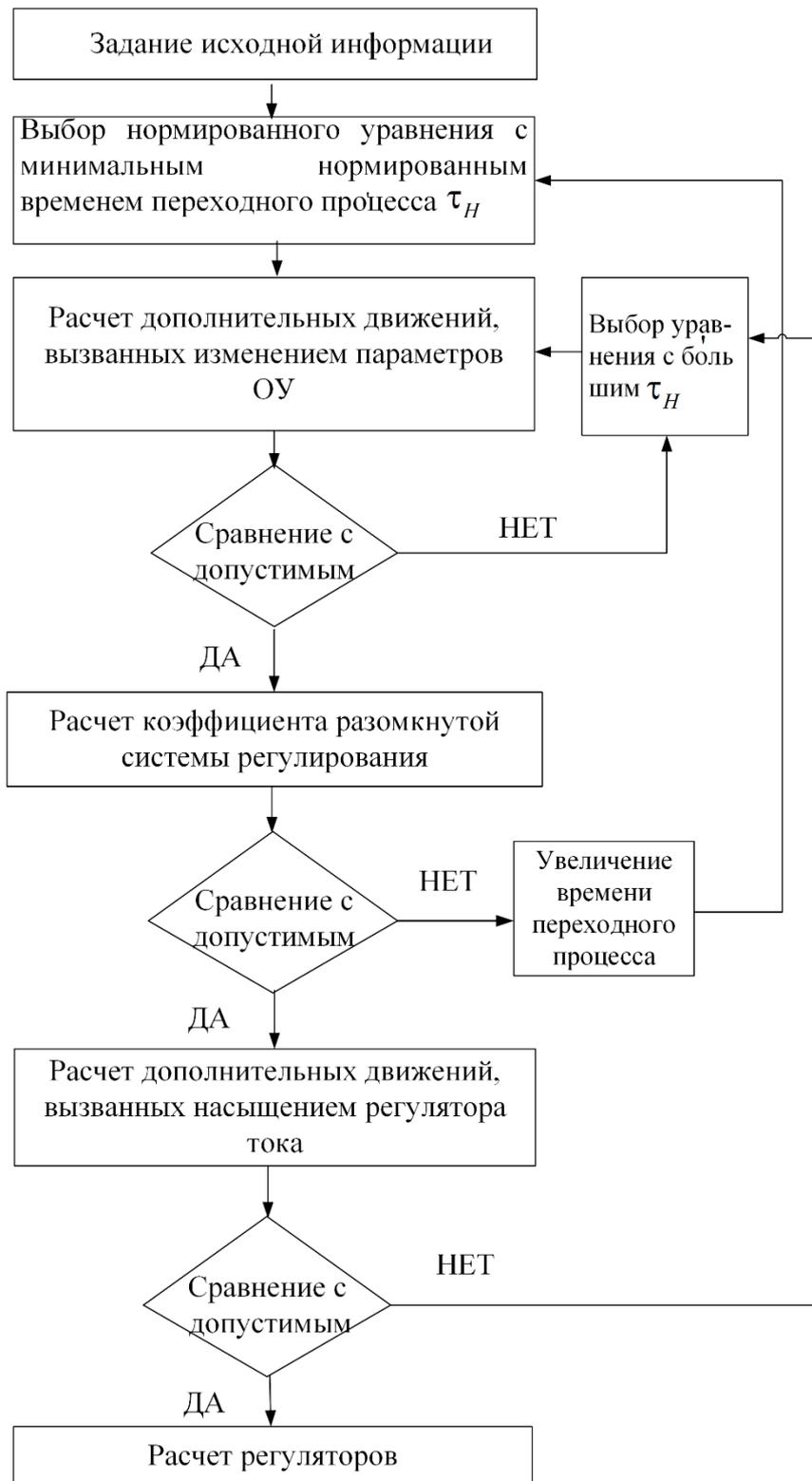


Рисунок 5.3 – Алгоритм расчета регулятора системы регулирования

#### 5.4 Разработка методики синтез адаптивных регуляторов электротехнических систем регулирования натяжения намотки изделий “сложной” формы “Кокон”

При намотке изделий “Конус”, “Кокон”, “Шар” первого класса изделий (с высокими требованиями к условиям эксплуатации изделий) параметры объекта регулирования 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 максимальное быстродействие в широком диапазоне изменения параметров объекта регулирования. Во 2 разделе настоящей работы, при получении математического описания объекта регулирования и его последующей линеаризации получены математические зависимости коэффициентов линеаризации от параметров процесса намотки.

Пусть система управления описывается математической моделью вида:

$$\Phi(y, y', \dots, y^{(n)}, u, u', \dots, u^{(m)}) = 0, \quad (5.17)$$

где  $\Phi$  – нелинейный матричный оператор;  $u$  – управляющее воздействие;  $y$  – выходная величина.

Уравнение (5.17) может быть линеаризовано в окрестности некоторой рабочей области. Результатом линеаризации является линеаризованное уравнение вида:

$$\Delta \dot{y} = \frac{\partial \Phi}{\partial y}(t) \cdot \Delta y + \frac{\partial \Phi}{\partial u}(t) \cdot \Delta u. \quad (5.18)$$

Данное выражение позволяет, используя принцип подчиненного управления, построить многоконтурную ЭТС и получить передаточную функцию регулятора внешнего контура (натяжения). Однако, параметры данного регулятора зависят от выбранной точки линеаризации, то есть от производных  $\frac{\partial \Phi}{\partial y}$  и  $\frac{\partial \Phi}{\partial u}$ . В процессе намотки изделий “Конус”, “Кокон”, “Шар” существенно изменяются параметры объекта регулирования. Рассмотрим возможность процесса адаптации регулятора натяжения при данных

изменениях параметров, то есть процесс параметрической адаптации. 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;  $[C_k]$  – матрица коррекции;  $[y_{\text{нп}}]$  – вектор наблюдаемых переменных.

Рассмотрим процесс намотки изделия из “сухого” композиционного материала. Для “сухого” композиционного материала из (2.15) имеем:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= \tilde{f}_1(S_1, S_0, l_1, v_1, v_2, EF); \\ k_1 &= \tilde{f}_2(S_1, S_0, l_1, EF); \\ k_2 &= \tilde{f}_3(S_1, S_0, l_1, EF); \\ k_3 &= \tilde{f}_4(S_1, S_0, l_1, v_1, v_2, EF); \\ k_4 &= \tilde{f}_5(S_1, S_0, l_1, v_1, v_2, EF); \\ k_5 &= \tilde{f}_6(S_1, S_0, l_1, EF); \\ E &= \tilde{f}_7(S_1, l_1, v_1, v_2, F). \end{aligned} \right\} \quad (5.19)$$

Здесь  $\tilde{f}_i$  – некоторые функции.

В соответствии с законом Гука, значение  $E$  вычисляется по выражению:

$$E = \frac{1}{F} \cdot \frac{l_1}{\int_0^{t_N} (v_2 - v_1) dt + \Delta l_N} \cdot S_{1N}.$$

Здесь  $S_{1N}$  – натяжение ленты в момент времени  $t_N$  (в момент определения значений  $E$ );  $\Delta l_N$  – изменение длины тракта намотки в момент времени  $t_N$ .

Функциональная схема трехконтурной ЭТС натяжения приведена на рисунке 5.4.

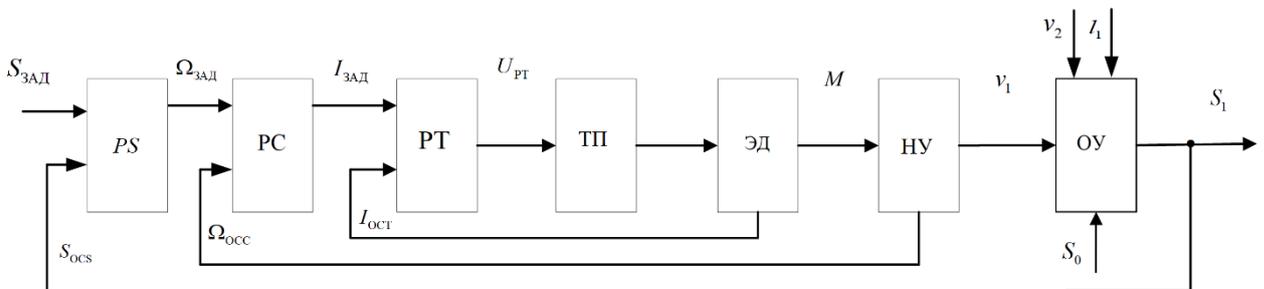


Рисунок 5.4 – Функциональная схема трехконтурной электротехнической системы натяжения “сухой” композиционной ленты

Для создания адаптивного регулятора ЭТС необходимо измерять  $S_1, S_0, v_1, v_2, I_1$  и знать информацию о  $EF$ . На основании данной информации в темпе с процессом производится изменение параметров регулятора контура натяжения. Функциональная схема адаптивной ЭТС натяжения приведена на рисунке 5.5.

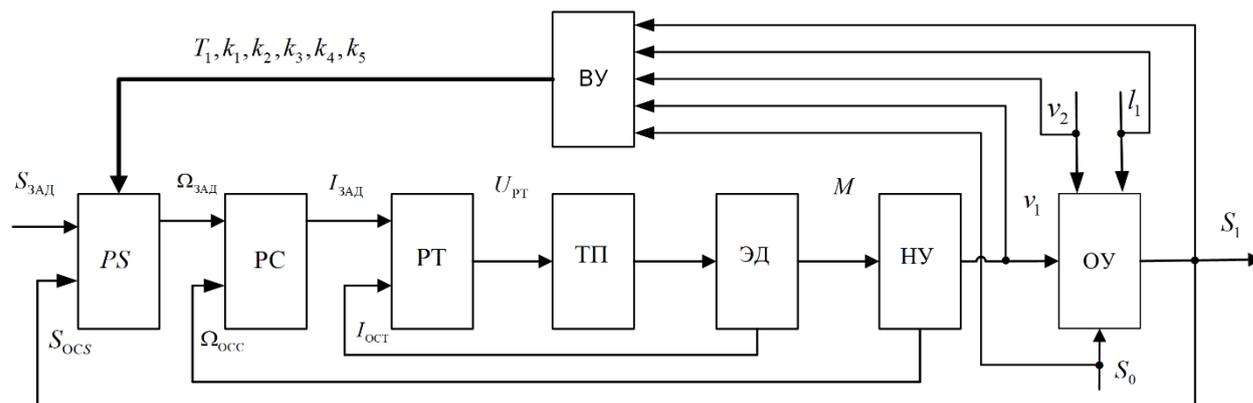


Рисунок 5.5 – Функциональная схема адаптивной ЭТС натяжения “сухой” композиционной ленты

Данная функциональная схема содержит вычислительное устройство ВУ, которое на основании информации о технологическом процессе осуществляет вычисления коэффициентов линеаризации  $T_1, k_i$ . На основании этой информации регулятор  $PS$  изменяет уставки, обеспечивая заданное качество регулирования. Подробнее данный вопрос рассмотрен в главе 6.

Рассмотрим процесс намотки изделия из “мокрого” композиционного материала. Для “мокрого” композиционного материала из (2.29) имеем:

$$\left. \begin{aligned} T_{1,m} &= \hat{f}_1(S_1, S_0, \alpha, v_2, EF); \\ k_{1,m} &= \hat{f}_2(S_1, S_0, \alpha, v_2, EF); \\ k_{2,m} &= \hat{f}_3(S_1, S_0, \alpha, EF); \\ k_{3,m} &= \hat{f}_4(S_1, S_0, \alpha, v_2, EF); \\ k_{4,m} &= \hat{f}_5(S_1, S_0, \alpha, EF); \\ f &= \hat{f}_6(S_1, S_0, \alpha). \end{aligned} \right\} \quad (5.20)$$

Здесь  $\hat{f}_i$  – некоторые функции.

Функциональная схема четырехконтурной ЭТС натяжения приведена на рисунке 5.6.

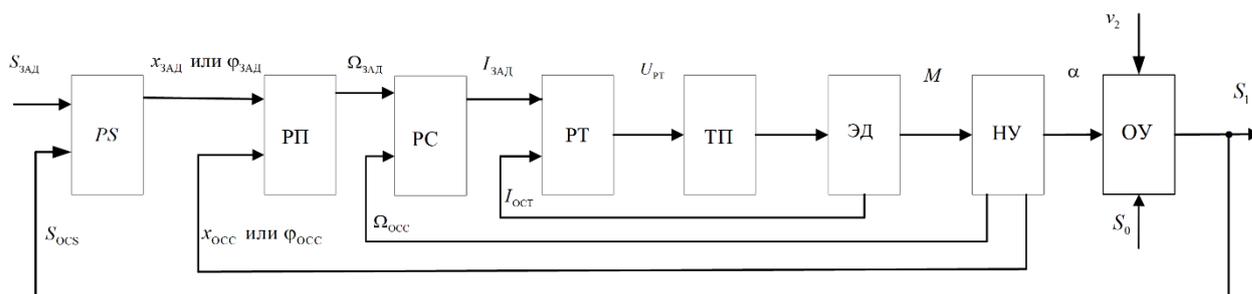


Рисунок 5.6 – Функциональная схема четырехконтурной электротехнической системы регулирования натяжения “мокрой” композиционной ленты

Для создания адаптивного регулятора необходимо измерять  $S_1, S_0, \alpha, v_2$  и знать информацию о коэффициенте вязкого трения  $f$ . На основании данной информации в темпе с процессом производится изменение параметров регулятора контура натяжения. Функциональная схема адаптивной ЭТС натяжения приведена на рисунке 5.7.

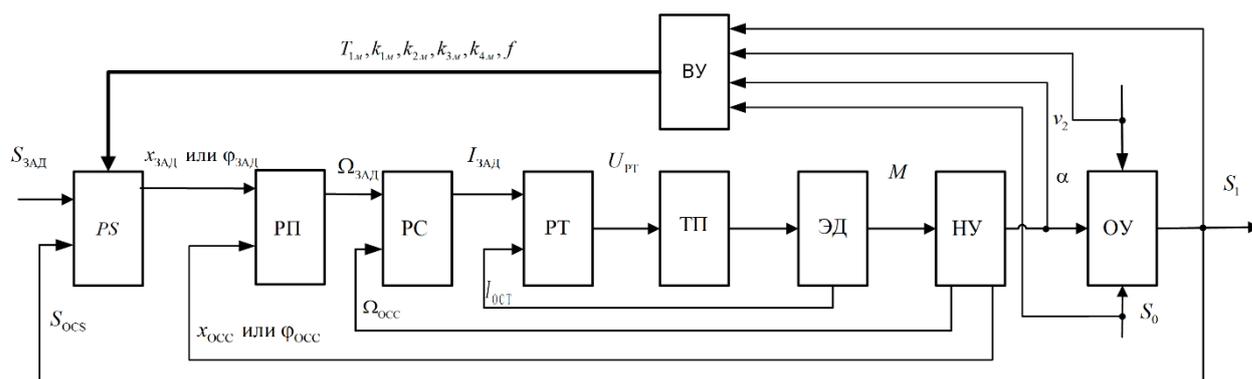


Рисунок 5.7 – Функциональная схема адаптивной электротехнической системы натяжения “мокрого” композиционного материала

Данная функциональная схема содержит вычислительное устройство ВУ, которое на основании информации о технологическом процессе

осуществляет вычисления коэффициентов линеаризации  $T_1, k_{im}$ . На основании этой информации регулятор  $PS$  изменяет уставки, обеспечивая заданное качество регулирования. Подробнее данный вопрос рассмотрен в главе 6.

## 5.5 Синтез регулятора натяжения с прогнозом состояния системы

### 5.5.1 Обоснование критерия оптимальности

При намотке изделий “Призма”, первого класса параметры объекта регулирования изменяются очень быстро, соизмеримо с длительностью переходного процесса. В литературе нет рекомендаций по синтезу систем управления при быстрых, соизмеримых с длительностью переходного процесса, изменениях параметров объекта регулирования в широких пределах. Не изучены и вопросы управления системой с прогнозом состояния системы.

Современное состояние вычислительной техники и методов оптимизации позволяет создавать и практически реализовывать алгоритмы прямого поиска вектора оптимального управления системами натяжения. В работе рассмотрен разработанный алгоритм для системы регулирования натяжением композиционного материала при изготовлении изделий методом намотки.

Вопрос выбора критерия оптимизации цифровых систем управления достаточно сложен. Одним из самых распространенных критериев оптимизации систем является квадратичная функция потерь [103,120-122]. Для линейных систем регулирования, описываемых преобразованиями Лапласа, на основании этой функции потерь разработаны методики оптимизации для непрерывных и дискретных систем.

Наиболее целесообразно рассматривать систему регулирования в виде разностных уравнений:

$$x(k+1) = \varphi[x(k), u(k), k], \quad (5.21)$$

где  $x(k)$  –  $n$ -мерный вектор пространства состояний системы;  $u(r)$  –  $r$ -мерный вектор пространства управляющих воздействий.

Для линейных систем управления квадратичная функция потери  $J_{\Sigma}$  имеет вид:

$$\begin{aligned} J_{\Sigma} &= x^T(N) \cdot P(N) \cdot x(N) + \sum_{k=0}^{N-1} [x^T(k) \cdot Q(k) \cdot x(k) + u^T(k) \cdot R(k) \cdot u(k)] = \\ &= \Theta [x(n), N] + \sum_{k=0}^{N-1} \Phi [x(k), u(k), k], \end{aligned} \quad (5.22)$$

где  $P, Q, R$  – весовые матрицы.

Первое слагаемое функционала (5.22) не зависит от управляющего воздействия  $u(k)$  и определяется только квадратами переменных состояния. Второе же слагаемое – это сумма квадратов переменных состояния и управляющих переменных на интервале  $0 \leq k \leq N-1$ . Рассматривать функцию потерь можно на конечном интервале  $N$ , либо на бесконечном интервале  $0 \leq k \leq \infty$ .

Матрицы  $P, Q, R$  обычно симметричные, что упрощает задачу вычисления вектора управления  $u$ , обеспечивающего минимум функционала (5.22). В этом случае задача оптимального управления сводится к определению матрицы  $P(k)$ , которая необходима для вычисления вектора  $u(k)$ .

Очевидно, что минимизация функционала (5.22) должна производиться с учетом ограничений на максимально допустимые моменты приводов  $M_{\delta}$  и управляющие воздействия  $u_{\delta}$ :

$$\left. \begin{aligned} |M(k)| &\leq M_{\delta}; \\ |u(k)| &\leq u_{\delta}, \end{aligned} \right\} \quad (5.23)$$

где  $u$  – вектор управляющих воздействий.

### **5.5.2 Синтез регулятора электропривода системы регулирования натяжения с прогнозом состояния**

Представим известный квадратичный критерий качества (5.22) в виде [123-125]:

$$J_{\Sigma} = \sum_{k=0}^{k=N-1} [\bar{x}^T(k) \cdot Q(k) \cdot \bar{x}(k) + u^T(k) \cdot R(k) \cdot u(k)], \quad (5.24)$$

где  $\bar{x} = x - x_0$ ;  $x$  – вектор состояния системы;  $x_0$  – желаемое значение вектора состояния;  $Q, R$  – весовые матрицы;  $u$  – вектор управления.

Неизменяемую часть электропривода опишем разностными уравнениями вида:

$$\left. \begin{aligned} x(k+1) &= A(k) \cdot x(k) + B(k) \cdot u(k); \\ y(k+1) &= C(k) \cdot x(k), \end{aligned} \right\} \quad (5.25)$$

где  $A$  – матрица динамики;  $B$  – матрица входа;  $C$  – матрица выхода;  $y$  – вектор выходов;

$$x(k) = \begin{vmatrix} S_1(k) \\ v_1(k) \end{vmatrix}; \quad y(k) = |S_1(k)|; \quad u(k) = |\Omega_{\text{зад}}|;$$

$$A = \begin{vmatrix} 1 - \frac{1}{T_1(k)} & k_1(k) \\ 0 & 1 - \frac{1}{4 \cdot T_{\mu}} \end{vmatrix}; \quad B = \begin{vmatrix} 1 \\ 4 \cdot T_{\mu} \cdot k_{\text{occ}} \\ 0 \end{vmatrix}; \quad C = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

Решение задачи определения оптимального управления для такого класса систем, с использованием второго метода Ляпунова, принципа максимума, динамического программирования, как показано в [123-125], сводится к решению уравнений Риккати. Число уравнений Риккати определяется размерностью вектора состояния системы. Для нестационарных систем регулирования решение цифровым регулятором (ЦР) в реальном масштабе времени большого числа уравнений требует существенных затрат машинного времени.

В работах [185-190] предложено минимизировать функционал (5.24) на небольших интервалах, однако это не позволяет получать оптимальные системы управления на всем интервале работы системы от 0 до  $N-1$ .

Далее рассмотрим возможность получения оптимального управления на всем диапазоне работы системы.

При синтезе системы регулирования воспользуемся квадратичным критерием качества:

$$J_{\Sigma} = V_3 [x(n)] + \sum_{k=0}^{N-1} L [x(k), u(k), k], \quad (5.26)$$

где  $V_3, L$  – скалярные функции.

В моменты времени  $k \in [0, N-1]$  требуется найти управление  $u(k)$ , минимизирующее функционал (5.26).

Подставляя в функционал (5.26) выражения для описания электропривода при  $k = 0, 1, \dots, N-1$ , получим:

$$J_{\Sigma} = F [x_1(0), \dots, x_n(0); u_1(0), \dots, u_1(N-1); u_r(0), \dots, u_r(N-1)], \quad (5.27)$$

где  $x(0)$  – начальное состояние системы.

Так как  $x(0)$  фиксирован, то выражение (5.27) есть функция  $k \times N$  управляющих воздействий  $u_1(k), \dots, u_r(k)$  в моменты времени  $k = 0, 1, \dots, N-1$ .

Для минимизации функционала (5.27), используем одним из методов нелинейного программирования [191-194]. Для данного случая наиболее целесообразно использовать 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.

Общая задача нелинейного программирования на независимые переменные ставится следующим образом: найти наименьшее значение  $f(u^*)$  нелинейной функции  $f(u)$  на всем пространстве  $E^n$  и точку  $u^*$ , обеспечивающую  $f(u^*) = \min$ .

Рассмотрим алгоритм метода оптимизации при поочередном изменении независимых переменных.

1. Выбираем стартовую точку  $u^{(0)} = (u_1^{(0)}, u_2^{(0)}, \dots, u_n^{(0)})$  и вычисляем  $f(u^{(0)})$ .
2. Рабочая формула метода:

$$u_i^{(m+1)} = u_i^{(m)} \pm \Delta u_i \quad (i = 1, n; m = 0, 1, \dots) \quad (5.28)$$

Вначале  $m = 0$ . Полагаем  $i = 1$ , то есть точки  $u^{(0)}$  меняем первую координату  $u_1^{(0)}$  на величину плюс  $\Delta u_1$ . Если  $f(u_1^{(1)}, u_2^{(0)}, \dots, u_n^{(0)}) < f(u_1^{(0)}, \dots, u_n^{(0)})$ , то

делаем еще один шаг. Если  $f(u_1^{(1)}, u_2^{(0)}, \dots, u_n^{(0)}) \geq f(u_1^{(0)}, \dots, u_n^{(0)})$ , то возвращаемся в предыдущую точку, уменьшая шаг, и снова делаем шаг по формуле (5.28). Если после нескольких неудачных шагов окажется  $\Delta u_1 \leq \varepsilon_1$ , то в формуле (5.28) нужно взять знак минус (сдвинуться влево по координате  $u_1$ ) и сделать серию шагов. Здесь и далее везде  $\varepsilon_1$  – заданное положительное малое число. Если  $\Delta u_1 < 0$  и  $|\Delta u_i| \leq \varepsilon_1$ , то следует изменять значение следующей координаты.

3. Критерием окончания минимизации является норма разности вида

$$\|u^{(m+1)} - u^{(m)}\| = \sqrt{(u_1^{(m+1)} - u_1^{(m)})^2 + \dots + (u_n^{(m+1)} - u_n^{(m)})^2} \leq \varepsilon_2 \quad (5.29)$$

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

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

Известно, что вектор управляющих воздействий, минимизирующий функционал (5.24), может быть представлен в виде

$$u(k) = -RX(k), \quad (5.30)$$

где  $R$  – матрица обратных связей.

Матрица  $R$  находится известными методами [123 – 125]. Учитывая запаздывание в цифровых системах управления, имеем [188]:

$$X(k) = A^*(k)X(0),$$

где  $A^*$  – матрица, получается подстановкой (5.30) в (5.25). При вычислении  $A^*$  отметим то обстоятельство, что в течение первого такта система не работает, так как еще не рассчитано управляющее воздействие, т. е.  $X(1) = X(0)$ .

После ряда преобразований имеем:

$$\begin{aligned} A^*(1) &= I; \\ A^*(2) &= [A - BR]; \\ A^*(3) &= [A^2 - ABR - BR]; \\ A^*(4) &= [A^3 - A^2BR - ABR - BRA + BRBR]; \\ &\dots \end{aligned}$$

Здесь  $I$  – единичная матрица. В общем случае:

$$A_{(k)}^* = AA_{(k-1)}^* - BRA_{(k-2)}^*.$$

Воспользовавшись  $Z$  - преобразованием, составим характеристические уравнения замкнутой системы на каждом интервале  $k$ :

$$\det[ZI - A^*(k)] = 0.$$

Условием устойчивости является определенное расположения полюсов замкнутой системы  $Z_i$ . В случае если оно не выполняется, необходимо воспользоваться другими методами синтеза системы.

### **Выводы по главе**

1. Разработан новый метод синтеза электротехнических систем регулирования натяжения композиционной ленты при изготовлении изделий различной формы, состоящий из трех методик, основанных на особенностях математического описания тракта намотки таких изделий. Данный метод в отличие от существующих позволяет осуществить синтез широкого класса ЭТС, в том числе робастных, адаптивных и цифровых систем управления натяжением.

2. Разработана оригинальная методика синтеза простых ЭТС натяжения при намотке изделий “Конус” из “сухой” и “мокрой” композиционной ленты, обеспечивающая заданные показатели качества регулирования при изменении параметров намотки в ограниченном диапазоне с невысокими требованиями к точности поддержания натяжения.

3. Впервые разработаны универсальные структурные схемы ЭТС натяжения при намотке изделий конус, кокон, шар из “мокрой” или “сухой” композиционной лентой с адаптивным регулятором, обеспечивающие заданные показатели качества регулирования при изменении параметров намотки в широком диапазоне с высокими требованиями к точности поддержания натяжения.

4. Предложена методика для создания регулятора ЭТС с прогнозом состояния системы. Показана перспективность применения такого регулятора при намотке изделий сложной геометрической формы, основанная на оценке

текущего и прогнозе следующих состояний параметров намотки. Создание таких алгоритмов необходимо при динамически изменяющихся параметрах объектов управления в больших диапазонах. Использование таких систем позволяет существенно увеличить точность поддержания натяжения на заданном уровне.

## 6 ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ

### 6.1 Исследования влияния параметров наматываемых изделий на работу натяжных устройств

#### 6.1.1 Исследование влияния габаритных размеров наматываемого изделия методом “сухой” намотки на эквивалентный момент двигателя

Рассмотрим выбор двигателя для натяжного устройства станка, на котором наматываются изделия “Цилиндр”. Общий вид изделия изображен на рисунке 1.3 (изделие *b*). Линейная скорость движения ленты при намотке данного изделия изменяется так, как показано на рисунке 3.31. Натяжение, с которым наматывается изделие  $S_1$ , равно 3000 Н; натяжение  $S_0$  равно 200 Н; произведение  $EF$  равно 10000 Н; радиус роликов натяжного устройства равен 0,09 м; передаточное отношение редуктора 50; КПД редуктора 0,8. При намотке данного изделия реализуются следующие технологические параметры процесса намотки:  $v_{2 \text{ лин } \min} = 0,15$  м/с;  $v_{2 \text{ лин } \max} = 0,3$  м/с;  $t_1 = 240$  с;  $t_2 = 900$  с;  $t_3 = 300$  с;  $t_4 = 900$  с;  $t_5 = 240$  с.

По выражению (3.41) находим мощность привода натяжного устройства:

$$P_1 = (S_{1\max} - S_{0\min}) \cdot v_{1\max} \cdot \eta_1 = (3000 - 200) \cdot 0,3 \cdot 0,8 = 672 \text{ Вт.}$$

Максимальная частота вращения двигателя равна:

$$\Omega_{\text{ДВ } \max} = \frac{i_1}{r_1} v_{\text{лин } \max} = \frac{50}{0,09} \cdot 0,3 = 166,7 \text{ рад/с.}$$

Предварительно выбираем синхронный двигатель с постоянными магнитами фирмы Siemens 1FT6061 со следующими номинальными данными: мощность двигателя 0,7 кВт, номинальный ток 1,9 А, номинальный момент 3,7 Нм, номинальная частота вращения 2000 об/мин, момент инерции

двигателя  $J_D = 0,0006 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  [195]. С учетом дополнительных вращающихся частей имеем:

$$J_1 = 1,1 J_D.$$

Используя выражение (3.44), найдем эквивалентный момент при намотке цилиндрического изделия для двигателя Siemens 1FT6061:

$$M_{\text{ЭКВ}} = 3,36 \text{ Нм}.$$

Так как номинальный момент двигателя равен 3,7 Нм, то данный двигатель выбран правильно для намотки цилиндрического изделия с указанными параметрами режимов намотки.

Рассмотрим выбор электродвигателя для станка СНП-36 [195].

Натяжение, с которым наматывается изделие  $S_{1\text{max}}$  равно 4000 Н; натяжение  $S_0$  равно 200 Н; произведение  $EF$  равно 10 000 Н; радиус роликов натяжного устройства равен 0,09 м; передаточное отношение редуктора 30; КПД редуктора 0,8. При намотке данного изделия реализуются следующие технологические параметры процесса намотки.

По выражению (3.41) находим мощность привода натяжного устройства:

$$P_1 = (S_{1\text{max}} - S_{0\text{min}}) \cdot v_{1\text{max}} \cdot \eta_1 = (4000 - 200) \cdot 0,4 \cdot 0,8 = 1216 \text{ Вт}.$$

Максимальная частота вращения двигателя равна:

$$\Omega_{\text{ДВ max}} = \frac{i_1}{r_1} \cdot v_{\text{лин max}} = \frac{30}{0,09} \cdot 0,3 = 100,0 \text{ рад/с}.$$

Предварительно выбираем синхронный двигатель с постоянными магнитами фирмы Siemens 1FK7060 со следующими номинальными данными: мощность двигателя 1,48 кВт, номинальный ток 3,7 А, номинальный момент 4,7 Нм, номинальная частота вращения 3000 об/мин, момент инерции двигателя  $J_D = 0,000795 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  [195]. С учетом дополнительных вращающихся частей имеем:

$$J_1 = 1,1 \cdot J_D.$$

Используя выражение (3.44), найдем эквивалентный момент при намотке цилиндрического изделия для двигателя Siemens 1FK7060:

$$M_{\text{ЭКВ}} = 7,6 \text{ Нм.}$$

Так как номинальный момент двигателя равен 4,7 Нм, то следует выбрать больший двигатель. В данном случае, на намоточном станке СНП – 36 было принято решение использовать два натяжных ролика, каждый из которых оснащен двигателем 1FK7060. Таким образом, общий момент, развиваемый двигателями, составил 9,4, что больше  $M_{\text{ЭКВ}}$ .

Рассмотрим намотку изделия “Квадрат”. Параметры изделия и станка:  $a= 1,2$  м,  $b=0,8$  м,  $\Omega_{\text{ОПР}}=1,5$  рад/с,  $OO_1=2,5$  м. Натяжение, с которым наматывается изделие  $S_1$ , равно 3000 Н; натяжение  $S_0$  равно 200 Н; скорость намотки ленты на изделие равна 0,3 м/с; произведение  $EF$  равно 10000 Н; радиус роликов натяжного устройства равен 0,09 м; передаточное отношение редуктора 50; КПД редуктора 0,8.

По выражению (3.47) рассчитываем эквивалентный момент, он равен:

$$M_{\text{ЭКВ}} = 4,66 \text{ Нм.}$$

Данный момент больше номинального момента двигателя, равного 3,7 Нм. Таким образом, неравенство (3.49) не выполняется и требуется выбрать двигатель бóльшей мощности.

Выбираем синхронный двигатель с постоянными магнитами фирмы Siemens 1FT6062 со следующими номинальными данными: мощность двигателя 1,1 кВт, номинальный ток 2,6 А, номинальный момент 5,2 Нм, номинальная частота вращения 2000 об/мин, момент инерции двигателя 0,00085 кг·м<sup>2</sup> [195].

Эквивалентный момент в этом случае равен:

$$M_{\text{ЭКВ}} = 5,38 \text{ Нм.}$$

Данный момент больше номинального момента двигателя, равного 5,2 Нм. Таким образом, неравенство (3.49) не выполняется и требуется выбрать двигатель еще бóльшей мощности.

Выбираем синхронный двигатель с постоянными магнитами фирмы Siemens 1FT6064 со следующими номинальными данными: мощность двигателя 1,7 кВт, номинальный ток 3,8 А, номинальный момент 8,0 Нм,

номинальная частота вращения 2000 об/мин, момент инерции двигателя 0,0013 кг·м<sup>2</sup>.

Эквивалентный момент в этом случае равен:

$$M_{\text{ЭКВ}} = 6,48 \text{ Нм.}$$

Данный момент меньше номинального момента двигателя, равного 5,2 Нм. Таким образом, неравенство (3.49) выполняется. Двигатель выбран правильно и обеспечит нормальный процесс намотки изделия. Увеличение  $M_{\text{ЭКВ}}$  при выборе более мощного двигателя объясняется увеличением габаритных размеров двигателя и, как следствие, увеличением момента инерции ротора.

Исследуем влияние габаритных размеров наматываемого изделия на эквивалентный момент двигателя. На рисунке 6.1 показана зависимость  $M_{\text{ЭКВ}}$  от размеров ребра  $a$ , на рисунке 6.2 от размеров ребра  $b$ , на рисунке 6.3 от длины тракта намотки  $OO_1$ .

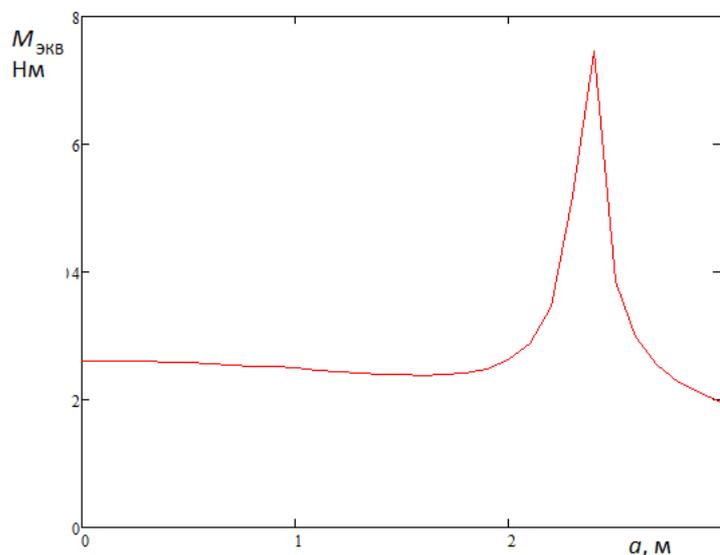


Рисунок 6.1 – Зависимость эквивалентного момента от габарита  $a$  изделия

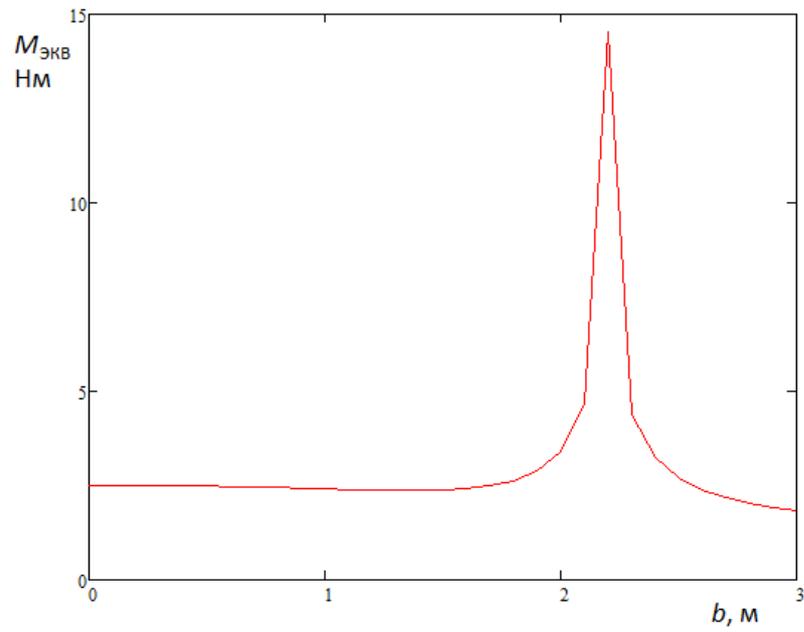


Рисунок 6.2 – Зависимость эквивалентного момента от габарита  $b$  изделия

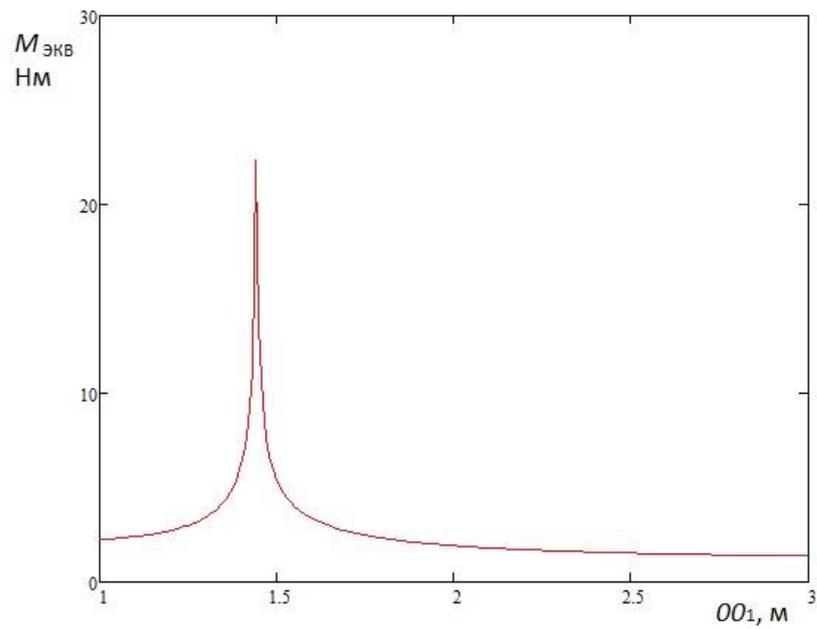


Рисунок 6.3 – Зависимость эквивалентного момента от длины тракта намотки  $OO_1$  изделия

Предлагаемая методика была использована при модернизации электропривода намоточного станка модели СНП – 36, разработанного Коломенским ООО “Механик”, используемого при намотке крупногабаритных корпусов с высокими требованиями к условиям эксплуатации намотанных изделий [196].

### ***6.1.2 Исследование влияния процесса намотки на работу натяжных устройств при “мокрой” намотке***

Рассмотрим натяжное устройство, которое предназначено для работы в намоточных станках, изготавливающих изделия с повышенными требованиями к прочности конструкций. На намоточном станке РПН-Н-500, выпущенном ООО “НПП ВИУС” наматываются баллоны диаметром 0,2 м со сферическими днищами [52] (изделия “Кокон”). С помощью системы автоматизированного программирования намоточных станков (САПНС) [52,53,102], разработанной ООО "НПП ВИУС", рассчитан угол поворота исполнительного механизма в процессе намотки изделия (рисунок 6.4).

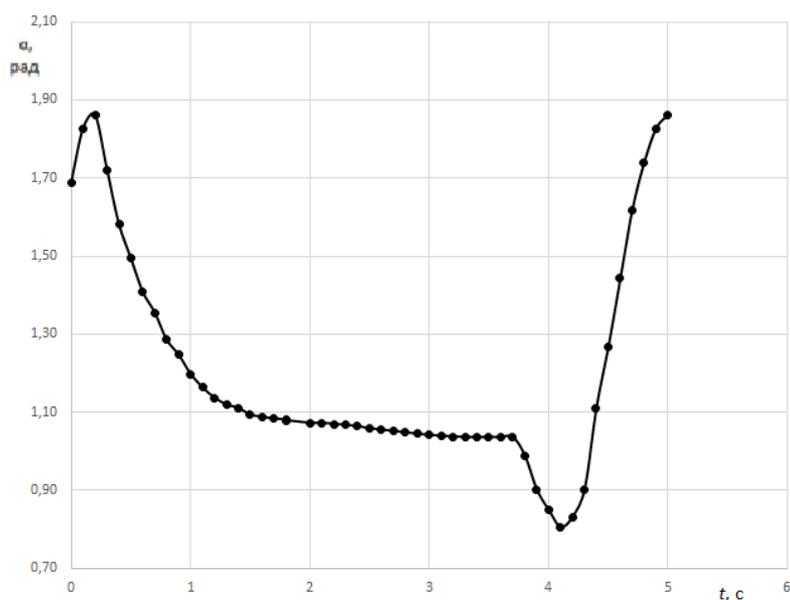


Рисунок 6.4 – График зависимости угла поворота натяжителя при намотке изделия

Из приведенного графика определим требуемое значения передаточного отношения редуктора. За 5 с исполнительный механизм должен перейти из одного крайнего положения в другое. Полагаем, что двигатель имеет номинальную частоту вращения 3000 об/мин. Поэтому из (3.78) имеем:

$$k_{6,m} \leq \frac{\Omega_{д\max} \cdot T_{НУ}}{\Delta\alpha_{\max}} = \frac{418,7 \cdot 5}{4} = 523,3.$$

Примем  $k_{6,m} = 40$ .

Следует отметить, что при создании натяжных устройств традиционно используются самотормозящиеся червячные редукторы. Особенностью работы данных механизмов являются невозможность вращения приводного двигателя за счет усилий, создаваемых лентой при прохождении направляющих тракта натяжного устройства, и очень низкий КПД передаточного механизма, порядка (45–50) % [175,176]. Данное техническое решение объяснялось отсутствием до настоящего времени надежных электродвигателей, которые могли бы стоять длительное время (часы) под нагрузкой без перегрева. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность использования в натяжных устройствах обычных планетарных редукторов с КПД (85–95) % и синхронных двигателей с постоянными магнитами.

Из (3.81) найдем максимальное значение усилия  $M_C$ , которое необходимо прикладывать со стороны приводного устройства при  $M_{ТР} = 1$  Нм (при использовании червячного самотормозящегося редуктора) и  $M_{ТР} = 0,1$  Нм (при использовании планетарного редуктора):

$$M_{C\max} = \frac{[300 + 100 \cdot e^{\frac{\arccos(-\frac{2 \cdot 0,03}{0,25}) - 0,14}{2}} \cdot \frac{0,03}{0,25}] \cdot (0,25 + 0,03)}{40} + 1 = 3,33 \text{ Нм},$$

$$M_{C\max} = \frac{[300 + 100 \cdot e^{\frac{\arccos(-\frac{2 \cdot 0,03}{0,25}) - 0,14}{2}} \cdot \frac{0,03}{0,25}] \cdot (0,25 + 0,03)}{40} + 0,1 = 2,43 \text{ Нм}$$

В соответствии с полученными данными предварительно выбираем:

- для случая использования червячного редуктора синхронный электродвигатель 1FT6 1,7 кВт, 3,9 А, 3,6 Нм, 4500 об/мин, с моментом инерции ротора 0,00085 кгм<sup>2</sup> фирмы Siemens [195] (при расчетах учтем, что  $J_1 = 1,1 \cdot J_{\text{д}} = 0,00094$  кгм<sup>2</sup>);

- для случая использования планетарного редуктора синхронный электродвигатель 1FT6 1,4 кВт, 3,4 А, 2,9 Нм, 4500 об/мин, с моментом инерции ротора 0,0006 кгм<sup>2</sup> фирмы Siemens (при расчетах учтем, что  $J_1 = 1,1 \cdot J_{\text{д}} = 0,00066$  кгм<sup>2</sup>).

Для заданного изменения в процессе намотки угла поворота натяжного устройства, изображенного на рисунке 6.4, рассчитаем статический  $M_C$  момент на валу двигателя при намотке одного витка изделия. При расчетах принимаем  $M_{\text{ТР}}$  равным 1 Нм и 0,1 Нм соответственно. Графики моментов приведены на рисунке 6.5.

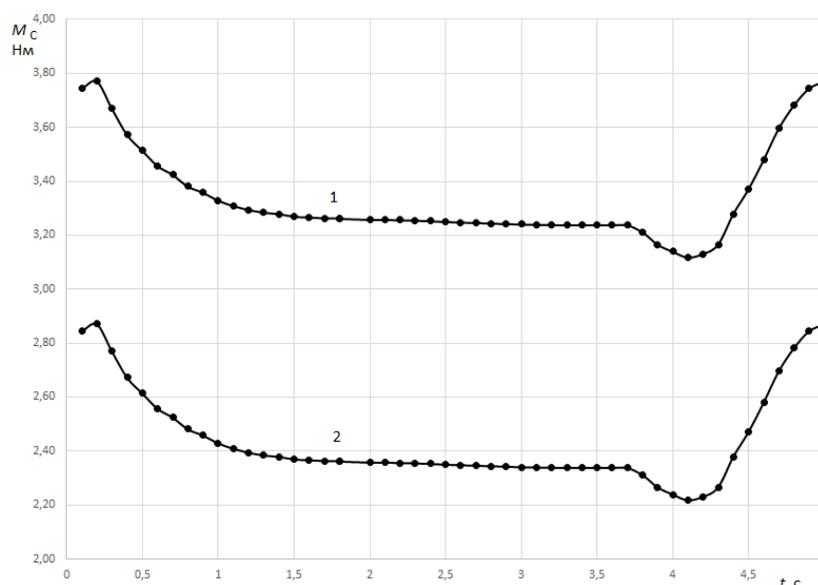


Рисунок 6.5 – Графики зависимости  $M_C$  при намотке одного витка изделия

1 – с червячным редуктором; 2 – с планетарным редуктором

На рисунке 6.6 показана зависимость динамического момента привода при намотке одного витка изделия при использовании червячного и планетарного редукторов.

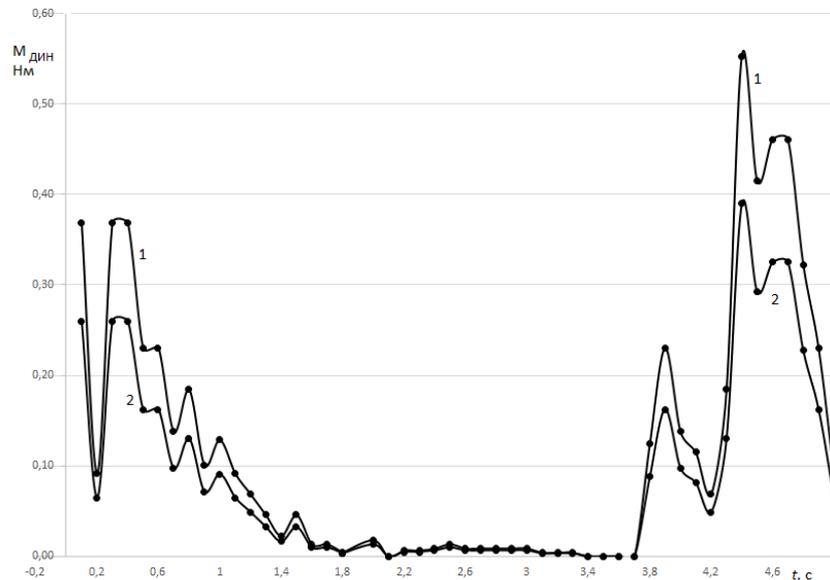


Рисунок 6.6 – Зависимость динамического момента привода при намотке одного витка изделия  
1 – с червячным редуктором; 2 – с планетарным редуктором

Значение эквивалентного момента, посчитанного с использованием выражений (3.94), (3.95), равно:

- при использовании червячного редуктора 3,53 Нм;
- при использовании планетарного редуктора 2,58 Нм.

Полученные значения эквивалентного момента меньше номинальных моментов двигателей. Поэтому данные двигатели выбраны правильно. Отметим, что величина динамического момента при намотке изделия существенно ниже величины статического момента привода.

На рисунке 6.7 показана зависимость эквивалентного момента двигателя от момента инерции привода при использовании червячного редуктора.

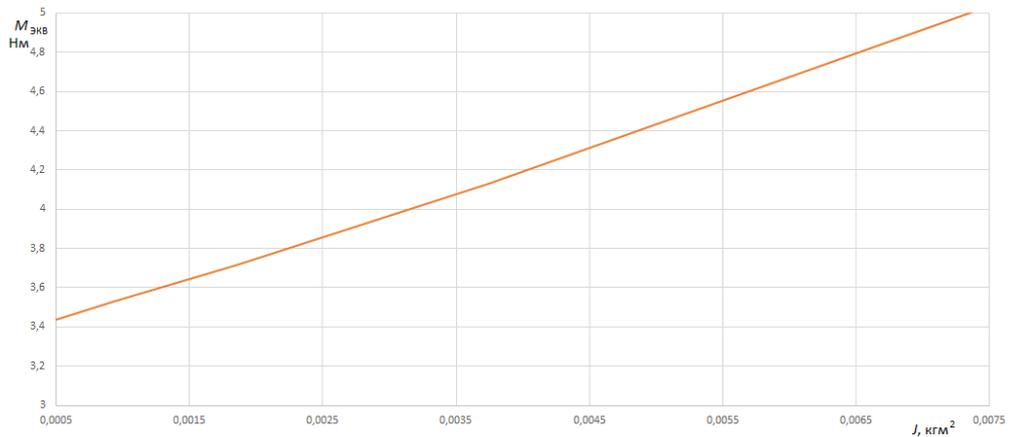


Рисунок 6.7 – График зависимости эквивалентного момента от момента инерции привода

Из приведенного графика видно, при увеличении момента инерции эквивалентный момент возрастает, так при  $J_1 = 0,0065$  кгм<sup>2</sup>  $M_{\text{ЭКВ}}$  становится равным 4,8 Нм, таким образом, при увеличении  $J_1$  в 6,9 раза эквивалентный момент увеличился в 1,6 раза.

На рисунке 6.8 показан намоточный станок модели СНП – 36, Коломенского завода ООО “Механик”. Станок используется для намотки крупногабаритных корпусов с высокими требованиями к условиям эксплуатации изделий [196].



Рисунок 6.8 – Намоточный станок СНП-36

Данный станок содержит два тракта намотки - “сухой” и “мокрый”. В станке используется натяжное устройство с линейным перемещением и дополнительным пневматическим приводом (см. рисунки 3.35, 3.36). Передаточное отношение червячного самотормозящегося редуктора  $k_{бм} = 40$ . Максимальное создаваемое натяжение  $S_1$  равно 3000 Н, а  $S_0$  – 1500 Н. Так как максимальный момент на валу двигателя возникает при нулевом положении роликов натяжного устройства  $x = 0$ , то из (8) получим  $\alpha/2 = 1,16$  рад. Данное натяжное устройство имеет следующие параметры:  $y_1 = 0,15$  м,  $r = 30$  мм,  $r_{ш} = 40$  мм. Используя выражения (3.35, 3.36) найдем максимальное значение  $M_C$ , которое равно 5,8 Нм при  $M_{тр} = 1$  Нм. Для данного случая выбран синхронный электродвигатель 1FK7042 со следующими параметрами: номинальная мощность 0,82 кВт, номинальный ток 1,95 А, номинальный момент 2,6 Нм, номинальная частота вращения 3000 об/мин. Рассчитаем момент, который должен создаваться пневматической системой. Пневматическая система начнет “помогать” двигателю, если его момент превысит номинальное значение. Разность между моментом  $M_C$  и

номинальным моментом двигателя составляет  $M_{ПЦ} = 3,2$  Нм. Усилие, которое должны создавать пневматические приводы, равно:  $F_{ПЦ} = M_{ПЦ} \cdot k_{6M} / r_{Ш} = 3,2 \cdot 40 / 0,04 = 3200$  Н. Графики изменения натяжения “мокрой” композиционной ленты, момента на валу двигателя и сигналы управления клапанами пневматической системы показаны на рисунке 6.9 [197,198].

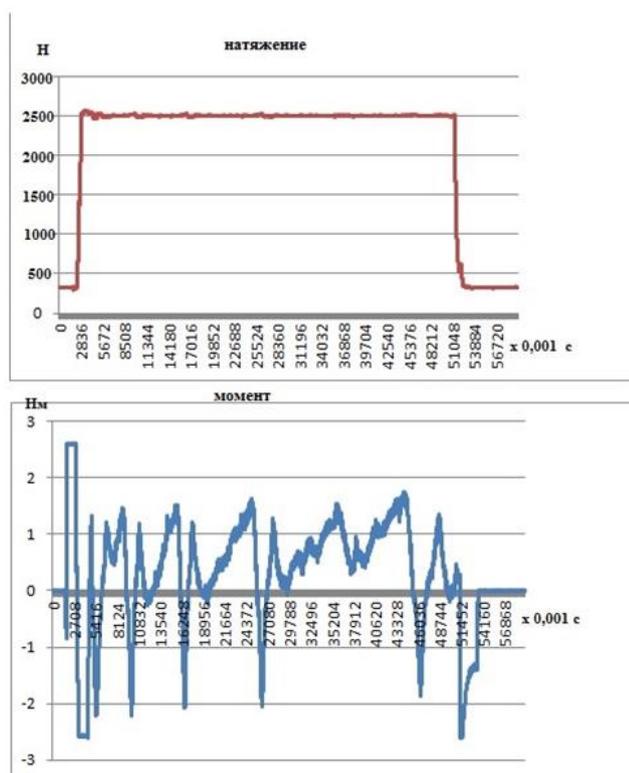


Рисунок 6.9 – Результаты испытаний электропривода механизма намотки

Клапаны пневмоцилиндров открываются при подаче на них сигнала амплитудой  $\pm 1$ . На графиках изображен процесс изменения натяжения с 300 Н до 2500 Н, поддержания заданного натяжения (2500 Н) в процессе намотки, уменьшения натяжения до 300 Н после завершения намотки. При достижении момента двигателя 2,6 Нм в работу включается пневматическая система, которая “помогает” двигателю.

## 6.2 Исследования регуляторов электротехнических систем регулирования натяжения при намотке изделий «Цилиндр»

### 6.2.1 Исследования регуляторов электротехнических систем натяжения при намотке изделий «Цилиндр» из «сухой» композиционной ленты

Исследуем ЭТС натяжения композиционной ленты при намотке изделий «Цилиндр».

В качестве приводного устройства используется ферропорошковый тормоз. Момент на валу тормоза равен:

$$M_{\text{Cl}} = \frac{r_1 \cdot \eta_1}{i_1} (S_1 - S_0) = \frac{0,08 \cdot 0,9}{6} (3000 - 200) = 33,6 \text{ Нм}, \quad (6.1)$$

где  $r_1 = 0,08$  м – радиус тормозного ролика;  $i_1 = 6$  – передаточное отношение редуктора, расположенного между тормозным роликом и ферропорошковым тормозом;  $\eta_1 = 0,9$  - КПД.

Здесь учтено, что максимальное натяжение, с которым наматываются изделия на станке, может достигать 3000 Н, а минимальное натяжение, с которым лента сходит с бобины, составляет 200 Н.

Выбираем ферропорошковый тормоз фирмы Warner Electric BR35 [199] с номинальным моментом на валу 35 Нм. Для данного тормоза имеем:  $R_M = 20$  Ом;  $T_{II} = T_{\mu} = 0,001$  с;  $k_{II} = 2,4$  В/В;  $k_M = 39$  Нм/А,  $T_M = 0,01$  с;  $k_{\text{ост}} = 10$  В/А;  $k_{\text{осс}} = 0,03$  Вc/рад;  $k_{\text{осс}} = 0,003$  В/Н;  $J_1 = 0,001$  кг·м<sup>2</sup>;  $R_M$  и  $T_M$  - соответственно сопротивление обмотки ферропорошкового тормоза и ее постоянная времени.

При намотке изделий «Цилиндр» диаметр изделия изменяется незначительно (см. рисунок 1.11 а). Из рассмотренных в главе 4 структурных схем, описывающих системы регулирования натяжения при «сухой» намотке,

выбираем трехконтурную систему с внутренними контурами тока и скорости [200-202]. Ей соответствует структурная схема, изображенная на рисунке 6.10.

Здесь (см. рисунок 6.10) введены следующие обозначения:

$$k_7 = \frac{r_1 \cdot \eta_1}{i_1} = \frac{0,08 \cdot 0,9}{6} = 0,012 \text{ Нм/А}; \quad \frac{r_1}{i_1} = \frac{0,08}{6} = 0,0133 \text{ м.}$$

В соответствии с (4.1), (4.2) запишем передаточную функцию регуляторов тока и скорости при настройке контуров на модульный оптимум:

$$W_{PT}(p) = \frac{(T_M p + 1)}{p \cdot 2T_\mu \cdot k_\Pi \cdot k_{OCT} / R_M} = \frac{(0,01p + 1)}{0,0024 \cdot p};$$

$$W_{PC}(p) = \frac{k_{OCT} \cdot J_1}{4 \cdot T_\mu \cdot k_{OCC} \cdot k_M} = 2,12.$$

Как отмечалось в главе 4, регулятор скорости выбран пропорциональным, так как требования к внутреннему контуру скорости по статизму невысокие.

Преобразованная структурная схема системы регулирования натяжения с учетом того, что внутренний контур тока и скорости можно заменить апериодическим звеном первого порядка [49-51,54,57-59,108-112,136-140], изображена на рисунке 4.19.

Передаточная функция регулятора натяжения (см. (4.3)), настроенного на модульный оптимум, запишется в виде:

$$W_{PS}(p) = \frac{T_1 p + 1}{p \cdot 8T_\mu \cdot T_1 \cdot k_1 \cdot k_7 \cdot k_{OCS} / k_{OCC}} = \frac{(1,54 \cdot p + 1)}{31,1 \cdot p}. \quad (6.2)$$

Здесь учтено, что  $k_{OCS} = 0,033 \text{ В/Н}$ ,  $k_{OCC} = 0,0033 \text{ Вс/рад}$ .

Результаты моделирования системы регулирования натяжения приведены на рисунке 6.11. Моделирование проведено при  $k_1 = 196153$ ,  $T_1 = 1,54 \text{ с}$ . В момент времени 0,04 с подается возмущающее воздействие в виде изменения на 200 Н предварительного натяжения  $S_0$ .



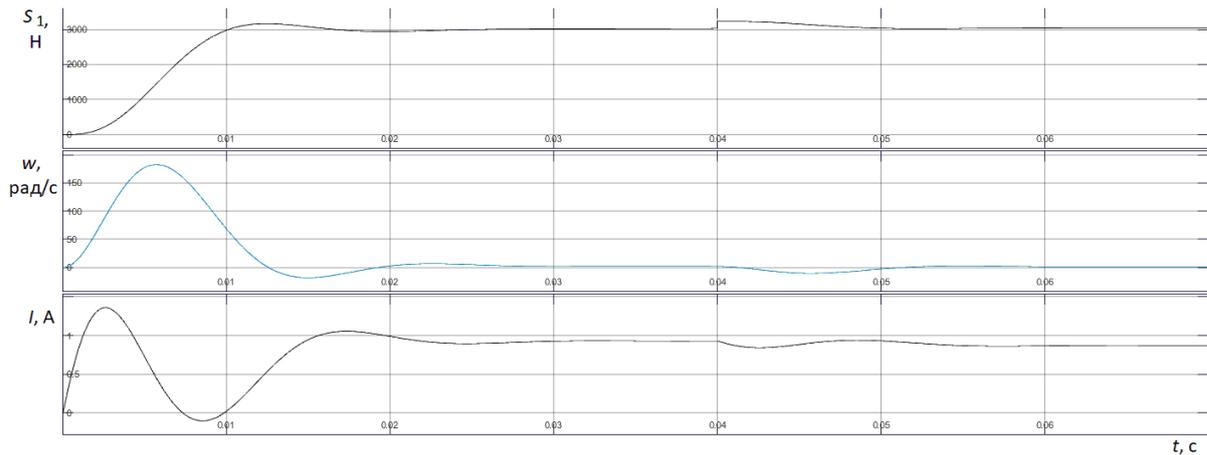


Рисунок 6.11 – Результаты моделирования электротехнической системы регулирования натяжения

Из полученных результатов видно, что система переходит из одного состояния в другое за 0,01 с при перерегулировании 5 %. Время отработки возмущающего воздействия не превышает 0,08 с.

### **6.2.2 Синтез регуляторов электротехнической системы натяжения при намотке изделий “Цилиндр” из “мокрой” композиционной ленты**

Исследуем систему регулирования натяжения “мокрой” композиционной ленты при намотке изделий “Цилиндр”.

Для случая использования червячного редуктора в разделе 3.2.3 выбран синхронный электродвигатель 1FT6 1,7 кВт, 3,9 А, 3,6 Нм, 4500 об/мин, с моментом инерции ротора 0,00085 кгм<sup>2</sup> фирмы Siemens (при расчетах берём  $J_1 = 1,1 \cdot J_d = 0,00094$  кгм<sup>2</sup>) [195]. Здесь учтено, что максимальное натяжение, с которым наматываются изделия на станке, может достигать 3000 Н.

При намотке изделий “Цилиндр” диаметр изделия изменяется незначительно (см. рисунок 1.11 а). Из рассмотренных в главе 4 структурных схем, описывающих системы регулирования натяжения при “мокрой” намотке, следует выбрать четырехконтурную систему с внутренними контурами тока, скорости вращения привода и положения исполнительного

механизма [197,198]. Ей соответствует структурная схема, изображенная на рисунке 6.12.

Передаточные функции регуляторов тока, скорости и положения исполнительного механизма в соответствии с выражениями (4.4) – (4.7) при настройке контуров на модульный оптимум запишутся в виде:

$$W_{PT}(p) = \frac{(T_M p + 1)}{p \cdot 2T_\mu \cdot k_{II} \cdot k_{OCT} / R_M} = \frac{(0,01p + 1)}{0,0024 \cdot p};$$

$$W_{PC}(p) = \frac{k_{OCT} \cdot J_1}{4 \cdot T_\mu \cdot k_{OCC} \cdot k_M} = 29,38;$$

$$W_{PI}(p) = \frac{k_{OCC} \cdot k_{6M}}{8 \cdot T_\mu \cdot k_{OCP}} = 2.$$

Регуляторы скорости и положения выбраны пропорциональными, так как требования к внутреннему контуру скорости по статизму невысокие.

Преобразованная структурная схема с учетом того, что внутренние контуры тока и скорости можно заменить апериодическим звеном первого порядка [49-51,54,57-59,108-112,136-140], изображена на рисунке 4.37.

С учетом этого, запишем передаточную функцию регулятора натяжения (4.7), настроенного на модульный оптимум:

$$W_{PS}(p) = \frac{T_{1M} p + 1}{16T_\mu \cdot T_{1M} \cdot k_{1M} \cdot k_{5M} \cdot k_{OCS} / k_{OCC}} = \frac{(0,48 \cdot p + 1)}{0,0227}. \quad (6.3)$$

Здесь учтено, что  $k_{OCS} = 0,033$  В/Н,  $k_{OCC} = 0,02$  Вс/м.

Результаты моделирования системы регулирования натяжения приведены на рисунке 6.13. Моделирование проведено при  $k_1 = 39492$ ,  $T_{1M} = 0,48$  с. Предварительное натяжение  $S_0$  равно 100 Н.

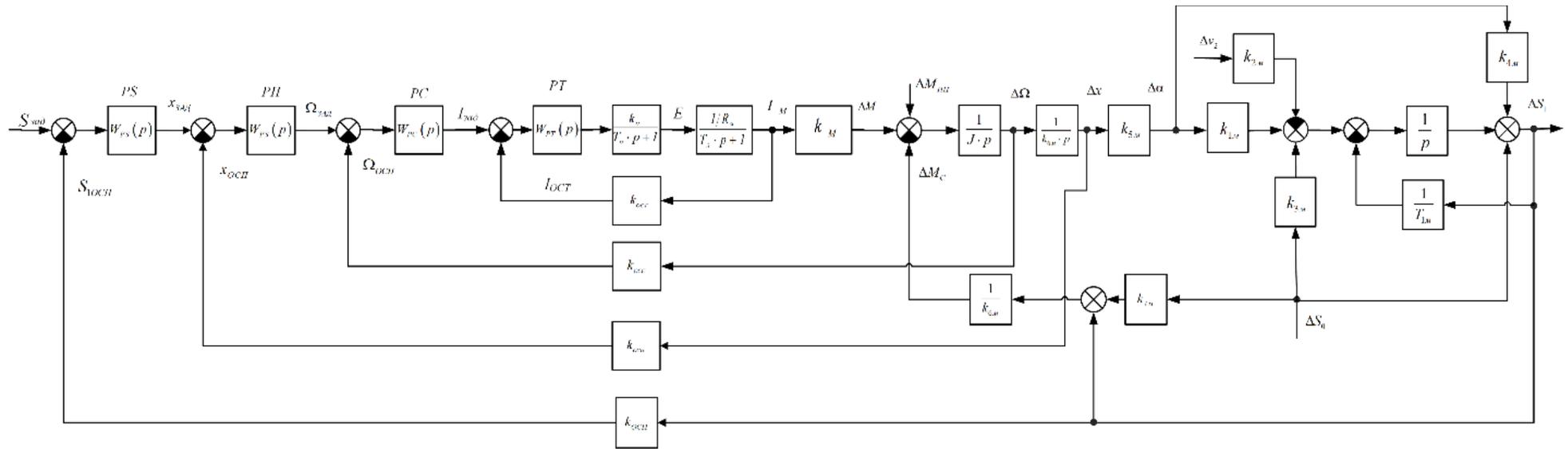


Рисунок 6.12 – Структурная схема четырехконтурной электротехнической системы регулирования натяжения при намотке изделий “мокрой” лентой

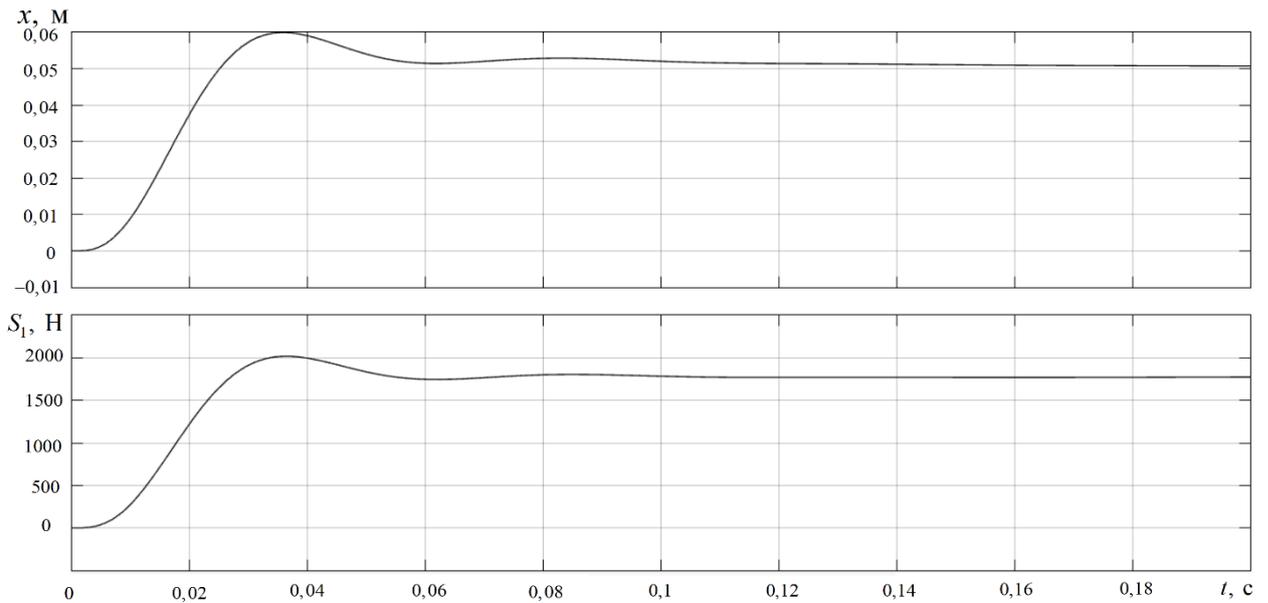


Рисунок 6.13 – Результаты моделирования электротехнической системы регулирования натяжения

Из полученных результатов видно, что система переходит из одного состояния в другое за 0,05 с при перерегулировании 10 %.

### **6.3 Синтез электротехнических систем регулирования натяжения при намотке изделий с медленно меняющимися параметрами**

#### ***6.3.1 Синтез электротехнической системы регулирования натяжения намотки изделий из “сухой” ленты с медленно меняющимися параметрами***

По предлагаемой методике исследуем ЭТС натяжения композиционной ленты при намотке изделий “Конус”, относящихся ко второму классу изделий.

Как и в разделе 5.2.1, в качестве приводного устройства используется ферропорошковый тормоз фирмы Warner Electric BR35 [199]. Исходные данные по тормозному устройству приведены в разделе 5.2.1.

При намотке изделий “Конус” диаметр изделия изменяется значительно (см. рисунок 1.11 *b*) до трех раз и более за один проход. Из рассмотренных в

главе 4 структурных схем, описывающих системы регулирования натяжения при “сухой” намотке, выберем трехконтурную систему с внутренними контурами тока и скорости [200-202].

Преобразуем данную структурную схему с учетом того, что внутренние контуры тока и скорости можно заменить апериодическим звеном первого порядка [49-51,54,57-59,108-112,136-140]. При преобразовании учтем, что передаточная функция регулятора натяжения  $PS$  принимается в виде  $W_{PS}(p) = k_{PS}/p$ . Дополнительно в цепь обратной связи включается корректирующее звено с передаточной функцией  $W_{RP}(p) = 1 + \tau_1 p + \tau_2 p^2$ . Преобразованная структурная схема изображена на рисунке 6.14.

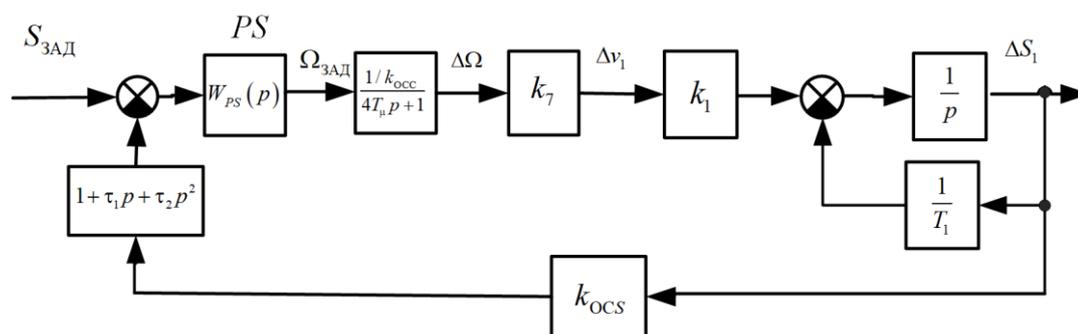


Рисунок 6.14 – Преобразованная структурная схема электротехнической трехконтурной системы регулирования натяжения при намотке изделий “сухой” лентой

В связи с тем, что регулятор представляет из себя интегральное звено, структурную схему целесообразно преобразовать к виду, изображенному на рисунке 6.15.

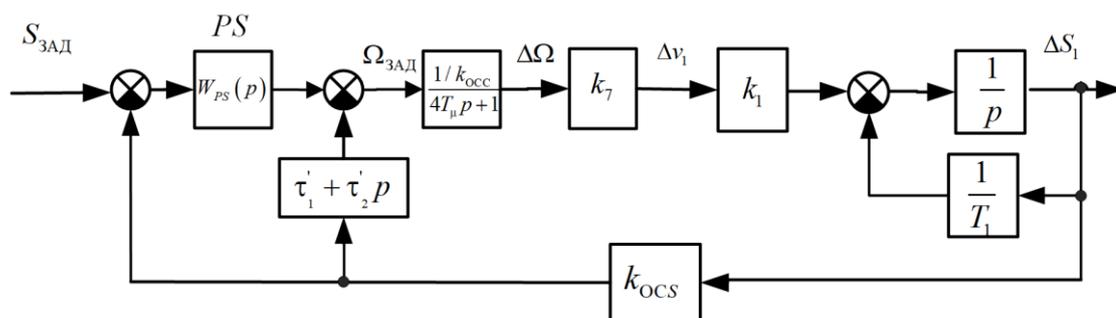


Рисунок 6.15 – Преобразованная структурная схема трехконтурной электротехнической системы регулирования натяжения при намотке изделий “сухой” лентой

Здесь  $\tau'_1 = \tau_1 \cdot k_{PS}$ ;  $\tau'_2 = \tau_2 \cdot k_{PS}$ .

Характеристическое уравнение замкнутой преобразованной системы имеет вид:

$$p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (6.4)$$

$$\text{где: } a_2 = \frac{4T_\mu + T_1}{4T_\mu \cdot T_1}; \quad a_1 = \frac{1}{4T_\mu \cdot T_1}; \quad a_0 = \frac{k_\Sigma \cdot k_{OCS}}{4T_\mu}; \quad k_\Sigma = \frac{k_1 \cdot k_7 \cdot k_{PS}}{k_{OCC}}.$$

Выражение (6.4) получено без учета корректирующего звена ( $\tau'_1 = \tau'_2 = 0$ ).

В дальнейшем рассчитаем регуляторы при “средних” значениях параметров объекта регулирования ( $S_1=400$  Н;  $S_0=200$  Н;  $v_2=v_1=0,05$  м/с;  $l_1=1,5$  м), получим:

$$a_2 = \frac{4 \cdot 0,001 + 28,8}{4 \cdot 0,001 \cdot 28,8} = 250,0; \quad a_1 = \frac{1}{4 \cdot 0,001 \cdot 28,8} = 8,68;$$

$$a_0 = \frac{196153 \cdot 0,0133 \cdot 0,003 \cdot k_{PS}}{4 \cdot 0,001 \cdot 0,4} = 4891,5 \cdot k_{PS}; \quad \Delta a_2 = \frac{(250,7 - 250,05)}{250,7} = 0,00259;$$

$$\Delta a_1 = \frac{(166,7 - 8,68)}{166,7} = 0,948; \quad \Delta a_0 = \frac{(4891,5 - 689,0) \cdot k_{PS}}{4891,5} = 0,86 \cdot k_{PS}, \quad \Delta a_2 \text{ изменяется}$$

незначительно, на 0,26 %;  $\Delta a_1$  изменяется на 94,8 %;  $\Delta a_0$  изменяется на 86 %.

Произведем расчет регулятора натяжения по предлагаемой методике:

- номер  $N_J$  нормированного уравнения – 29;

- для уравнения 29 имеем:  $A_1 = A_2 = 11$ ,  $\tau_H = 11$ .

Рассчитаем  $k_{PS}$  при  $t_\delta = 0,4$  с:

$$k_{PS} = \frac{(\frac{\tau_H}{t_\delta})^3}{a_0} = \frac{(\frac{11}{0,4})^3}{4892,7} = 4,25.$$

Определим  $\tau_1$  и  $\tau_2^2$ :

$$\tau_1 = \frac{A_1(\frac{\tau_H}{t_\delta})^2 - a_1}{(\frac{\tau_H}{t_\delta})^3} = \frac{11 \cdot (\frac{11}{0,4})^2 - 8,68}{(\frac{11}{0,4})^3} = 0,4 \text{ с};$$

$$\tau_2^2 = \frac{A_2(\frac{\tau_H}{t_\delta}) - a_2}{(\frac{\tau_H}{t_\delta})^3} = \frac{11 \cdot (\frac{11}{0,4}) - 250}{(\frac{11}{0,4})^3} = 0,0025 \text{ с}^2;$$

$$\tau_1' = 0,4 \cdot 4,25 = 1,7 \text{ с};$$

$$\tau_2'^2 = 0,0025 \cdot 4,25 = 0,01 \text{ с}^2.$$

Определим дополнительные движения в системе, вызванные изменением параметров объекта регулирования:

$$\delta\Theta_y = \frac{a_1(\Delta a_1 - \Delta k) - a_2\Delta k}{\tau_H^2 A_1} t_\delta^2 = \frac{8,68 \cdot (0,948 - 0,86) - 250 \cdot 0,86}{11^2 \cdot 11} \cdot 0,4^2 = -0,0258;$$

$$\begin{aligned} \delta C = & \frac{2A_1A_2 - 1}{A_1A_2 - 1} \Delta k + \frac{A_2a_1(\Delta a_1 - \Delta k)}{(A_1A_2 - 1)\tau_H^2} t_\delta^2 + \frac{A_1a_2(\Delta a_2 - \Delta k)}{(A_1A_2 - 1)\tau_H} t_\delta = \frac{2 \cdot 11 \cdot 11 - 1}{11 \cdot 11 - 1} \cdot 0,86 + \\ & + \frac{11 \cdot 8,68 \cdot (0,948 - 0,86)}{(11 \cdot 11 - 1) \cdot 11^2} \cdot 0,4^2 + \frac{11 \cdot 250 \cdot (0,00259 - 0,86)}{(11 \cdot 11 - 1) \cdot 11} \cdot 0,4 = 1,02; \end{aligned}$$

$$\|\Delta S_1(t)\|_{L_2} = 4,97 \text{ Н.}$$

Моделирование показало, что изменение параметров объекта регулирования не влияет на показатели качества ЭТС. Время переходного процесса составляет 0,4 с при изменении параметров объекта регулирования. График переходного процесса показан на рисунке 6.16.

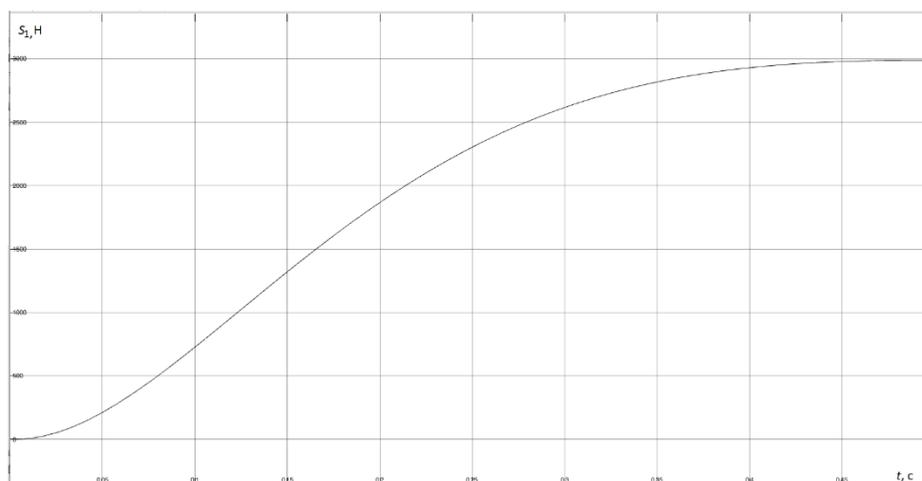


Рисунок 6.16 – График переходного процесса в системе регулирования натяжения при намотке изделий “Конус”

### ***6.3.2 Синтез электротехнической системы регулирования натяжения намотки изделий из “мокрой” ленты с медленно меняющимися параметрами***

По предлагаемой методике рассчитаем системы регулирования натяжения композиционной ленты при намотке изделий “Конус”, относящихся ко второму классу изделий.

Как и в разделе 6.5.1, в качестве приводного устройства используется синхронный электродвигатель 1FT6 1,7 кВт, 3,9 А, 3,6 Нм, 4500 об/мин, с моментом инерции ротора 0,00085 кгм<sup>2</sup> фирмы Siemens (при расчетах берём  $J_1 = 1,1 \cdot J_D = 0,00094$  кгм<sup>2</sup>) [195]. Здесь учтено, что максимальное натяжение, с которым наматываются изделия на станке, может достигать 3000 Н.

При намотке изделий “Конус” диаметр изделия изменяется значительно (см. рисунок 1.11 *b*), до трех раз и более за один проход. Из рассмотренных в главе 4 структурных схем, описывающих системы регулирования натяжения при “мокрой” намотке, следует выбрать четырехконтурную систему с внутренними контурами тока, скорости вращения двигателя и положения

исполнительного механизма, изображенную на рисунке 4.33. Ей соответствует структурная схема, изображенная на рисунке 5.5.

Преобразуем данную структурную схему с учетом того, что внутренние контуры тока, скорости и положения можно заменить апериодическим звеном первого порядка. При преобразовании учтем, что передаточная функция регулятора натяжения  $PS$  равна  $W_{PS}(p) = k_{PS}/p$ . Дополнительно в цепь обратной связи включается корректирующее звено с передаточной функцией  $W_{RP}(p) = 1 + \tau_1 p + \tau_2^2 p^2$ . Преобразованная структурная схема изображена на рисунке 6.17. Здесь учтено, что  $T_\mu = T_{II}$ .

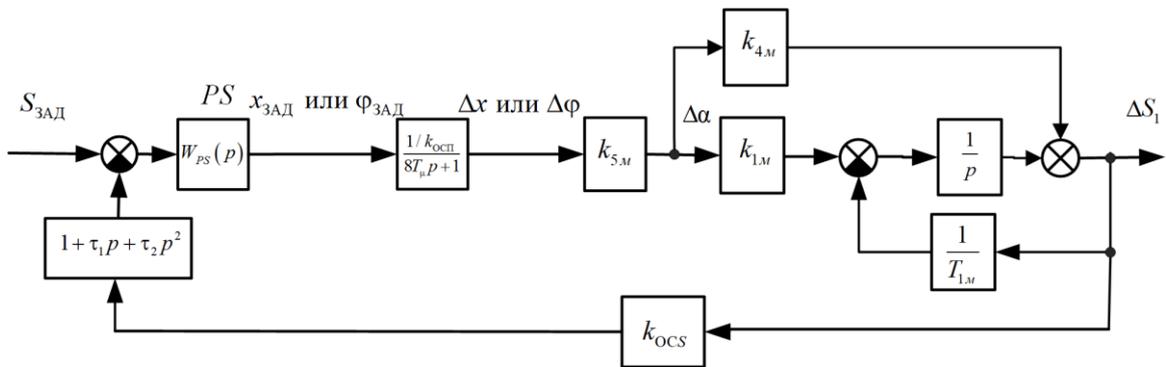


Рисунок 6.17 – Преобразованная структурная схема трехконтурной электротехнической системы регулирования натяжения при намотке изделий “мокрой” лентой

В связи с тем, что регулятор представляет из себя интегральное звено, структурную схему целесообразно преобразовать к виду, изображенному на рисунке 6.18.

$$\text{Здесь } \tau_1' = \tau_1 \cdot k_{PS}; \quad \tau_2'^2 = \tau_2^2 \cdot k_{PS}.$$

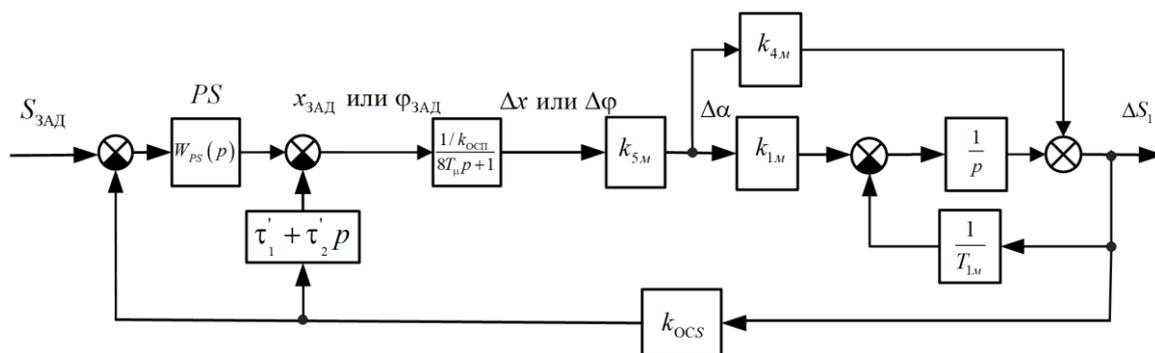


Рисунок 6.18 – Преобразованная структурная схема трехконтурной электротехнической системы регулирования натяжения при намотке изделий “мокрой” лентой

Характеристическое уравнение замкнутой преобразованной системы имеет вид:

$$p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (6.5)$$

$$\text{где: } a_2 = \frac{4T_\mu + T_{1M}}{4T_\mu \cdot T_{1M}}; \quad a_1 = \frac{1}{4T_\mu \cdot T_{1M}} (1 + T_{1M} \cdot k_\Sigma \cdot k_{4M}); \quad a_0 = \frac{k_\Sigma \cdot k_{1M}}{4T_\mu}; \quad k_\Sigma = \frac{k_{5M} \cdot k_{PS} \cdot k_{OCS}}{k_{OCS}}.$$

Выражение (6.5) получено без учета корректирующего звена ( $\tau'_1 = \tau'^2_2 = 0$ ).

В дальнейшем рассчитаем регуляторы при “средних” значениях параметров объекта регулирования ( $S_1=661,6$  Н;  $S_0=500$  Н;  $v_2 = v_1 = 0,3$  м/с;  $\alpha=2$  рад), получим:

$$k_{1M} = 349882,5; \quad k_{3M} = 15,0; \quad k_{4M} = 5080,78; \quad T_{1M} = 0,15 \text{ с.}$$

Рассчитаем коэффициенты  $a_i$  и диапазон их изменений:

$$a_2 = \frac{4 \cdot 0,001 + 0,15}{4 \cdot 0,001 \cdot 0,15} = 256,7; \quad a_1 = \frac{(1 + 0,15 \cdot 0,1 \cdot k_{PS} \cdot 5080,78)}{4 \cdot 0,001 \cdot 0,15} = (1666,7 + 1,27 \cdot 10^5 \cdot k_{PS});$$

$$a_0 = \frac{0,1 \cdot 349882,5 \cdot k_{PS}}{4 \cdot 0,001} = 8,7 \cdot 10^6 \cdot k_{PS}; \quad k_\Sigma = \frac{13,3 \cdot 0,003}{0,4} \cdot k_{PS} = 0,1 \cdot k_{PS}; \quad \Delta a_2 = (256,8 \div 250,7);$$

$\Delta a_0 = (125,2 \div 5530) k_{PS}$ ,  $\Delta a_2$  изменяется незначительно, на 0,2 %;  $\Delta a_0$  изменяется в 44 раза.

Контуров тока и скорости настроим по стандартным методикам на модульный оптимум.

Произведем расчет регулятора натяжения по предлагаемой методике, получим:

- номер  $N_J$  нормированного уравнения – 29;
- для уравнения 29 имеем:  $A_1 = A_2 = 11$ ,  $\tau_H = 11$ ;
- $t_\delta = 0,4$  с;
- $a_0 = \left(\frac{\tau_H}{t_\delta}\right)^3 = 2,08 \cdot 10^4$ ;
- находим  $k_{PS}$ :  $k_{PS} = \frac{2,08 \cdot 10^4}{8,7 \cdot 10^6} = 0,0024$ ;
- находим  $a_1$ :  $a_1 = 2,0 \cdot 10^3$ ;
- находим  $\tau_1$  и  $\tau_2$ :

$$\tau_2^2 = \frac{A_2 \cdot \left(\frac{\tau_H}{t_\delta}\right) - a_2}{a_0} = \frac{11 \cdot 27,5 - 256,7}{2,08 \cdot 10^4} = 0,0022 \text{ с}^2,$$

$$\tau_1 = \frac{A_1 \cdot \left(\frac{\tau_H}{t_\delta}\right)^2 - a_1}{a_0} = \frac{11 \cdot (27,5)^2 - 2,0 \cdot 10^3}{2,08 \cdot 10^4} = 0,30 \text{ с},$$

$$\tau_2'^2 = 0,0022 \cdot 0,0024 = 0,53 \cdot 10^{-5} \text{ с}^2,$$

$$\tau_1' = 0,3 \cdot 0,0024 = 0,72 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\delta\Theta_y = \frac{a_1(\Delta a_1 - \Delta k) - a_2 \Delta k}{\tau_H^2 A_1} t_\delta^2 = \frac{2,0 \cdot 10^3 \cdot (0,675 - 0,962) - 256,7 \cdot 0,962}{11^2 \cdot 11} \cdot 0,4^2 = -0,099;$$

$$\begin{aligned} \delta C = & \frac{2A_1 A_2 - 1}{A_1 A_2 - 1} \Delta k + \frac{A_2 a_1 (\Delta a_1 - \Delta k)}{(A_1 A_2 - 1) \tau_H^2} t_\delta^2 + \frac{A_1 a_2 (\Delta a_2 - \Delta k)}{(A_1 A_2 - 1) \tau_H} t_\delta = \frac{2 \cdot 11 \cdot 11 - 1}{11 \cdot 11 - 1} \cdot 0,962 + \\ & + \frac{11 \cdot 2,0 \cdot 10^3 \cdot (0,675 - 0,962)}{(11 \cdot 11 - 1) \cdot 11^2} \cdot 0,4^2 + \frac{11 \cdot 256,7 \cdot (0,023 - 0,962)}{(11 \cdot 11 - 1) \cdot 11} \cdot 0,4 = 1,06; \end{aligned}$$

$$\|\Delta S_1(t)\|_{L_2} = 4,97 \text{ Н}; t_1 = 0,25 \text{ с}.$$

Моделирование показало, что изменение параметров объекта управления не влияет на показатели качества ЭТС. Время переходного процесса составляет 0,4 с. при изменении параметров объекта регулирования. График переходного процесса показан на рисунке 6.19.

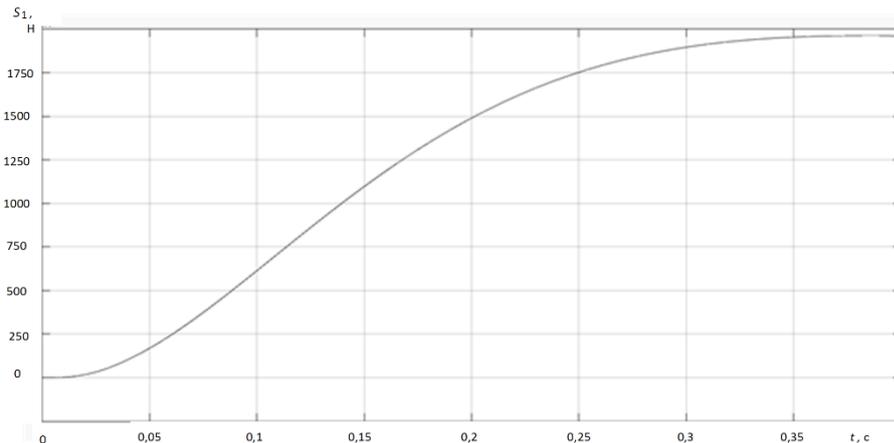


Рисунок 6.19 – График переходного процесса в системе регулирования натяжения при намотке изделий «Цилиндр»

## 6.4 Синтез адаптивных регуляторов электротехнических систем

### 6.4.1 Синтез адаптивных регуляторов электротехнической системы натяжения при «мокрой» намотке

Произведем дальнейшее исследование объекта управления. При этом учтем, что в реальных условиях намотки изменяются угол охвата лентой натяжных роликов, натяжение, с которым наматываемый материал поступает на натяжное устройство, скорость намотки и коэффициент трения «мокрого» композиционного материала по направляющим тракта станка:

$$\alpha^* = \text{от } 2 \text{ до } 6 \text{ рад}; S_0^* = \text{от } 100 \text{ до } 500 \text{ Н};$$

$$v_2^* = \text{от } 0,05 \text{ до } 0,3 \text{ м/с}; f = \text{от } 0,1 \text{ до } 0,2 \text{ 1/рад}; \dot{S}_0^* = 0; \dot{l}_1^* = 0.$$

Определим коэффициенты  $k_{1,м}, k_{3,м}, k_{4,м}, T_{1,м}$ . Для этого воспользуемся методом теории планирования эксперимента [203,204]. Сначала рассмотрим параметры, которые изменяются в процессе намотки. Назовем их варьируемыми. Варьируемые параметры представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Варьируемые параметры

Параметр	от	до	Изменение параметра, раз
$\alpha$ (рад)	2	6	3
$S_0$ (Н)	100	500	5
$v_2$ (м/с)	0,05	0,3	6
$f$ (1/рад)	0,1	0,2	2

Произведем кодирование натуральных значений уровней факторов в кодовые безразмерные величины с целью построения стандартной матрицы эксперимента. Кодирование производится по формуле [196,197]:

$$X_u = \frac{x_u - x_{u0}}{\Delta x_u}, \quad (6.6)$$

где  $X_u$  – кодированное значение  $u$ -го фактора;  $x_u$  – натуральное текущее значение  $u$ -го фактора;  $x_{u0}$  – начальный (нулевой, средний) уровень фактора;  $\Delta x_u$  – интервал варьирования  $u$ -го фактора;

$$\Delta x_u = \frac{x_{u\max} - x_{u\min}}{2}. \quad (6.7)$$

После кодирования уровни факторов принимают значения: +1 – верхний уровень; –1 – нижний уровень; 0 – нулевой (средний) уровень [203,204]. Результат кодирования четырех факторов  $\alpha$ ,  $S_0$ ,  $v_2$ ,  $f$  представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Кодирование факторов

Факторы	$X_1$	$\alpha$	$X_2$	$S_0$	$X_3$	$v_2$	$X_4$	$f$
Интервал варьирования	1	4	1	400	1	0,125	1	0,05
Верхний уровень	+1	6	+1	500	+1	0,3	+1	0,2
Нижний уровень	-1	2	-1	100	-1	0,05	-1	0,1
Основной уровень	0	4	0	300	0	0,175	0	0,15

Получим значения коэффициентов  $k_{1M} - k_{4M}$ ,  $T_{1M}$  для указанных изменений параметров, они приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Значения  $k_{1M} - k_{4M}$ ,  $T_{1M}$  и интервал их варьирования

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

Вопросы расчета регуляторов тока, скорости и положения систем подчиненного регулирования подробно описаны в литературе [49-51,54,57-59,108-112,136-140].

Отметим, что три внутренних контура с достаточной точностью можно заменить апериодическим звеном первого порядка [49-51,54,57-59,108-112,136-140] с передаточной функцией  $W(p) = \frac{1/k_{осп}}{8T_{\mu}p+1}$ . Здесь  $k_{осп}$  – коэффициент усиления датчика обратной связи по положению натяжного ролика;  $T_{\mu}$  – малая постоянная времени, равная сумме постоянных времени преобразователя, питающего электродвигатель ЭД, и постоянной времени датчика тока и фильтров.

С учетом этого, структурную схему системы регулирования натяжения упрощенно можно представить в виде, изображенном на рисунке 6.20.

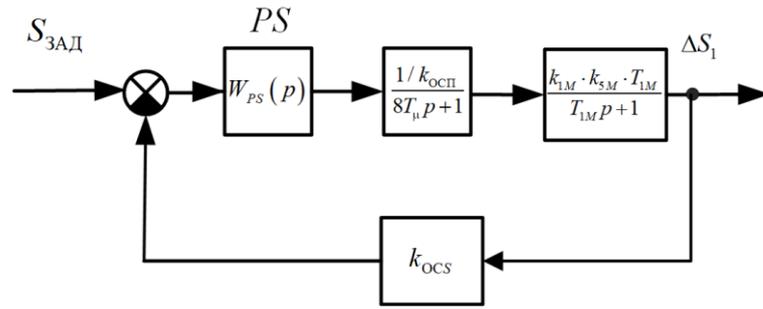


Рисунок 6.20 – Функциональная схема системы регулирования натяжения

При настройке регулятора натяжения на модульный оптимум, получим передаточную функцию ПИ регулятора [49-51,54,57-59,108-112,136-140]:

$$W_{PS}(p) = \frac{T_{1M}p + 1}{16 \cdot T_{\mu} \cdot k_{1M} \cdot k_{5M} \cdot (1/k_{ОСП}) \cdot k_{ОСС} \cdot T_{1M} \cdot p} = \frac{T_{1M}p + 1}{k_{1MO} \cdot T_{1M} \cdot p}, \quad (6.8)$$

где  $k_{ОСС}$  – коэффициент усиления датчика обратной связи контура регулирования натяжения;  $k_{1MO} = 16 \frac{k_{1M} \cdot k_{5M} \cdot k_{7M} \cdot k_{ОСС}}{k_{ОСП}} T_{\mu}$ .

При настройке системы на симметричный оптимум, получим передаточную функцию ПИ регулятора [49-51,54,57-59,108-112,136-140]:

$$W_{PS}(p) = k_{PC} \left( 1 + \frac{1}{T_{CO1} \cdot p} + \frac{1}{T_{CO2}^2 \cdot p^2} \right), \quad (6.9)$$

где:

$$\left. \begin{aligned} k_{PC} &= \frac{32T_{\mu} \cdot k_{ОСП}}{512T_{\mu}^2 \cdot k_{1M} \cdot k_{5M} \cdot k_{ОСС}}; \\ T_{CO1} &= \frac{32T_{\mu}T_{1M}}{32T_{\mu} + T_{1M}}; \\ T_{CO2} &= \sqrt{32T_{\mu}T_{1M}}. \end{aligned} \right\}$$

Отметим, что в полученной передаточной функции регулятора значения  $T_{1M}$  и  $k_{1M}$  изменяются в широких пределах, что отрицательным образом сказывается на качестве регулирования натяжения в процессе намотки.

В таблице 6.4 приведены значения времени переходного процесса от параметров объекта управления. Исследование проведено на модели системы в пакете MatLab Simulink. Регулятор натяжения настроен на значения

$k_{1m} = 221,2$ ,  $T_{1m} = 0,47$  с. В процессе моделирования параметры регулятора не изменялись.

Таблица 6.4 – Анализ времени переходного процесса при изменении параметров объекта управления

№	$k_{1m}$	$T_{1m}$	$t_{\text{ПП}}$ , с
1	349882,5	1,43	0,15
2	349882,5	0,15	0,025
3	13228,5	1,43	3,5
4	13228,5	0,15	6,9

Из полученных данных видно, что время переходного процесса изменяется от 0,025 с до 6,9 с. Для уменьшения влияния параметров объекта управления на поведение системы регулирования необходимо ввести коррекцию регулятора натяжения. Очевидно, что это можно сделать, используя выражения, полученные при линеаризации уравнения (2.8) по выражениям (2.16, 2.17). Однако они довольно сложные и требуют большого времени при вычислении в реальном времени. Упростим эти выражения.

Для этого воспользуемся методами, используемыми в теории планирования эксперимента [203,204]. Сначала рассмотрим параметры, которые изменяются в процессе намотки. Назовем их варьируемыми. Варьируемые параметры представлены в таблице 6.3.

Составим матрицу планирования эксперимента (расчетов). Она приведена в таблице 6.5 [203,204].

Таблица 6.5 – Матрица планирования эксперимента (расчетов) и результаты расчетов

№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$k_{1м}$	$k_{3м}$	$k_{4м}$	$T_{1м}$
1	-1	-1	-1	-1	47,25	-123,13	2,510	10,05
2	1	-1	-1	-1	10,92	-183,21	2,520	10,15
3	-1	1	-1	-1	228,25	-582,66	2,530	10,05
4	1	1	-1	-1	53,97	-870,04	2,600	10,15
5	-1	-1	1	-1	47,25	-123,13	2,510	3,38
6	1	-1	1	-1	10,92	-183,21	2,520	3,48
7	-1	1	1	-1	228,25	-582,66	2,530	3,38
8	1	1	1	-1	53,70	-870,04	2,600	3,48
9	-1	-1	-1	1	43,07	-150,18	2,510	10,05
10	1	-1	-1	1	-11,79	-333,06	2,560	10,15
11	-1	1	-1	1	205,63	-711,93	2,560	10,05
12	1	1	-1	1	-55,49	-1590,00	2,790	10,15
13	-1	-1	1	1	43,07	-150,18	2,510	3,38
14	1	-1	1	1	-11,79	-333,06	2,560	3,48
15	-1	1	1	1	205,63	-711,93	2,560	3,38
16	1	1	1	1	-55,49	-1590,00	2,790	3,48
17	0	0	0	0	50,49	-512,59	2,560	5,10

Значения коэффициентов регрессии позволяют оценить степень влияния факторов и их взаимодействия на параметр модели. Величина коэффициента соответствует вкладу данного фактора в величину параметра модели при переходе значения фактора с нулевого уровня на верхний или нижний.

Для оценки влияния указанных факторов и математического описания процесса используем модель первого порядка:

$$\tilde{y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{34} X_3 X_4 + b_{123} X_1 X_2 X_3 + b_{234} X_2 X_3 X_4 + b_{124} X_1 X_2 X_4 + b_{134} X_1 X_3 X_4, \quad (6.10)$$

$$\text{где } b_u = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ui} Y_i}{N}; b_{ij} = \frac{\sum_{i,j=1}^N X_{ui} X_{uj} Y_i}{N}; b_{ij} = \frac{\sum_{i,j,m=1}^N X_{uim} X_{ujm} Y_i}{N}.$$

После обработки полученных данных имеем:

-для коэффициента  $k_{1M}$ :

$$b_0 = 64,34; b_1 = -61,97; b_2 = 40,33; b_3 = -0,02; b_4 = -18,69; b_{12} = -40,51; b_{23} = -0,016; b_{14} = -12,38; b_{13} = -0,016; b_{24} = -12,36; b_{34} = 0,016; b_{123} = -0,16; b_{234} = 0,016; b_{124} = -8,021; b_{1234} = 0,016;$$

-для коэффициента  $k_{3M}$ :

$$b_0 = -564,77; b_1 = -165,70; b_2 = -348,83; b_3 = 0; b_4 = -120,72; b_{12} = -108,53; b_{23} = 0; b_{14} = -83,94; b_{13} = 0; b_{24} = -79,10; b_{34} = 0; b_{123} = 0; b_{234} = 0; b_{124} = -55,05; b_{1234} = 0;$$

-для коэффициента  $k_{4M}$ :

$$b_0 = 2,57; b_1 = 0,042; b_2 = 0,045; b_3 = 0; b_4 = 0,031; b_{12} = 0,03; b_{23} = 0; b_{14} = 0; b_{13} = 0; b_{24} = 0,02; b_{34} = 0; b_{123} = 0; b_{234} = 0; b_{124} = 0,014; b_{1234} = 0;$$

- для постоянной времени  $T_{1M}$ :

$$b_0 = 6,67; b_1 = 0,047; b_2 = 0; b_3 = -3,14; b_4 = 0; b_{12} = 0; b_{23} = 0; b_{14} = 0; b_{13} = 0; b_{24} = 0; b_{34} = 0; b_{123} = 0; b_{234} = 0; b_{124} = 0; b_{1234} = 0.$$

Произведем анализ полученных моделей. Для этого рассчитаем значения коэффициентов  $k_{1M} - k_{4M}$ ,  $T_{1M}$  по точному уравнению и по полученным формулам, далее, используя критерий Кохрена, проверим однородность дисперсии.

Для коэффициента  $k_{1M}$ :

$$G_{k_{1M}} = dis_{\max}^2 / \sum_{u=1}^N dis_u^2 = 109,63 / 693,1 = 0,16,$$

где  $dis_u^2 = (k_{1M} - \tilde{k}_{.M})^2$  – дисперсия, рассчитанная для каждого сочетания параметров объекта управления;  $dis_{\max}^2$  – максимальная из рассчитанных дисперсий.

Для коэффициента  $k_{3M}$ :

$$G_{k_{3,m}} = dis_{\max}^2 / \sum_{u=1}^N dis_u^2 = 4016,62 / 14880,82 = 0,27.$$

Для коэффициента  $k_{4,m}$ :

$$G_{k_{4,m}} = dis_{\max}^2 / \sum_{u=1}^N dis_u^2 = 0,008 / 0,00608 = 0,13.$$

Для коэффициента  $T_{1,m}$ :

$$G_{T_{1,m}} = dis_{\max}^2 / \sum_{u=1}^N dis_u^2 = 2,46 / 3,225 = 0,761.$$

Для числа опытов  $N=17$  и принятой доверительной вероятности 0,95 табличное значение критерия Кохрена равно 0,36. Таким образом, можно сделать вывод об адекватности полученной модели для коэффициентов  $k_{i,m}$ . Для коэффициента  $T_{1,m}$  можно сделать вывод, что полученная модель неадекватно описывает процесс.

Далее найдем среднюю дисперсию, а затем, используя критерий Стьюдента, определим доверительный интервал коэффициентов  $\Delta b$ .

Для коэффициента  $k_{1,m}$ :

$$\Delta b = t \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N dis_u^2}{u N}} = 13,47, \quad (6.11)$$

где  $t = 2,11$  – табличное значение критерия Стьюдента при доверительной вероятности 0,95 и числе степеней свободы  $N=17$ .

Для коэффициента  $k_{3,m}$ :

$$\Delta b = t \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N dis_u^2}{u N}} = 62,43. \quad (6.12)$$

Для коэффициента  $k_{4,m}$ :

$$\Delta b = t \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N dis_u^2}{u N}} = 0,44. \quad (6.13)$$

После определения доверительного интервала (6.11-6.13) решаем вопрос о значимости каждого коэффициента. Коэффициент значим, если  $|b| > \Delta b$ . Окончательно получаем:

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

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

$$\tilde{k}_{4,m} = b_0 = 2,57.$$

В связи с полученной неадекватной моделью для  $T_{1,m}$  усложним модель, воспользуемся моделью второго порядка:

$$\begin{aligned} \tilde{y} = & b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + b_{23} X_2 X_3 + \\ & + b_{24} X_2 X_4 + b_{34} X_3 X_4 + b_{123} X_1 X_2 X_3 + b_{234} X_2 X_3 X_4 + b_{124} X_1 X_2 X_4 + b_{134} X_1 X_3 X_4 + \\ & + b_{11}(X_1^2 - \beta) + b_{22}(X_2^2 - \beta) + b_{33}(X_3^2 - \beta) + b_{33}(X_4^2 - \beta), \end{aligned}$$

где  $\beta = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij}^2$ ;  $N$  – общее число точек плана;  $i = 1, \dots, n$ .

Для построения плана второго порядка необходимо изменять переменные на трех уровнях. Здесь используется понятие «“звездное” плечо  $\alpha$ » – это расстояние между центральной и “звездной” точкой. Для четырех переменных имеем:  $N = 25$ ;  $\alpha = 1,414$ ;  $\beta = 0,8$  [203,204].

В таблице 6.6 приведены матрица планирования экспериментов и результаты расчетов.

Таблица 6.6 – Матрица планирования эксперимента (расчетов) и результаты расчетов

№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$T_{LM}$		Дисперсия
					точное	по полученным выражениям	
1	-1	-1	-1	-1	10,05	8,93	1,249
2	1	-1	-1	-1	10,15	9,01	1,308
3	-1	1	-1	-1	10,05	8,93	1,249
4	1	1	-1	-1	10,15	9,01	1,308
5	-1	-1	1	-1	3,38	3,98	0,359
6	1	-1	1	-1	3,48	4,05	0,328
7	-1	1	1	-1	3,38	3,98	0,359
8	1	1	1	-1	3,48	4,05	0,328
9	-1	-1	-1	1	10,05	8,93	1,249
10	1	-1	-1	1	10,15	9,01	1,308
11	-1	1	-1	1	10,05	8,93	1,249
12	1	1	-1	1	10,15	9,01	1,308
13	-1	-1	1	1	3,38	3,98	0,359
14	1	-1	1	1	3,48	4,05	0,328
15	-1	1	1	1	3,38	3,98	0,359
16	1	1	1	1	3,48	4,05	0,328
17	1,41	0	0	0	5,17	6,54	1,890
18	-1,41	0	0	0	5,03	6,44	1,992
19	0	1,41	0	0	5,10	6,49	1,939
20	0	-1,41	0	0	5,10	6,49	1,939
21	0	0	1,41	0	3,04	3,00	0,002
22	0	0	-1,41	0	12,60	9,98	6,840
23	0	0	0	1,41	5,10	6,49	1,939
24	0	0	0	-1,41	5,10	6,49	1,939
25	0	0	0	0	5,10	2,75	5,539

Произведем анализ полученной модели. Используя критерий Кохрена, проверяем однородность дисперсии.

$$G_{T_{LM}} = dis_{\max}^2 / \sum_{u=1}^N dis_u^2 = 6,84 / 37 = 0,19.$$

Для числа опытов  $N=25$  и принятой доверительной вероятности 0,95 табличное значение критерия Кохрена равно 0,3. Таким образом, можно сделать вывод об адекватности полученной модели.

Далее найдем среднюю дисперсию, а затем, используя критерий Стьюдента, определим доверительный интервал коэффициентов  $\Delta b$ .

Для коэффициента  $k_{1,m}$ :

$$\Delta b = t \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N dis_u^2}{N}} = 2,1, \quad (6.14)$$

где  $t = 1,73$  – табличное значение критерия Стьюдента при доверительной вероятности 0,95 и числе степеней свободы  $N=25$ .

После определения доверительного интервала решаем вопрос о значимости каждого коэффициента. Окончательно получаем:

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{1,m} &= b_0 + b_3 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + b_{44} X_4^2 = \\ &= 2,75 - 2,48 X_3 + 4,64 X_1^2 + 4,51 X_2^2 + 4,93 X_3^2 + 4,64 X_4^2. \end{aligned}$$

На рисунке 6.21 показана структурная схема системы регулирования натяжения с адаптивным регулятором [205,206].

Адаптивный регулятор состоит из двух блоков.

Блок 2 преобразует реальные переменные в кодированные. В соответствии с выражением (5.20):

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{\alpha - 4}{2}; \\ X_2 &= \frac{S_0 - 300}{200}; \\ X_3 &= \frac{v_2 - 0,2}{0,1}; \\ X_4 &= \frac{f - 0,15}{0,05}. \end{aligned}$$

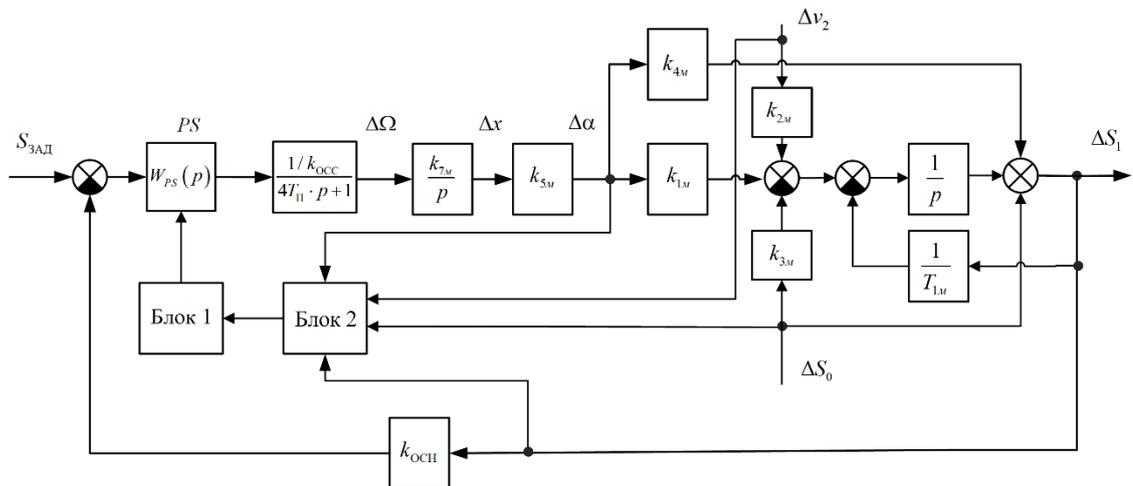
Далее, блок 1 осуществляет расчет параметров регулятора натяжения.

Сначала вычисляются параметры  $k_{1,m}$  и  $T_{1,m}$  по формулам:

$$\begin{aligned} \tilde{k}_{1,m} &= 64,34 - 61,97 \cdot X_1 + 40,33 \cdot X_2 - 18,69 \cdot X_4 - 40,51 \cdot X_1 \cdot X_2; \\ \tilde{T}_{1,m} &= 2,75 - 2,48 X_3 + 4,64 X_1^2 + 4,51 X_2^2 + 4,93 X_3^2 + 4,64 X_4^2. \end{aligned}$$

Далее вычисляем уставки регулятора натяжения:

$$W_{PS} = \frac{T_{1,m} p + 1}{k_{1,m} \cdot 1,07 \cdot 10^{-5} \cdot p}.$$



Рисунке 6.21 – Структурная схема адаптивной электротехнической системы регулирования натяжения “мокрой” композиционной ленты

На рисунке 6.22 показаны результаты моделирования системы регулирования натяжения при существенном изменении параметров объекта регулирования.

Адаптивная система хорошо работает при широких изменениях параметров объекта регулирования, перерегулирование в системе не превышает 9 %, время переходного процесса 0,12 с.

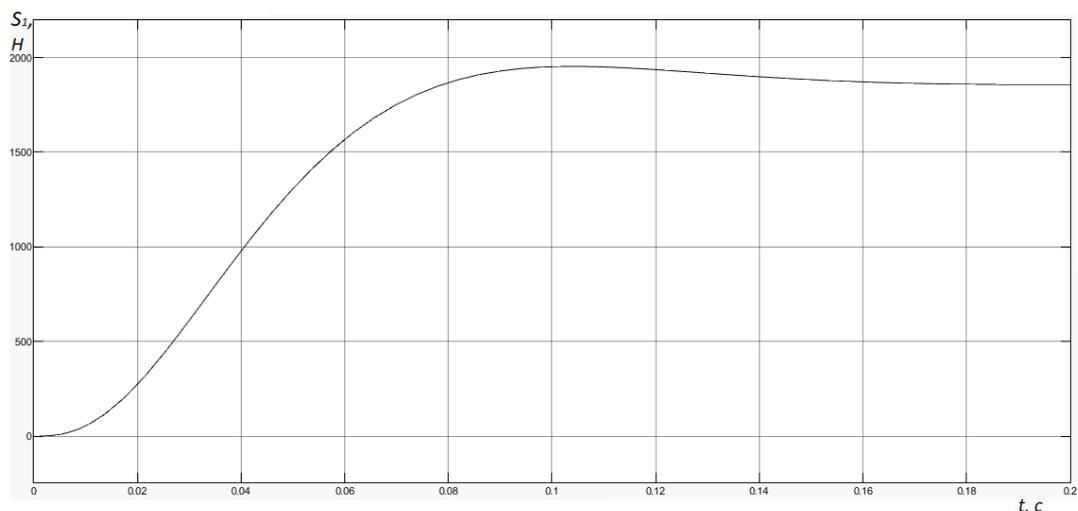


Рисунок 6.22 – Переходный процесс при изменении параметров объекта регулирования

Приведем алгоритм работы адаптивного регулятора. Он представлен на рисунке 6.23.

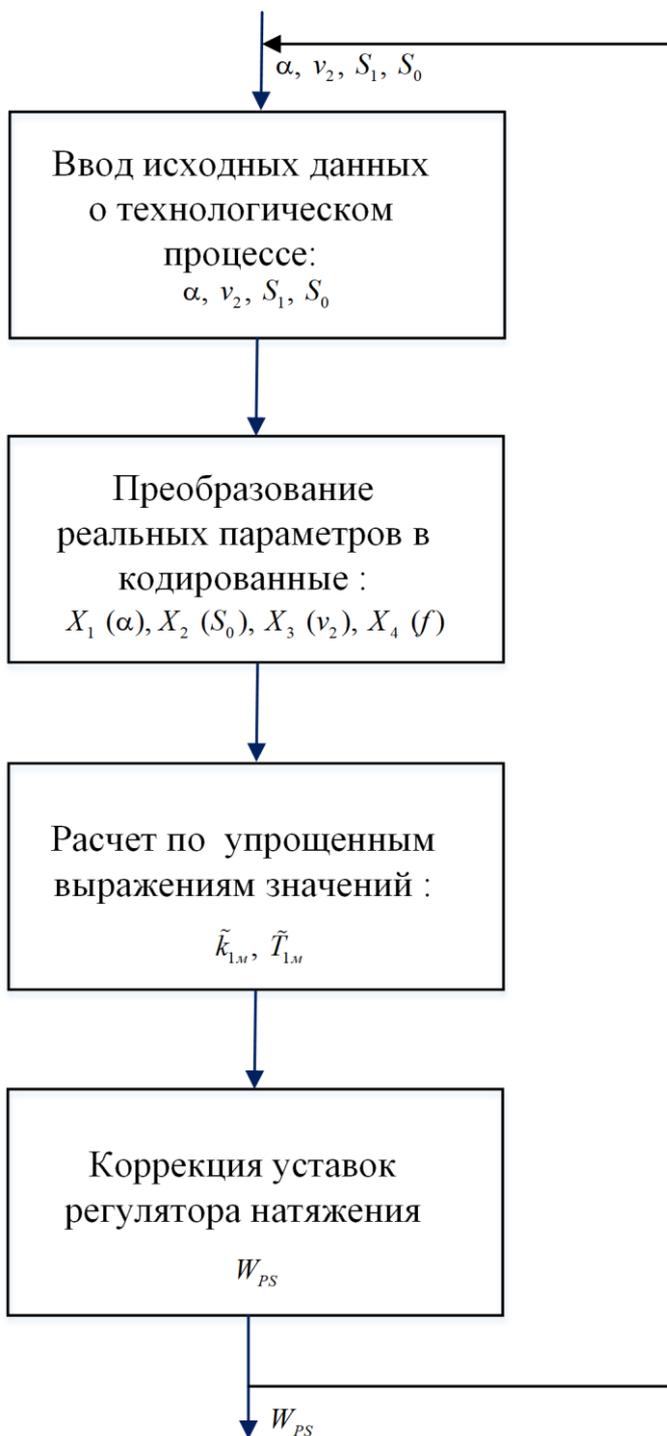


Рисунок 6.23 – Алгоритм работы вычислительного устройства адаптивного регулятора натяжения “мокрого” композиционного материала

### 6.4.2 Синтез адаптивных регуляторов электротехнических систем регулирования натяжения при “сухой” намотке

Как уже отмечалось в разделе 2, при линеаризации математического описания упругой ленты получаются передаточные функции, коэффициенты которых, зависят от режимов работы оборудования и наматываемого изделия. В предыдущем параграфе нам удалось существенно упростить математические выражения, которые следует использовать при расчете уставок регуляторов системы.

Рассчитаем параметры полученной ранее ЭТС линеаризованного объекта регулирования (см. рисунок 2.4). При этом учтем, что в реальных условиях намотки, изменяются длина тракта намотки, натяжение, с которым наматывается материал на изделие, натяжение, с которым материал сходит с оправки и скорость намотки:

$$l_1^* \text{ от } 0,7 \text{ до } 1,5 \text{ м; } S_1^* \text{ от } 400 \text{ до } 3000 \text{ Н; } S_0^* \text{ от } 200 \text{ до } 400 \text{ Н;}$$

$$v_2^* \text{ от } 0,05 \text{ до } 0,3 \text{ м/с; } v_1^* \text{ от } 0,05 \text{ до } 0,3 \text{ м/с; } \dot{S}_0^* = 0; \dot{l}_1^* = 0.$$

Сначала рассмотрим параметры, которые изменяются в процессе намотки. Изменяющиеся параметры представлены в таблице 6.7.

Таблица 6.7 – Изменяющиеся параметры

Параметр	от	до	Изменение параметра (раз)
$S_0$ (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

По выражениям (2.15) рассчитаем параметры  $k_1$  и  $T_1$ . Параметр  $k_1$  изменяется от 27350 до 200000. Параметр  $T_1$  изменяется от 1,496 до 28,846.

Как в разделе 5.3.1, были произведены, методом планирования эксперимента, расчеты, позволяющие упростить выражение (2.15). Однако, даже при использовании планов второго порядка получены неадекватные модели. Для числа опытов  $N=25$  и принятой доверительной вероятности 0,95 табличное значение критерия Кохрена равно 0,28. Полученные модели имеют большие значения. Кроме того, при расчетах постоянных времени  $T_1$  получаются отрицательные значения, что расходится с физическим представлением постоянной времени. Поэтому при создании адаптивной системы регулирования натяжения “сухого” материала было принято решение использовать не упрощенные выражения (2.15). Из этих же выражений имеем:

$$k_1 = \frac{(EF + S_1^* - S_0^*)^2}{l_1^* \cdot EF};$$

$$T_1 = \frac{l_1^* \cdot EF}{2(EF + S_1^* - S_0^*)v_1^* - EF \cdot v_2^*}.$$

Для исследования влияния изменения параметров объекта регулирования проведем моделирование при крайних значениях данных параметров, приведенных в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Значения параметров  $k_1$  и  $T_1$

$N$	$k_1$	$T_1$
1	200000	28,8
2	200000	1,5
3	27350	28,8
4	27350	1,5

Результаты моделирования представлены на рисунках 6.24 – 6.27.

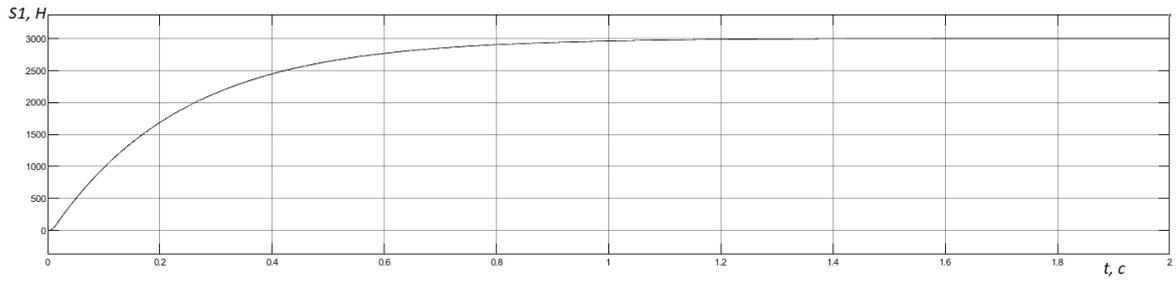


Рисунок 6.24 – Результаты моделирования электротехнической системы при  $k_1 = 200000$ ;  $T_1 = 30$  с

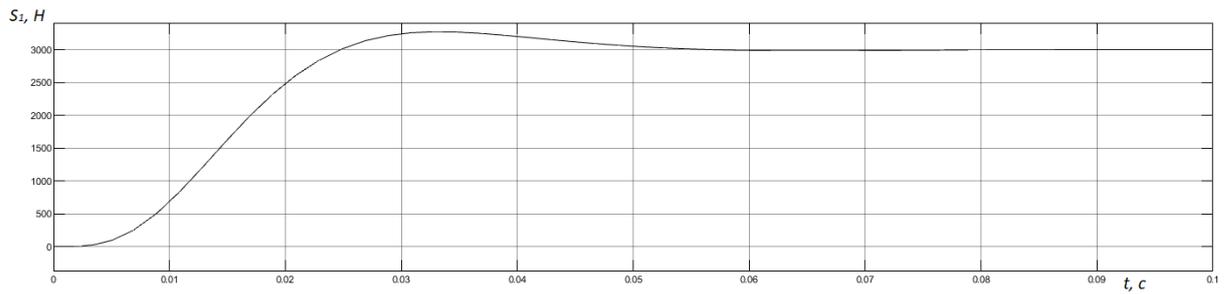


Рисунок 6.25 – Результаты моделирования электротехнической системы при  $k_1 = 200000$ ;  $T_1 = 1,5$  с

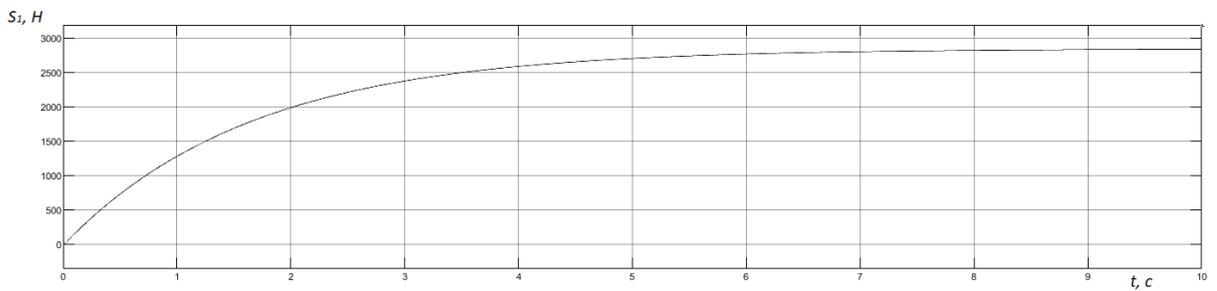


Рисунок 6.26 – Результаты моделирования электротехнической системы при  $k_1 = 27350$ ;  $T_1 = 28,8$  с

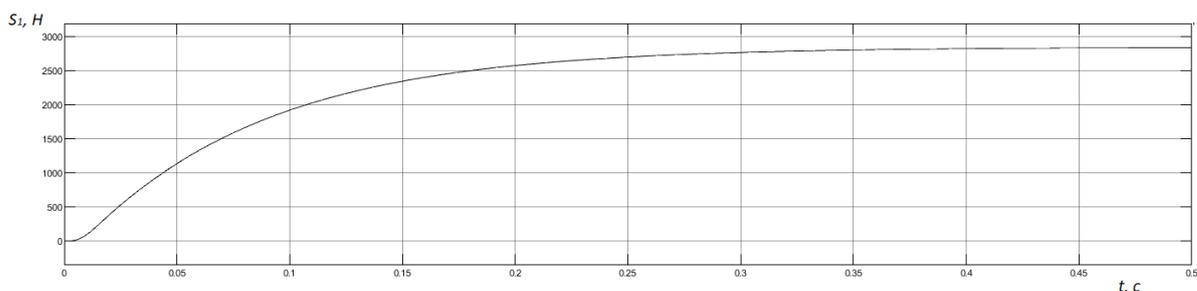


Рисунок 6.27 – Результаты моделирования электротехнической системы при  $k_1 = 27350$ ;  $T_1 = 1,5$  с

Анализ полученных переходных процессов приведен в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Анализ полученных переходных процессов

$N$ рис.	$k_1$	$T_1$	$t_{\text{ПП}}$ , с
6.24	200000	28,8	0,8
6.25	200000	1,5	0,05
6.26	27350	28,8	6,0
6.27	27350	1,5	0,35

Из полученных данных видно, что время переходного процесса изменяется от 0,05 с до 6,0 с, то есть в 120 раз. Для уменьшения влияния параметров объекта управления на поведение системы регулирования желательно ввести коррекцию коэффициента усиления регулятора натяжения, то есть использовать адаптивный регулятор.

На рисунке 6.28 показана структурная ЭТС натяжения с адаптивным регулятором [207].

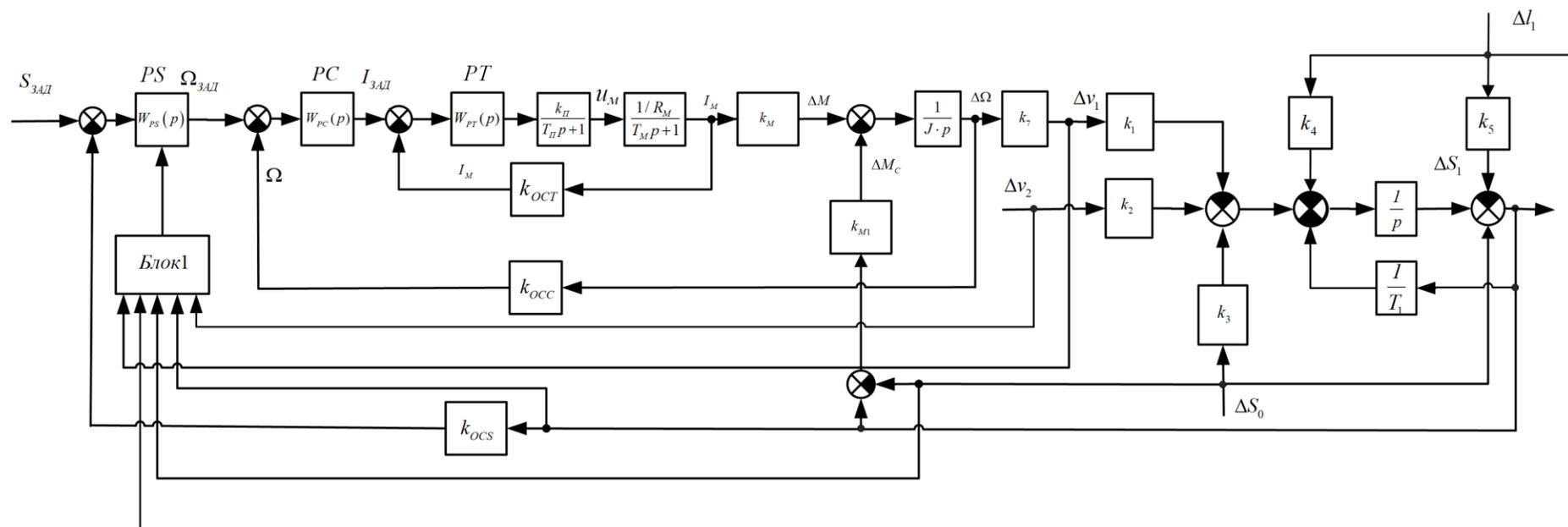


Рисунок 6.28 – Структурная схема системы регулирования электротехнической системы натяжения “сухой” ленты с адаптивным регулятором

Адаптивный регулятор состоит из Блока 1, который осуществляет расчет параметров  $k_1$  и  $T_1$ . Очевидно, что сигналы об истинных параметрах процесса натяжения блок 1 получает с помощью АЦП (анало-цифрового преобразователя). Алгоритм работы адаптивного регулятора представлен на рисунке 6.29.



Рисунок 6.29 – Алгоритм работы вычислительного устройства адаптивного регулятора натяжения “сухого” композиционного материала

Влияние на процесс регулирования запаздывания в процессе преобразования сигналов из аналоговой формы в цифровую и дискретность по уровню исследуем при моделировании.

Далее вычисляем уставки регулятора натяжения:

$$W_{PS} = \frac{T_1 p + 1}{k_1 \cdot 1,07 \cdot 10^{-5} \cdot p}$$

На рисунке 6.30, 6.31 приведены схемы набора регулятора на модели в системе MatLab.

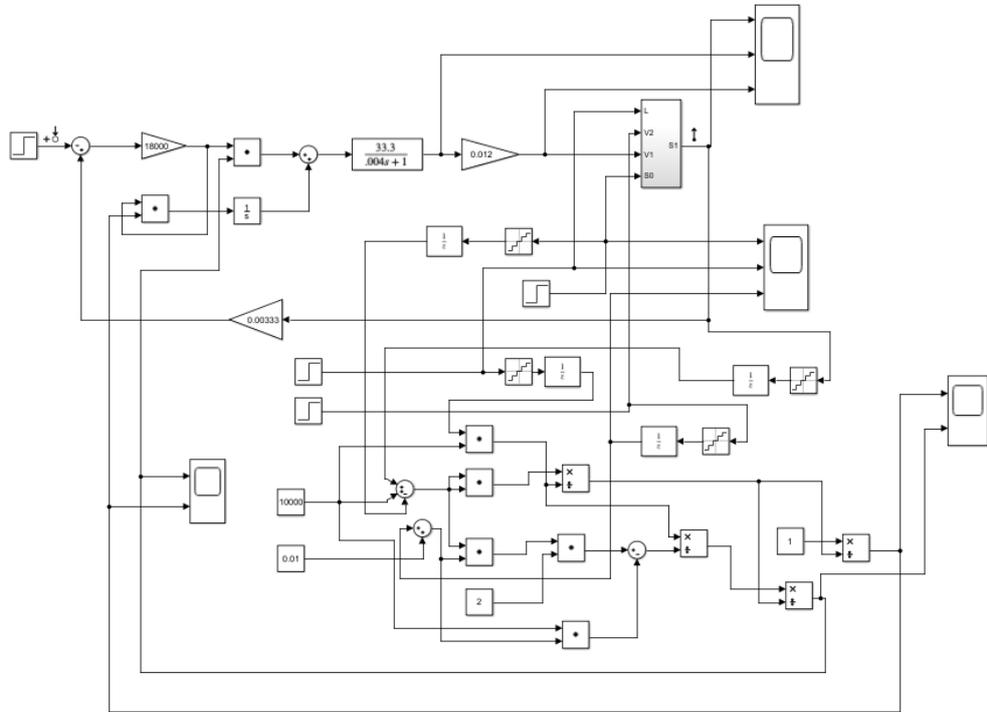


Рисунок 6.30 – Схема набора модели электротехнической системы регулирования натяжения “сухой” ленты с адаптивным регулятором

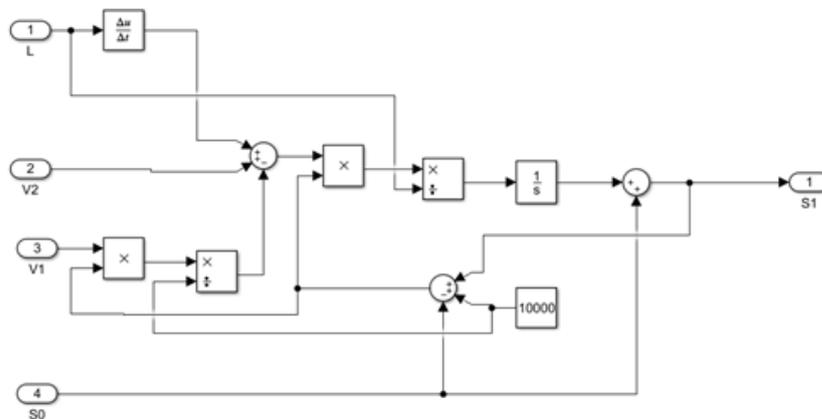


Рисунок 6.31 – Схема набора математической модели упругой “сухой” ленты при прохождении ее по направляющим тракта станка при  $l_1 = l_1(t)$

Очевидно, что процесс определения параметров регулятора и изменение их на вновь рассчитанные происходит с некоторым запаздыванием. Это объясняется наличием в контуре адаптации аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и времени, необходимого для вычисления требуемых параметров. Данный процесс в модели учтен последовательно включенными звеньями Quantization interval (шаг квантования по уровню) и блоком единичной дискретной задержки Unit Delay.

Отметим, что при использовании современных средств вычислительной техники, например, контроллера фирмы Siemens SIMATIC S7-1500 с центральным процессором CPU 1518-4 PN/DP, типовое время выполнения математических операций с плавающей точкой составляет 6 нс, с фиксированной точкой – 2 нс [195]. Как показали наши расчеты, время вычисления  $k_1$  составляет 30 нс,  $T_1$  – 40 нс. Общее время вычисления составляет 70 нс. В системе может быть использован аналого-цифровой преобразователь (АЦП) SIMATIC SM 532-5HF00-0AB0, время преобразования на 1 канал составляет 50 мкс. Время цикла не зависимо от количества подключенных каналов, составляет 125 мкс. Модуль имеет 16 разрядов, 8 аналоговых входов. Общее время вычисления  $k_1$  и  $T_1$  составит 195 мкс. При данных расчетах мы не учли время преобразования переменных в переменные с плавающей точкой, время на передачу полученных данных в систему коррекции параметров регуляторов. Поэтому при моделировании примем время задержки 1 мс.

Рассмотрим возможность использования в устройстве адаптации техники других производителей, которая существенно дешевле продукции фирмы Siemens. Так наиболее известными производителями являются компании Texas Instruments и National Semiconductor [208]. Продукция компаний сочетает в себе высокие характеристики со сравнительно небольшой стоимостью.

Процессоры семейства TMS320C62xx создавались для работы с плавающей точкой, построены на базе архитектуры Velocity, использующей

технология VLIW (very long instruction word — очень длинное слово команды). Ядро процессора состоит из 8 параллельных вычислительных модулей, а командное слово является 8 параллельными командными словами (по одному на модуль). Процессоры обладают производительностью 1600 MIPS (миллионов простых операций в секунду), работают на частоте 200 МГц; имеют по 64 кбайт ОЗУ программ и данных, 32-битный интерфейс внешней памяти, поддерживающий SDRAM, SBSRAM; набор универсальных многоканальных буферизированных последовательных портов; мощный многоканальный контроллер прямого доступа к памяти; дополнительную 32-разрядную шину расширения, позволяющую подключать как синхронные, так и асинхронные устройства (хост-процессоры и т. д.). Стоимость процессоров составляет порядка \$10–11, что делает их конкурентоспособными при построении систем обработки сигналов с высокими требованиями к производительности и критичными к цене элементной базы.

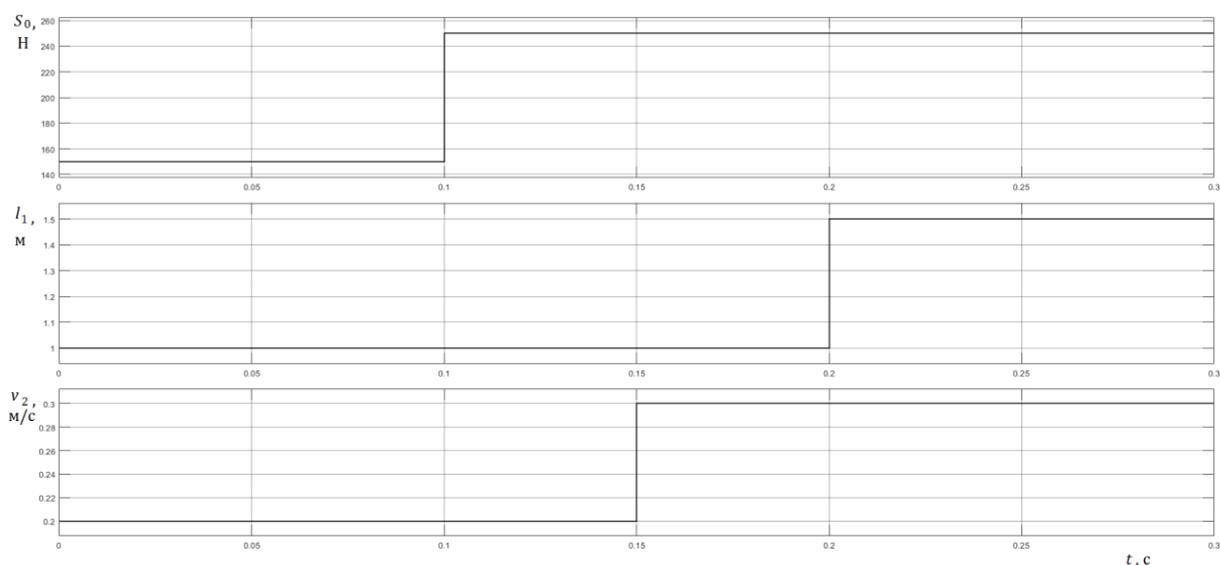
Фирма National Semiconductor выпускает АЦП, рассмотрим некоторые из них, которые можно применить в системе регулирования натяжения. Как будет показано далее, для системы регулирования натяжения достаточно иметь АЦП на 12 разрядов. Характеристики 12-разрядных АЦП приведены в таблице 6.10.

Как видно из приведенных данных время преобразования составляет единицы 4–9 мкс, можно использовать АЦП с различными интерфейсами. В настоящее время существуют технические средства и других производителей, которые можно использовать в системах регулирования натяжения.

При моделировании системы производилось изменение параметров:  $S_0$ ,  $l_1$ ,  $v_2$  (рисунок 6.32). Первый параметр изменяется в 0,1 с, второй 0,15 с, третий 0,2 с.

Таблица 6.10 – Характеристики АЦП фирмы National Semiconductor

Тип	Время преобразования мкс	Интерфейс	Количество каналов
ADC12048	3,6	Parallel	8
ADC12038	8,8	Microvire	8
ADC12H038	5,5	Microvire	8
ADC12L038	8,8	Microvire	8
LM12458	8,8	Parallel	8
LM12H458	5,5	Parallel	8
LM12L458	8,8	Parallel	8
ADC121S625	5,0	Serial	8

Рисунок 6.32 – Графики изменения параметров  $S_0$ ,  $I_1$ ,  $v_2$  при намотке изделия

Проведенные нами исследования влияния дискретизации по уровню в АЦП и задержки показаны на рисунках 6.33, 6.34. Исследовалось влияние разрядности АЦП (8 разрядов-желтый цвет, 10-зеленый, 12-коричневый, 14-синий) и время преобразования информации (от 40мс до 1мс).

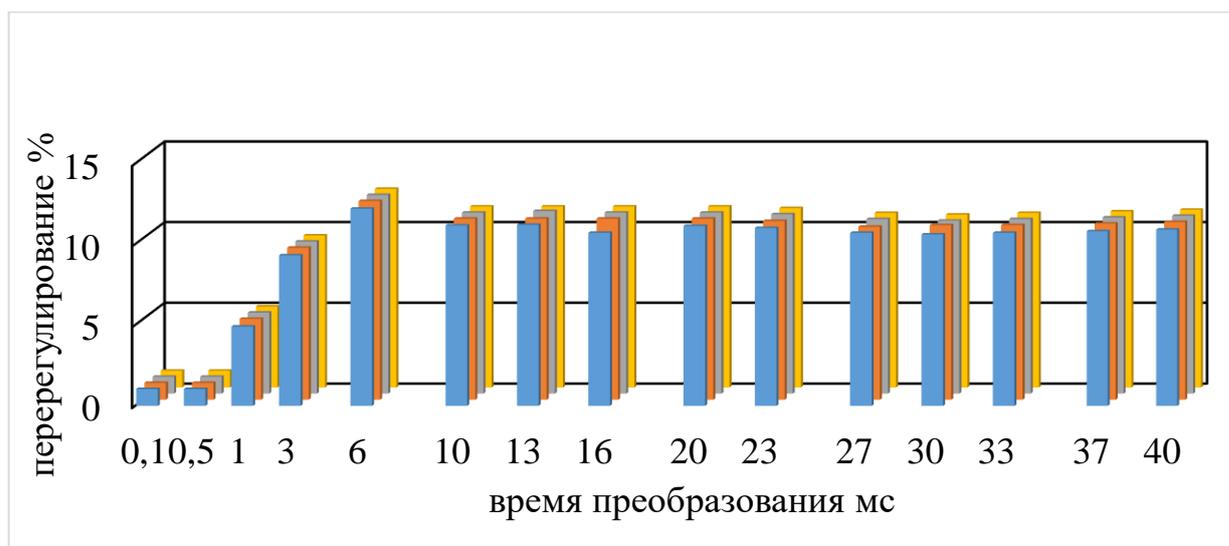


Рисунок 6.33 – Зависимость перерегулирования в адаптивной электротехнической системе от времени преобразования информации в АЦП

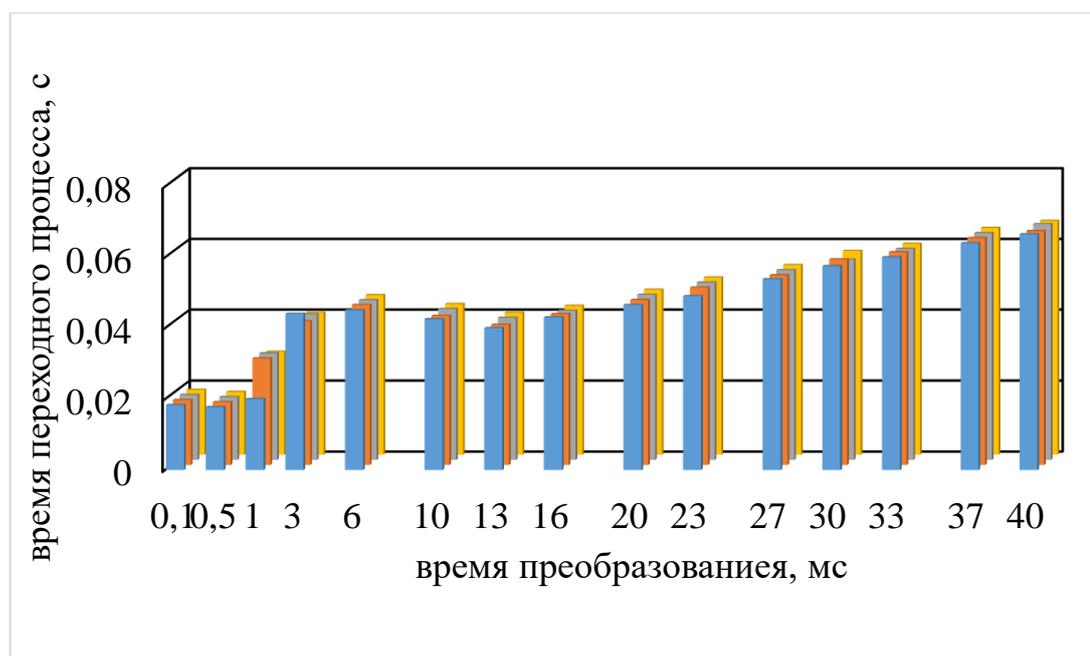


Рисунок 6.34 – Зависимость времени переходного процесса в адаптивной электротехнической системе от времени преобразования информации в АЦП

Из полученных результатов видно, что на перерегулирование в ЭТС влияет время преобразования информации в АЦП и практически не влияет разрядность АЦП. При времени преобразования 1 мс и менее, поведение ЭТС

практически не отличается от системы, в которой отсутствуют преобразование по уровню и время преобразования сигнала равно нулю.

Результаты моделирования адаптивной электротехнической системы приведены на рисунках 6.35 – 6.39.

На рисунке 6.35 показан переходный процесс при использовании 8 разрядного АЦП и времени преобразования сигнала 40 мс. На рисунке 6.36 показан переходный процесс при использовании 8 разрядного АЦП и времени преобразования сигнала 1 мс. Из приведенных графиков видна дискретность преобразования сигналов по уровню и времени.

На рисунках 6.37-6.39 приведены переходные процессы при использовании 12 разрядного АЦП и времени обработки информации 1 мс.

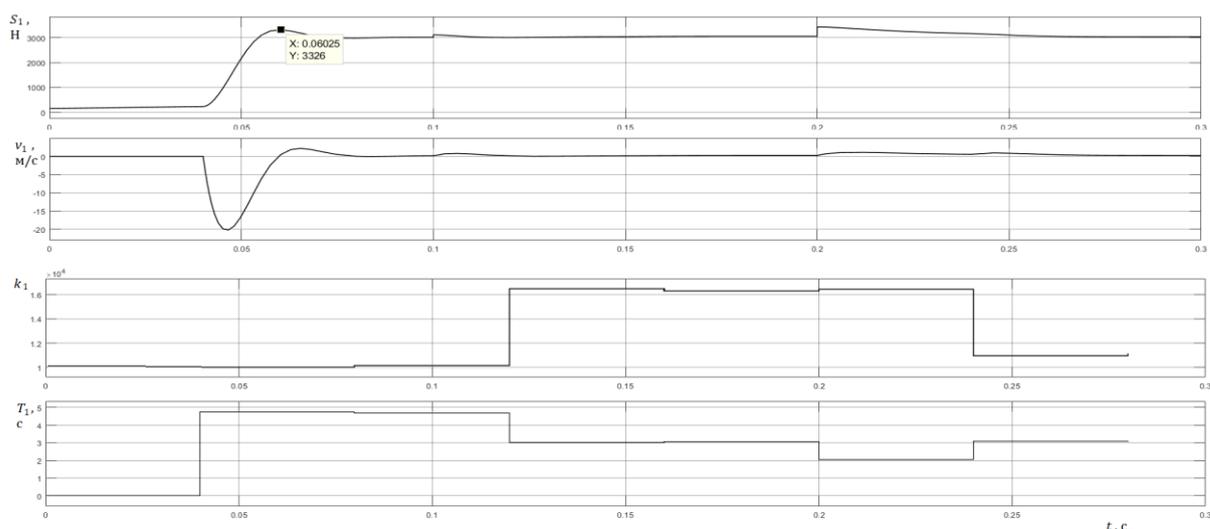


Рисунок 6.35 – Переходный процесс при использовании 8 разрядного АЦП и времени преобразования сигнала 40 мс

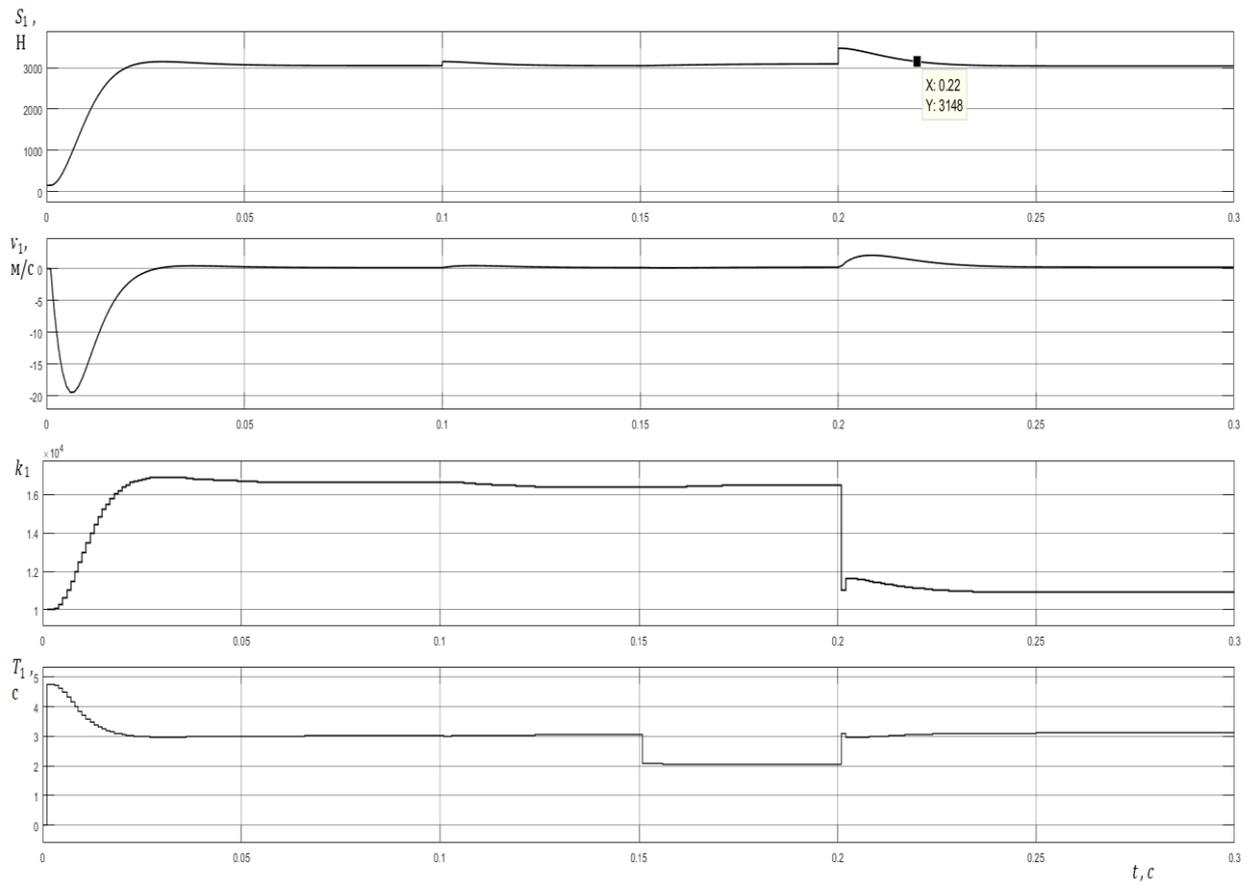


Рисунок 6.36 – Переходный процесс при использовании 8 разрядного АЦП и времени преобразования сигнала 1 мс

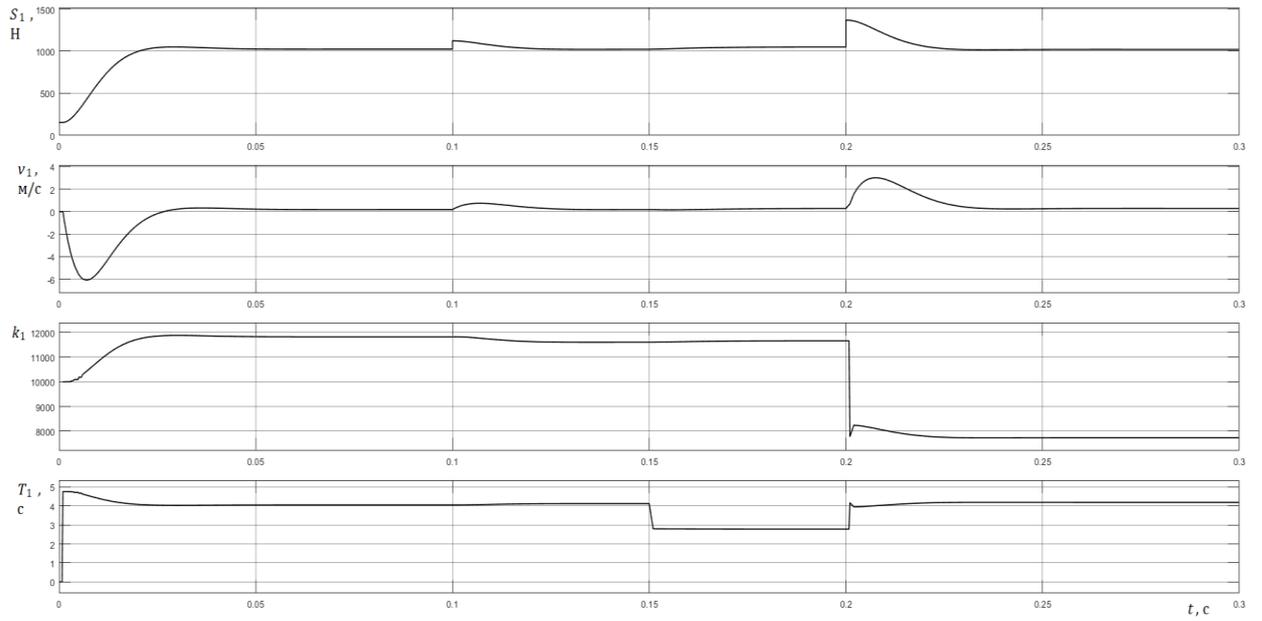


Рисунок 6.37 – Результаты моделирования адаптивной электротехнической системы при изменении натяжения от 0 до 1000 Н

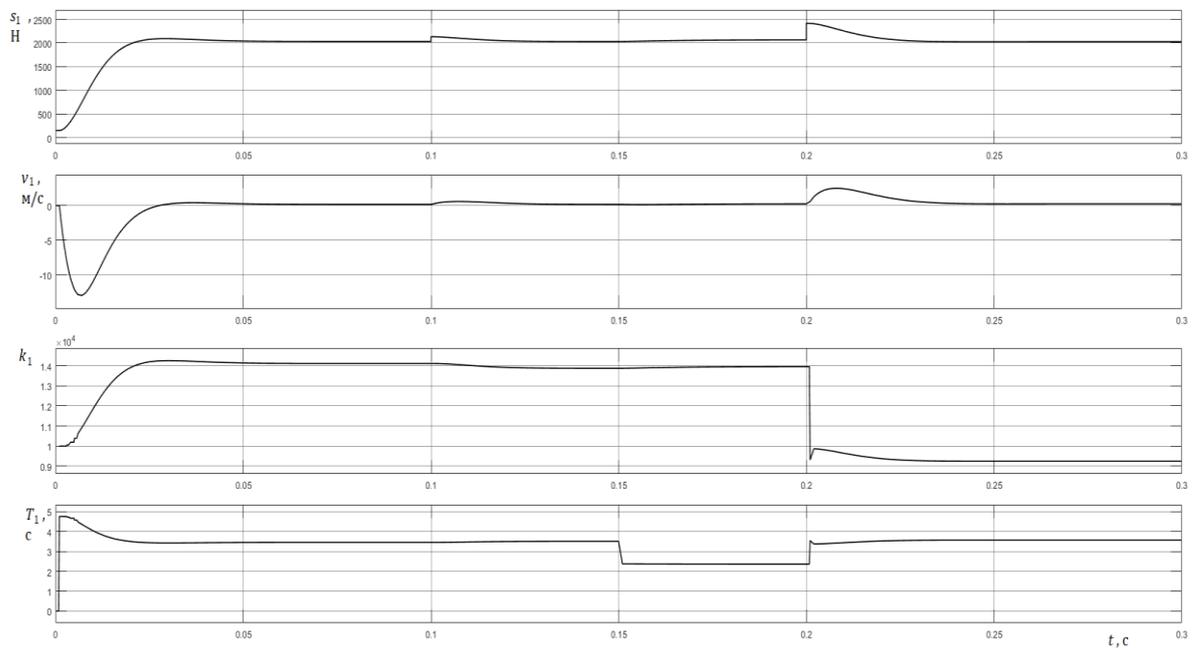


Рисунок 6.38 – Результаты моделирования адаптивной электротехнической системы при изменении натяжения от 0 до 2000 Н

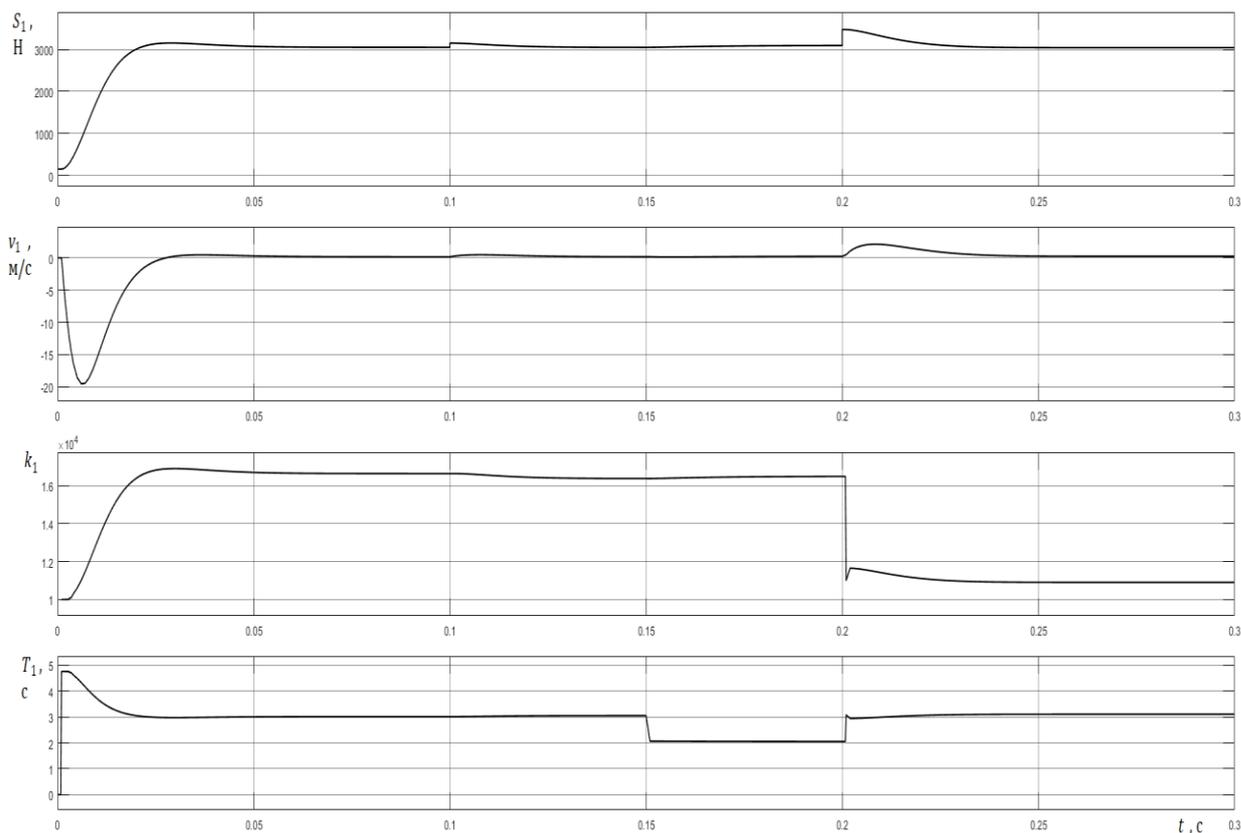


Рисунок 6.39 – Результаты моделирования адаптивной электротехнической системы при изменении натяжения от 0 до 3000 Н

Из полученных результатов видно, что адаптивная система хорошо работает при изменениях параметров объекта регулирования в процессе намотки изделия.

### 6.5 Синтез регулятора электротехнической системы натяжения с прогнозом состояния

В соответствии с результатами, полученными в разделе 5.6 проведем исследование разработанной электротехнической системы регулирования натяжения “сухого” композиционного материала с прогнозом состояния. Схема модели ЭТС натяжения “сухой” композиционной ленты в MatLab Simulink приведена на рисунках 6.40–6.43.

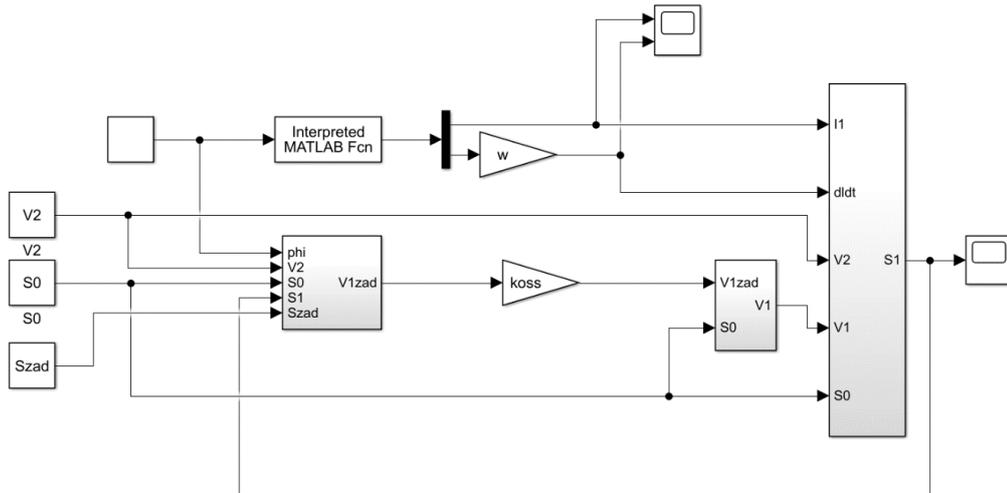


Рисунок 6.40 – Модель электротехнической системы с прогнозом состояния

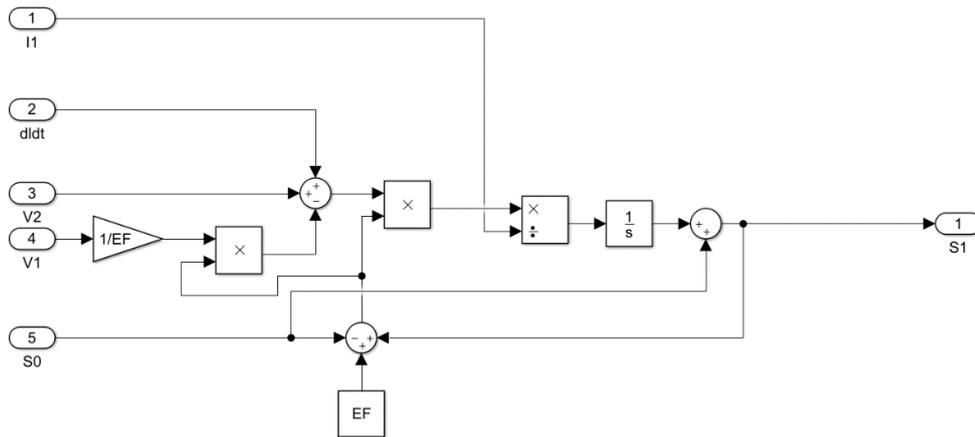


Рисунок 6.41 – Объект регулирования для электротехнической системы регулирования

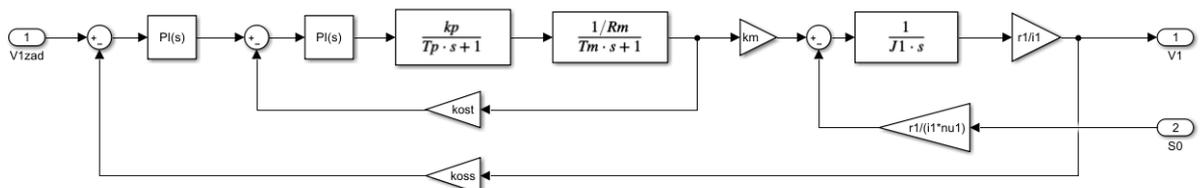


Рисунок 6.42 – Регулятор тока и скорости электротехнического регулятора

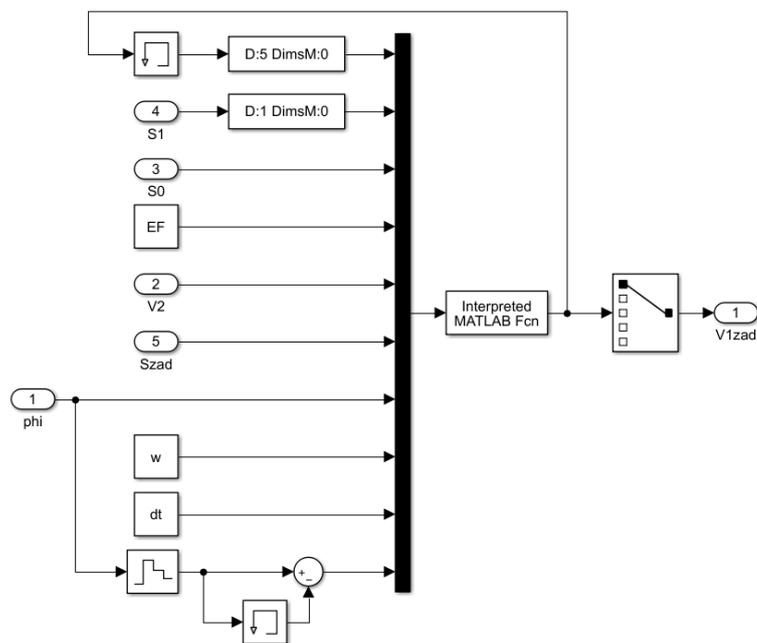


Рисунок 6.43 –Регулятор

Исследования проводились при изменении параметров  $k_2$  и  $T_1$ , при управляющем воздействии  $S_{1\text{зад}}$ , при изменении длины тракта намотки  $l_1$  (при намотке изделий “Призма”), изменении предварительного натяжения  $S_0$ , изменении скорости намотки  $v_2$ . Управление рассчитывалось на 5 интервалов вперед, время каждого интервала 0,01 с. Таким образом, система просчитывает управление на 0,05 с вперед. Результаты моделирования приведены на рисунках 6.44, 6.45.

Моделирование показало, что при намотке изделий “Призма”, когда параметры объекта управления изменяются достаточно быстро, в том числе и скачком, натяжение композиционного материала практически не изменяется во времени (от 2999,5 Н до 3003 Н, или на 0,12% от заданного уровня натяжения).

Проблемой применения такой системы являются:

- процесс пуска системы, перерегулирование здесь достигает 83%;
- разработка достаточно быстрых алгоритмов оптимизации динамических систем.

На наш взгляд, выходом из первого создавшегося положения является разработка системы с переменной структурой, с двумя регуляторами. Пуск системы будет осуществляться при использовании стандартах регуляторов (П или ПИ), а потом (через 0,1-0,2 с) система будет переключаться на цифровой регулятор.

Решение второй проблемы значительно труднее. Проведенные нами исследования показали, что использование стандартных методов оптимизации не позволяет получить быстрый результат. Однако, по всей видимости, здесь можно найти приемлемые решения.

В таблице 6.11 приведены результаты моделирования электропривода с разными регуляторами, рассмотренными ранее [181]. Из приведенной таблицы можно сделать следующие выводы. Наилучшими характеристиками обладает электропривод с оптимальным регулятором, который обеспечивает отклонение натяжения при намотке изделия на 0,12 %.

Таблица 6.11 – Результаты моделирования электропривода  
с разными регуляторами

Вид регулятора	Значение натяжения, Н в процессе намотки		Вариация натяжения	
	минимум	максимум	в Н	в %
П	2943	2977	34	1,13
ПИ	2990	3006	16	0,53
Оптимальный	2999,5	3003	3,5	0,12

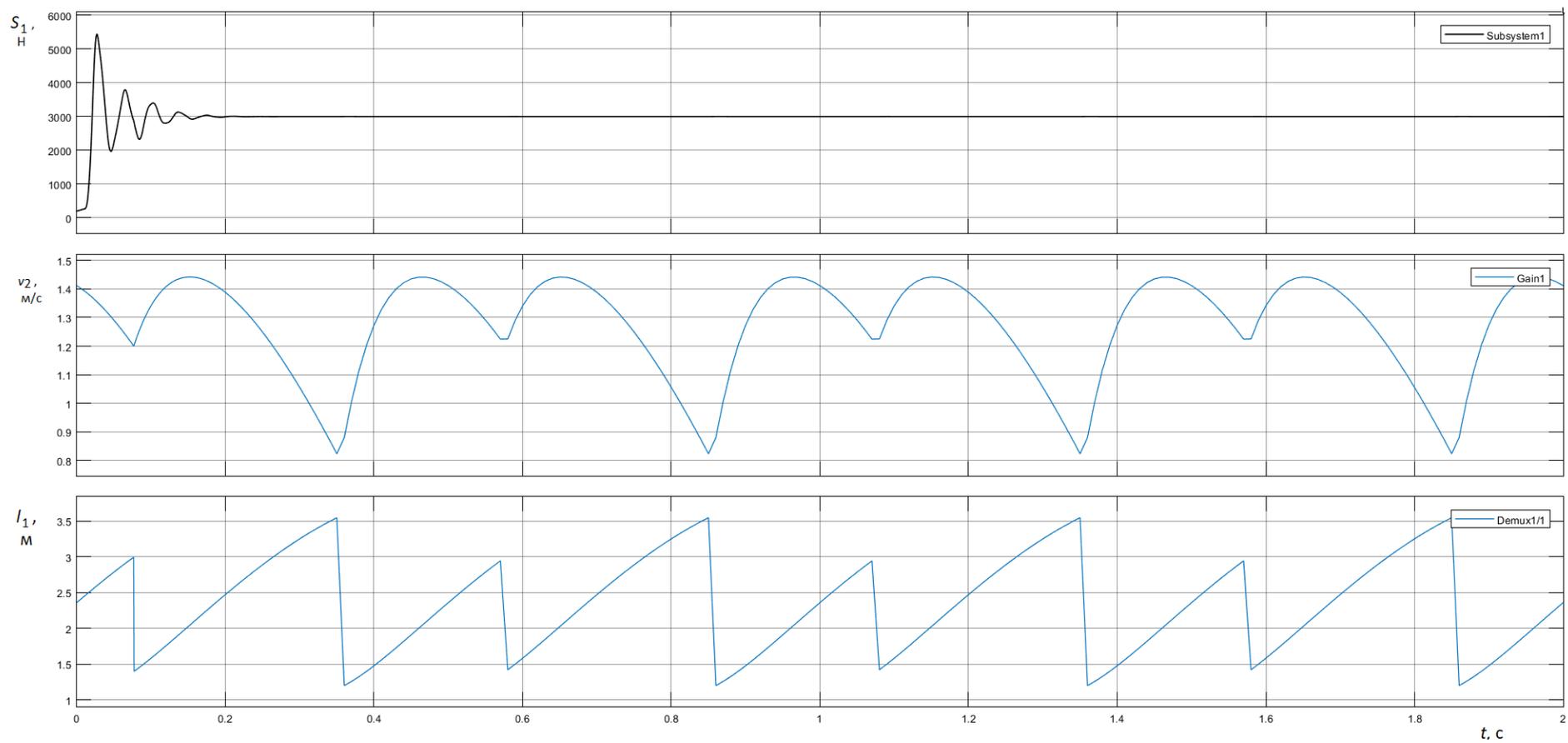


Рисунок 6.44 – Результаты моделирования ЭТС натяжения с прогнозом состояния

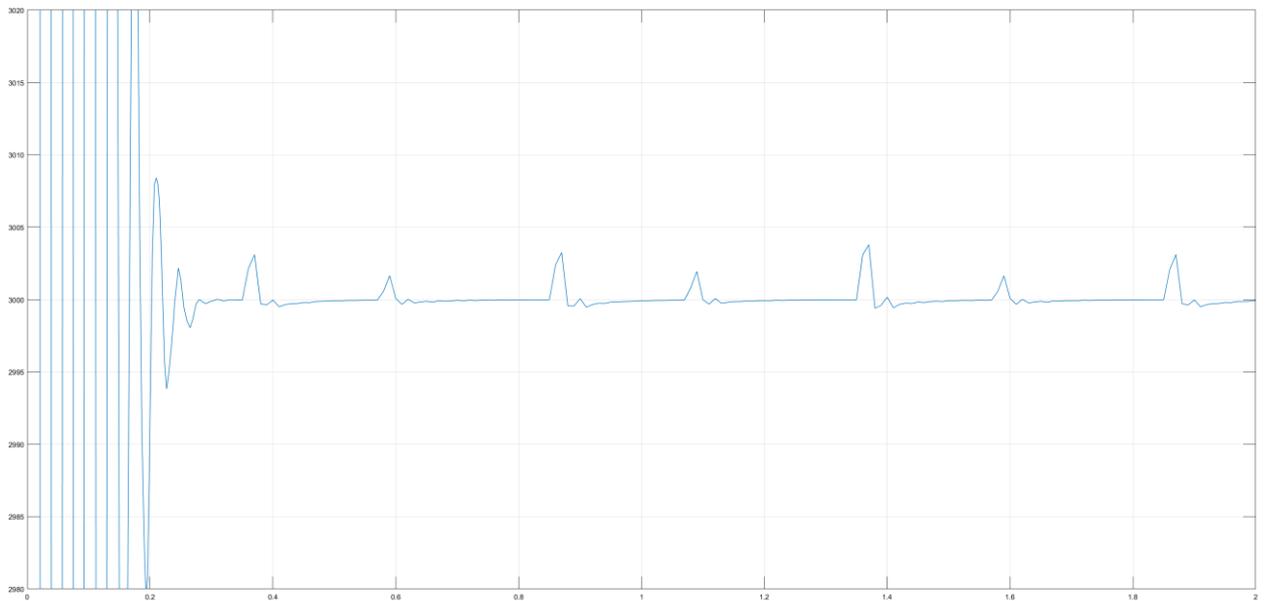


Рисунок 6.45 – Результаты моделирования ЭТС натяжения с прогнозом состояния в крупном масштабе

### **6.5 Электротехническая система регулирования натяжения композиционного материала при изготовлении изделий методом выкладки**

Рассмотрим ЭТС натяжения, используемую при выкладке композиционных изделий.

На рисунке 6.46 приведена структурная схема неизменяемой части объекта управления (ОУ) с линеаризованным описанием упругой ленты без амортизатора, а на рисунке 6.47 с амортизатором [209]. Здесь  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $T_1$  – значения коэффициентов и постоянная времени, полученные при линеаризации уравнения (2.9).

На рисунке 6.48 приведена ЭТС натяжения композиционной ленты при использовании в качестве электродвигателя синхронного двигателя с постоянными магнитами.

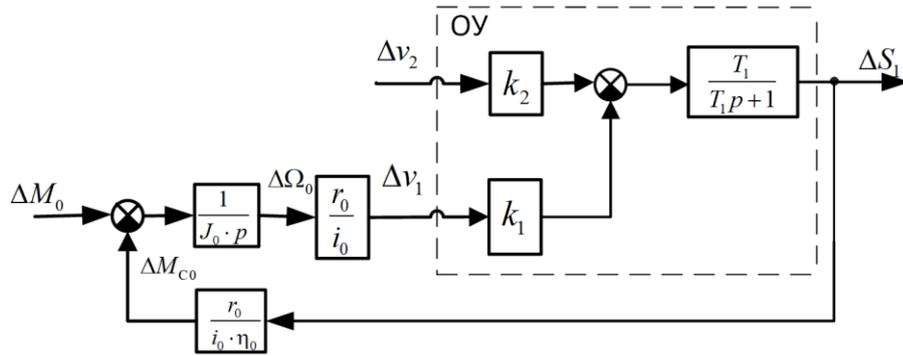


Рисунок 6.46 – Структурная схема неизменяемой части объекта регулирования без амортизатора

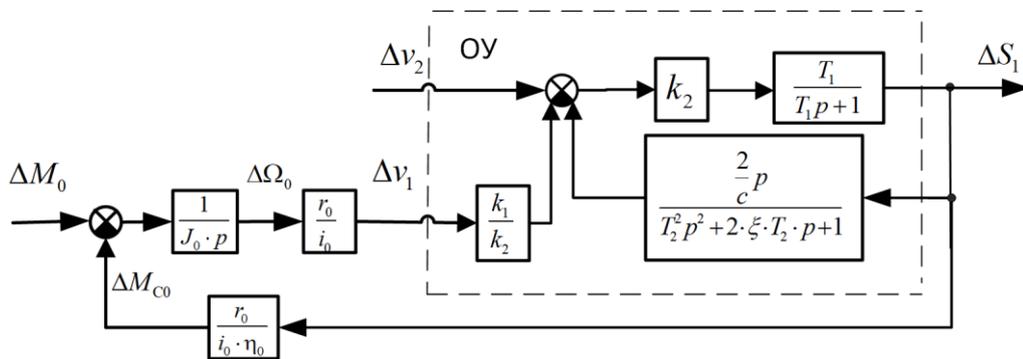


Рисунок 6.47 – Структурная схема неизменяемой части объекта регулирования с амортизатором

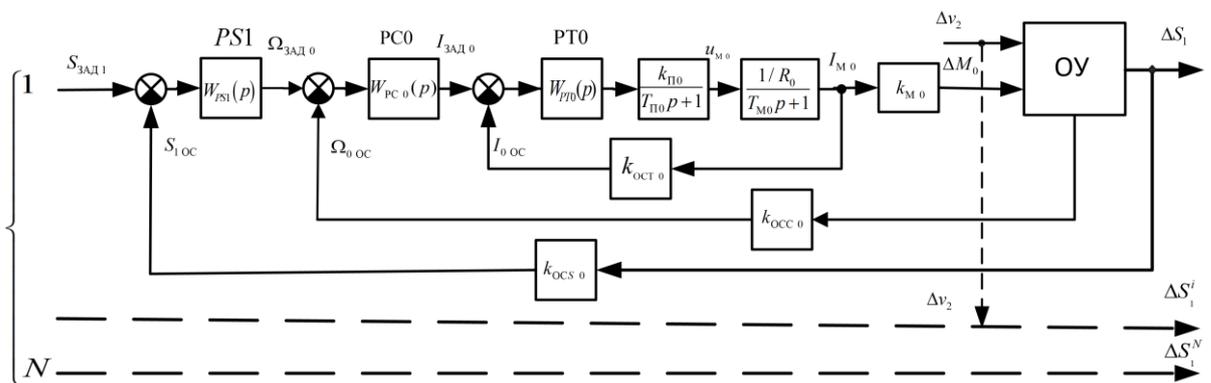


Рисунок 6.48 – Структурная схема ЭТС натяжения при выкладке изделий из композиционных материалов

Представленная система построена по принципу подчиненного управления и содержит внутренний контур тока с регулятором

$W_{PTO}$ , контур скорости с регулятором  $W_{PCO}$  и контур натяжения композиционной ленты с регулятором  $W_{PS}$ . На рисунке 6.48 введены обозначения:  $k_{OCS0}$ ,  $k_{OCC0}$ ,  $k_{OCT0}$  – соответственно коэффициенты обратных связей контуров натяжения, скорости и тока;  $k_{Π0}$ ,  $T_{Π0}$  – коэффициент усиления и постоянная времени транзисторного преобразователя частоты;  $R_0$ ,  $T_{M0}$  – сопротивление двигателя и постоянная времени обмотки статора;  $k_{M0}$  – коэффициент, связывающий значение тока статора с моментом на валу двигателя.

Отметим, что таких систем на выкладочной головке может быть несколько (в нашем случае  $N$ ). Особенностью их построения является то, они имеют общее входное воздействие ( $\Delta v_2$ ), но не имеют внутренних перекрестных обратных связей.

Передаточные функции регулятора тока и скорости являются стандартными:

$$W_{PT}(p) = \frac{(T_{M0}p + 1)}{p \cdot 2T_{\mu} \cdot k_{\Pi 0} \cdot k_{OCT 0} / R_0};$$

$$W_{PC}(p) = \frac{k_{OCT 0} \cdot J_0}{4 \cdot T_{\mu} \cdot k_{OCC 0} \cdot k_M}.$$

Здесь  $T_{\mu}$  малая постоянная времени преобразователя, датчиков тока и скорости.

Передаточная функция регулятора натяжения без учёта использования амортизатора получена нами ранее [209]:

$$W_{PS}(p) = \frac{T_1 p + 1}{p \cdot 8T_{\mu} \cdot T_1 \cdot k_1 \cdot r_0 \cdot k_{OCS 0} / (k_{OCC 0} \cdot i_0)}.$$

Отметим, что в данное выражение входит радиус  $r_0$  (текущий радиус бобины), который в процессе работы изменяется в зависимости от используемых бобин с препрегом.

На рисунках 6.49, 6.50 показаны результаты моделирования разработанной системы. При этом приняты следующие значения параметров ленты и тракта намотки:  $EF = 10000$  Н,  $r_0 = (0,1-0,2)$  м,  $\eta_0 = 0,9$ ;

$k_{\text{OCC}} = 0,1 \text{ Вc/рад}$ ;  $T_{\mu} = 0,001 \text{ с}$ ;  $T_1 = 5 \text{ с}$  постоянная времени ленты;  
 $k_1 = 34000 \text{ Нс/м}$ ;  $k_{\text{OCS}} = 0,025 \text{ В/Н}$ .

Графики, приведенные на рисунках 6.49, 6.50, показывают, что при включении система обеспечивает заданное значение натяжения:

- при  $r_0 = 0,1 \text{ м}$  за  $0,045 \text{ с}$  при перерегулировании  $1,2 \%$ ;
- при  $r_0 = 0,2 \text{ м}$  за  $0,05 \text{ с}$  при перерегулировании  $8,7 \%$ .

В момент времени  $0,2 \text{ с}$  начинается процесс выкладки. Скорость движения композиционной ленты изменяется с  $0$  до  $0,3 \text{ м/с}$ . При этом наблюдается изменение контролируемого натяжения:

при  $r_0 = 0,1 \text{ м}$  от минус  $50 \text{ Н}$  с последующим восстановлением требуемого натяжения за  $5 \text{ с}$ ;

при  $r_0 = 0,2 \text{ м}$  от  $37 \text{ Н}$  с последующим восстановлением требуемого натяжения за  $3,7 \text{ с}$ .

Данные показатели являются неудовлетворительными.

Работа системы существенно улучшается при использовании обратной связи по основному возмущающему воздействию – скорости выкладки  $v_2$ . Обратная связь подается на сумматор, включённый между регуляторами натяжения и скорости. Передаточная функция корректирующего звена имеет вид:

$$W_{\text{KV}}(p) = \frac{i_0 \cdot k_{\text{OCC}} (8 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1)}{r_0} = \frac{i_0 \cdot k_{\text{OCC}} (0,008 \cdot p + 1)}{r_0}.$$

Структурная схема ЭТС натяжения с учетом корректирующего устройства показана на рисунке 6.51.



На рисунках 6.52, 6.53 приведены графики моделирования системы регулирования натяжения в процессе выкладки изделий из композиционных материалов с использованием корректирующего устройства. Процесс включения системы не отличается от предыдущего случая. В момент времени 0,07 с начинается выкладка. Скорость движения ленты изменяется с 0 до 0,3 м/с. В момент времени 0,12 с скорость движения ленты изменяется с 0,3 до 0 м/с.

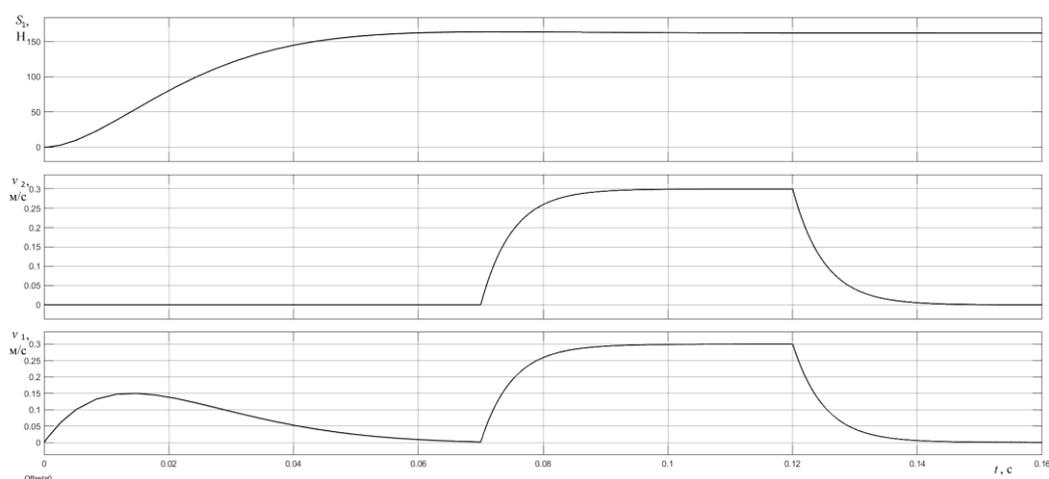


Рисунок 6.52 – Графики моделирования системы регулирования натяжения в процессе работы при наличии обратной связи по скорости движения ленты ( $r_0 = 0,1$  м)

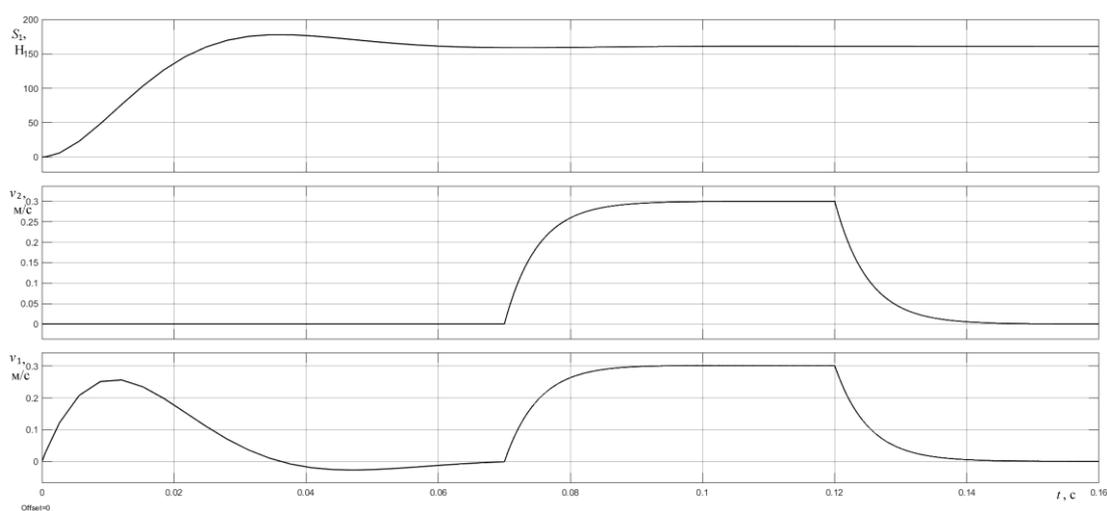


Рисунок 6.53 – Графики моделирования системы регулирования натяжения в процессе работы при наличии обратной связи по скорости движения ленты ( $r_0 = 0,2$  м)

Моделирование показывают, что использование предлагаемого корректирующего устройства и современной системы управления позволяет отказаться от амортизатора и получить систему регулирования, которая обеспечивает поддержание натяжения композиционной ленты в процессе выкладки на заданном уровне.

### **Выводы по главе**

1. Проведены расчеты выбора электродвигателей, используемых при намотке различных изделий. Показано, что форма изделий влияет на нагрев электродвигателя, а следовательно, на его мощность. Показано, что при “мокрой” намотке при использовании в натяжном устройстве червячного редуктора несколько завышена требуемая мощность используемого электродвигателя, которые могут длительное время находиться в состоянии покоя под номинальной нагрузкой, тем не менее не требуется.

2. В соответствии с методикой синтеза электротехнических систем регулирования натяжения при намотке изделий “Конус” из “сухой” и “мокрой” композиционной ленты произведен расчет и моделирование систем регулирования натяжения. Расчеты и моделирование показали, что синтезированная ЭТС обеспечивает заданные показатели качества регулирования при намотке изделий “Конус”.

3. В соответствии с разработанными структурными схемами рассчитаны и промоделированы электротехнические системы регулирования натяжения при намотке изделий “мокрой” или “сухой” композиционной лентой с адаптивным регулятором. Расчеты и моделирование показали, что синтезированные ЭТС обеспечивают заданные показатели качества регулирования при изменении параметров намотки в широких пределах.

4. Промоделирована работа ЭТС с прогнозом состояния системы. Показана перспективность применения такого регулятора при намотке изделий сложной геометрической формы.

5. Синтезированный регулятор и предложенное корректирующее устройство позволяют получить качественную электротехническую систему регулирования натяжения при выкладке изделий из композиционных материалов без использования амортизатора.

## **7. ПРАКТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАТЯЖЕНИЯ**

### **7.1 Задачи и условия выбора элементной базы электротехнических систем регулирования натяжения**

Одним из этапов проектирования ЭТС натяжения являются обоснование и выбор элементной базы неизменяемой части электропривода. При выборе элементов электропривода следует учитывать их технические характеристики, надежность и стоимость. Отметим, что при выборе технических средств для оснащения станков, предназначенных для намотки изделий с высокими требованиями условиям эксплуатации, на первое место выдвигается вопрос надежности и технических характеристик изделия. При выборе технических средств для оснащения станков, предназначенных для намотки изделий с невысокими требованиями к условиям эксплуатации намотанных изделий наряду с такими критериями как надежность и технические характеристики изделия, встает вопрос цены изделия.

Отметим, что требования к габаритным и весовым характеристикам как самого привода, так и системы его управления не предъявляются. Намоточное оборудование представляет из собой достаточно массивное оборудование, на котором можно закрепить современный привод с натяжным устройством.

Требования к энергетическим характеристикам привода и системы управления также не предъявляются. Потребляемая системой регулирования натяжения мощность несущественна по сравнению с мощностью, потребляемой всем намоточным станком. Источником энергии является трехфазная сеть переменного тока, это позволяет использовать различные приводы – как электрические постоянного или переменного тока, так и пневмоприводы или гидроприводы. В главе 3 нами рассмотрены варианты использования электропривода и пневмопривода, показано, что для намоточного оборудования наиболее целесообразно использовать электрические приводы. Исключением являются комбинированные натяжные

устройства для “мокрой” намотки, использующие электрический и пневматический приводы.

Если рассматривать эксплуатационные требования, то здесь во главу угла становятся требования по надежности оборудования. Процесс намотки композиционных изделий не должен прерываться на долгое время из-за возможности необратимых физико-химических превращений, происходящих в наматываемом изделии, и, соответственно брака изделия. Как правило, стоимость изделия достаточно высока. Поэтому данный вопрос весьма актуален.

Точное измерение натяжения ленты необходимо для обеспечения постоянного качества продукции при намотке и максимальной производительности оборудования. Датчик натяжения, как и любой другой датчик, состоит из чувствительного элемента и преобразователя сигнала чувствительного элемента в стандартный сигнал. Для измерения натяжения можно использовать несколько принципов.

Измерения колебаний наматываемого композиционного материала, частота колебаний которого зависит от натяжения [210-212]. Данный метод широко используется для определения натяжения канатов, металлических проводов, тросов и других длинномерных изделий. Отметим, что частота колебаний композиционного материала при его намотке, кроме натяжения, зависит и от массы этого колеблющегося материала. Масса суммируется из массы наполнителя и связующего. При обрыве нескольких нитей или изменении соотношения наполнитель – связующее показания датчика будут существенно отличаться от реального значения натяжения композиционного материала. Поэтому этот способ не обеспечивает точного измерения натяжения и не получил практического внедрения на реальном намоточном оборудовании.

Наиболее простым является измерение усилия, создаваемого композиционным материалом при его прохождении через ролики тракта намотки станка, рисунок 7.1.

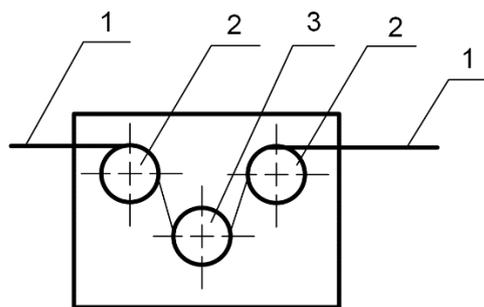


Рисунок 7.1 – Измеритель натяжения композиционной ленты:

1 – композиционная лента; 2 – входной и выходной ролики-измерители; 3 – измерительный ролик измерителя натяжения.

Композиционная лента, проходя по измерительному ролику 3, прикладывает к нему некоторое усилие. Это усилие прямо пропорционально натяжению композиционного материала. Измерить его можно несколькими способами. Если ролик 3 подпружинить, то можно измерять перемещение пружины. До появления качественных клеев, позволяющих приклеить тензорезистор к поверхности, данный метод измерения натяжения был основным [56,77,79]. Недостаток данного метода заключается в том, что перемещение, даже незначительное, подвижного ролика 3 изменяет угол охвата роликов композиционной лентой и как следствие, усилие на ролике. Вопросам улучшения точности измерения натяжения при значительном перемещении ролика 3 (до 2 мм) посвящена литература [56,77,79]. С появлением качественных клеев удалось осуществить измерения усилия, приложенного к ролику 3, с очень маленьким его перемещением (до 1–2 мкм), при этом можно использовать тензорезисторы (металлические или полупроводниковые) или магнитоупругие элементы.

Основные технические характеристики измерителей усилий приведены в таблице 7.1 [212].

Таблица 7.1 – Основные технические характеристики измерителей усилий

Наименование	Ед. изм.	Тензорезисторные		Магнитоупругие	
		металлические	полупроводниковые	с изменением магнитной проницаемости	анизотропные
Номинальный диапазон измеряемых усилий	Н	$10^2 - 5 \cdot 10^6$		$10^{-3} - 5 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^7$
Температурный дрейф нуля	% град <sup>-1</sup>	0,001 – 0,005	0,005 – 0,04	0,02 – 0,05	0,01 – 0,05
Линейная погрешность	%	0,01 – 0,1	0,1 – 0,3	1,0 – 5,0	0,1 – 2,0
Класс точности при рабочей температуре		0,025 – 0,06	0,1 – 0,25	1,0 – 2,5	0,4 – 2,5
Верхняя граница рабочей частоты	Гц	до 5000		до 1000	

Из приведенных данных видно, что наиболее целесообразно в измерителях натяжения использовать тензометрические датчики усилий с металлическими чувствительными элементами. Данный чувствительный элемент при измерении практически не изменяет положение ролика в пространстве, имеет высокие показатели по температурному дрейфу, погрешности измерений, классу точности и быстродействию. В настоящее время промышленностью ряда стран выпускаются измерители натяжения с использованием данного чувствительного элемента [211-213].

Фирма Метротекс, расположенная в Московской области [213], выпускает широкий ассортимент аппаратуры для текстильных изделий, химических волокон. В том числе фирма выпускает измерители натяжения. Однако, максимальное измеряемое натяжение этих измерителей не превышает 200 Н при достаточно большой погрешности измерений, доходящей до 2 %.

Датчики усилия и тензодатчики производятся в мире многими фирмами. Компания FMS- Force Measuring Systems AG (Швейцария) [214] изготавливает тензометрические измерители натяжения с точностью (0,3–0,5) % от номинального значения. Оборудование компании FMS- Force Measuring Systems AG распространяется в РФ через компанию ООО «СервоКИП» [215], расположенную в Нижнем Новгороде. Температурный диапазон работы предлагаемых датчиков от - 40°C до 160°C. Встроенные механические ограничители защищают датчик от перегрузок. Датчики применяются для контроля натяжения бумаги, нитей, ткани, пленки, провода и кабеля, листового металла, алюминия, стали.

Рассмотрим датчики, изготавливаемые итальянской фирмой Re spa [216]. Эти датчики успешно применяются по всему миру и предоставляют экономически эффективное решение запросов своих клиентов. Диапазон датчиков удовлетворяет все требования применений и позволяет использовать их для измерения значения натяжения всех материалов, включая композиционные материалы.

Рассмотрим датчики нагрузки серии SF. Максимальная нагрузка датчиков составляет 25000 Н, имеются защита от перегрузки. Датчики спроектированы с фланцевым креплением для крепления как напрямую на концах вала, измеряющего натяжение, так и с валом, который охватывает материал, натяжение которого измеряется. Благодаря компактному размеру, датчики можно использовать в ограниченном пространстве. Они обладают высокой надежностью. Внешний вид датчиков показан на рисунках 7.2.



Рисунок 7.2 – Внешний вид датчиков серии CF фирмы Re spa

Класс точности датчиков 0,5%. Максимальная перегрузочная способность составляет 300% от номинального значения. Выходной сигнал 4-20 мА.

## **7.2 Электротехнические системы регулирования натяжения, разработанные, изготовленные и внедренные на намоточном оборудовании**

В соответствии с теоретическими выводами, полученными в работе, разработаны, изготовлены, прошли лабораторные испытания и внедрены в производство ряд электротехнических систем регулирования натяжения на намоточных станках СНП-36, КУ-489Ф3, КУ-421М, КУ-479Ф3.

Рассмотрим подробнее одну из ЭТС [197,202].

Автоматизированная система контроля и регулирования технологических параметров (АСКРТП) предназначена для автоматического регулирования заданных технологических параметров процесса намотки полимерных композиционных материалов (ПКМ) на намоточном станке с ЧПУ модели СНП-36. Специальный намоточный станок СНП-36 может

осуществлять многокоординатную намотку изделий “мокрым” и “сухим” способами.

В процессе “сухой” намотки изделий АСКРТП должна обеспечить стабилизацию усилия натяжения ленты или ткани, температуры их нагрева ткани и температуры прокатного ролика.

В процессе “мокрой” намотки изделий из композиционных материалов АСКРТП должна обеспечить стабилизацию усилия натяжения пропитанной ленты, сформированной из жгутов, температуры связующего в пропиточной ванне и процентного содержания связующего в пропитанной ленте.

Условия эксплуатации АСКРТП.

Температура окружающего воздуха от +5°С до +60°С.

Относительная влажность воздуха при 30° С от 40% до 90%.

Атмосферное давление от 84,0 кПа до 106,7 кПа.

Вибрации с частотой до 25 Гц и амплитудой не более 0,1мм.

Технические характеристики АСКРТП представлены в таблице 7.2.

Состав системы.

В АСКРТП входят следующие системы управления, контроля и мониторинга технологического процесса намотки материала:

- система автоматического управления натяжением материала (САУ НМ);
- система автоматического управления температурой связующего в пропиточной ванне (САР ТС);
- система контроля содержания связующего в пропитанной ленте (СКСС);
- система контроля и регулирования температуры нагревательной печи и прикатного ролика (СКРТПР);
- система мониторинга и регистрации технологических параметров (верхний уровень АСКРТП).

Таблица 7.2 – Технические характеристики АСКРТП станка модели СНП-36

Наименование показателей	Значение показателей
Намотка изделий методом “сухой” намотки	
Применяемый материал	Стеклолента Стеклоткань
Скорость укладки, м/мин	от 3 до 18
Наибольшая ширина ленты, мм	150
Наибольшая ширина стеклоткани для подмотки технологических утолщений, мм	300
Пределы усилия натяжения ленты/ткани, Н	от 250 до 2000
Пределы усилия прикатки наматываемого слоя, Н	от 100 до 3000
Температура поверхности прикатного ролика, град.	до 150
Температура поверхности нагревательной печи, град.	до 250
Намотка изделий “Кокон” методом “мокрой” намотки	
Применяемый материал	Стекложгут Органожгут Углежгут
Скорость намотки, м/мин	от 3 до 18
Наибольшая масса оправки с изделием, кг	10000
Наибольшее количество паковок из стекло – и органожгута, устанавливаемых на шпулярнике, шт.	24
Наибольшая ширина сформированной ленты из стекло – и органожгута, мм	100
Наибольшее натяжение сформированной ленты из стекло – и органожгута, Н	4000
Наибольшее количество паковок из углежгута, устанавливаемых на шпулярнике, шт.	30
Наибольшая ширина сформированной ленты из углежгута, мм	50
Наибольшее натяжение сформированной ленты из углежгута, Н	1200
Наибольшая ширина стеклоткани для подмотки технологических утолщений, мм	300
Род тока питающей сети напряжение питающей сети, В частота тока, Гц потребляемая мощность, кВА	Переменный, трёхфазный 380±5% 50 ±1 8,0

Рассмотрим процесс “сухой” намотки изделий из композиционных материалов. Схематично он приведен на рисунке 7.3.

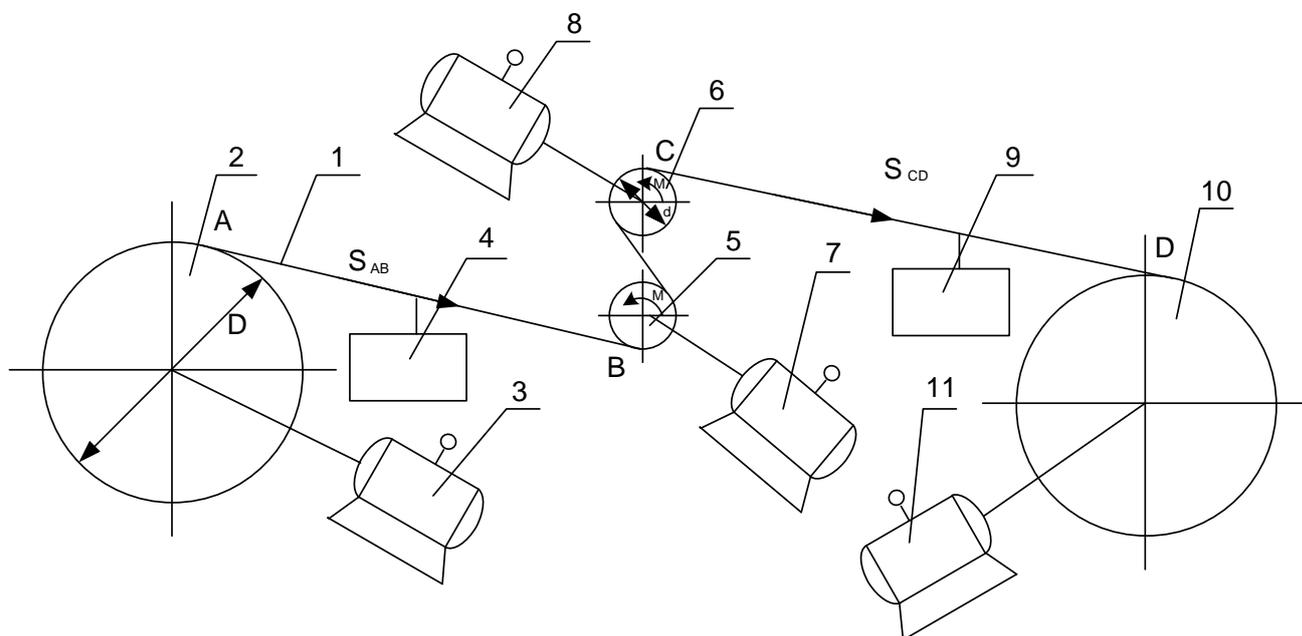


Рисунок 7.3 – Тракт намотки “сухой” ленты

“Сухой” материал 1 сматывается с бобин 2. Бобина с материалом 2 связана с первым тормозным устройством 3. В процессе намотки “сухого” материала с подающей бобины натяжение на участке АВ измеряется датчиком 4 и поддерживается путем изменения тормозного момента устройства 3. В качестве тормозного устройства используется синхронный двигатель 1FK7060-5, управляемый от преобразователя Sinamics S120 фирмы Siemens. Натяжение на участке CD определяется как натяжением на участке АВ, так и тормозным моментом вращающихся роликов 5,6, связанных с тормозными механизмами 7,8. В качестве тормозных механизмов здесь также используются синхронные двигатели 1FK7060-5, управляемые от преобразователей Sinamics S120 фирмы Siemens. Для реализации регулирования натяжения ткани до 400 кг используются обрезиненные ролики диаметром 150 мм. Ролики связаны с электродвигателями через планетарные редукторы фирмы Apex Dinamics - модели AFR 100-S2-P2. Система сделана

так, что тормозной момент на валах двигателей 7,8 поддерживается одинаковым. Это устраняет неравномерную нагрузку на приводы и уменьшает вероятность проскальзывания материала по обрешеченным роликам. Далее “сухая” лента проходит датчик натяжения 9 и наматывается на изделие 10. Изделие приводится во вращение электродвигателем 11.

Особенностью рассматриваемой схемы является отсутствие измерителя диаметра бобины с материалом 2. В этом случае для поддержания постоянного натяжения на участке АВ в процессе изменения диаметра бобины 2 можно синтезировать систему регулирования со стабилизацией мощности торможения. Однако в этом случае не удастся получить хорошее качество регулирования натяжения. Поэтому в системе использован датчик натяжения 4.

На рисунке 7.4 приведена функциональная схема ЭТС натяжения. Рассмотрим работу системы.

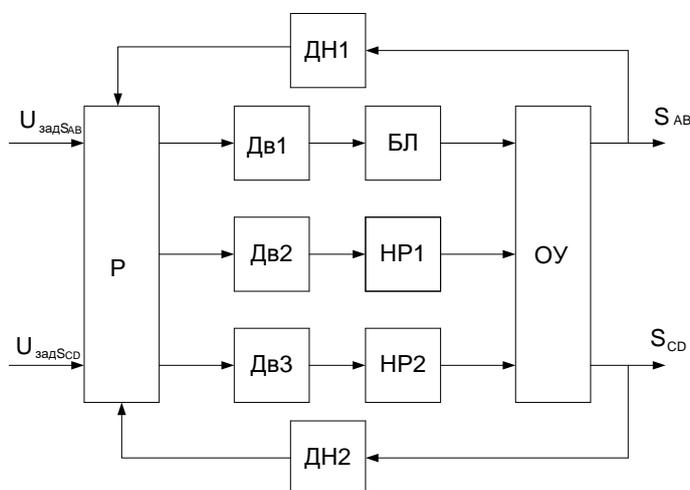


Рисунок 7.4 – Функциональная схема ЭТС натяжения

Сигнал о требуемом уровне натяжения  $U_{задSAB}$  на участке АВ подается на вход регулятора Р. Сюда поступает и сигнал с датчика ДН1 о реальном значении натяжения на участке АВ. На основании этой информации регулятор формирует управляющее воздействие на синхронный двигатель Дв1,

связанный с бобиной с “сухой” лентой БЛ. Изменяя тормозной момент на валу двигателя изменяем и натяжение ленты  $S_{AB}$ . ОУ – объект управления, упругая “сухая” лента.

Натяжение на участке намотки формируется на основании информации о требуемом натяжении на участке ВС ( $U_{задSBC}$ ) и реальном натяжении  $S_{CD}$ , измерено измерителем натяжения ДН2. Управляющие воздействия на двигатели Дв2, Дв3 формируются также регулятором Р. Регулятор при этом формирует их так, что моменты, развиваемые двигателями, должны быть одинаковыми. Двигатели через редукторы связаны с натяжными роликами НР1 и НР2. Последние воздействуют на объект управления (ОУ) – упругую композиционную ленту.

На рисунке 7.5 представлена более развернутая функциональная схема привода бобины ленты.

На рисунке 7.6 представлена функциональная схема привода роликов натяжного устройства.

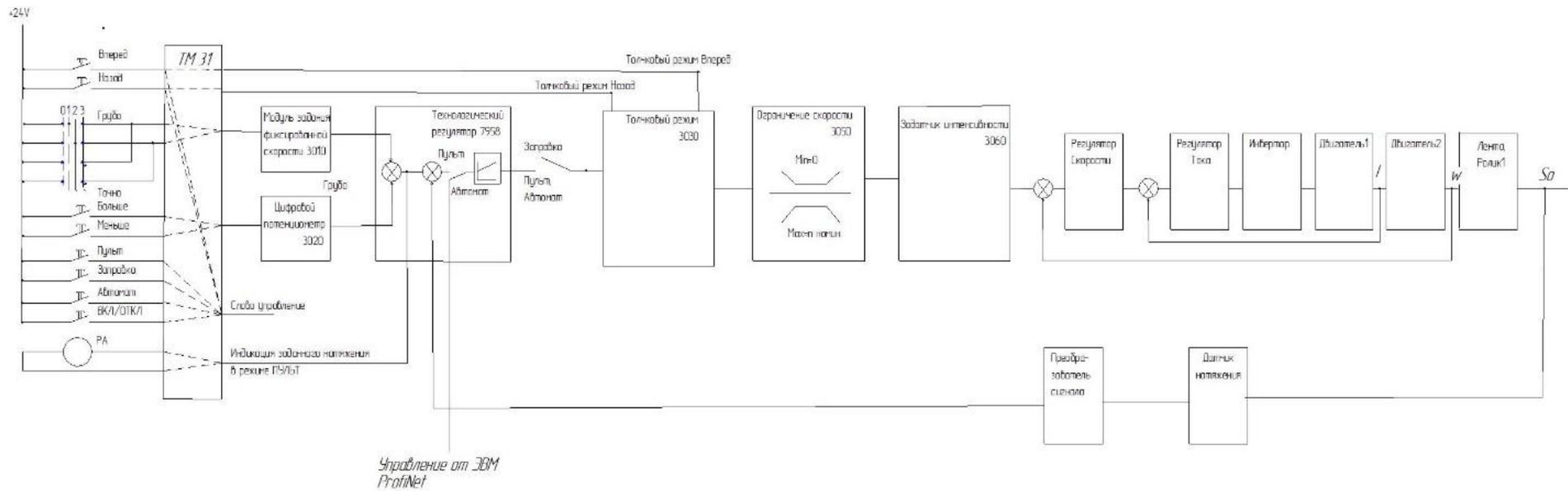


Рисунок 7.5 – Функциональная схема электропривода управления бобины с лентой

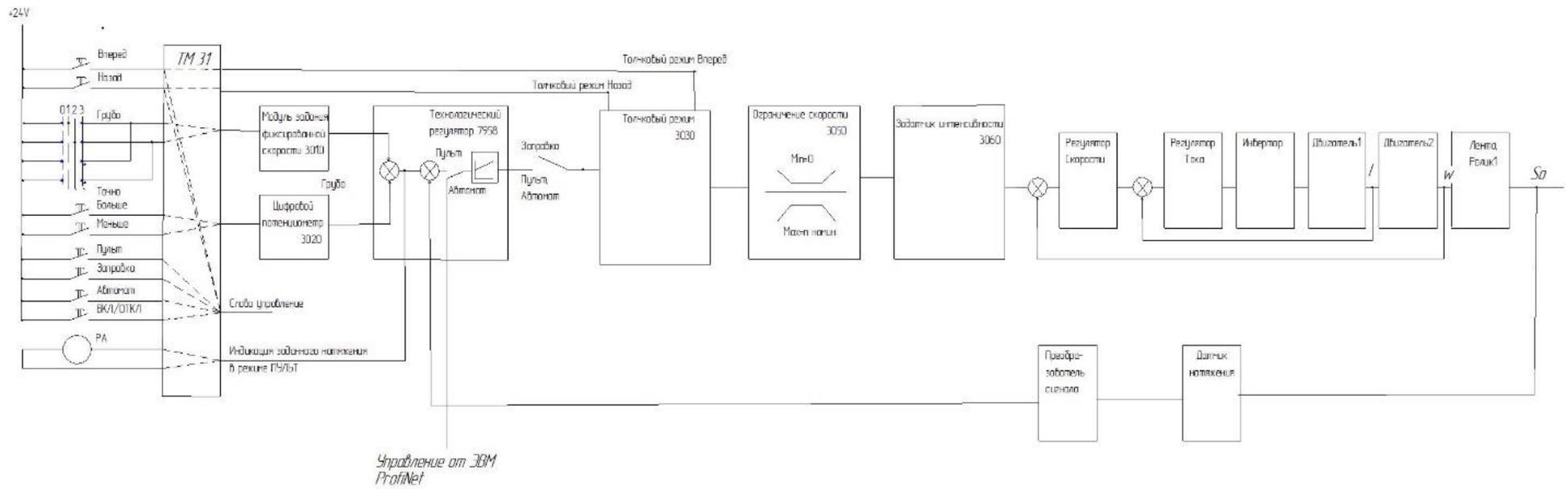


Рисунок 7.6 – Функциональная схема привода роликов натяжного устройства

При намотке изделий по “мокрой” технологии регулирование натяжения осуществляется за счет изменения угла охвата лентой невращающегося ролика. Функциональная схема системы регулирования натяжения для данного случая приведена на рисунке 7.7.

Особенностью построения данной схемы является наличие пневматического цилиндра, управляемого от трех пневматических клапанов. Клапаны управляются в зависимости от момента, развиваемого двигателем. При превышении заданного уровня момента двигателя открывается первый клапан, в пневматический цилиндр постепенно нагнетается воздух. При уменьшении момента клапаны выключаются. При достижении отрицательного момента заданного уровня включается второй клапан, и давление в пневмоцилиндрах начинает уменьшаться. При остановке привода открывается третий клапан, давление резко сбрасывается и привод возвращается в исходное состояние, обеспечивающее минимальный угол охвата лентой роликов натяжного устройства.

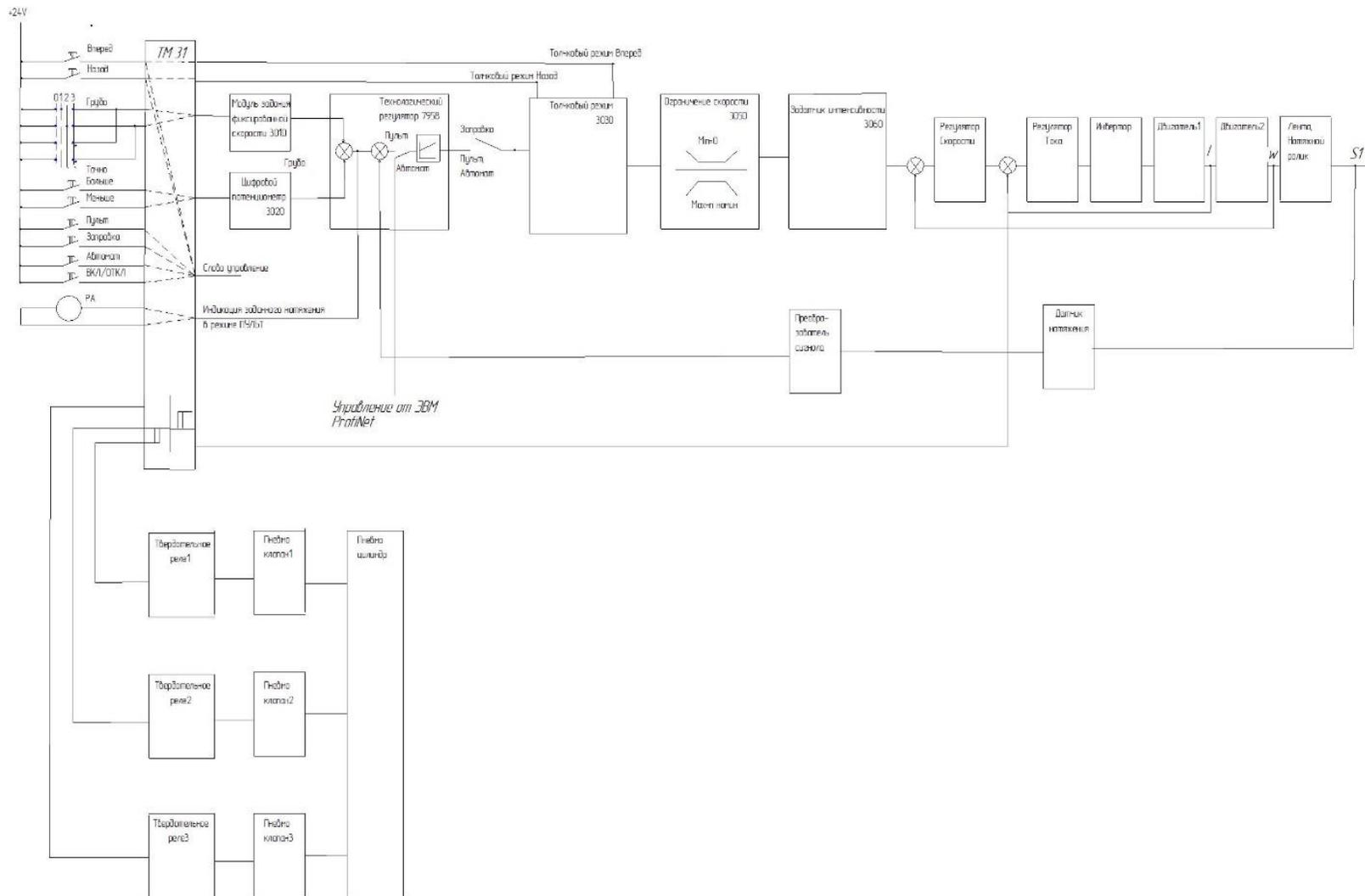


Рисунок 7.7 – Функциональная схема системы регулирования натяжения “мокрой” ленты

Автоматизированная система контроля и регулирования технологических параметров представляет собой двухуровневую систему сбора и обработки данных, целью функционирования которой являются поддержание в заданных пределах основных режимных параметров намотки ленты на трактах “мокрой” и “сухой” намотки, а также осуществление оперативного контроля, супервизорного управления (задание переменных) и протоколирования технологических параметров процесса намотки.

Управляющее устройство, реализовано с использованием программируемого логического контроллера Simatic S7-300 и CPU, для регулирования усилий в трактах “сухой” и “мокрой” намотки материала применена система приводов Sinamics S-120 фирмы Siemens.

Система автоматического управления натяжением материала (САУ НМ) предназначена для стабилизации натяжения ленты или ткани при “сухой” и “мокрой” намотке изделий. В состав САУ НМ входят две отдельно работающие системы управления:

- система автоматического управления натяжением ленты/ткани тракта “сухой” намотки (САУ НСЛ), реализует управление электроприводов бобины и двух роликов;

- система автоматического управления натяжением ленты тракта “мокрой” намотки (САУ НМЛ), реализует управление перемещением натяжного ролика с помощью электропривода и пневмоцилиндров.

Система управления усилием натяжения материала при “сухой” и “мокрой” намотке изделий реализует все виды защит, обеспечивающие безопасность функционирования соответствующих механизмов.

Конструктивно САУ НМ состоит из: стойки управления, трёх пультов управления, четырёх механизмов натяжения материала.

Внешний вид шкафа управления станком СНП-36 показан на рисунке 7.8.



Рисунок 7.8 – Внешний вид шкафа управления станком СНП-36

На рисунке 7.9 приведены результаты испытаний системы натяжения “мокрого” композиционного материала.

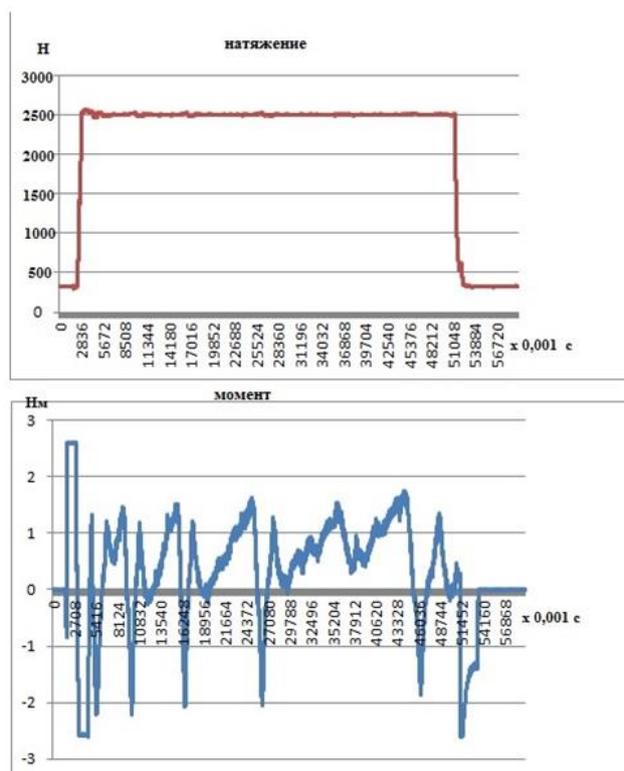


Рисунок 7.9 – Осциллограммы исследования системы регулирования натяжения “мокрого” композиционного материала

### 7.3 Перспективы и направления дальнейшего развития научных исследований

Композиционные изделия в настоящее время находят широкое применение во многих отраслях промышленности. Большое количество деталей изготавливается методом выкладки или намотки. Для уменьшения себестоимости производства актуальным является создание современных намоточных станков и оборудования, которое используется для выкладки изделий. Для осуществления этой задачи следует дополнительно решить перечисленные ниже научные проблемы:

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

- разработать алгоритмы и методики адаптации ЭТС натяжения в реальном времени при изменении в процессе намотки модуля упругости композиционного материала для “сухой” и “мокрой” намотки;

- 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, исполнительных механизмов и т. д.;

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

### **Выводы по главе**

1. Для построения систем регулирования натяжения необходимо измерять:

- ток электродвигателя, используя шунт, трансформатор тока или датчик Холла;

- скорость вращения электродвигателя, используя тахогенератор или энкодер;

- положение роликов натяжного устройства, используя энкодеры, вращающиеся трансформаторы, индуктосины или оптические датчики;

- натяжение целесообразно измерять с помощью тензометрических датчиков, встроенных в измеритель натяжения.

2. Рассмотрены задачи и условия выбора технических средств для систем регулирования натяжения. Показано, что в качестве измерителей натяжения целесообразно применять тензометрические датчики нагрузки (например, фирмы Re spa) с высокой перегрузочной способностью и с высокой точностью измерения.

3. Описана разработанная система регулирования натяжения для “сухой” и “мокрой” композиционной ленты, применяемая на станке СНП-36 Коломенского завода ООО “Механик”.

4. Сформулированы перспективы и направления дальнейшего развития научных исследований по развитию теории и практика создания электротехнических систем для намотки и выкладки изделий из композиционных материалов.

## 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 создания электротехнических систем, обеспечивающих повышение точности натяжения композиционного материала при намотке и выкладке изделий. Создание и внедрение разработанных электротехнических систем позволяет обеспечить высокие качественные характеристики наматываемых изделий. В результате выполненных исследований получены следующие основные выводы и результаты.

1. Все наматываемые изделия объединены в зависимости от требований к прочностным характеристикам и геометрической формы в два класса и пять подклассов. Предложенная классификация позволяет обоснованно выбирать структуру и состав электротехнической системы натяжения и скорости движения композиционных лент, а также требуемые алгоритмы управления такими системами.

2. Предложена методика определения требований к автоматизированным электроприводам по точности отработки программ намотки по критериям допустимого отклонения от заданного значения целевой функции, характеризующей качество изделий, и ограничений, связанных с технологическими требованиями. Эти требования являются одними из основных исходных данных при синтезе электротехнических систем регулирования натяжения композиционной ленты.

3. Разработаны математические модели упругой композиционной ленты, элемента ЭТС натяжения, которые, в отличие от известных, описывают динамические процессы, возникающие при намотке различных изделий из композиционных материалов. Для решения задач синтеза ЭТС проведена линеаризация математического описания упругой ленты, исследовано влияние процесса намотки на коэффициенты линеаризации, что позволяет

существенно упростить математические описания, использовать его при создании современных электротехнических систем регулирования натяжения любой геометрической формы изделий из композиционных материалов.

4. Предложены методы синтеза ЭТС натяжения, используемые при намотке и выкладке изделий из композиционных материалов.

5. Рассмотрены 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, к условиям эксплуатации которых не предъявляются особые требования, целесообразно использовать ферропорошковые тормозные устройства (для “сухой” намотки).

6. Впервые получены аналитические выражения для натяжных устройств для определения статического и динамического моментов, возникающих на валу двигателя натяжного устройства, максимального статического момента от угла поворота роликов или их перемещения. Предложены рекомендации по выбору натяжных устройств при намотке изделий из “мокрого” композиционного материала.

7. Предложена новая методика выбора мощности привода натяжных устройств при намотке, учитывающая динамические моменты, связанные с изменением параметров при намотке композиционных изделий, позволяющая обоснованно выбирать двигатель привода натяжного устройства.

8. Разработан новый метод синтеза электротехнических систем регулирования натяжения композиционной ленты при изготовлении изделий различной формы, основанный на особенностях свойств тракта намотки изделий, который в отличие от существующих позволяет осуществить синтез ЭТС натяжения композиционных материалов. Метод позволяет комплексно проектировать ЭТС натяжения, используемые при намотке изделий из композиционных материалов изделий различной формы:

- методика синтеза ЭТС натяжения при намотке изделий “Конус”, к условиям эксплуатации которых не предъявляются особые требования, использование данной методики обеспечивает заданные показатели качества регулирования при изменении параметров намотки в ограниченном диапазоне;

- методика синтеза ЭТС натяжения при намотке изделий “Кокон”, “Шар” с текущей идентификацией параметров объекта управления, адаптацией регулятора системы;

- методика синтеза ЭТС натяжения с прогнозом состояния, используемой при намотке изделий сложной геометрической формы, основанная на оценке текущего и прогнозе следующих возможных состояний параметров намотки.

9. Полученные результаты исследования использованы:

- при создании ЭТС натяжения для “сухой” и “мокрой” композиционной ленты, применяемых на станке СНП-36 Коломенского завода ООО “Механик”, при изготовлении конструкций ракеты-носителя “Союз-5” на станках КУ-489Ф3, КУ-421М, КУ-479Ф3;

- в ООО «Пластик Энттерпрайз» 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.

10. Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составит 1 042 млн. рублей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Росато, Д. В. Намотка стеклонитью / Д. В. Росато, К. С. Грове. - Москва : Машиностроение, 1969. - 310 с.
2. Композиционные материалы : справочник/ В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин [и др.] ; под общей ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. - Москва : Машиностроение, 1990. - 512 с.
3. Головкин, Г. С. Научные основы производства изделий из термопластиковых материалов : монография / Г. С. Головкин, В. П. Дмитриенко. - Москва : НИЦ Енфра-М, 2016. - 477 с.
4. Боголюбов, В. С. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении / В. С. Боголюбов, А. Ю. Братухин, О. С. Сироткин. - Москва : Готика, 2003. - 515 с.
5. Композиционные материалы в конструкции летательных аппаратов : сборник статей : пер. с англ. / под. ред. А. Л. Абибов. - Москва : Машиностроение, 1975. - 272 с.
6. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / Л. Нильсен. - Москва : Химия, 1978. - 312 с.
7. Промышленные полимерные композиционные материалы / М. Ричардсон, Д. Филлипс, Б. Харрис [и др.] ; под ред. М. Ричардсона. - Москва : Химия, 1980. - 472 с.
8. Болотин, В. В. Механика многослойных конструкций / В. В. Болотин, Ю. Н. Новичков. - Москва : Машиностроение, 1980. - 375 с.
9. Образцов, И. Ф. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов / И. Ф. Образцов, В. В. Васильев, В. А. Бунаков. - Москва : Машиностроение, 1977. - 144 с.
10. Комков, М. А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения: учебное пособие / М. А. Комков, В. А. Тарасов. - Москва : Изд во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. - 431 с.

11. Цыплаков, О. Г. Основы формирования стеклопластиковых оболочек / О. Г. Цыплаков. - Москва : Машиностроение, 1968. - 176 с.
12. Справочник по композиционным материалам : в 2-х кн.; кн. 2 / под ред. Дж. Любина ; Б. Э Геллера ; пер. с англ. А. Б. Геллера [и др.] - Москва : Машиностроение, 1988 . - 584 с.
13. Антипов, Ю. В. Полимерные композиционные материалы. Технологии и применение / Ю. В. Антипов, А. А. Кульков, Н. В. Пименов // Высокомолекулярные соединения. Серия С. - 2016. - Т. 58, № 1. - С. 29-41.
14. Каблов, Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года / Е. Н. Каблов // Авиационные материалы и технологии. - 2015. - №1 (34). - С. 3-33.
15. Каблов, Е. Н. Композиты: сегодня и завтра / Е. Н. Каблов // Металлы Евразии. - 2015. - №1. - С. 36-39.
16. Раскутин, А. Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях / А. Е. Раскутин // Авиационные материалы и технологии. - 2017. - № 5. - С. 349-367.
17. Башаров, Е. А. Анализ применения композиционных материалов в конструкции планеров вертолетов / Е. А. Башаров, А. Ю. Вагин // Труды МАИ. - 2017. - № 92. - С. 1-33.
18. Технология производства и диагностика качества композитных конструкций ракетно-космической техники. Создание конструкций из волокнистых композиционных материалов : учебное пособие / М. А. Комков, С. В. Бочкарев, А. Л. Галиновский [и др.] ; под ред. М. А. Комкова, А. Л. Галиновского. - Старый Оскол : ТНТ, 2020. - 344 с.
19. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов» / Г. М. Гуняев, В. В. Кривонос, А. Ф. Румянцев [и др.] // Конверсия в машиностроении. - 2004. - № 4. - С. 65-69.

20. Технология вертолетостроения. Технология производства лопастей вертолетов и авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов / Б. Н. Слюсарь, М. Б. Флек, Е. С. Гольдберг [и др.] - Ростов н/Д : изд-во ЮНФ РАН, 2006. - 230 с.
21. Алсаид, М. Обоснование применения многослойных композиционных материалов в судостроении / М. Алсаид, А. Саламех // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. - 2019. - № 2. - С. 37-47.
22. Сидорова, В. В. Применение композитных материалов в нефтегазовой промышленности / В. В. Сидорова // Гидравлические машины и системы транспортировки нефти и газа : сб. науч. тр. - Воронеж, 2019. - Вып. 7. - С. 84-91.
23. Любин, Е. А. Применение композитных трубопроводов в нефтегазовой промышленности / Е. А. Любин, Д. С. Густов // Инженер-нефтяник. - 2016. - № 1. - С. 72-78.
24. Об одной возможности изготовления роторов высокоскоростных электрогенераторов с постоянными магнитами / П. Г. Колпахчян, Б. Н. Лобов, И. В. Русакевич [и др.] // X Международная конференция по автоматизированному электроприводу АЭП 2018 : материалы конф., г. Новочеркасск, 3-6 окт. 2018 г. - Новочеркасск : Лик, 2018. - С. 14-19.
25. The Production Possibility of Permanent Magnet High Speed Electric Generator Rotors // P. G. Kolpakchyan, B. N. Lobov, A. P. Mikitinskiy [and others] // 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>.
26. Каблов, Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года / Е. Н. Каблов // Авиационные материалы и технологии. - 2012. - № 5. - С. 7-17.

27. Материалы сайта ВИАМ : Стратегия направления развития материалов и технологий их переработки до 2030 года. Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. - URL : <https://viam.ru/binder>.
28. Материалы сайта ВИАМ : Протокол № 27 пр. ВПК (НТС) от 02.12.2011 научно-технического совета Военно-промышленной комиссии при Правительстве Российской Федерации. - URL : [https://viam.ru/strategic\\_directions](https://viam.ru/strategic_directions).
29. Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. N 328 "Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности". - URL : <http://gov.garant.ru/SESSION/PILOT/main.htm>.
30. Сайт Data.gov.ru (открытые данные России) : Сведения о региональных программах внедрения композиционных материалов в Российской Федерации. - URL : <https://data.gov.ru/opendata/7705596339-compositematerials>.
31. Сайт Правительства России : О внедрении композиционных материалов, конструкций и изделий из них. Работа правительства в цифрах и фактах 2 августа 2015 года. - URL : <http://government.ru/info/19244/>.
32. Автоматизированные системы управления намоточными станками / В. Е. Шукшунов, В. Г. Жуковский, А. И. Евченко [и др.]. - Москва : Машиностроение, 1985. - 207 с.
33. Автоматизация процесса формирования ориентированного стеклопластика / В. Е. Шукшунов, Е. И. Фандеев, В. В. Михайлов [и др.]. - Орджоникидзе : Ир, 1969. - 112 с.
34. Болотин, В. В. Влияние технологических факторов на механическую надежность конструкций из композитов / В. В. Болотин // Механика полимеров. 1972. - № 3. - С. 529-540.
35. Технологические факторы и их влияние на качество изделий из композитов, изготавливаемых методом намотки // Ю. В. Василевич, К. А.

Горелый, С. В. Сахоненко [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. - 2015. - Т. 4. - С. 194-196.

36. Микитинский, А. П. Управление качеством изделий из композиционных материалов на основе программированной силовой намотки // А. П. Микитинский, Г. Г. Лисовская, Н. П. Тишкин // Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Технические науки. - 1983. - № 1. - С. 25-29.

37. Двирный, В. В. Исследование влияния усилия натяжения углеродного волокна при намотке / В. В. Двирный, О. А. Исеева, Е. Г. Пацков // Материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева (10-14 нояб. 2015, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. - Красноярск, 2015. - Ч. 1. - С. 101-102.

38. Армированные пластики – современные конструкционные материалы / Э. С. Зеленский, А. М. Куперман, Ю. А. Горбаткина [и др.] // Российский химический журнал. - 2001. - Т. 45, № 2. - С. 56-74.

39. Гуменников, В. В. Исследование силы натяжения в нитях при продольной намотке изделий из композитов / В. В. Гуменников, Я. С. Карпов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2013. - Вып. 59. - С. 89-95.

40. Захарычев, С. П. Влияние технологических условий намотки на свойства полимерных композиционных материалов / С. П. Захарычев, В. А. Иванов // Вестник ТОГУ. - Хабаровск : Изд-во ТОГУ. - 2010. - № 1 (16). - С. 55-64.

41. Болотин, В. В. Анализ технологических напряжений в намоточных изделиях из композитов на протяжении всего процесса изготовления / В. В. Болотин, А. Н. Воронцов, Р. Х. Мурзаханов // Механика композитных материалов. - 1980. - № 3. - С. 500-508.

42. Применение дискретной модели намоточных изделий к задачам определения остаточных напряжений и синтеза закона управления натяжения / Г. В. Воронцов, Н. П. Тишкин, Г. Г. Лисовская [и др.] // Известия

Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Технические науки. - 1982. - № 1. - С. 32-35.

43. Воронцов, Г. В. О задаче оптимизации остаточных напряжений в цилиндрических оболочках из композитного материала / Г. В. Воронцов, Г. Г. Лисовская, А. П. Микитинский / Исследование по расчету пластин и оболочек : межвуз. сб. науч. тр. - Ростов-на-Дону, 1982. - С. 31-41.

44. Лисовская, Г. Г. Обоснование законов силовой намотки изделий из композитных материалов и требований к точности САР / Г. Г. Лисовская, А. П. Микитинский, Д. А. Пятницын. - Депонировано ЦНИИНТИ 1983, № ДР-338.

45. Воронцов, Г. В. Расчет программ силовой намотки бобин из стеклопластиковых материалов // Г. В. Воронцов, А. П. Микитинский, Г. Г. Лисовская. - Технические средства и системы контроля и управления объектами повышенной ответственности : межвуз. сб. науч. тр. - Новочеркасск, 1982. - С. 91-102.

46. Глушко, К.С. Расчет композитных оболочек вращения, комбинированных сосудов давления и резервуаров [http://conf.nsc.ru/files/conferences/ym2012/fulltext/141350/141351/ym2012\\_article\\_GolushkoKS.pdf](http://conf.nsc.ru/files/conferences/ym2012/fulltext/141350/141351/ym2012_article_GolushkoKS.pdf).

47. Рассудов, Л. Н. Алгоритмизация управления рабочими органами намоточных станков для производства стеклопластиковых оболочек / Л. Н. Рассудов, В. Н. Мядзель, С. Г. Мамаев // Механика полимеров. - 1977. - № 1. - С. 30-34.

48. Рыбников, С. И. Автоматическое управление намоткой / С. И. Рыбников. - Москва : Энергия, 1972. - 112 с.

49. Иванов, Г. М. Электропривод в химической и целлюлозно-бумажной отраслях промышленности / Г. М. Иванов, А. Г. Иванов // Московский гос. индустриальный ун-т. - Москва : МГИУ, 2008. - 474 с.

50. Иванов, Г. М. Автоматизированный многодвигательный электропривод постоянного тока / Г. М. Иванов, Г. М. Левин, В. М. Хуторецкий ; под ред. Г. М. Иванова. - Москва : Энергия, 1978. - 160 с.

51. Иванов, Г. М. Автоматизированный электропривод в химической промышленности / Г. М. Иванов, Г. Б. Онищенко. - Москва : Машиностроение. 1975. - 312 с.
52. Маринин, В. И. Разработка системы автоматизированной подготовки управляющих программ для намоточных станков / В. И. Маринин, Д. Н. Князев, А. Б. Миткевич // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТПКММ). Корпоративные нано-и CALS-технологии в наукоемких отраслях промышленности : тр. 4 -й Междунар. конф., 26-29 апр. 2005 г., г. Москва, Россия. - Москва : Знание, 2006. - С. 537-540.
53. Система автоматизированной технологической подготовки производства оболочек вращения из композиционных материалов методом намотки / В. И. Маринин, Д. Н. Князев, С. М. Журихин [и др.] // Металлургия, Машиностроение. Станкоинструмент - 2006: в рамках промышленного конгресса Юга России : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. "Современные тенденции развития металлургической, машиностроительной и станкоинструментальной промышленности", г. Ростов-на-Дону, 6-8 сент. 2006 г. / Выстав. центр "ВертоЭкспо". - Ростов н/Д, 2006. - С. 2:27-2:29.
54. Борцов, Ю. А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский. - 2-е изд., перераб. и доп. - СПб. : Энергратомиздат. Санкт-Петербург. отд-ние, 1992. - 288 с.
55. Прокофьев, Г. И. Автоматизированная технология формообразования анизотропных конструкций из волокнистых композиционных материалов [Текст] : дис. ... докт. техн. наук : 05.13.07 / Прокофьев Геннадий Иванович. - Санкт-Петербург, 1998. - 258 с.
56. Электромеханические системы и управления натяжением ленточных материалов / Н. И. Бондарев, Г. Г. Лисовская, В. В. Михайлов [и др.]. - Москва : Энергия, 1980. - 97 с.

57. Филатов, А. С. Автоматизированный электропривод реверсивных станов холодной прокатки тонкой и тончайшей лент и полос [Текст] : дис. ... докт. техн. наук / Филатов Алексей Сергеевич. – Москва, 1970. - 287 с.
58. Файнберг, Ю. М. Авторегулирование при холодной прокатке / Ю. М. Файнберг. – Харьков : Metallurgizdat, 1960. - 189 с.
59. Дружинин, Н. Н. Непрерывные станы как объект автоматизации / Н. Н. Дружинин. - Москва : Metallurgiya, 1975. - 336 с.
60. Щербина, Ю. В. Методология исследования и проектирования автоматизированных систем управления в рулонных печатных машинах [Текст] : дис. ... докт. техн. наук. : 05.13.06. / Щербина Юрий Владимирович. – Москва, 2010. - 315 с.
61. Ikononopoulos, G. Filament winding technology: a numerical simulation and experimental validation of the winding and curing phase Computer Aided Design in Composite Material Technology / G. Ikononopoulos , M. Marchetti // Science and Engineering of Composite Materials. - 1998. - № 7 (3). - P. 215-222.
62. Nazarov, V. V. Automatic control of tension of composite material forced winding / V. V. Nazarov, P. D. Krut'ko // Problemy Prochnosti i Nadezhnos'ti Mashin. - 1992. - № 2. - P. 92-99.
63. Farese, Frank B. Controlling precision winders with clutches and brakes / Farese, Frank B. // Power transmission design. - 1998. - № 30 (10). - P. 25-27.
64. Development of PLC-based tension control system / Ren S.-L., Lu H., Wang Y.-Z. [and others] // Chinese Journal of Aeronautics. - 2007. - № 20 (3). - P. 266-271.
65. Research on precision tension control system based on neural network / Wang C., Wang Y., Yang R. [and others] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 2004. - № 51 (2). - P. 381-386.
66. A new fiber winding precision tension control system / Ren S.-L., Lai Y.-N., Wang, Y.-Z. [and others] // Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics, ICAL 2009. - 2009. - P. 233-236.

67. Fiber winding precision tension fuzzy control system / Ren S.-L., Lai Y.-N., Wang Y.-Z. [and others] // *Advanced Materials Research*. - 2010. - Vol. 129-131. - P. 370-375.
68. Zhang, H. Precision tension control technology of composite fiber tape winding molding / H. Zhang, H. Tang, Y. Shi // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. - 2018. - № 31(7). - P. 925-945.
69. Hong, Q. Dynamics Modeling and Tension Control of Composites Winding System Based on ASMC / Q. Hong, Y. Shi, Z. Chen // *IEEE Access*. - 2020. - Vol. 8. - P. 102795-102810 .
70. Рач, В. А. Создание корпусов малогабаритных РДТТ одноразового и кратковременного действия из армированных пластиков [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.07.04 / Рач Валентин Анатольевич. - Харьков, 1992. - 42 с.
71. Микитинский, А.П. К синтезу электропривода с упругостью второго рода [Электронный ресурс] / А. П. Микитинский // *Научные труды КубГТУ : электронный сетевой политематический журнал*. - 2023. - № 5. - С. 108-122. - URL : <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0102/4702.pdf>.
72. Официальный сайт компании Hengshui Snowate Environmental Technology Co., Ltd. - URL : <https://www.membranhousing.org/>.
73. Окольников, Г. Э. Использование углеродного волокна в конструкциях ветровых электростанций / Г. Э. Окольников, Д. А. Бронников, Н. И. Щедрин // *Системные технологии*. - 2018. - № 27. - С. 60-63.
74. Официальный сайт компании Ракеты и композиты. - URL : <http://k-blog.ru/rakety-i-kompozity/>.
75. Официальный сайт компании NASA. - URL : <https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/news/releases/2014/14-043.html>.
76. Официальный сайт Савеловского машиностроительного завода в составе Управляющей компании группы СТАН. - URL : [www.stnki-katalog.ru](http://www.stnki-katalog.ru).
77. Устройство УПЛ-2М для измерения и регулирования натяжения ленточного материала : информ. листок Ростовского ЦНТИ №3-74 / Г. Г.

Лисовская, Н. Я. Рябенко, В. П. Письменный и др. - Ростов-на-Дону, 1974. – 4 с.

78. Микитинский, А. П. Система автоматического регулирования натяжения намотки САРН-2: информ. листок Ростовского ЦНТИ / А. П. Микитинский, В. П. Бобрешов, Д. А. Пятницын. - Ростов-на-Дону, 1978.

79. Микитинский, А. П. Средства контроля и управления натяжением / А. П. Микитинский, Г. Г. Лисовская, В. В. Мартынов // Технические средства и системы контроля и управления объектами повышенной ответственности. - Новочеркасск, 1981. - С. 53-68.

80. А.с. 583220 СССР. Исполнительный механизм регулятора натяжения нити / А. П. Микитинский. - № 2124056 ; заявл. 14.04.1975 ; опубл. 15.08.1977, Бюл. № 45.

81. А.с. 765421 СССР. МПК D03D49/12 Исполнительный механизм регулятора натяжения нити / А. П. Микитинский, А. С. Монченко, Г. Г. Лисовская. - № 2689933/28 ; заявл. 30.11.78 ; опубл. 23.09.1980, Бюл. № 35.

82. Гусев, Ю. А. Особенности препрегов для автоматизированной выкладки методами ATL и AFP / Ю. А. Гусев, А. В. Борщев, А. В. Хрульков // Электронный научный журнал «ТРУДЫ ВИАМ». - 2012. - № 3. - С. 2-13.

83. Grimshaw, M. N. Advanced technology tape laying for affordable manufacturing of large composite structures / M. N. Grimshaw, C. G. Grant, J. M. L. Diaz // 46-th International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings). - 2001. - P. 2484-2494.

84. Официальный сайт фирмы Coriolis. - URL : <https://www.coriolis-composites.com/industries/aerospace/>.

85. Официальный сайт фирмы Microsam. - URL : <https://mikrosam.com/new/article/ru/avtomatizirovanna-vkladka-volokon-afp/>.

86. Официальный сайт фирмы M-Torres. - URL : <https://www.mtorres.es/en/communication/news/latest-technological-developments-mtorres-le-bourget-2017>.

87. Официальный сайт фирмы Electroimpact. - URL : <https://www.electroimpact.com/Products/Robots/Overview.aspx>.
88. Официальный сайт фирмы Ingersoll. - URL : <https://en.machinetools.camozzi.com/products/fiber-placement-machines/all-products/robotic-fiber-placement.kl>.
89. Каталог продукции ООО “НПП ВИУС”. - URL : <http://nppvius.ru/ru/katalog/namotochnoe-oborudovanie/>.
90. Микитинский, А. П. Автоматизация процесса изготовления препрега на ленточной установке / А. П. Микитинский, А. А. Завалий // Перспективы развития технических наук : сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-практ. конф., г. Челябинск, 11 июля 2016 г. / Инновационный центр развития образования и науки. - Челябинск, 2016. - Вып. 3. - С. 63 - 70.
91. Харитоновна, Ю.Ю. Методика прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки [Текст] : дис. ... канд. техн. наук. : 05.13.01. / Харитоновна Юлия Юрьевна. – Ижевск, 2017. - 195 с.
92. Deng, B. Modeling and optimizing the composite prepreg tape winding process based on grey relational analysis coupled with BP neural network and bat algorithm / B. Deng, Y. Shi // Nanoscale Research Letters. - 2019. - Vol. 14 - № 1. - P. 296.
93. Multi-response optimization of T300/epoxy prepreg tape-wound cylinder by grey relational analysis coupled with the response surface method / C. Kang, Y. Shi, X. He, T. Yu. [and others] // Materials Research Express. - 2017. - Vol. 4. - №. 9. - Article number 095301.
94. Optimization of parameter ranges for composite tape winding process based on sensitivity analysis / T. Yu, Y. Shi, X. He [and others] // Applied Composite Materials. -2017. - Vol. 24. - №. 4. - P. 821-836.
95. Ильина, С. Т. Разработка и исследование системы автоматического регулирования натяжением основы на ткацких станках [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Ильина Светлана Тимофеевна. - Москва, 1973. - 166 с.

96. Малофеев, Р. М. Машины текстильного производства / Р. М. Малофеев, Ф. Ф. Светик. - Москва : Машиностроение, 2002. - 496 с.
97. Терентьев, В. И. Тенденции совершенствования современных ткацких машин / В. И. Терентьев, Б. Н. Смирнова // Текстильная промышленность. - 2010. - № 2. - С. 8-10.
98. Оптимизация натяжения нитей на ткацких станках с микропрокладчиками : монография / О. А. Ортиков, Х. Ю. Расулов, Д. Н. Кадилова [и др.]. - Маврикий : LAP LAMBERT ACADEMIC PUBLISHING, 2017. - 224 с.
99. Приходько, И. Ю. Совокупное воздействие на толщину и плоскостность полос при холодной прокатке современными средствами регулирования / И. Ю. Приходько, А. М. Сафьян, В. С. Куший // Производство проката. - 1999. - № 2. - С. 41-46.
100. Храмшин, В. Р. Энергосберегающие тиристорные электроприводы прокатных станов : монография / В. Р. Храмшин. - Магнитогорск, из-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. - 180 с.
101. Храмшин, В. Р. Разработка и внедрение автоматизированных электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосного стана горячей прокатки / В. Р. Храмшин // Вестник ИГЭУ. - 2012. - № 6. - С. 100-104.
102. Определение энергетических характеристик натяжителя волокнистого материала на основе расширенной кинематической модели намоточного станка // Д. Н. Князев, Д. С. Андреев, И. Г. Семенченко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2017. - № 4. - С. 92-99.
103. Микитинский, А. П. К вопросу выбора мощности привода натяжных устройств из условия быстродействия / А. П. Микитинский, Н. И. Бондарев // Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Технические науки. - 1977. - № 3. - С. 53-56.
104. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. - Москва : Наука, 1975. - 768 с.

105. Соколов, Н. И. Аналитический метод синтеза систем автоматического регулирования / Н. И. Соколов. - Москва : Машиностроение, 1966. - 328 с.
106. Проектирование инвариантных следящих приводов : учебное пособие / В. Н. Яворский, А. А. Бессонов, А. И. Коротаев [и др.]. - Москва : Высшая школа, 1963. - 474 с.
107. Яворский, В. Н. Проектирование нелинейных следящих систем с тиристорным управлением исполнительным двигателем / В. Н. Яворский, В. И. Макшанов, В. П. Ермолин. - Ленинград : Энергия, Ленинградское отделение, 1978. - 208 с.
108. Kessler, C. Das symmetrische Optimum / C. Kessler. // Regelungstechnik. - 1958. - № 11. - С. 393–400.
109. Kessler, C. Das symmetrische Optimum / C. Kessler. // Regelungstechnik. - 1958. - № 12. - С. 432–436.
110. Kessler, C. Ein Beitrag zur Theorie mehrschleifiger Regelungen / C. Kessler. // Regelungstechnik. - 1960. - № 8. - С. 283-287.
111. Фишбейн, В. Г. Расчет систем подчиненного регулирования вентильного электропривода постоянного тока / В. Г. Фишбейн. - Москва : Энергия, 1972. - 136 с.
112. Шестаков, В. М. Синтез последовательной коррекции в системах подчиненного регулирования электроприводов с упругими механическими передачами / В. М. Шестаков, Ю. М. Ишаков // Известия вузов. Энергетика. - 1974. - № 3. - С. 39-45.
113. Щербина, Ю. В. Системы управления натяжением ленты в рулонных печатных машинах / Ю. В. Щербина // Вестник МГУП им. И. Федорова. - 2011. - № 1. - С. 221-237.
114. Елсуков, В. С. Структурно-параметрический синтез нелинейных систем управления с дифференциальными бинарно-операторными связями [Текст] : дис. ... докт. техн. наук. : 05.13.01 / Елсуков Владимир Сергеевич. - Новочеркасск, 2009. - 280 с.

115. Никитин, А. В. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления : монография / А. В. Никитин, В. Ф. Шишлаков ; под ред. В. Ф. Шишлакова; СПбГУАП. - СПб., 2003. - 358 с.
116. Плешивцева, Ю. Э. Альтернативный метод структурно-параметрического синтеза каскадных систем автоматического управления / Ю. Э. Плешивцева, А. А. Афиногентов // Автометрия. - 2015. - Т. 51, № 5. - С. 17-26.
117. Егупов, Н. Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Синтез регуляторов систем автоматического управления : учебник : в 5 т. / Н. Д. Егупов, К. А. Пупков / МГТУ им. Баумана. - 2 изд., перераб и доп. - Москва : изд-во МГТУ, 2004. - Т. 3. - 616 с.
118. 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.
119. 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.
120. Бондарев, Н. И. Исследование чувствительности нелинейных систем к изменению параметров объекта регулирования : сб. науч. тр. / Н. И. Бондарев, В. А. Петраков / Новочеркасский политехн. ин-т. - Новочеркасск : НПИ, 1975. - Т. 314 : Приборы и устройства автоматики. - С.16-19.
121. Лисовская, Г. Г. Вопросы разработки систем автоматического регулирования натяжных ленточных материалов / Г. Г. Лисовская, А. П. Микитинский // Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы Технические науки. - 1979. - № 2. - С. 29-33.

122. Бондарев, Н. И. Расчет автоматических систем с линеаризуемыми характеристиками, описываемыми дифференциальными уравнениями второго и третьего порядков : реферат / Н. И. Бондарев, А. П. Микитинский // Известия Вузов. Электромеханика. - 1976. - № 5. - С. 590.
123. Куо, Б. Теория и проектирование цифровых систем управления : пер. с англ. / Б. Куо. - Москва : Машиностроение, 1986. - 448 с.
124. Изерман, Р. Цифровые системы управления : пер. с англ. / Р. Изерман. - Москва : Мир, 1984. - 541 с.
125. Стрейц, В. Методы пространства состояния в теории дискретных линейных систем управления : пер. с англ. / В. Стрейц ; под ред. Я. З.Цыпкина. - Москва : Наука, 1985. - 296 с.
126. Иовенко, В. В. Введение в теорию упругости: учебное пособие / В. В. Иовенко / Тихоокеанский государственный университет. - Хабаровск : Изд-во ТГУ, 2017 - 200 с.
127. Стружанов, В. В. Теория упругости: основные положения : учебное пособие / В. В. Стружанов, Н. В. Бурмашева ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. - Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. - 204 с.
128. Микитинский, А. П. Линеаризация математической модели механизма намотки гибких материалов / А. П. Микитинский, В. И. Пашковский / Деп. в ЦНИИНТИ, № ДР-396.
129. Холоденко, Н. О. Решение задачи математического описания упругой ленты как объекта управления при намотке тел вращения сложной геометрической формы / Н. О. Холоденко, А. П. Микитинский // Экономика, наука и образование в XXI веке: материалы III Регион. науч.-практ. конф. ученых, студентов и аспирантов (24-25 марта 2011 г., г. Шахты) - Новочеркасск : Лик, 2011. - С. 376-380.
130. 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).

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

132. Микитинский, А. П. Математическая модель лентопротяжного тракта станка для "мокрой" намотки изделий из композиционных материалов = Mathematical model of wet-filament winding machine tape path / А. П. Микитинский // 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 October 2016 through 7 October 2016. - Пермь: изд-во ПНИПУ, 2016. - С. 447-450.

133. Александров, М. П. Тормозные устройства : справочник / М. П. Александров, А. Г. Лысяков, М. В. Новожилов; под общ. ред. М. П. Александрова. - Москва : Машиностроение, 1978. - 152 с.

134. Воробьева, Т. М. Электромагнитные муфты / Т. М. Воробьев. - Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1960. - 207 с.

135. Могилевский, В. Г. Электромагнитные порошковые муфты и тормоза / В. Г. Могилевский. - Москва; Ленинград : Энергия, 1964. - 104 с.

136. Ключев, В. И. Теория электропривода: учеб. для вузов / В. И. Ключев. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Энергоатомиздат, 2001. - 704 с.

137. Шрейнер, Р. Т. Системы подчиненного регулирования приводов. Часть 1. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат : учебное пособие для вузов / Р. Т. Шрейдер / Уральский государственный профессионально-педагогический университет. - Екатеринбург : изд-во УГПШУ, 1997. - 277 с.

138. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. - Екатеринбург : УРО РАН, 2000. - 654 с.
139. Пятибратов, Г.Я., Барыльник, Д.В. Моделирование электромеханических систем: Учеб. пособие / Юж.-Рос.гос.политехн.кн-т. – Новочеркасск, 2013. – 103 с.
140. Виноградов, А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов / ГОУВПО Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина. - Иваново, 2008. - 298 с.
141. Поздеев, А. Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых электроприводах : монография / А. Д. Поздеев / Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова. - Чебоксары : изд-во ЧГУ, 1998. - 171 с.
142. Барыльник, Д. В. Электромеханическая система компенсации силы тяжести с асинхронным частотно-регулируемым электроприводом : дисс. ... канд. техн. наук : 05.09.03. / Барыльник Дмитрий Владимирович – Новочеркасск, 2009 .– 178 с.
143. Кравченко, О. А. Теория и практика создания электромеханических силокомпенсирующих систем тренажеров для подготовки космонавтов [Текст] : дис. ... докт. техн. наук : 05.09.03 / Кравченко Олег Александрович. – Новочеркасск, 2013. - 380 с.
144. Использование электропривода с векторным управлением в системе регулирования натяжения при намотке изделий из композиционных материалов / А. П. Микитинский, В. А. Завалий, А. А. Завалий [и др.] // Информационные технологии: проблемы и перспективы развития : материалы III Регион. межвуз. науч.-практ. конф. молодых ученых, асп. и студ., 28 мая 2015 г., г. Новошахтинск / Южный федеральный университет. – Новошахтинск; Новочеркасск : Изд-во НОК, 2015. – С. 70–74.

145. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов [и др.]. - Москва : Энергоиздат, 1983. - 256 с.
146. Кузнецов В. А. Вентильно - индукторные двигатели / В. А. Кузнецов, В. А. Кузмичева. - Москва : МЭИ, 2003. - 71 с.
147. Вентильно-индукторный привод - перспективное направление развития современного регулируемого электропривода / В. Ф.Козаченко, А. М. Русаков, А. В. Сорокин [и др.] // Новости теплоснабжения. - 2011. - № 11 (135). – URL : [https://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=3754](https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3754).
148. Колпахчян, П. Г. Перспективы применения вентильного электропривода для управления насосами-дозаторами / П. Г. Колпахчян, Б. Н. Лобов, А. П. Микитинский // Сборник научных статей по материалам V Всероссийской научно-практической конференции, Каменск-Шахтинский 2 декабря 2015 г. - Новочеркасск : Лик, 2016. - С.110-115.
149. Разработка вентильно-индукторного двигателя для индивидуального привода дозирующего насоса прядильной машины / П. Г. Колпахчян, А. Р. Шайхиев, Б. Н. Лобов и [др.] // Известия вузов. Электромеханика. - 2017. - № 2. - С. 38-43.
150. Автоматическая система для обеспечения заданных значений линейной плотности и натяжения синтетической нити / Б. Н. Лобов, П. Г. Колпахчян, А. П. Микитинский [др.] // Известия вузов. Электромеханика. - 2020. - № 2-3. - С. 55-62.
151. Пути повышения качества при производстве синтетических волокон / Б. Н. Лобов, П. Г. Колпахчян, А. П. Микитинский А.П. [и др.] // Международный научно – исследовательский журнал. - 2016. - № 6 (48), Ч. 2 - С. 74-77.
152. Колпахчян, П. Г. Применение современного электропривода для управления насосами-дозаторами / П. Г. Колпахчян, Б. Н. Лобов, Микитинский А.П. // Пром-Инжиниринг: труды II международной научно-технической конференции. - Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2016. - С. 339-343.

153. Лобов, Б. Н. The control of dosing pumps by modern electric drive / Б. Н. Лобов, А. П. Микитинский, П. Г. Колпахчян // 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/>.
154. Егоров, И. Н. Векторное управление вентильно-индукторными двигателями мехатронных систем / И. Н. Егоров, В. А. Шабаев // *Фундаментальные исследования*. - 2015. - № 12-5. - С. 891-895.
155. Фисенко, В. Г. Проектирование вентильных индукторных двигателей: методическое пособие / В. Г. Фисенко, А. Н. Попов. - Москва : Издательство МЭИ, 2005. - 56 с.
156. Перегудов, О.А. Математическая модель поверочного расчёта вентильно-индукторной электрической машины / В сборнике: XII Ежегодная научная сессия аспирантов и молодых ученых. Материалы межрегиональной научной конференции. В 2-х томах. 2018. С. 95-99.
157. Гарипов, И.Р., Гринин, Е.А., Турбин, А.И. О внедрении инновационных вентильно-индукторных электроприводов / *Научный журнал Российского газового общества*, №2, 2017. - С. 27-32.
158. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А. В. Иванов-Смоленский, Ю. В. Абрамкин, А. И. Власов [и др.] ; под ред. А. В. Иванова-Смоленского. - Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 213 с.
159. Бычков, М. Г. Алгоритмы и системы управления вентильно - индукторного электропривода / М. Г. Бычков // *Вентильно-индукторный электропривод : доклады науч.-практ. семинара*. - Москва : Издательство МЭИ, 2006. - С. 34-72.
160. Виноградов, А. Б. Вентильно – индукторный привод с минимизацией пульсаций электромагнитного момента (Электронный ресурс) / А. Б. Виноградов. - URL : <http://vectorgroup.ru/articles/article10>.

161. Красовский, А. Б. Исследование пульсаций момента вентильно – индукторного двигателя при регулировании среднего значения момента в зоне малых скоростей / А. Б. Красовский // Электротехника. - 2017. - № 5. - С. 2-8.
162. Обзор подходов к снижению пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя методами математического моделирования / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, Д. А. Статовой [и др.] // Вестник ДГТУ. Рубрика Машиностроение и машиноведение. - 2016. - Т. 16, Вып. 2 (85). - С. 51-58.
163. 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.
164. Selecting the engine power while the dry winding of the composite material / A.P. Mikitinskiy, B.N. Lobov, P.G. Kolpakhchyan [and others] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2021. - Jan. - Vol. 1029. - P. 012113. - URL : <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1029/1/012113>.
165. Математическое описание упругой ленты как объекта управления при намотке тел вращения типа прямоугольник // Д. Ю. Богданов, К. А. Микитинский, Д. Г. Борзенко [и др.] // Микроэлектронные информационно-управляющие системы и комплексы: сб. тез. и стат. Всерос. науч. школы, г. Новочеркасск, 5-7 сент. 2011 г. / Южно-Российский государственный технический университет (НПИ). - Новочеркасск : Лик, 2011. - С. 138-141.
166. Богданов, Д. Ю. Математическое описание намотки прямоугольника с закругленными углами / Д. Ю. Богданов, Д. В. Чередникова, А. П. Микитинский // Микроэлектронные информационно-управляющие системы и комплексы : сб. тез. и стат. Всерос. науч. школы, г. Новочеркасск, 5-7 сентября 2011 г. / Южно-Российский государственный технический университет (НПИ). - Новочеркасск : Лик, 2011. - С. 141-143.
167. 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.
168. Микитинский, А. П. Математическое описание намотки лонжеронов / А. П. Микитинский, К. А. Микитинский, Д. Г. Борзенко // Студенческая научная весна - 2012: материалы регин. науч.-техн. конф. (конкурса науч.-тех. работ) студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Рост. обл., 24-25 мая 2012 г. / Южно-Российский государственный технический университет (НПИ). – Новочеркасск : ЛИК, 2012. - С. 106-108.
169. Пат. 128606 Рос. Федерация, МПК В65Н20/00. Устройство автоматического управления намоткой / Микитинский А. П., Орлов С. И. - № 2012138017/13 ; заявл. 05.09.2012 ; опубл. 27.05.2013 , Бюл. № 15.
170. Орлов, С. И. Математическая модель натяжного устройства / С. И. Орлов, А. П. Микитинский // Информационные технологии: проблемы и перспективы развития : сб. тр. по материалам II Регион. межвуз. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, 28 мая 2014 г., Новошахтинск / Филиал ЮФУ в г. Новошахтинске. - Новочеркасск : Изд-во НОК, 2014. - С. 39-43.
171. 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.
172. Микитинский, А. П. Mathematical Description of the Tensioners Used while Winding of the Wet Composite Material Products / А.П. Микитинский, Б.Н. Лобов, П.Г. Колпахчян // 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 9376352.
173. Микитинский, А. П. К вопросу определения мощности двигателя натяжных устройств, используемых при намотке изделий из «мокрого»

композиционного материала / А. П. Микитинский // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2020. - Т.63, № 6. - С. 21-28.

174. Energy characteristics of the tensioners motor when winding products of a wet composite material / A. P. Mikitinskiy, B. N. Lobov, Y. A. Valyukevich [and others] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2021. - Jan. - Vol. 1029. - P. 012111. - URL : <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1029/1/012111>.

175. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. - Москва : Наука, 1975. - 640 с.

176. Определение КПД червячного редуктора по коэффициентам потерь / В. И. Зворыкин, В. В. Зимин, С. Ю. Гончаров [и др.] // Инженерный вестник. Электронный научно-технический журнал. - 2015. - № 9. - С. 70-85.

177. Микитинский, А. П. Tension control adaptive system synthesis used in winding of products made of "dry" composite material [Электронный ресурс] / А. П. Микитинский // 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. - № 012028. - URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/680/1/012028/pdf>.

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

179. Микитинский, А. П. Система регулирования натяжного устройства при намотке изделий из композиционных материалов [Электронный ресурс] / А. П. Микитинский, Б. Н. Лобов, П. Г. Колпахчян // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. - 2018. - Т. 6, № 3. - С. 3-8. - URL : <http://www.indust-engineering.ru/issues/2018/2018-3.pdf>.

180. Микитинский, А. П. Control System of Tension Device in Winding Fabrics from Composite Materials / А. П. Микитинский, Б. Н. Лобов, П. Г. Колпахчян // Lecture Notes in Electrical Engineering. - 2020. - Том 641 : Международная

российская конференция по автоматизации, RusAutoCon 2019; Сочи; Российская Федерация; 8 сентября 2019 г. - 14 сентября 2019 г. - С. 42-49.

181. Микитинский, А.П. Синтез регуляторов электроприводы натяжного устройства композиционных материалов [Электронный ресурс] / А.П. Микитинский, О.А. Кравченко, Д.Ю. Богданов, Б.Н. Лобов // Научные труды КубГТУ : электронный сетевой политематический журнал. - 2023. - № 6. - С. 132-149. - URL : <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0103/4735.pdf>.

182. 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.

183. Пятибратов, Г. Я. Развитие теории и практика управления усилиями в электро-механических системах с упругими связями [Текст] : дис. ... докт. техн. наук : 05.09.03 / Пятибратов Георгий Яковлевич. - Краснодар : КубГТУ - 2000. - 353 с.

184. Микитинский, А. П. Учет ненулевых начальных условий при синтезе регуляторов электроприводов методом типовых характеристик / А. П. Микитинский // Известия вузов. Электромеханика. - 1989. - № 10. - С. 101-103.

185. Микитинский, А. П. О синтезе квазиоптимальных дискретных электроприводов методом переменных состояний / А. П. Микитинский, В. И. Пашковский // Известия вузов. Электромеханика. - 1989. - № 2. - С. 99-102.

186. Микитинский, А. П. Оптимальное управление системой натяжения композиционного материала / А. П. Микитинский // Математические методы в технике и технологии ММТТ-17 : сб тр. Междунар. науч. конф., 1-3 июня 2004 г. : в 10 т. / Костромской государственной технологической университет. - Кострома : Изд-во КГТУ, 2004. - Т. 6. секц. 13. - С. 142-144.

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

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

189. 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.] / Новочеркасский государственный технический университет ; отв. ред. В.Г. Ушаков. - Новочеркасск, [Ростов н/Д] : НГТУ, [Гефест], 1997. - С. 157-161.

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

191. Базара, М. Нелинейное программирование. Теория и алгоритмы / М. Базара, К. Шетти. - Москва : Мир, 1982. - 583 с.

192. Банди, Б. Методы оптимизации: вводный курс / Б. Банди; пер. с англ. О. В. Шихеевой; под ред. В. А. Волынского. - Москва : Радио и связь, 1988. - 128 с.

193. Поляк, Б. Т. Введение в оптимизацию / Б. Т. Поляк. - Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. - 381 с.
194. Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. - Москва : Мир, 1974. - 536 с.
195. Официальный сайт фирмы Siemens. - URL : [www.siemens.com](http://www.siemens.com)
196. Официальный сайт фирмы ООО «Механик» Коломна. - URL : [www/kolmexanik.ru](http://www/kolmexanik.ru) .
197. Микитинский, А. П. Электроприводы механизмов намотки изделий из композиционных материалов / А. П. Микитинский, А. Б. Бекин, Л. Л. Алтунян // Труды VIII международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014, 7-9 окт. 2014 г. : в 2-х т. / Национально-исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева. - Саранск : изд-во НИМГУ, 2014. - Т. 2. - С. 516-521.
198. Орлов, С. И. Система регулирования натяжения при намотке изделий из композиционных материалов / С. И. Орлов, А. П. Микитинский // Информационные технологии: проблемы и перспективы развития : материалы II Регион. межвуз. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (28мая 2014 г., Новошахтинск) / Филиал ЮФУ в г. Новошахтинске. - Новочеркасск : изд-во НОК, 2014. - С. 52-56.
199. Каталог тормозов фирмы Warner Electric. - URL : [http://www.ziptrading.org/data/catalog/87/bv\\_product.pdf](http://www.ziptrading.org/data/catalog/87/bv_product.pdf) .
200. Завалий, А. А. Система регулирования натяжения при намотке изделий из композиционных материалов / А. А. Завалий, А. М. Кенжаев, А. П. Микитинский // Международный студенческий научный вестник. - 2015. - № 5. - С. 701-703.
201. Микитинский, А. П. Система регулирования натяжения намотки лонжеронов / А. П. Микитинский, С. И. Орлов // Студенческая научная весна – 2013 : материалы Регин. науч.-техн. конф. (конкурса науч.-тех. работ) студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Рост. обл., г. Новочеркасск,

25-26 апр. 2013 г. / Южно-Российский государственный технический университет (НПИ). - Новочеркасск : ЮРГТУ, 2013. - С. 152-153.

202. 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.

203. Аугамбаев, М. Основы планирования научно-исследовательского эксперимента / М. Аугамбаев, А. З. Иванов, Ю. И. Терехов ; под ред. Г. М. Рудакова. - Ташкент : Укитувчи, 2004. - 336 с.

204. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Марков, Ю. В. Грановский. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Наука, 1976. - 278 с.

205. 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.

206. 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>.

207. 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>.

208. Официальный сайт фирмы Texas Instruments. - URL : [www.ti.com](http://www.ti.com).

209. 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.
210. Пат. RU 2555196 (НА). МПК G01L 5/04 (2006.01). Способ измерения натяжения длинномерных изделий [Текст] / Сидоров О. А., Смердин А. Н., Голубков А. С. [и др.]. - № 2013147558/28 ; заявл. 24.10.2013 ; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 19.
211. Бауман, Э. Измерение сил электрическими методами: пер. с нем. / Э. Бауман. - Москва : Мир, 1978. - 380 с.
212. Фрайлен Д. Современные датчики. Справочник / Д. Фрайлен. - Москва : Техносфера, 2005. – 592 с.
213. Официальный сайт ООО «МЕТРОТЕКС». - URL : [www.metrotex.ru](http://www.metrotex.ru).
214. Официальный сайт FMS- Force Measuring Systems AG (Швейцария) <https://www.fms-technology.com/en/our-solutions/tension-control/force-sensors>
215. Официальный сайт ООО «СервоКИП». - URL : [www.fms-ag.ru](http://www.fms-ag.ru).
216. Официальный сайт Фирма Re-spa. - URL : [www.re-spa.com](http://www.re-spa.com).
217. Voicea, A. V. Optimal operation of a mi-croturbine cluster with partial-load efficiency and emission characterization / A. V. Voicea, G. Chicco, P. Mancarella // 2009 IEEE Bucharest PowerTech, 28 June - 02 July 2009 / IEEE. - Bucharest, Romania, 2009. - P. 1-8. - DOI: 10.1109/PTC.2009.5282263.
218. Soares, C. Microturbines: applications for distributed energy systems / C. Soares. - Butterworth-Heinemann : Elsevier, 2011. - 320 p.
219. Giampaolo, T. Gas Turbine Handbook: Principles and Practice / T. Giampaolo. - Fifth Edition. - Lulu Press, Inc, 2020. - 475 p.
220. High-speed electrical machines: Technologies, trends, and developments / D. Gerada, A. Mebarki, N. L. Brown [and other] // IEEE Trans. Ind. Electron. - 2014. - Vol. 61, № 6. - P. 2946-2959.

221. Synchronous high-speed reluctance machine with novel rotor construction / J. Ikäheimo, J. Kolehmainen, T. Käsäkangas [and others] // IEEE Trans. Ind. Electron. - 2014. - Vol. 61, № 6. - P. 2969 – 2975.
222. Antipov, V. N. High-speed electrical machines for power engineering: current state and development trends. Russian Electrical Engineering / V. N. Antipov, Ya. B. Danilevich. - 2007. - Vol. 78, № 6. - P. 277-279.
223. Arkkio, A. Induction and permanent-magnet synchronous machines for high-speed applications. Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Machines and Systems - ICEMS 2005, 27-29 September 2005 / A. Arkkio, T. Jokinen, E. Lantto. - 2005. - Vol. 2. - P. 871-876.
224. Strength Design on Permanent Magnet Rotor in High Speed Motor Using Finite Element Method / T. Zhang, X. Ye, H. Zhang [and others] // TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering. - 2014. - Vol.12, № 3. - P. 1758 – 1763.
225. Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами / Ф. Р. Исмагилов, А. А. Герасин, И. Х. Хайруллин [и др.]. - Москва : Машиностроение, 2014. - 267 с.
226. Ледовский, А. Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами / А. Н. Ледовский. - Москва : Энергоатомиздат, 1985. - 169 с.
227. Bernard, N. Design Methodology of a Permanent Magnet Synchronous Machine for a Screwdriver Application / N. Bernard, F. Martin, M. El-Hadi Zaïm. - // IEEE Transactions on Energy Conversion. - 2012. - Vol. 27, Is. 3. - P. 624-633.
228. Ultra High Speed Motor Supported by Air Foil Bearings for Air Blower Cooling Fuel Cells / D.-K. Hong, B.-C. Woo, J.-Y. Lee [and others] // IEEE Transactions on Magnetics. - 2012. - Vol. 48, Is. 2. - P. 871-874.
229. Колпахчян, П. Г. Sensorless control of the high-speed switched-reluctance generator for the steam turbine = Бездатчиковое управление высокооборотным вентильно-индукторным генератором для паровой микротурбины /

- П.Г. Колпахчян, А.Р. Шайхиев, А.Е. Кочин  
// *Advances in Intelligent Systems and Computing*. - 2018. - Vol. 680. - P. 349-358.
230. Pfister, P.-D. Very-High-Speed Slotless Permanent-Magnet Motors: Analytical Modeling, Optimization, Design, and Torque Measurement Methods / P.-D. Pfister, Y. Perriard // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. - 2010. - Vol. 57, Is. 1. - P. 296-303.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Акты внедрения результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО фирмы  
«Пластик Эntерпрайз»,  
доктор технических наук,  
профессор



Г.Тюрин

2022 г.

### А К Т

внедрения результатов диссертационной работы доцента  
кафедры «Электроснабжение и электропривод»  
ФГБОУ ВО ЮРГПУ (НПИ) имени М.И.Платова  
МИКИТИНСКОГО Александра Петровича  
«Развитие теории и практики электротехнических систем регулирования  
натяжения композиционных материалов»

Результаты диссертационной работы Микитинского А.П. по развитию теории и практики создания электротехнических систем для изготовления изделий из композиционных материалов, выполненные в ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова на кафедре «Электроснабжение и электропривод», использованы на нашем предприятии в 2021-2022г.г. при создании автоматизированных систем управления технологическими процессами при изготовлении опытных образцов и в мелкосерийном производстве ряда изделий.

Внедрены (использованы):

- рекомендации по выбору исполнительных механизмов систем регулирования натяжения при “сухой” и “мокрой” намотке;
- обоснованный выбор структурных схем систем регулирования натяжения, регуляторов и алгоритмов их работы;
- разработанный автором метод синтеза систем регулирования натяжения.

Внедренные результаты работы позволили сократить сроки разработки новых систем регулирования натяжения и повысить качество изготовления изделий. Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составит 512 млн. рублей.

Главный инженер

ООО «Пластик Эntерпрайз»

Корнелюк О.А.

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель  
генерального директора  
и главного конструктора  
АО «ЦНИИСМ»

А.А. Кульков

2022 г.

14.10

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

доцента энергетического факультета

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)

имени М.И. Платова

МИКИТИНСКОГО А.П.

«Развитие теории создания электромеханических систем для изготовления  
изделий из композиционных материалов»

Результаты научно-исследовательской работы Микитинского А.П. по развитию теории создания электромеханических систем для изготовления изделий из композиционных материалов, выполненные в ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова на кафедре «Электроснабжение и электропривод», использованы на нашем предприятии в 2022 г. при освоении производства новых изделий, в том числе, в мелкосерийном производстве из композиционных материалов.

Внедрены:

1) Системная классификация наматываемых изделий в зависимости от их геометрии и требований, предъявляемых к их условиям эксплуатации, диапазона и скорости изменения параметров в процессе намотки, позволяющая обоснованно осуществлять выбор электромеханических систем (ЭМС) управления процессом намотки;

2) Технические предложения и схемные решения для реализации ЭМС натяжения композиционной ленты, которые учитывают специфику намотки изделий из композиционных материалов и позволяют повысить точность отработки системой управления заданных законов намотки 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);

3) 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-421М для изготовления Силовой оболочки корпуса ВПХО системы РБАС РН «Союз-5» 374СА11.10.00.110 (АЕВ 02101.13080);

4) Адаптивные ЭМС 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);

Внедренные результаты работы позволили повысить качество изготовления на предприятии изделий из композиционных материалов методом «мокрой» намотки.

Начальник отделения и  
Главный химик – заместитель  
Главного конструктора по  
материаловедению



Ю.В. Антипов

Начальник отдела  
конструкционных  
композиционных  
материалов



К.С. Пахомов

Основные сокращения, приведенные в акте внедрения:

ВПХО – вентилятор переходного отсека;

ОРД – основной ракетный двигатель;

РБАС – ракетный двигатель разгонного блока;

РН – ракета-носитель;

УРД – управляющий ракетный двигатель.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «Дон-Текс»

Черепков Илья Валерьевич



А К Т

внедрения результатов диссертационной работы доцента кафедры «Электроснабжение и электропривод» ФГБОУ ВО ЮРГПУ (НПИ) имени М.И.Платова МИКИТИНСКОГО Александра Петровича «Развитие теории и практики электротехнических систем регулирования натяжения композиционных материалов»

Результаты диссертационной работы Микитинского А.П. по развитию теории и практики создания электротехнических систем регулирования натяжения композиционных материалов, выполненные в ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова на кафедре Электроснабжение и электропривод, внедрены на нашем предприятии в 2022-2023г.г. при модернизации автоматизированной линии по ламинированию Lamitex-1400/60 для производства синтетического полотна в серийном производстве.

При модернизации использованы:

- разработанные автором рекомендации по выбору исполнительных механизмов систем регулирования натяжения;
- предложенная автором методика выбора мощности электродвигателей синхронного типа, работающих в системах регулирования натяжения, позволила увеличить срок службы двигателей;
- разработанный автором метод синтеза систем регулирования натяжения для стабилизации натяжения, что повышает качественные характеристики готовой продукции.

Внедренные результаты работы позволили сократить сроки модернизации установки и повысить качество изготовления изделий за счет более лучшего регулирования натяжения.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составит 530 млн. рублей.

Главный инженер

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops, written over a horizontal line.

Баскаков В.А.



- обоснованный выбор структурных схем систем регулирования натяжения, регуляторов и алгоритмов их работы.

Декан электромеханического факультета,  
ФГБОУ ВО ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова,  
к.т.н., доцент



И.В. Троценко

И.о. заведующего кафедрой «Электроснабжение  
и электропривод» ФГБОУ ВО  
ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова,  
к.т.н.



А.Б. Бекин

Доцент кафедры «Электроснабжение  
и электропривод» ФГБОУ ВО  
ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова,  
к.т.н.



Н.А. Сухенко

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Расчет бандажа роторов высокоскоростных генераторов из композиционных материалов

Прежде чем говорить о практической реализации систем регулирования натяжения, рассмотрим возможность использования композиционных материалов при создании нового высокотехнологического продукта в области энергетики.

В настоящее время наметилась тенденция применения высокоскоростных электрогенераторов с постоянными магнитами. Частота вращения ротора таких генераторов достигает 100 000 об/мин. При таких частотах вращения на постоянные магниты действуют большие осевые усилия, способные разрушить машину. Рассмотрим возможность замены традиционного бандажа ротора из высокопрочной стали на бандаж, изготовленный методом намотки из композиционного материала [24,25].

Одним из направлений развития энергетики в настоящее время является применение распределенных энергетических систем. Они находят применение для энергоснабжения удаленных объектов, применяются в составе установок, использующих альтернативные источники энергии для повышения надежности энергоснабжения. Для энергоснабжения автономных объектов востребованным является диапазон мощностей генерации до 1 – 2 МВт [217-219]. Для таких энергетических систем необходимо создание генерирующих установок мощностью до 100 – 200 кВт [219,220]. Наиболее рациональным для решения указанных задач является применение газового топлива. Применение газо-поршневых установок на такой мощности нецелесообразно, поэтому в рассматриваемом диапазоне мощностей получили распространение микрогазотурбинные установки (микроГТУ) [217-219].

Мировым лидером в создании микроГТУ является фирма Capstone Turbine Corporation (США), серийно производящая энергетические системы на их основе для снабжения потребителей тепловой и электрической энергией.

Аналогичные системы производятся также другими компаниями: Calnetix Power Solutions (США), Turbec (Италия) и рядом других [218]. Производимые микроГТУ имеют мощность от 30 до 350 кВт. Несмотря на различия в конструкции и компоновке установок различных производителей, общей чертой микроГТУ является применение высокооборотных электрогенераторов (ЭГ), находящихся на общем валу с турбиной [218, 220, 221].

Эффективность высокооборотного ЭГ во многом определяет показатели энергетической установки в целом. Поэтому его создание является одной из наиболее сложных задач при разработке микроГТУ. При этом наиболее сложным является обеспечение прочности вращающихся частей ЭГ. Далее в статье рассмотрены некоторые вопросы разработки высокооборотных ЭГ с постоянными магнитами на роторе предназначенных для работы в составе микроГТУ.

Частота вращения газовой турбины мощностью 100 – 200 кВт, при которой достигается ее максимальная эффективность, превышает 100 000 об/мин. Создание электрогенераторов с таким сочетанием мощности и частоты вращения является сложной, практически неразрешимой задачей из-за ограничений по прочностным свойствам применяемых материалов. Поэтому в составе микроГТУ частота вращения турбины принимается 60 000 – 100 000 об/мин при мощности 100 кВт и снижается при увеличении мощности. Такое сочетание мощности и частоты вращения является компромиссом между эффективностью турбины и возможностью создания ЭГ с использованием существующих активных материалов.

В качестве высокооборотных ЭГ, применяемых в составе микроГТУ возможно применение различных типов бесколлекторных электрических машин (ЭМ), таких как синхронные с постоянными магнитами (ПМ) на роторе, синхронные реактивные или асинхронные [220]. Наилучшими удельными показателями обладают ЭМ с ПМ на роторе, что делает их

наиболее распространенным типом высокооборотных электрогенераторов, используемых в составе микроГТУ [222].

Статоры высокооборотных ЭГ практически не имеют отличий для различных типов ЭМ и выполняются по традиционной для ЭМ переменного тока конструкции. Наиболее сложной частью высокооборотного ЭГ для микроГТУ является ротор. Поэтому актуальным является проведение исследований в области совершенствования его конструкции, направленные на повышение допустимой частоты вращения.

Применяемые в конструкции ротора высокооборотной ЭМ ПМ изготавливаются методами порошковой металлургии. Их особенностью является недопустимость работы на растяжение. Поэтому в конструкции ротора высокооборотных ЭМ необходимо применять специальные меры по закреплению ПМ. Наиболее подходящими для ротора высокооборотного генератора с рассматриваемыми параметрами являются самарий-кобальтовые постоянные магниты (Sm-Co) марок КС-25 и КС-37, имеющие хорошие механические характеристики [213] и сохраняющие работоспособность при температуре ротора до 250 градусов.

Особенностью ПМ типа Sm-Co является очень высокий предел прочности на сжатие, не уступающий легированной стали, и низкий на растяжение (850 МПа и 35 – 50 МПа). Также, они очень чувствительны к образованию микротрещин при снятии нагружения, после чего практически сразу наступает разрушение. Поэтому переход от напряжения сжатия к напряжению растяжения недопустим, и обязательным элементом конструкции ротора является бандаж, надеваемый на ПМ с натягом. Бандаж должен быть рассчитан таким образом, чтобы при рабочей частоте не допускать перехода от напряжения сжатия к напряжению растяжения в наиболее нагруженной части постоянного магнита. Материал бандажа должен быть изготовлен из немагнитного материала, чтобы не допускать замыкания магнитного потока. В настоящее время наибольшее распространение получили металлические бандажи.

В качестве альтернативы металлическим сплавам как материалу для бандажа фиксирующего ПМ на роторе высокооборотной ЭМ, могут выступать композиционные материалы на основе стеклянной или угольной нити. По сравнению со сталями и металлическими сплавами их основными преимуществами являются высокая прочность и меньшая плотность. Применение композиционных материалов для изготовления бандажей, фиксирующих ПМ на роторе высокооборотной ЭМ, рассматривается в ряде работ [220,222-224] и считается перспективным. Одним из наиболее важных вопросов, требующих решения при проектировании ротора высокооборотной ЭМ с ПМ, является обеспечение прочности конструкции. Далее приведены результаты исследования этой проблемы и сравнение эффективности использования различных материалов (металлического сплава и композитных материалов).

При проектировании ЭМ с ПМ на роторе, как было указано выше, одним из главных вопросов является обеспечение прочности конструкции. Конструкция ротора ЭМ с ПМ приведена на рисунке В.1. Вал такой ЭМ также выполняет функции ярма магнитной системы, по нему замыкается магнитный поток от ПМ. Поэтому вал должен выполняться из конструкционной стали или нержавеющей стали с магнитными свойствами. Перемагничивания ротора по основной гармонике нет, поэтому значительных магнитных потерь в вале не возникает.

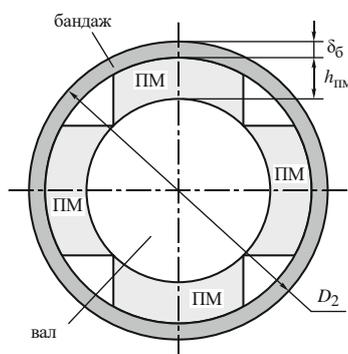


Рисунок В.1 – Конструкция ротора высокооборотной ЭМ с ПМ

Предварительный анализ материала для изготовления стягивающего ПМ бандажа показал, что в качестве материала бандажа в конструкциях роторов высокооборотных ЭМ, вращающихся с частотой вращения более 60 000 об/мин, применяют хромоникелевый сплав марки 36НХТЮ, нержавеющую и немагнитную сталь 12Х18Н10Т, латунь ЛС59-1, титановые сплавы ВТ1-1 и ВТ6 [222]. Наилучшие результаты достигаются при использовании сплава 36НХТЮ, имеющего предел текучести 700 МПа, близкий к пределу текучести материала ПМ.

В качестве альтернативы этому сплаву были рассмотрены композиционные материалы на основе стеклянной и угольной нити (стеклопластик и углепластик) [223,224]. Механические свойства сплава 36НХТЮ и композиционных материалов, необходимые для расчета прочности ротора высокооборотной ЭМ с ПМ приведены в таблице В.1.

Таблица В.1 – Механические свойства материалов бандажа

Параметр	36НХТЮ	Стеклопластик	Углепластик
Модуль упругости (модуль Юнга), МПа	200 000	730 000	350 000
Предел текучести, МПа	700	860	1 100
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7900	2500	1800
Коэффициент Пуассона	0,3	0,22	0,199

Предельный диаметр ротора по условию прочности бандажа можно определить по выражению [225]:

$$D_{\max} = \frac{60}{\pi} \cdot \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\sigma_6}{\rho_6 k_a}},$$

где  $n$  – частота вращения ротора, об/мин;

$k_a = 3$  – коэффициент запаса;

$\sigma_6$  - предел прочности материала бандажа;

$\rho_6$  - плотность материала бандажа.

При частоте вращения  $n = 100\ 000$  об/мин предельный диаметр ротора для выбранных материалов:

$$36\text{НХТЮ} \quad D_{\max} = 31 \text{ мм};$$

$$\text{стеклопластик} \quad D_{\max} = 61 \text{ мм};$$

$$\text{углепластик} \quad D_{\max} = 80 \text{ мм}.$$

Высокая прочность композиционных материалов позволяет получить предельный диаметр ротора существенно больший, чем для металлических сплавов. Однако, создание ротора с такими диаметрами, как правило, невозможно из-за проблем с опорами вала (подшипника). Наиболее часто применяемые в конструкциях высокооборотных ЭМ газодинамические подшипники при частоте вращения  $100\ 000$  об/мин имеют ограничение по диаметру ротора порядка  $30 - 35$  мм [222,224-228]. Поэтому в дальнейшем будет рассматриваться ротор диаметром  $31$  мм, соответствующий предельному значению при использовании бандажа из сплава 36НХТЮ.

Расчет толщины бандажа при известной прочности материала, заданной частоте вращения и высоте ПМ выполняется с использованием выражения [226]:

$$\delta_{\sigma} = \frac{\left(\frac{\pi}{30}n\right)^2 \left[ \rho_{\sigma} R_{\text{ср.б}} (D_{\text{бн}}^2 - D_{\text{бв}}^2) + \rho_{\text{пм}} R_{\text{ср.пм}} (D_{\text{пмн}}^2 - D_{\text{пмв}}^2) \right]}{8\sigma_{\sigma}}, \quad (\text{П4.1})$$

где  $D_{\text{бн}} = D_2$  – наружный диаметр бандажа равный наружному диаметру ротора;

$$D_{\text{бв}} = D_2 - 2\delta_{\sigma} - \text{внутренний диаметр бандажа};$$

$$R_{\text{ср.б}} = \frac{D_{\text{бн}} - \delta_{\sigma}}{2} - \text{средний радиус бандажа};$$

$$D_{\text{пмн}} = D_{\text{бв}} - 2\delta_{\sigma} - \text{наружный диаметр ПМ};$$

$$D_{\text{пмв}} = D_{\text{бв}} - 2\delta_{\sigma} - 2h_{\text{пм}} - \text{внутренний диаметр ПМ};$$

$$R_{\text{ср.пм}} = \frac{D_{\text{пмн}} - h_{\text{пм}}}{2} - \text{средний радиус ПМ};$$

$h_{\text{ПМ}}$  - высота ПМ.

Как следует из приведенного выше выражения, толщина бандажа зависит от высоты ПМ. Предварительные расчеты показали, что при принятом диаметре ротора увеличение высоты ПМ более 5 – 6 мм неэффективно, так как из-за роста толщины бандажа увеличивается немагнитный зазор между статором и ротором. Оптимальной для ЭМ с указанным выше сочетанием мощности и частоты вращения является высота ПМ 4 мм. При такой высоте ПМ толщина бандажа для диаметра ротора 31 мм равна:

36НХТЮ  $\delta_6 = 1,1$  мм;

стеклопластик  $\delta_6 = 0,74$  мм;

углепластик  $\delta_6 = 0,57$  мм.

На бандаж действуют напряжения от предварительного натяга, теплового расширения ПМ и от центробежных сил. Оценка правильности определения толщины бандажа сводится к проверке совместного выполнения двух условий [224]:

$$\begin{cases} P_N = P_\Delta + P_T - P_\omega > 0; \\ \sigma_N = \sigma_\Delta + \sigma_T - \sigma_\omega < \sigma_6, \end{cases} \quad (\text{П4.2})$$

где  $P_N$  – суммарное давление бандажа на ПМ;

$P_\Delta$  – давление от предварительного натяга;

$P_T$  – давление, создаваемое тепловым расширением ротора;

$P_\omega$  – давление, создаваемое центробежными силами;

$\sigma_N$  – суммарное напряжение в бандаже;

$\sigma_\Delta$  – напряжение от предварительного натяга;

$\sigma_T$  – напряжение, создаваемое тепловым расширением ротора;

$\sigma_\omega$  – напряжение, создаваемое центробежными силами.

Выполнение первого условия (П4.2) гарантирует, что ПМ будет находиться в сжатом состоянии при вращении ротора с рабочей частотой вращения. Второе условие в (П4.2) определяет способность бандажа работать без разрушения при рабочей частоте вращения ротора.

Механическое напряжение и давление от предварительного натяга определяются по формулам:

$$\sigma_{\Delta} = \frac{\Delta_{\text{п}}}{D_2 - 2\delta_{\text{б}}} E_{\text{б}}; P_{\Delta} = \frac{\delta_{\text{б}}}{R_{\text{ср.б}}}, \quad (\text{П4.3})$$

где  $\Delta_{\text{п}}$  - предварительный натяг;

$D_2 = D_{\text{бн}}$  - наружный диаметр бандажа равный наружному диаметру ротора;

$$R_{\text{ср.б}} = \frac{D_{\text{бн}} - \delta_{\text{б}}}{2} - \text{средний радиус бандажа.}$$

Механическое напряжение и давление от термического расширения ротора определяются следующим образом:

$$\sigma_T = \frac{\Delta D_T}{D_{\text{пмн}}} E_{\text{б}}; P_T = \sigma_T \frac{h_{\text{б}}}{R_{\text{ср.б}}}, \quad (\text{П4.4})$$

где  $\Delta D_T = \alpha T_{\text{пм}} D_{\text{пмн}} (T - T_0)$  - линейное расширение ротора;

$T, T_0$  - рабочая и исходная температуры ротора.

Механическое напряжение и давление, создаваемое центробежными силами при вращении ротора, вычисляются с использованием выражений:

$$\sigma_{\omega} = 0,1425\rho_{\text{б}} \left( \frac{\pi}{30} n \right)^2 (0,424R_{\text{ср.б}}^2 + D_2^2); P_{\omega} = R_{\text{ср.б}}\rho_{\text{б}} \left( \frac{\pi}{30} n \right)^2 \delta_{\text{б}}. \quad (\text{П4.5})$$

С использованием выражений (П4.3) – (П4.5) были выполнены расчеты составляющих давления бандажа на ПМ и напряжения в бандаже из различных материалов в зависимости от частоты вращения ротора для температуры, соответствующей холодному (20°C) и нагретому (200°C) состоянию конструкции. Величина предварительного натяга выбиралась таким образом, чтобы при расчетной частоте вращения ротора в нагретом состоянии обеспечивалось выполнение первого условия (П4.2) с запасом не менее 2 МПа. На рисунках П4.2 – П4.4 приведены результаты расчетов для бандажей, выполненных из сплава 36НХТЮ, стеклопластика и углепластика.

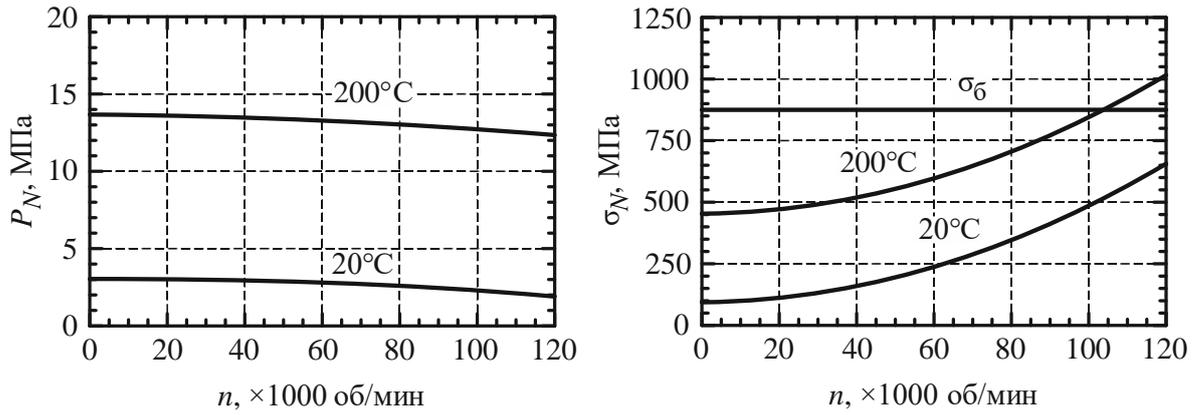


Рисунок В.2 – Давление, действующее на ПМ со стороны бандажа, и напряжения в бандаже из сплава 36НХТЮ при диаметре ротора  $D_2 = 31$  мм

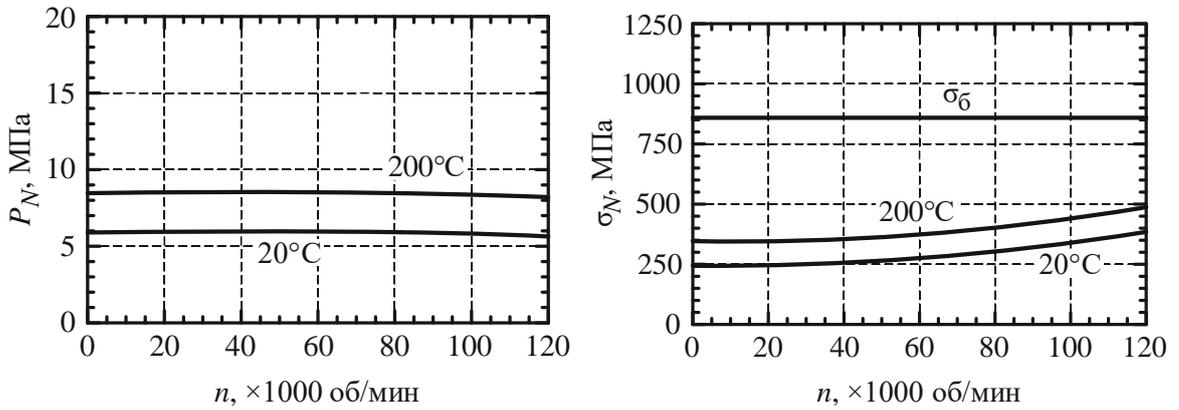
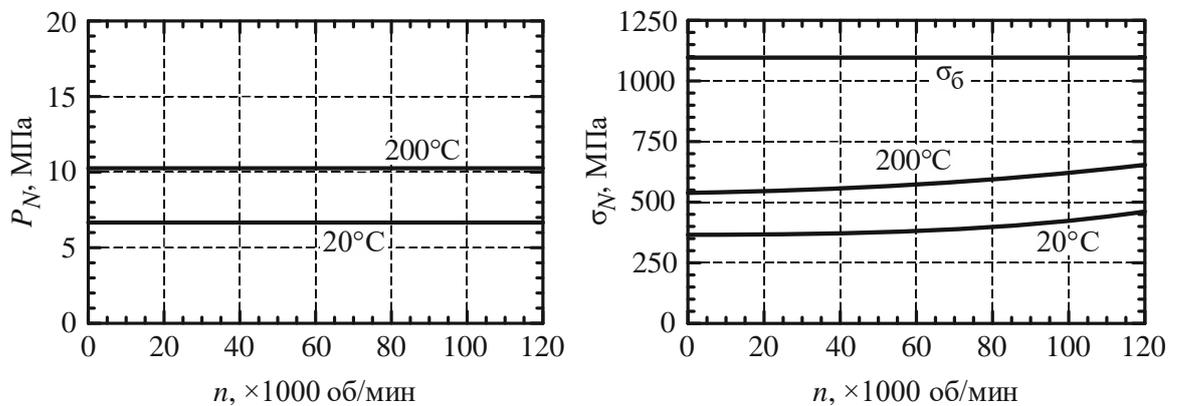


Рисунок В.3 – Давление, действующее на ПМ со стороны бандажа, и напряжение в бандаже из стеклопластика при диаметре ротора  $D_2 = 31$  мм



Рисунке В.4 – Давление, действующее на ПМ со стороны бандажа, и напряжение в бандаже из углепластика при диаметре ротора  $D_2 = 31$  мм

Анализ результатов расчетов показывает, что бандаж из сплава 36НХТЮ при расчетной частоте вращения работает практически на пределе прочности. За счет высокой плотности материала бандажа величина предварительного натяга должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить снижение давления на ПМ при увеличении частоты вращения. При использовании композиционных материалов для рассматриваемого диаметра ротора бандажи работают со значительным запасом по прочности. Кроме того, меньшая плотность материала приводит к более значительному, по сравнению с металлическим бандажом, снижению давления от действия центробежных сил определяемых из выражения (П4.5).

Сравнение бандажей из стеклопластика и углепластика показывает, что за счет большей упругости стеклопластика необходимо иметь больший предварительный натяг. Это приводит к значительному начальному сжатию ПМ. Этого недостатка лишен бандаж из углепластика, который растягивается значительно меньше. Также, углепластик имеет большую, по сравнению со стеклопластиком, прочность, что позволяет делать из него бандаж с меньшей толщиной. Это снижает величину немагнитного зазора ЭМ и позволяет значительно поднять мощность.

По приведенной в [216,225,229,230] методике было выполнено определение мощности ЭМ с диаметром ротора 31 мм, частотой вращения 100 000 об/мин, высоте ПМ 4 мм при использовании бандажей из различного материала. Для бандажа из сплава 36НХТЮ она составила 60 кВт, из стеклопластика и углепластика – 110 кВт и 120 кВт соответственно.

Анализ полученных результатов показывает, что применение композиционных материалов в конструкции ротора с ПМ высокооборотной ЭМ позволяет существенно поднять их мощность. Этот эффект достигается за счет того, что эти материалы имеют меньшую плотность и большую прочность по сравнению с металлическими сплавами. Применение углепластика для этих целей является предпочтительным, так как он имеет меньший модуль упругости по сравнению со стеклопластиком и, как следствие, меньше

растягивается под действием центробежных сил. Это позволяет использовать меньшее значение предварительного натяга и снизить нагрузку на ПМ в неподвижном состоянии.

При изготовлении бандажей из композиционных материалов с заданной величиной предварительного натяга наиболее целесообразно использовать метод намотки. Существуют два метода намотки изделий: “сухой” и “мокрый”. В данном случае целесообразно использовать метод “мокрой” намотки, подробно описанный в разделе 1.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1 Частота вращения ротора высокооборотных ЭМ ограничена прочностными характеристиками и способами крепления ПМ и предельной окружной скоростью ротора.

2. Предельный диаметр ротора с ПМ зависит от частоты вращения и определяется прочностными характеристиками материала бандажа.

3. Бандаж, фиксирующий ПМ на роторе высокооборотной ЭМ, может быть выполнен из цветных металлов и сплавов, таких как латунь, нержавеющая сталь, титановые сплавы и т.п. При частоте вращения ротора более 60 000 об/мин наилучшие показатели ЭМ обеспечивает хромоникелевый сплав 36НХТЮ. С его использованием при частоте вращения ротора 100 000 об/мин возможно создание ЭМ мощностью 60 кВт.

4. При изготовлении бандажа высокооборотных ЭМ с ПМ на роторе целесообразно использовать композиционные материалы на основе стеклянных или угольных нитей, так как они обеспечивают высокую механическую прочность изделия и имеют меньшую, по сравнению с металлическими сплавами, плотность.

5. При использовании композиционных материалов бандажи работают со значительным запасом по прочности. Кроме того, меньшая плотность материала приводит к более значительному, по сравнению с металлическим бандажом, снижению давления от действия центробежных сил, что позволяет использовать предварительный натяг.

6. Сравнение бандажей из стеклопластика и углепластика показывает, что за счет большей упругости стеклопластика необходимо иметь больший предварительный натяг. Это приводит к значительному начальному сжатию ПМ. Этому недостатка лишен бандаж из углепластика, который растягивается значительно меньше. Также, углепластик имеет большую, по сравнению со стеклопластиком, прочность, что позволяет делать из него бандаж с меньшей толщиной. Это снижает величину немагнитного зазора ЭМ и позволяет значительно поднять мощность.

7. Применение бандажей из композиционных материалов позволяет увеличить мощность высокооборотной ЭМ с ПМ на роторе, по сравнению с бандажами из металлических сплавов, за счет уменьшения толщины бандажа и снижения величины немагнитного зазора.

8. Для изготовления бандажей из композиционных материалов целесообразно применять технологию “мокрой” намотки.

9 Полимеризацию наматываемых роторов целесообразно проводить в процессе намотки.