

На правах рукописи

Степанов Петр Евгеньевич

**АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕМОТКИ
РУЛОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАШИНАХ
ПОЛИГРАФИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность 2.5.21. — Машины, агрегаты и технологические процессы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Научный руководитель: **Усов Алексей Георгиевич**,
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образовательное образование «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», профессор кафедры машиноведения

Официальные оппоненты: **Саламандра Константин Борисович**
доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории вибротехнических систем

Терешин Валерий Алексеевич
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доцент Института машиностроения материалов и транспорта, Высшая школа транспорта

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва

Защита диссертации состоится 9 декабря 2025 года в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.385.04 на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18, ауд. № 437.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 190068, Санкт-Петербург, Вознесенский пр., д. 46 и на сайте <http://www.sutd.ru>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.385.04
кандидат технических наук

Антонова Ирина Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В технологических процессах текстильной, лёгкой, полиграфической и других отраслях промышленности часто используется оборудование для размотки рулона с целью дальнейшей обработки. Например, в полиграфическом производстве широко распространены ротационные листорезальные машины, основным предназначением которых является распуск рулона на листы требуемой длины (формата). Непосредственно в области печати можно отметить крупные тиражи печатной продукции, обычно изготавливающиеся на ролевых ротационных печатных машинах, обладающих высокой производительностью. В текстильной и лёгкой промышленности перематка из рулона в рулон материалов осуществляется, например, при их разбраковке или окрашивании.

Одним из наиболее нагруженных узлов перематочного оборудования является узел размотки. В процессе перематки происходит изменение диаметра рулона, его массы и момента инерции. Следует отметить, что из-за нелинейности уравнений, описывающих механические свойства полотна намотанного материала, неидеальности формы втулки, эксцентриситета оси вращения в процессе перематывания возникают колебания силы натяжения полотна материала и скорости размотки, что в свою очередь влияет на качество продукции и производительность. В полиграфическом производстве при окрашке полотен колебания скорости полотна могут приводить к нежелательному проскальзыванию полотна и несовпадению красок, а колебания силы натяжения способны менять внутреннее состояние полотна вплоть до его разрыва.

В процессе разработки нового и модернизации существующего перематочного оборудования важной задачей является анализ и синтез адаптивных алгоритмов управления, с целью получения управляющих воздействий на приводы, позволяющих минимизировать колебания скорости и силы натяжения перематываемого полотна.

Исходя из сказанного, разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения для моделирования перематочных машин текстильной, лёгкой, полиграфической промышленности при учёте свойств полотна, формы втулки и эксцентриситета оси вращения является важной и актуальной задачей, направленной на совершенствование узлов перематочных машин.

Цель и задачи работы. Цель диссертации заключается в разработке методического, математического, алгоритмического и программного обеспечения для исследования процессов перематки рулонных материалов в полиграфических машинах, разработке алгоритмов управления приводами узлов размотки и намотки этих машин. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются **следующие задачи:**

1. Обзор процессов и оборудования для перематки рулонного материала, используемого в полиграфическом производстве, конструктивных особенностей узлов размотки и намотки.

2. Разработка динамических и математических моделей узлов размотки и намотки перематочной машины, учитывающих особенности схемы проводки полотна.

3. Разработка геометрической модели поперечного сечения рулона, учитывающей форму поперечного сечения втулки. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для исследования и анализа геометрических характеристик рулонов и параметров узлов перемоточной машины.

4. Разработка функциональной схемы системы управления приводами перемоточной машины, обеспечивающей выполнение технологических требований (скорость и сила натяжения полотна материала).

5. Синтез алгоритма управления перемоточной машиной. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для моделирования и исследования управляемого процесса перемотки рулонного материала.

Методы исследований. При выполнении диссертационной работы применялись методы математического анализа, теории колебаний, нелинейной механики, теории автоматического управления, аналитического и численного моделирования, методы спектрального анализа.

Соответствие диссертационной работы паспорту научной специальности. Диссертационная работа выполнена в рамках паспорта научной специальности 2.5.21 — Машины, агрегаты и технологические процессы ВАК Министерства науки и высшего образования РФ и соответствует следующим его пунктам:

1. Разработка научных и методологических основ, технических и технологических требований к проектированию и созданию новых машин, агрегатов и технологических процессов;

4. Исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций с использованием моделирования, численных и физических экспериментов;

7. Исследование с учётом эксплуатационных условий технологических процессов, динамики машин, агрегатов, узлов и их взаимодействия с окружающей средой.

Научная новизна. Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что:

— разработана компоновочная схема перемоточной машины с сенсорными валами и системой автоматического управления приводами, которая обеспечивает выполнение требуемых технологических условий перемотки, например, заданной величины натяжения полотна;

— предложена геометрическая модель поперечного сечения рулона в виде эквидистантной спирали; исследованы геометрические свойства спирали, используемые в динамических и математических моделях узлов машин;

— разработано математическое, алгоритмическое и программное обеспечение для расчёта и исследования эквидистантной спирали и её параметров;

— предложена методика определения массо-инерционных характеристик вращающегося рулона в процессе его размотки и намотки с учётом неидеальности формы его поперечного сечения и биения;

— разработаны динамические и математические модели узлов размотки, намотки и перемоточной машины в целом, учитывающие биение и

неидеальность формы поперечного сечения рулона, механические характеристики приводов, упругость полотна на участках;

— предложена схема подчинённой системы управления на основе декомпозиции объекта управления, представленного перемоточной машиной, с использованием метода согласованного управления;

— разработана методика синтеза алгоритма управления перемоточной машиной на основе методов декомпозиции и согласованного управления.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость выполненных в диссертационной работе исследований заключается в том, что:

— разработаны методы анализа и совершенствования процессов и оборудования для перемотки рулонных материалов в машинах полиграфического производства;

— разработаны адаптивные алгоритмы управления, позволяющие учитывать колебания узлов перемоточных машин.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

— разработаны алгоритмы и компьютерные программы, позволяющие моделировать поперечные сечения рулонов с учётом формы втулок;

— созданы алгоритмы и компьютерные программы для решения задач оптимального управления приводами с целью получения заданных значений скорости и силы натяжения полотна;

— разработаны компьютерные программы, позволяющие моделировать работу перемоточной машины в различных режимах.

Материалы диссертации, разработанное алгоритмическое и программное обеспечение используется в учебном процессе Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна на кафедре машиноведения при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 15.03.02 и 15.04.02 – «Технологические машины и оборудование», а также, при подготовке аспирантов, обучающихся по направлению 2.5.21. — Машины, агрегаты и технологические процессы.

Результаты диссертационного исследования применяются в научно-исследовательской деятельности в СПбГУПТД.

Положения, вынесенные на защиту:

— компоновочная схема перемоточной машины с сенсорными валами и системой автоматического управления безредукторными приводами;

— математическая модель перемоточной машины с учётом особенностей схем проводки полотна и изменения масс-инерционных характеристик рулонов;

— геометрическая модель поперечного сечения рулона, представленного в виде эквидистантной спирали;

— синтез адаптивного алгоритма согласованного управления перемоточной машины с учётом предварительной декомпозиции объекта управления.

Степень достоверности результатов работы. Достоверность результатов подтверждается обоснованным применением методов математического моделирования, теории автоматического управления, аналитического и численного решения математических моделей. Установлены качественные и

количественные совпадения результатов моделирования с данными, полученными в рассматриваемой области ранее. Используются современные методы и средства исследований, методики сбора и обработки исходной информации по теме диссертации; современные информационные технологии и вычислительная техника.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы прошли положительную апробацию на XVI Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика (РИ-2018)», Всероссийской научной конференции молодых учёных «Инновации молодёжной науки», Международной научно-технической конференции Light Conf 2021. Также получены акты об использовании результатов диссертационной работы в ООО «ТИПОГРАФИЯ ЛИТАС +», ООО «РосБалт» и ЗАО «СПб Образцовая Типография».

Публикация результатов диссертации. По результатам выполненных исследований опубликовано 4 статьи в журналах, входящих в «Перечень ...» ВАК РФ, 4 тезиса докладов.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав основной части, заключения (выводов и рекомендаций), списка основных сокращений, списка использованных источников информации (86 наименований) и 2 приложений. Основное содержание работы изложено на 215 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы работы, сформулированы цели и задачи исследований, определены научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В первой главе представлен обзор и анализ существующих машин и технологий, применяемых в текстильной, лёгкой, полиграфической и других отраслях промышленности, при выполнении операций, связанных с размоткой и перемоткой рулонных материалов.

Рассмотрены существующие подходы к математическому моделированию процессов перемотки полотна материала; математическому описанию геометрии материала в рулоне, а также подходы к разработке алгоритмов управления системами приводов машин.

Исследованию работы перемоточного оборудования машин текстильной, лёгкой, полиграфической промышленности, разработке математических моделей и алгоритмов управления посвящены работы таких учёных, как: Дроздов В. Н., Щербина Ю. В., Тюрин А. А., Климов Б. И. Б Балтер, Лин К. и других.

Исследования, посвященные рулонным печатным машинам, показали, что дефекты печати, такие как «неприводка печати», во многом обусловлены чрезмерным растяжением бумажного полотна. Растяжения вызваны ошибками настройки печатной машины и динамическими процессами, порожденными вращением печатных пар, подающих полотно. Эти динамические процессы вызваны особенностями функционирования электромеханических систем приводов. В одноприводных машинах согласование угловых скоростей подающих пар осуществляется с помощью механических трансмиссий,

податливость которых вызывает дополнительную подвижность пар. Установлено, что уменьшения неприводки легче добиться в машинах с индивидуальными приводами.

По результатам обзора сформулирована цель и выполнена постановка задач исследования.

Вторая глава посвящена разработке динамических и математических моделей узлов размотки, намотки и перемоточной машины в целом.

На рисунке 1 представлена схема узла размотки, где: 1 — пара тянущих валков (они же цилиндры размотки), 2 — сенсорный вал, 3 — рулон, 4 — втулка, 5 — полотно.

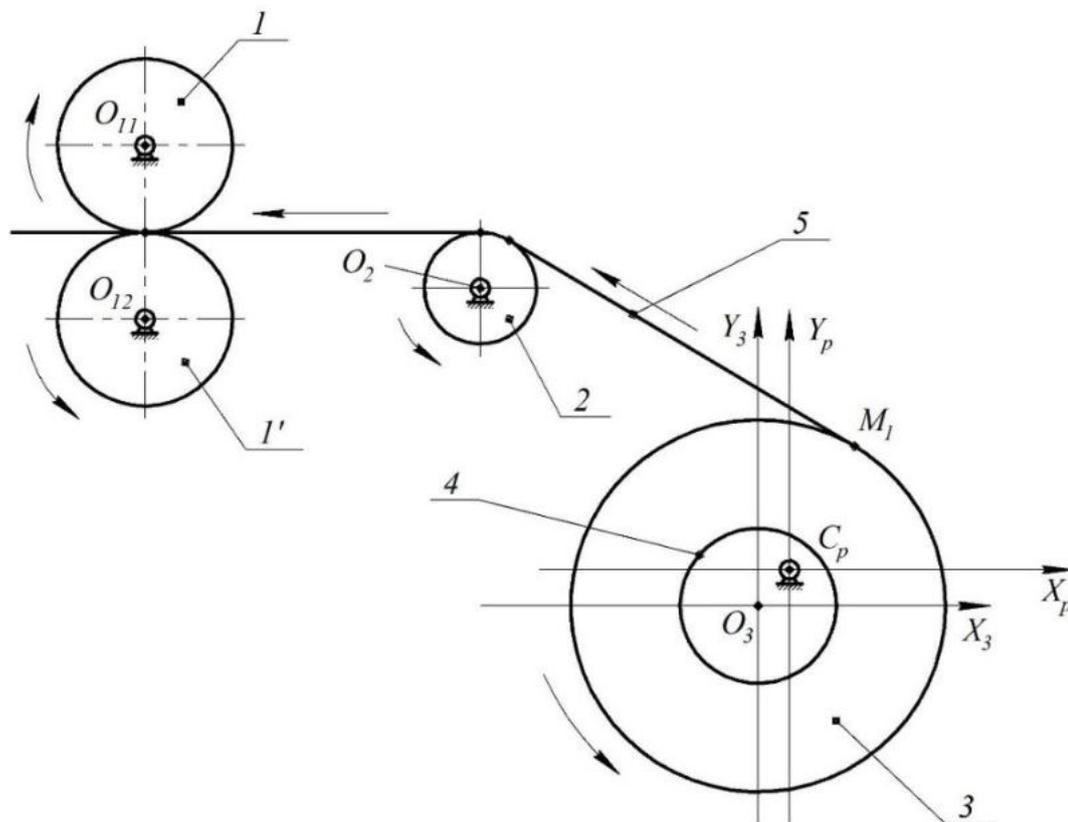


Рисунок 1 — Схема узла размотки

Размотка рулона 3 происходит под действием силы натяжения (на рисунке 2.1 не показана) полотна материала, создаваемой в общем случае лентоведущими цилиндрами, вращающимися от своих индивидуальных приводов. Пара цилиндров 1 осуществляет подачу полотна материала за счёт возникающей силы трения при контакте поверхности цилиндров 1 и 1' с полотном 5. При этом индивидуальный привод обычно имеет только один из цилиндров 1, а второй 1' является прижимным валом и его основное предназначение заключается в обеспечении необходимого усилия прижима. При этом на разматываемом рулоне 3 (далее – рулон размотки) стоит тормозящее устройство, участвующее в обеспечении необходимой силы натяжения полотна материала. Измерение силы натяжения полотна материала осуществляется с помощью сенсорного вала 2. При наличии системы равнения полотна можно сделать следующие допущения: поперечное сечение полотна остаётся параллельным образующим рулона,

сенсорного вала и тянущих цилиндров; образующая полотна в поперечном сечении является параллельной этим осям при выполнении указанного условия.

В дальнейшем при разработке математической модели узла размотки будем считать, что пары цилиндров не меняют толщину полотна при прохождении области контакта и что движение полотна происходит без проскальзывания относительно тянущих цилиндров и сенсорного вала.

Введём неподвижную систему координат $C_p X_p Y_p$, центр которой C_p , совмещен с центром вращения рулона (проекция оси вращения на плоскость поперечного сечения рулона). Центр масс O_3 сечения рулона может не находиться на оси вращения. Будем считать рулон телом вращения, имеющим возможность поворота вокруг горизонтальной оси с центром в точке C_p .

Будем считать цилиндры и сенсорный вал абсолютно твёрдыми телами, а рулон телом вращения с переменными параметрами. За обобщённые координаты примем углы поворота цилиндров 1 и 1', сенсорного вала 2 и рулона 3 (рисунок 1). Аналогичные рассуждения применимы и к узлу намотки. Объединив оба узла (рисунок 2) и записав уравнения движения приводов, механические характеристики приводов и уравнения изменения сил натяжения полотна на участках, получим математическую модель перемоточной машины.

Можно показать, что разность сил натяжения на участках до и после сенсорных валов составляет порядка долей ньютона и это при значениях сил натяжения на участках полотна порядка сотен ньютонов. Руководствуясь этим соображением, была проведена редукция математической модели путём исключения дифференциальных уравнений, описывающих динамику сенсорных валов. Окончательно, математическую модель перемоточной машины можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{p1} \ddot{\gamma}_{p1} = -0.5 J'_{p1} (\gamma_{p1}) \dot{\gamma}_{p1}^2 - c_{e1} c_{m1} R_1^{-1} \dot{\gamma}_{p1} + r_{n1} F_1 - \\ \quad - c_{m1} R_1^{-1} u_1 - (g e_1 \cos \gamma_{p1} + C_{nu1}) M_{p1}, \\ J_{p2} \ddot{\gamma}_{p2} = -0.5 J'_{p2} (\gamma_{p2}) \dot{\gamma}_{p2}^2 - c_{e4} c_{m4} R_4^{-1} \dot{\gamma}_{p2} - r_{n2} F_5 + \\ \quad + c_{m4} R_4^{-1} u_4 - (g e_2 \cos \gamma_{p2} + C_{nu2}) M_{p2}, \\ (L_1 + L_2) \dot{F}_1 = -r_{ep1} \dot{\gamma}_{p1} F_1 + SE(v_{e1} - \dot{\gamma}_{p1} r_{ep1}) + \\ \quad + \dot{\gamma}_{p1} (SE + F_{p1}) L'_1(\gamma_{p1}) + v_{e1} F_{p1}, \\ L_3 \dot{F}_3 = -v_{e1} F_3 + SE(v_{e2} - v_{e1}) + v_{e2} F_2, \\ (L_4 + L_5) \dot{F}_5 = -v_{e2} F_5 + SE(r_{ep2} \dot{\gamma}_{p2} - v_{e2}) + \\ \quad + \dot{\gamma}_{p2} (SE + F_3) L'_5(\gamma_{p2}) + r_{ep2} \dot{\gamma}_{p2} F_3, \\ J_{e1} R_2 \dot{v}_{e1} = -c_{e2} c_{m2} v_{e1} + r_{e1}^2 R_2 (F_3 - F_1) + c_{m2} r_{e1} u_2, \\ J_{e2} R_3 \dot{v}_{e2} = -c_{e3} c_{m3} v_{e2} + c_{m3} r_{e2} u_3 + r_{e2}^2 R_3 (F_5 - F_3). \end{array} \right. , \quad (1)$$

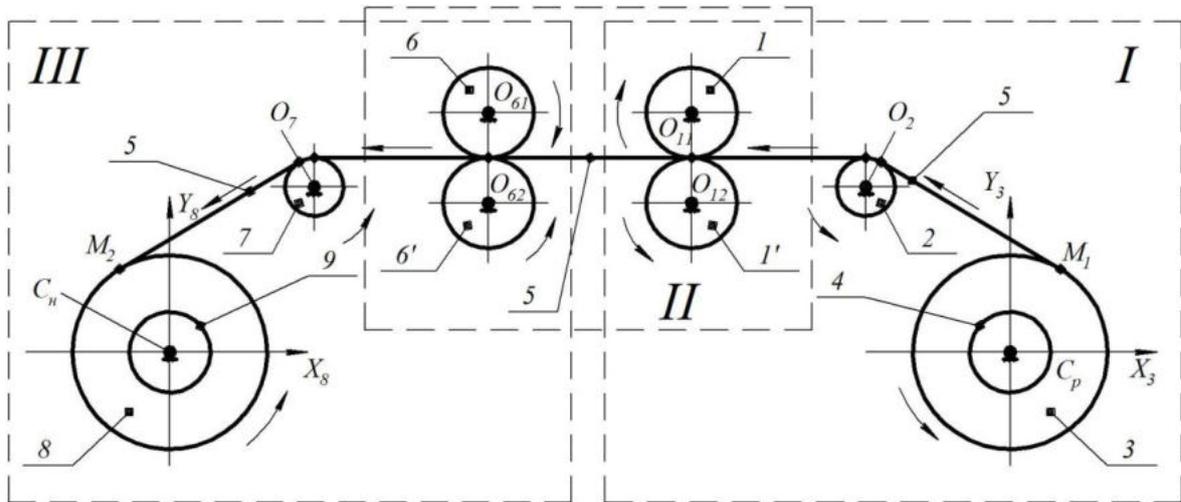


Рисунок 2 — Схема пермоточной машины

I — участок размотки, *II* — участок контроля, *III* — участок намотки.

где: $\gamma_{pk}, k=1,2$ — углы поворота рулонов размотки и намотки, v_p — скорость точек полотна в месте рулон(а), F — сила натяжения полотна на участке, r_n — плечи сил натяжения полотна материала на соответствующих участках размотки и намотки относительно полюсов C_p и C_n (рисунки 1-2), $c_{mk}, c_{ek}, R_k, u_k, k=1,4$ — постоянная момента, константа противо-э.д.с., сопротивление и напряжение на обмотке якоря соответствующего двигателя, J_p, J_{cv}, J_e — моменты инерции рулона, сенсорного вала и цилиндра размотки/намотки соответственно, L — длины участков полотна, $M_{pk}, k=1,2$ — массы рулонов размотки и намотки, $e_k, k=1,2$ — эксцентриситеты осей вращения, $r_{epk}, k=1,2$ — радиусы вращений в рулонах размотки и намотки (длины отрезков C_pM_1 и C_nM_2).

По полученной модели был выполнен анализ номинального режима работы пермоточной машины и определены необходимые взаимосвязи между номинальными, то есть желаемыми функциями переменных состояния.

В третьей главе была разработана геометрическая модель поперечного сечения рулона как эквидистантной спирали.

Расположение витков в рулоне зависят от положения первого витка (рисунок 3), задаваемого полярным радиусом

$$r_0(\varphi + \varphi_1) = f(\varphi + \varphi_1) + g(\varphi + \varphi_1).$$

Здесь $f(\varphi + \varphi_1)$ — функция, описывающая контур втулки ($\varphi \in [0, 2\pi]$, $\varphi_1 = const$), удовлетворяющая условиям $f(\varphi_1) = f(\varphi_1 + 2\pi)$, $f'(\varphi_1) = f'(\varphi_1 + 2\pi)$. Функция $g(\varphi + \varphi_1)$ описывает первый виток рулона при условиях $g(0) = 0$, $g(2\pi) = h$, $g'(0) = g'(2\pi)$, $g'(0) = -f'(0)$, где $h = const$ — толщина полотна (шаг витка). Пусть начальная и конечная точки первого витка лежат на

одной прямой, проходящей через точку O_3 , а касательные к контурам витков в указанных точках перпендикулярны к этой прямой (рисунок 3):

$$r_0(\varphi_1) + h = r_0(\varphi_1 + 2\pi); \quad \left. \frac{x'}{y'} \right|_{\varphi=\varphi_1} = \left. \frac{x'}{y'} \right|_{\varphi=\varphi_1+2\pi} = \operatorname{tg}(\varphi_1),$$

где $x = r_0 \cos(\varphi + \varphi_1)$, $y = r_0 \sin(\varphi + \varphi_1)$, $x' = dx/d\varphi$, $y' = dy/d\varphi$.

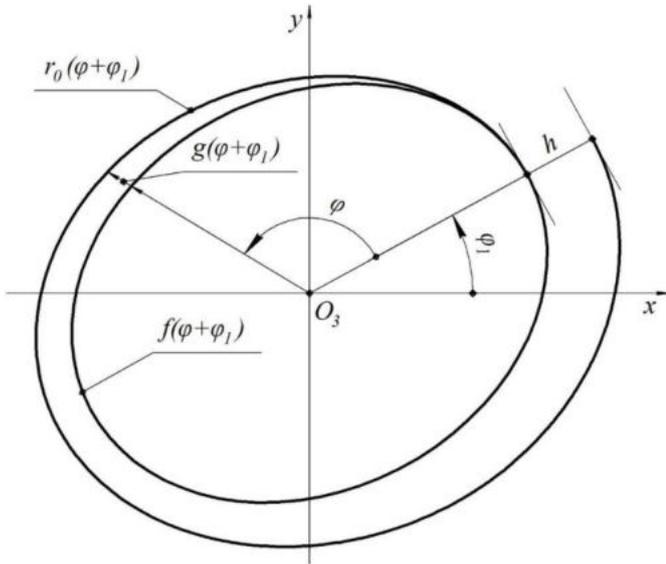


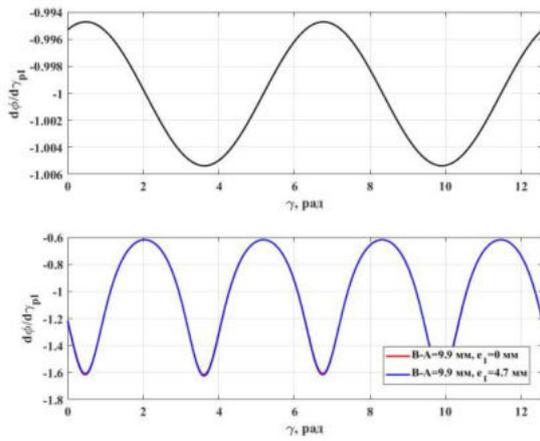
Рисунок 3 — Расчётная схема к определению функции первого витка

На основе этих рассуждений была дана оценка общей длины полотна в рулоне в виде неравенства. Показано, что разность между возможным максимальным и минимальным значениями общей длины равна $N\Delta$, где N — количество витков в рулоне, Δ — разность длин контура поперечного сечения втулки и его эквидистантной кривой на расстоянии h . С помощью формул для построения эквидистантных кривых получены выражения для координат точек n -го витка:

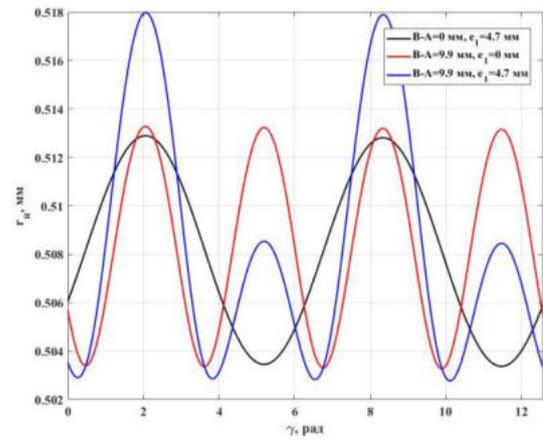
$$x_n = r_0 \cos(\varphi) + h(n-1)(r'_0 \sin(\varphi) + r_0 \cos(\varphi)) / \sqrt{(r'_0)^2 + (r_0)^2},$$

$$y_n = r_0 \sin(\varphi) - h(n-1)(r'_0 \cos(\varphi) - r_0 \sin(\varphi)) / \sqrt{(r'_0)^2 + (r_0)^2},$$

На базе полученных аналитических выражений разработана геометрическая модель поперечного сечения рулона, используемая в дальнейшем для расчёта его масс-инерционных характеристик. Разработан алгоритм и программа, позволяющая анализировать геометрические и масс-инерционные характеристики рулона при учёте толщины полотна, вида функции $g(\varphi + \varphi_1)$ и формы втулки (рисунок 4, поперечное сечение втулки представлено окружностью и эллипсом с полуосями A и B). Представленные зависимости демонстрируют колебательный характер изменения момента инерции и радиуса вращения, а, следовательно, и длины участка полотна, причем с переменной амплитудой.



Зависимость $d\varphi/d\gamma_{p1}$



Зависимость $r_{n1}(\gamma_{p1})$

Рисунок 4 — Геометрические характеристики рулона

Четвёртая глава посвящена проблемам анализа и синтеза алгоритмов управления. Эти проблемы осложняются тем, что объект управления является нелинейным, обладающим свойством параметрической неопределённости. Параметры электродвигателей могут иметь допуски до 10%, толщина полотна в общем случае не является постоянной величиной; неизвестны точные значения коэффициентов трения в подшипниках, неизвестно распределение силы натяжения полотна внутри рулона размотки.

С целью упрощения записи (1) были введены новые обозначения:

$$x_1 = \gamma_{1p}, \quad x_2 = \frac{d\gamma_{1p}}{dt}, \quad x_3 = \gamma_{2p}, \quad x_4 = \frac{d\gamma_{2p}}{dt}, \quad x_5 = F_1, \\ x_6 = F_3, \quad x_7 = F_5, \quad x_8 = v_{e1}, \quad x_9 = v_{e2}.$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = q_1 x_2^2 + q_2 x_2 + q_3 x_5 + q_4 u_1 + q_5, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = w_1 x_4^2 + w_2 x_4 + w_3 x_7 + w_4 u_4 + w_5, \\ \dot{x}_5 = q_6 x_2 + q_7 x_2 x_5 + q_8 x_5 x_8 + SEq_8 x_8, \\ \dot{x}_6 = r_1 x_5 x_8 - 2r_1 x_6 x_8 + r_1 x_6 x_9 - SEr_1 x_8 + SEr_1 x_9, \\ \dot{x}_7 = SEw_6 x_4 + w_6 x_4 x_7 - 2w_7 x_7 x_9 + w_7 x_6 x_9 - SEw_7 x_9, \\ \dot{x}_8 = r_2 x_5 - r_2 x_6 + r_3 x_8 + r_4 u_2, \\ \dot{x}_9 = r_5 x_6 - r_5 x_7 + r_6 x_9 + r_7 u_3. \end{cases}, \quad (5)$$

Коэффициенты q, w, r определяются в соответствии с системой (1). Применим метод декомпозиции и разделим исходный объект управления на

подсистемы (рисунок 2), полагая уравнения движения приводов пар цилиндров независимыми от других переменных состояния x :

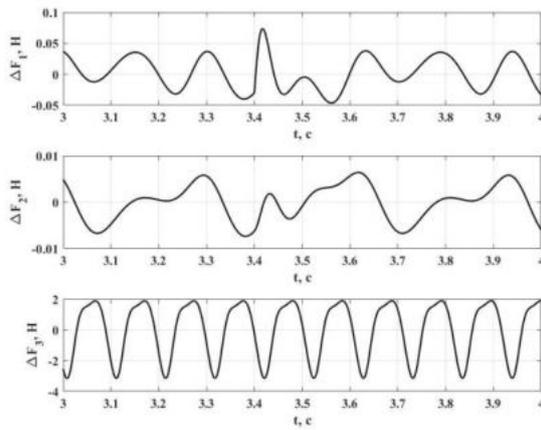
$$\begin{cases}
 \dot{x}_3 = x_4, \\
 \dot{x}_4 = w_1 x_4^2 + w_2 x_4 + w_3 x_7 + w_4 u_4 + w_5, \\
 \dot{x}_7 = SEw_6 x_4 + w_6 x_4 x_7 - 2w_7 x_7 x_9 + w_7 x_{6H} x_9 - SEw_7 x_9, \\
 \dot{x}_9 = r_6 x_9 + r_7 u_{3H} + r_5 x_{6H} - r_5 x_{7H}.
 \end{cases}
 \quad \text{Намотка}$$

$$\begin{cases}
 \dot{x}_1 = x_2, \\
 \dot{x}_2 = q_1 x_2^2 + q_2 x_2 + q_3 x_5 + q_4 u_1 + q_5, \\
 \dot{x}_5 = q_6 x_2 + q_7 x_2 x_5 + q_8 x_5 x_8 + SEq_8 x_8, \\
 \dot{x}_8 = r_3 x_8 + r_4 u_{2H} + r_2 x_{5H} - r_2 x_{6H}.
 \end{cases}
 \quad \text{Размотка}$$

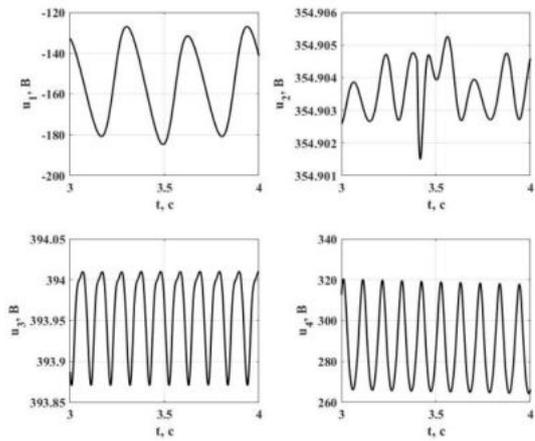
$$\begin{cases}
 \dot{x}_6 = r_1 x_{5H} x_8 - 2r_1 x_6 x_8 + r_1 x_6 x_9 - SEr_1 x_8 + SEr_1 x_9, \\
 \dot{x}_8 = r_3 x_8 + r_4 u_{2H} + r_2 x_{5H} - r_2 x_{6H}, \\
 \dot{x}_9 = r_6 x_9 + r_7 u_{3H} + r_5 x_{6H} - r_5 x_{7H}.
 \end{cases}
 \quad \text{Контроль}$$

В нижних индексах символ «H» означает номинальное, то есть желаемое значение данной величины. К каждой подсистеме был применён метод согласованного управления, суть которого заключается в активном согласовании каналов управления. Уравнениями согласований для каждой из подсистем являются условия поддержания заданных значений сил натяжений полотна на соответствующих участках. В таком случае, исходя из структуры полученных математических моделей подсистем, в результате применения метода декомпозиции и метода согласованного управления внутри этих подсистем, получаем, что размерность объектов, описывающих относительное движение по многообразию, равна двум, что, даёт одномерное условие, накладываемое на составляющие управляющих воздействий, отвечающих за реализацию продольного движения. Это приводит к необходимости назначить внутри участков один из приводов ведущим, а другой — ведомым. Если на участке контроля ведущим выбрать привод цилиндров намотки, то во избежание противоречий при расчёте управляющих воздействий в подсистеме размотки, привод цилиндров размотки, являющийся ведомым на участке контроля, должен быть ведущим на участке размотки. Аналогичные рассуждения применимы к участку намотки. Совместное применение метода декомпозиции и внутри него метода согласованного управления создает определенную иерархию подсистем управления. Привод намотки при выполнении условий согласования определяет движение всей машины.

Для управления участками размотки, контроля и намотки используется алгоритм грубого управления вынужденным движением (метод встроенной модели) совместно с наблюдателями. На рисунке 5 представлены некоторые результаты моделирования системы управления перемоточной машиной.



Графики $\Delta F(t)$



Графики $u_i(t), i = \overline{1,4}$

Рисунок 5 — Графики ошибок по силам натяжения полотна на участках и управляющих воздействий приводов

Можно отметить достаточно малые амплитуды колебаний ошибок по силам натяжения на участках, что объясняется в первую очередь теоретически идеальной реакцией приводов на поступающие управляющие воздействия.

Исследования показывают, что напряжённо-деформированное состояние рулона в значительной мере зависит от силы натяжения полотна на участке намотки. Недостаточный контроль этой силы может привести различным дефектам рулона. Поэтому к системе управления участком намотки предъявляются повышенные требования. В связи с этим, учитывая метод декомпозиции, в работе рассмотрен ещё один вариант построения адаптивной системы управления участком намотки на основе второй теоремы Ляпунова и сформированной полуэталлонной модели рулона намотки. Ключевая цель управления после ряда преобразований задаётся как слежение за полуэталлонной моделью, которая сформулирована относительно угла поворота рулона намотки $\bar{\gamma}_{2p}$. На рисунке 6 показан результат моделирования этой системы. Как видно, ошибка выполнения задания достаточно мала.

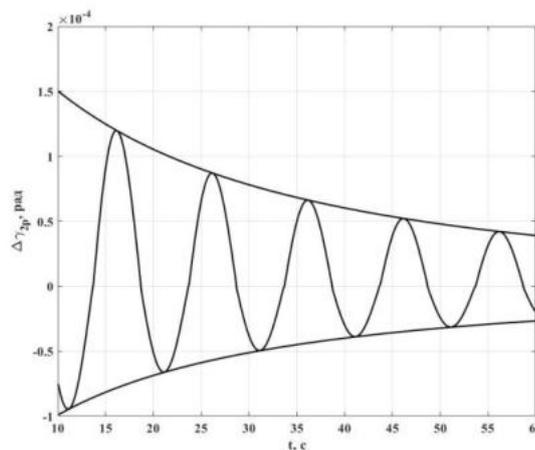


Рисунок 6 — График $\Delta\gamma_{2p}(t)$

Основные результаты и выводы

На основании проведённых исследований, направленных на совершенствование системы управления приводами перемоточной машины в условиях параметрической неопределённости и возникающих нелинейных колебаний, можно сделать следующие выводы.

1. Выполнен обзор процессов и оборудования для перемотки рулонного материала, используемого в полиграфическом производстве. Предложена новая компоновочная схема перемоточной машины непрерывного действия с сенсорными валами и системой автоматического управления приводами узлов размотки и намотки, обеспечивающая требуемые из технологических соображений значения скорости и натяжения полотна.

2. Разработаны динамические и математические модели узлов размотки, намотки и перемоточной машины в целом, учитывающие изменения в процессе работы масс-инерционных характеристик рулонов и геометрических параметров узлов. Предложенные математические модели позволяют учитывать особенности схемы проводки полотна и его упругость, а также механические характеристики приводов.

3. Предложена геометрическая модель поперечного сечения рулона в виде эквидистантной спирали. Для построения эквидистантной спирали предложен набор функций, описывающих контур поперечного сечения втулки и первый виток спирали. Сформулированы необходимые граничные условия для функции первого витка. Получена оценка длины полотна в рулоне в зависимости от периметра контура поперечного сечения втулки и шага спирали. Показано, что форма внешнего витка эквидистантной спирали стремится к окружности с ростом номера витка вне зависимости от формы поперечного сечения втулки. Разработаны алгоритм и программа для моделирования эквидистантной спирали, применяемой к рулонным материалам.

4. Получены аналитические зависимости для определения положения центра тяжести, массы и момента инерции поперечного сечения рулона с учётом неидеальности формы поперечного сечения. Проанализированы зависимости координат центра тяжести поперечного сечения рулона от номера внешнего витка и параметра спирали. Разработаны алгоритм и программа для моделирования масс-инерционных характеристик рулона.

5. Разработана методика и математические зависимости для определения взаимного положения рулона и участка полотна между рулоном и сенсорным валом. Разработаны алгоритмы и программы для моделирования геометрических характеристик узлов размотки и намотки, позволяющие учитывать биение рулона и неидеальность поперечного сечения втулки.

6. Предложена функциональная схема системы управления приводами перемоточной машины, обеспечивающая требуемую скорость и натяжение полотна. Выполнен анализ режима разгона перемоточной машины. Сформулированы требования к номинальной функции скорости цилиндров намотки. Выполнен синтез согласованного управления перемоточной машиной в целом.

7. Проведена декомпозиция исследуемой системы, в результате которой сформированы математические модели участков размотки, намотки и контроля. Выполнен синтез согласованного управления на участках размотки, намотки и контроля. Синтезированы алгоритмы управления объектами, описывающими относительные и продольные движения по многообразию. Синтезированы наблюдатели Люэнбергера и наблюдатели со скользящим режимом. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для моделирования системы управления. Выполнено моделирование системы управления перемоточной машиной. Анализ полученных результатов подтверждает адекватность предложенных математических моделей и систем управления узлами размотки и намотки.

8. Проведён спектральный анализ колебаний сил натяжения полотна на участках с использованием кратковременного преобразования Фурье. Определены частоты наибольших по амплитуде гармоник. На основе полученных данных определена матрица состояния модели внешнего воздействия алгоритма грубого управления вынужденным движением.

9. Выполнен синтез адаптивного алгоритма управления на основе функции Ляпунова участком намотки с использованием алгоритма скоростного градиента. Разработаны алгоритмы и программы для моделирования адаптивной системы управления участком намотки. Полученные результаты моделирования подтверждают справедливость проведённых расчётов и исследований.

10. Даны инженерные рекомендации по проектированию перемоточных машин непрерывного действия с сенсорными валами и системой автоматического управления индивидуальными приводами узлов размотки и намотки, обеспечивающей заданные значения скорости и натяжения полотна.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включённых в «Перечень...» ВАК РФ

1. Степанов П. Е. Определение модели внешнего воздействия в алгоритме грубого управления движением на участке контроля перемоточной машины / П. Е. Степанов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2023. – №4 – С. 52-56. – DOI 10.46418/2619-0729_2023_4_10.

2. Степанов П. Е. Математическое моделирование узла размотки рулона текстильных и полиграфических материалов / П. Е. Степанов, А. Г. Усов // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 12-2. – С. 317-323. – DOI 10.17513/snt.38449. ISSN: 1812-7320.

3. Степанов П. Е. Разработка математической модели разматываемого рулона в листорезальной машине / П. Е. Степанов, А. Г. Усов, М. П. Блоков // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2019. – № 3. – С. 34-40. ISSN: 2072-6775.

4. Степанов П. Е. Синтез алгоритма управления узлом размотки листорезальной машины с применением метода замороженных коэффициентов / В. Н. Дроздов, П. Е. Степанов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. – 2017. – № 3. – С. 120-125. ISSN: 2079-8199.

Материалы конференций

5. Степанов П. Е. К вопросу о перемотке рулонных материалов / П. Е. Степанов, А. Г. Усов // Наука - Технологии - Производство : Тезисы докладов Международной научно-технической конференции, посвященной инновационному развитию текстильной и легкой промышленности, Санкт-Петербург, 29–31 марта 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2021. – С. 20-21.

6. Степанов П. Е. Исследование геометрической модели идеального рулона / П. Е. Степанов, М. П. Блоков, А. В. Моисеев // Инновации молодежной науки : Тезисы докладов Всероссийской научной конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 20–24 апреля 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2020. – С. 14-15.

7. Степанов П. Е. Синтез алгоритма управления узлом размотки / В. Н. Дроздов, П. Е. Степанов // Тези доповідей 16ї міжнародної науковотехнічної конференції студентів і аспірантів «Друкарство молоде», Київ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» видавничополіграфічний інститут, 2016. – С. 109.

8. Степанов П. Е. Алгоритм управления узлом размотки / В. Н. Дроздов, П. Е. Степанов // Инновации молодежной науки – Тезисы докладов 19 (ежегодной) конференции студентов, аспирантов и молодых учёных института ПТиО ВШПМ СПбГУПТД, 2016. – С. 179.