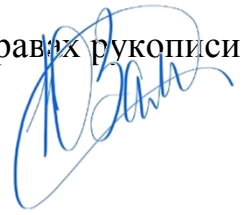


На правах рукописи



Замурагин Юрий Михайлович

**РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ НАТЯЖЕНИЯ
И ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЙ РУЛОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В
УПАКОВОЧНОМ ОБОРУДОВАНИИ**

Специальность 2.5.2. Машиноведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН).

Научный руководитель: **Саламандра Константин Борисович**
доктор технических наук, ведущий научный
сотрудник Лаборатории вибротехнических систем
ИМАШ РАН, г. Москва

Официальные оппоненты: **Малолетов Александр Васильевич**
доктор физико-математических наук, доцент,
директор института робототехники и
компьютерного зрения Автономной
некоммерческой организации высшего образования
«Университет Иннополис», г. Иннополис

Приходько Александр Александрович
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Техническая механика и специальные машины им.
профессора А.А. Петрика» ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный технологический университет»,
г. Краснодар

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»,
г. Санкт-Петербург**

Защита диссертации состоится «09» сентября 2025 года в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.075.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) по адресу: 101000, Москва, М. Харитоньевский пер., д. 4.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью учреждения (организации), просьба направлять по адресу: 101000, Москва, М. Харитоньевский пер., д. 4, ученому секретарю совета 24.1.075.01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМАШ РАН и на сайте <http://imash.ru/councils/disertacii01/zamuragin/>

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н.



Рашоян Гагик Володяевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Реализация технологических процессов в автомобильной, электротехнической, пищевой, легкой и других отраслях промышленности не обходится без широкого использования автоматических линий, представляющих собой совокупность взаимосвязанных машин-автоматов, каждая из которых выполняет заданную технологическую операцию. Построение автоматических линий на основе современных технологий, интеллектуальных производственных решений и роботизированных систем, входящих в перечень приоритетных направлений научно-технического развития Российской Федерации, позволяет улучшить потребительские качества оборудования, повысить производительность, гибкость и функциональность, уменьшить объем наладочных операций, внедрить алгоритмы автонастройки под изменяющиеся условия эксплуатации.

Автоматические линии применяются, в частности, для обработки и производства изделий из металла, пластика, бумаги и других смотанных в рулоны листовых материалов. На этом же оборудовании производятся, в том числе, операции автоматической сборки изделий из нескольких лент. Применение современных компонентов промышленной автоматизации (сервоприводов, оптических датчиков, энкодеров и т.п.) и механических систем линейного перемещения на основе шариковинтовых передач являются наиболее результативным способом повышения эффективности при разработке и создании транспортных, управляющих и исполнительных систем автоматических линий, обеспечивающих согласованность и взаимосвязанность операций. При этом новые свойства модернизированных систем линий приводят к необходимости разработки новых механизмов, методов их контроля и оценки технического состояния. К ним относятся задачи разматывания и протягивания рулонного материала, обеспечения его натяжения, а также задачи оценки положения компонентов и их позиционирования на основе компьютерного моделирования работы технологического оборудования. Таким образом, работа в области анализа и синтеза механизмов и методов моделирования работы и оценки технического состояния технологического оборудования, позволяющих повысить его эффективность и производительность, представляется актуальной.

Степень разработанности темы. Вопросам проектирования систем, механизмов и способов определения положения исполнительных механизмов, методам исследования и оценки технического состояния объектов машиностроения посвящены многочисленные работы различных ученых и изобретателей, в том числе, И.И. Артоболевского, В.А. Глазунова, В.Ф. Глазунова, В.Л. Жавнера, Л.Н. Кошкина, А.Ф. Крайнева, А.Ю. Кутына, Б.Л. Саламандра, Л.И. Тывеса, Ю.В. Щербины, и др., а также производителей промышленного оборудования Fives Machining Systems, Hassia, Jiangsu Jinwang, Sumitomo Heavy Industries и др. Анализ существующих отечественных и зарубежных работ и изобретений в области оценки технического состояния технологического оборудования при автоматической сборке на основе математического и компьютерного моделирования показал, что, несмотря на наличие большого количества решений, степень их теоретического обоснования недостаточна. По этой же причине многие из существующих решений являются узкоспециализированными и не имеют универсальности и адаптивности, которые требуются для упрощения и удешевления производственных процессов. Это обуславливает необходимость разработки новых методов и выработки подхода к проектированию таких систем.

Идея диссертационной работы заключается в использовании принципа обратной связи при синтезе механизмов для поддержания требуемой силы натяжения ленты при разматывании и протягивании ее из рулона, и в использовании современных электромеханических приводов с обратной связью, оптических измерительных систем, позволяющих оценивать положение заготовок на технологическом оборудовании, позиционировать их относительно технологических станций и друг друга.

Цель диссертационной работы заключается в повышении эффективности автоматических линий путем синтеза новых механизмов, систем перемещения лент и

разработки новых методов их подачи, направленных на автоматическую диагностику положений лент, автоматическое совмещение двух лент и сборку изделий из них.

Задачи, решаемые в работе:

- обзор и анализ механизмов натяжения, протягивания и перемещения лент;
- синтез механизма разматывания и протягивания лент из рулона, разработка и анализ математической модели механизма при разматывании и протягивании ленты из рулона с постоянной скоростью или в дискретном (старт-стоп) режиме, проектирование и испытание опытного образца механизма;
- разработка и создание электромеханической системы перемещения двух лент на автоматической упаковочной линии, разработка математической модели этого процесса;
- разработка метода оценки положений лент на автоматической упаковочной линии на основании информации о координате одной из лент и алгоритмов расчета величины перемещения привода;
- создание опытного образца электромеханической системы перемещения двух лент для автоматической линии блистерной упаковки и ее экспериментальное исследование, верификация математической модели процесса совмещения двух лент.

Объектами исследования являются механизмы и системы протягивания, натяжения и перемещения лент цикловой автоматической линии упаковки пищевых продуктов в пластиковые контейнеры.

Предметом исследования являются методы моделирования разматывания и протягивания лент из рулона с постоянной скоростью и в дискретном режиме; оценка положений двух лент относительно технологических станций автоматической линии и друг относительно друга.

Научная новизна заключается в том, что:

- для обеспечения требуемой силы натяжения сматываемого из рулона ленточного материала синтезирована кинематическая схема нового механизма разматывания, в которой реализована кинематическая обратная связь в виде поворотного рычага, связывающего силу натяжения ленты с приложенным к барабану рулона тормозным моментом;
- разработана математическая модель механизма разматывания ленты, на основании которой выполнен его параметрический синтез;
- предложена следящая электромеханическая система перемещения двух лент с обратной связью и разработана ее математическая модель;
- на основе компьютерного моделирования работы автоматической упаковочной линии предложен метод оценки технического состояния технологического оборудования, позволивший прогнозировать положение лент относительно технологических станций и обеспечить их позиционирование друг относительно друга;
- предложенные математические модели механизмов и методы позволили сформировать перечень рекомендаций для настройки технологического оборудования этого типа.

Теоретическая значимость работы заключается в:

- полученных соотношениях, определяющих связь между конструктивными параметрами механизма разматывания и протягивания рулонного материала и силой натяжения сматываемой ленты;
- разработанных методах моделирования процесса перемещения двух лент на автоматических упаковочных линиях.

Практическая значимость работы:

- разработан оригинальный механизм разматывания и протягивания ленты из рулона, эффективный при работе как с постоянной скоростью, так и в дискретном режиме;
- разработана новая электромеханическая система перемещения рулонных материалов для сборки изделий из двух лент на автоматических упаковочных линиях;
- разработан метод оценки технического состояния технологического оборудования,

закрывающийся в определении положения двух лент на автоматической линии на основе информации о координате одной из них;

- сформулированы рекомендации по настройке и выбору параметров разработанной электромеханической системы перемещения лент;
- разработанные механизмы и методы позволили повысить эффективность автоматических упаковочных линий.

Реализация результатов работы. Полученные научные результаты диссертации были использованы при выполнении государственного задания в рамках темы 1.13 «Разработка методов анализа и синтеза новых классов механизмов и технологических процессов для машин новых поколений», а также договоров 04-22-ИМАШ от 01.03.2022 г. и 05-24-ИМАШ от 01.03.2024 г. Практические положения диссертации реализованы и испытаны на стенде «Автоматическая линия блистерной упаковки АЛБ 165» в ИМАШ РАН и внедрены на предприятиях ООО «Порционные продукты» и ООО Производственная Компания «Мед России».

Методы исследований:

- при моделировании механизма разматывания и протягивания рулонных материалов использованы классические методы теоретической механики, теории механизмов и машин, численные методы интегрирования дифференциальных уравнений;
- при моделировании процесса перемещения компонентов сборки использовались методы теории конечных разностей и теории автоматического управления;
- натурные испытания проводились с использованием современных аппаратных средств измерения, сбора и обработки информации.

Положения, выносимые на защиту:

- синтез механизма разматывания и протягивания рулонных материалов с постоянной скоростью и в дискретном режиме;
- электромеханическая система перемещения лент на автоматических упаковочных линиях, содержащая механический привод с обратной связью и измерительно-управляющую систему;
- математическая модель механизма разматывания и протягивания рулонного материала с учетом изменения радиуса рулона и наличия кинематической обратной связи в синтезированном механизме, математическая модель процесса перемещения двух лент одним приводом на автоматической упаковочной линии;
- метод оценки положения лент на автоматической линии, обеспечивающий позиционирование лент относительно технологических станций и друг относительно друга с заданной точностью и с учетом возможных изменений условий эксплуатации.

Обоснованность и достоверность научных результатов обеспечивается использованием фундаментальных положений теоретической механики, теории механизмов и машин, исчисления в конечных разностях, применением современных методов вычислительной механики, численного компьютерного моделирования, использованием достоверных источников, сопоставлением результатов моделирования с экспериментом и результатами, полученными другими исследователями. Практическая достоверность полученных результатов подтверждается экспериментальными данными и внедрением разработанных механизма разматывания и протягивания рулонного материала, электромеханической системы, методов и алгоритмов в серийно производимые автоматические упаковочные линии.

Личный вклад соискателя заключается в выполненном обзоре современного состояния исследований, научной и патентной литературы, сравнительном анализе известных устройств, механизмов и методов перемещения материалов на автоматических линиях, разработке математических моделей синтезированного механизма и процесса перемещения двух лент одним приводом на автоматических линиях, разработке метода оценки технического состояния автоматической упаковочной линии на основе информации о

положении одной из лент, проведении натурных экспериментов, обработке экспериментальных данных.

Апробация результатов исследования. Основные положения и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях и семинарах: Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (г. Москва, ИМАШ РАН), 2022-2024 гг.; Международная конференция «Моделирование в инженерном деле» (г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана), 2023 г.; Международная конференция по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения 23» (г. Санкт-Петербург, ГУАП), 2023 г.; Международная научно-практическая конференция «Современное машиностроение: Наука и образование 2023» (г. Санкт-Петербург, СПбПУ Петра Великого), 2023 г.; XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (г. Санкт-Петербург, СПбПУ Петра Великого), 2023 г.; Московский ежемесячный семинар молодых ученых и студентов (г. Москва, ИМАШ РАН), 2023, 2024 гг.; Международный семинар по научным проблемам машиностроения им. И.И. Артоболевского (г. Москва, ИМАШ РАН), 2025 г.; IX Международная научная конференция «Перспективы и направления развития теории механизмов и машин» (г. Москва, ИМАШ РАН), 2025 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 4 статьи в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 105 наименований. Работа содержит 154 страницы основного текста, 71 рисунок, 3 таблицы, 3 приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимость и положения, выносимые на защиту. Представлены методы исследования и обоснована достоверность полученных результатов, приведены сведения об апробации работы, личном вкладе автора, публикациях, структуре и объеме диссертации.

В первой главе описываются объекты исследования и приводится анализ научной и патентной литературы, формулируются задачи диссертационного исследования.

Технологический процесс разматывания и протягивание гибких листовых рулонных материалов в упаковочном оборудовании имеет крайне важное значение. Например, на автоматических линиях (рис. 1а) потеря натяжения лент приводит к их относительному смещению, влияет на качество изготавливаемых изделий и может быть причиной замятия материалов в инструментах технологических станций. С другой стороны, избыточное натяжение ленты является причиной ее растяжения, деформации, обрыва и аварии. Известные механизмы разматывания рулонных материалов предназначены в основном для работы с постоянной скоростью. Их основными недостатками являются скачки силы натяжения в момент начала разматывания и инерционный выбег рулона при остановке этого процесса. Таким образом, первая задача исследования направлена на разработку механизма, устраняющего указанные недостатки.

Технологические станции автоматической линии (рис. 1а) являются неподвижными, соответственно при перемещении лент необходимо, чтобы формируемые на нижней ленте контейнеры попадали точно в инструменты станций. При этом необходимо обеспечивать совмещение контура контейнеров с этикетками на верхней ленте. Выполненный обзор систем перемещения двух лент показал отсутствие универсальных механизмов и методов совмещения компонентов, находящихся на различных лентах, который позволял бы при этом попадать точно в инструменты на технологических станциях при изменяющихся условиях эксплуатации оборудования (тип материалов, габариты изделий, механические характеристики и т.п.). Таким образом, вторая задача заключается в разработке системы и

универсальных методов перемещения рулонных материалов, позволяющих позиционировать ленты относительно технологических станций и друг друга.

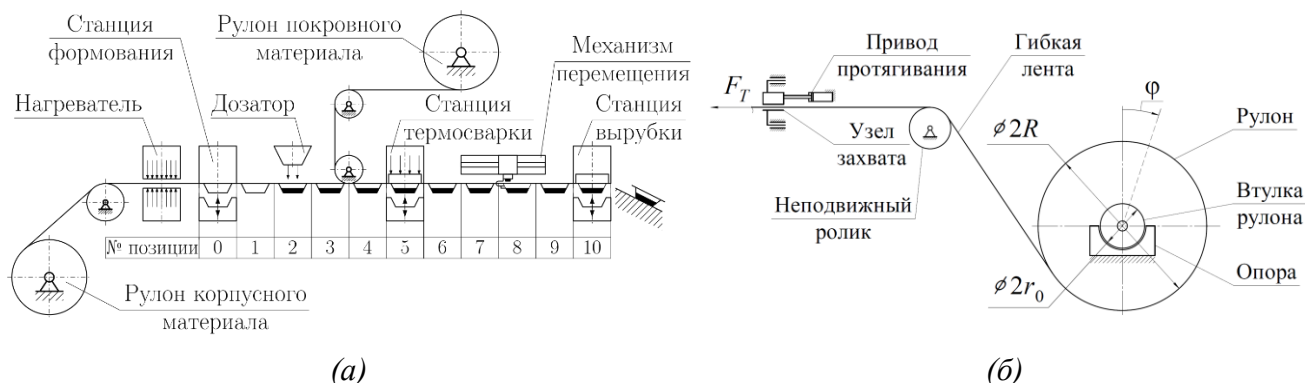


Рис. 1. (а) Технологическая схема автоматической линии блистерной упаковки; (б) Исходная кинематическая схема механизма размотки и протяжки ленты.

Во второй главе описывается синтез и анализ механизма протягивания рулонных материалов с постоянной скоростью и в дискретном режиме. В качестве исходной кинематической схемы (рис. 1б) использован известный механизм, представляющий из себя рулон, установленный на опоре, из которого с помощью привода протягивания сматывается материал. Тормозной момент в таком устройстве создается за счет массы рулона. В работе предложена идея использования кинематической обратной связи, на основе которой был синтезирован и запатентован механизм разматывания и протягивания лент, изображенный на рис. 2. К исходной кинематической схеме были добавлены поворотный рычаг с натяжным роликом и колодочный тормоз, кинематически связанный с поворотным рычагом через упоры и планшайбу. В таком случае, при начале разматывания, привод протягивания преодолевает только инерционность рычага с натяжным роликом, который затем отжимает тормозные колодки, позволяя рулону свободно разматываться, а при торможении рычаг опускается, запирая колодочный тормоз и останавливая рулон, не позволяя ему совершать инерционный выбег.

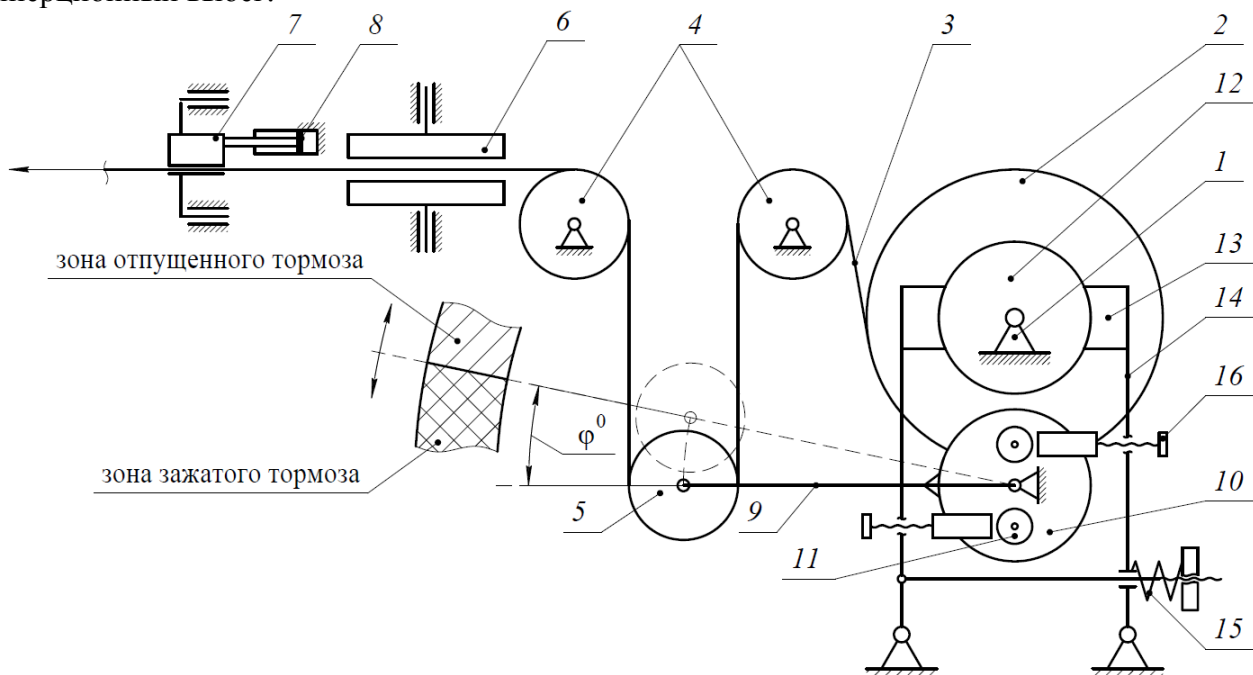


Рис. 2. Кинематическая схема синтезированного механизма разматывания и протягивания ленты: 1 – опора, 2 – рулон, 3 – гибкая лента, 4 – неподвижные ролики, 5 – натяжной ролик, 6 – технологическая станция, 7 – захват ленты, 8 – привод протягивания, 9 – поворотный рычаг, 10 – планшайба, 11 – кулачок, 12 – барабан колодочного тормоза, 13 – тормозные колодки, 14 – поворотный рычаг, 15 – пружина, 16 – регулируемые упоры.

На рис. 3 представлены элементы устройства и силы, возникающие в них. С помощью уравнений равновесия моментов, рассматривая ленточный материал как нерастяжимый, а изменение угла поворота рычага малым, была получена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} J_1(t)\ddot{\varphi}_1 = F_T(t)R(t) - \mu(N_1(t) + N_2(t))r_B \\ J_2\ddot{\varphi}_2 = (2F_T(t) - P)b - 2F_S(t)a \\ N_1(t)L + N_2(t)L = 2F_0l_0 - F_S(t)(l_1 + l_2) \end{cases}$$

где J_1 – момент инерции рулона, μ – коэффициент трения в колодочном тормозе, J_2 – момент инерции поворотного рычага с натяжным роликом, F_0 – сила поджатия пружины 15.

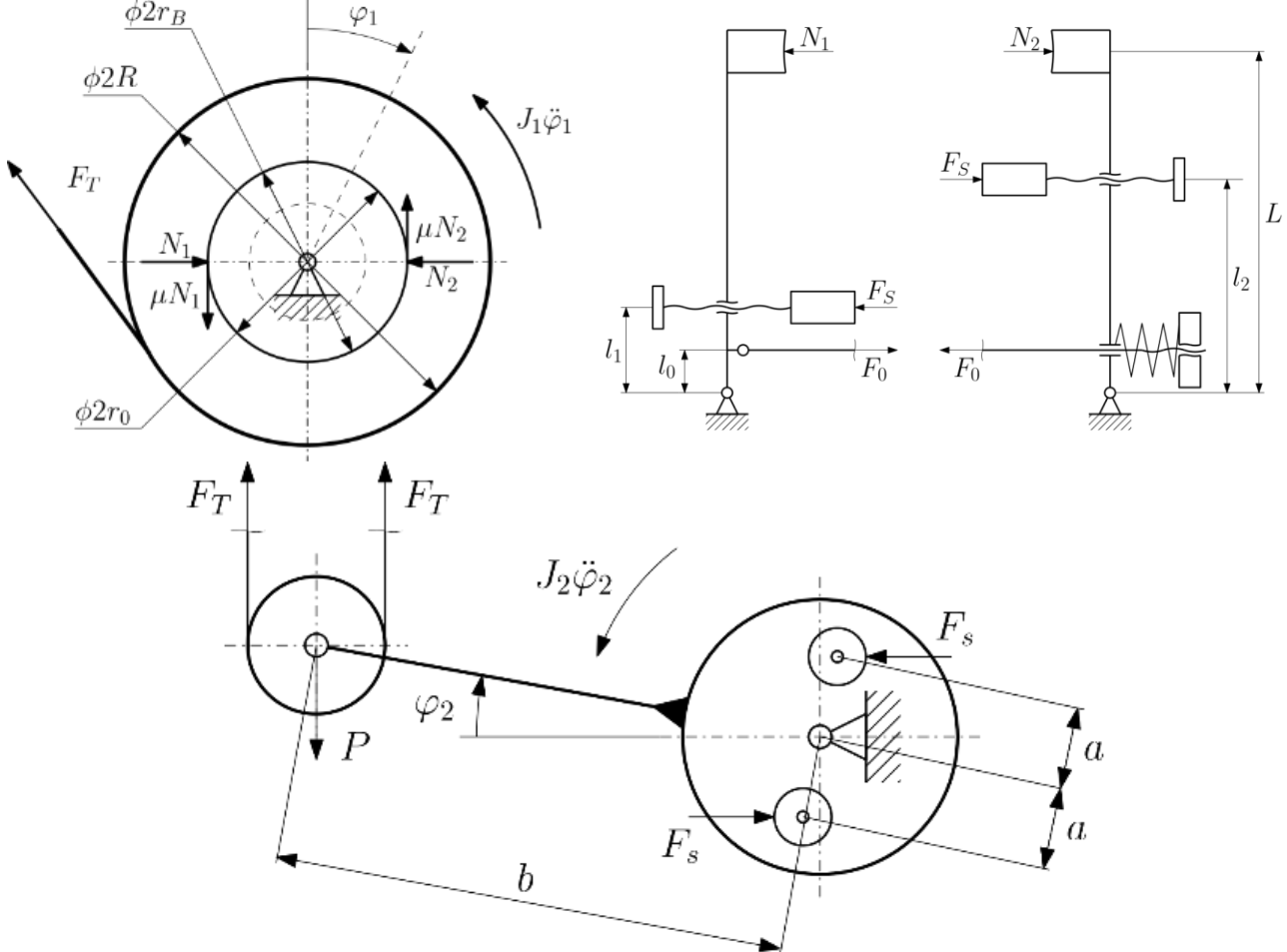


Рис. 3. Элементы устройства и силы, возникающие в них.

Для исключения влияния габаритных размеров механизма и универсальности полученных зависимостей уравнения приводились к безразмерному виду. Приняты следующие безразмерные величины и переменные:

$$\xi = R/r_0; \xi_B = r_B/r_0; \xi_0 = R_0/r_0; \lambda = (l_1 + l_2)/L; \lambda_0 = l_0/L; \kappa = a/b; \Phi_T = F_T/P; \\ \Phi_S = F_S/P; \Phi_0 = F_0/P; N = (N_1 + N_2)/P; \sigma = r_0/gT_0^2; k_p = \rho_2/\rho_1; T_0 = \sqrt{\rho_1 \pi H r_0^3 / P}$$

Тогда силы, действующие на элементы механизма, с учетом переменного радиуса рулона выражаются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \Phi_T = \mu \xi_B (4\lambda_0 \kappa \Phi_0 + \lambda) / 2 (\kappa \xi + \mu \lambda \xi_B) \\ \Phi_S = (4\mu \lambda_0 \Phi_0 \xi_B - \xi) / 2 (\kappa \xi + \mu \lambda \xi_B) \\ N = \xi (4\lambda_0 \kappa \Phi_0 + \lambda) / 2 (\kappa \xi + \mu \lambda \xi_B) \end{cases}$$

При этом в механизме-прототипе (рис. 1б) сила натяжения ленты определяется формулой:

$$\Phi_{T2} = \mu_2 \xi_B (\xi^2 + k_p - 1) / \sigma \xi.$$

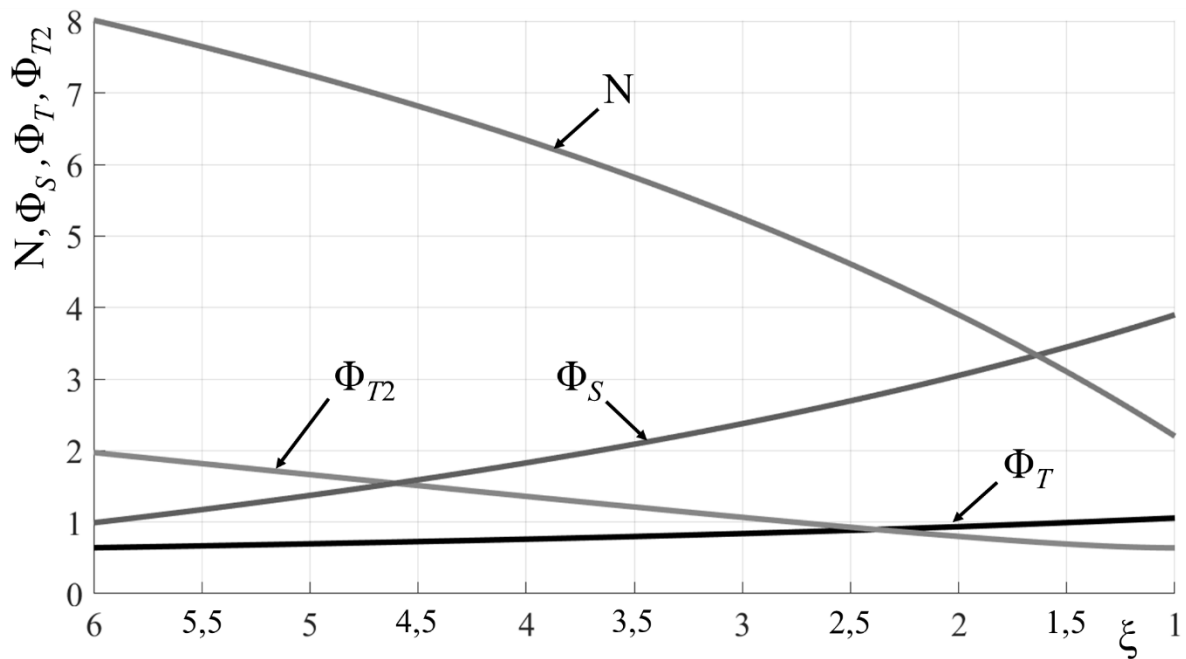


Рис. 4. Зависимости сил от радиуса рулона.

Из зависимости, полученной для силы натяжения ленточного материала следует, что при уменьшении отношения плеч рычага a/b (рис. 3) уменьшается влияние радиуса рулона на величину силы натяжения. Зависимости полученных сил от радиуса рулона (рис. 4) показывают, что в синтезированном механизме с уменьшением радиуса рулона сила натяжения ленты увеличивается в 1,6 раз, а в механизме-прототипе уменьшается в 3 раза. Исходный механизм теряет эффективность при R близких к r_0 , а разработанный механизм при этом сохраняет силу натяжения ленты.

При динамическом анализе механизма принимается, что момент инерции рулона рассчитывается как момент составного диска (внутри металлическая втулка, снаружи ленточный материал), а момент инерции рычага с натяжным роликом рассчитывается в приближении, что радиус ролика существенно меньше длины рычага. Также принимается, что радиус рулона в зависимости от угла его поворота изменяется по закону архимедовой спирали, а скорости подвижных элементов системы связаны следующим соотношением:

$$\dot{\phi}_2 b = (\dot{x} - \dot{\phi}_1 R)/2,$$

где $\dot{x}$ – закон изменения скорости привода протягивания.

Дополнительно введены безразмерные величины и переменные:

$$\beta = b/r_0; \delta = d/2\pi r_0; \Lambda = A/r_0; \tau = t/T_0; v = T_0 \dot{x}/r_0;$$

$$\phi_1 = \varphi_1; \phi'_1 = T_0 \dot{\phi}_1; \phi''_1 = T_0^2 \ddot{\phi}_1; \phi_2 = \varphi_2; \phi'_2 = T_0 \dot{\phi}_2; \phi''_2 = T_0^2 \ddot{\phi}_2.$$

Система дифференциальных уравнений движения элементов механизма принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \phi''_1 + 2\beta\phi''_2 - (v' + \delta\phi_1'^2)/(\xi_0 - \delta\phi_1) = 0 \\ \left((\xi_0 - \delta\phi_1)^3 + (k_p - 1)\xi_k^4 / (\xi_0 - \delta\phi_1) \right) \phi''_1 - \beta\sigma\phi_2'' + 2\mu N\xi_B / (\xi_0 - \delta\phi_1) - 1 - \Phi_S \kappa = 0. \end{cases}$$

На рис. 5 показаны результаты численного моделирования работы механизма, показывающие, что в моменты разгона сила натяжения возрастает, а поворотный рычаг с натяжным роликом поднимается вверх. При торможении сила незначительно уменьшается, а рычаг с натяжным роликом опускается. Колебания составляют $\pm 4\%$ от среднего значения силы натяжения.

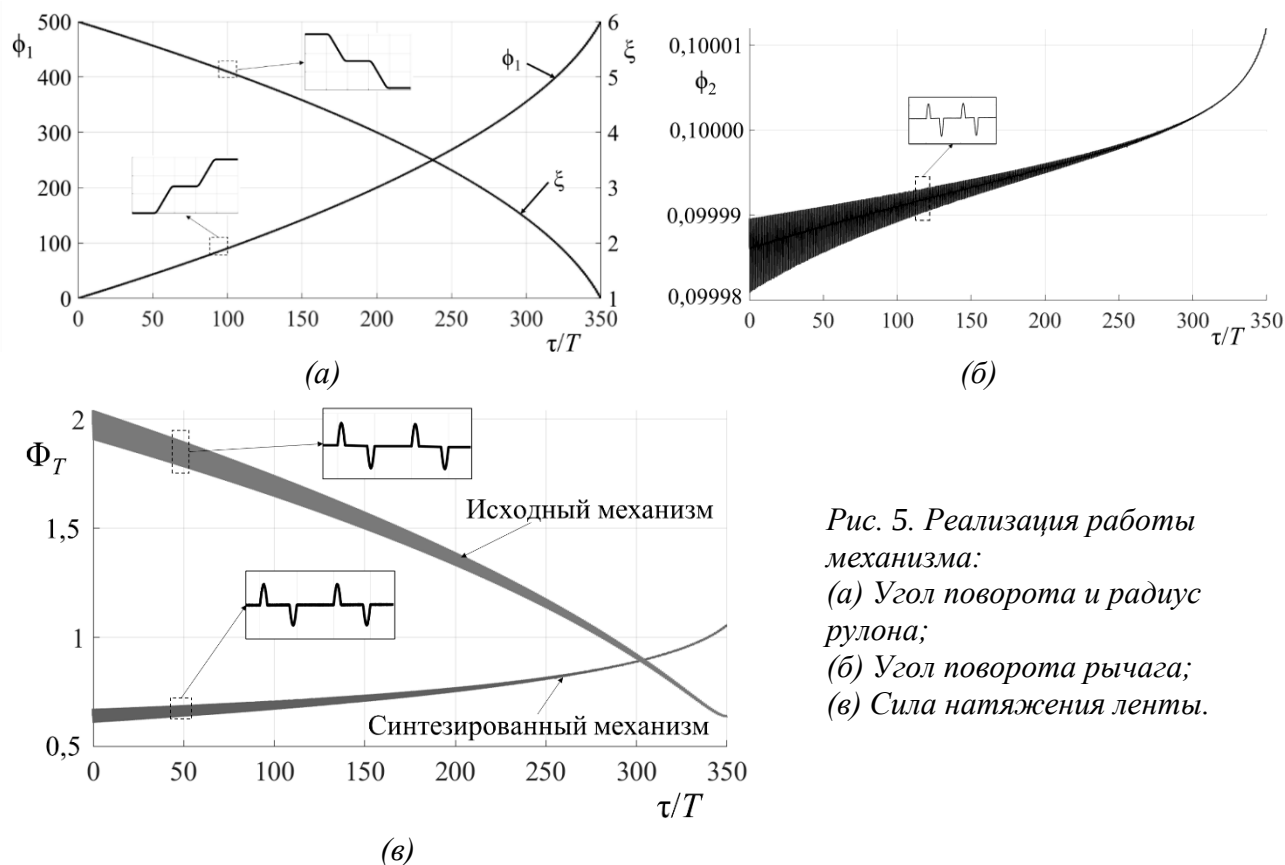


Рис. 5. Реализация работы механизма:
 (а) Угол поворота и радиус рулона;
 (б) Угол поворота рычага;
 (в) Сила натяжения ленты.

В третьей главе описывается следующая система перемещения ленточных материалов автоматической упаковочной линии и метод определения положений лент относительно технологических станций и друг относительно друга. Основываясь на уже известных механизмах и способах, с использованием современной компонентной базы была разработана новая электромеханическая система перемещения лент для автоматической упаковочной линии, представленная на рис. 6а. Основным источником информации о положении ленты на автоматической линии является фотометка (рис. 6б), отпечатанная с тем же шагом, что и этикетка. Основная задача состоит в том, чтобы обеспечить попадание контейнеров в инструменты технологических станций (рис. 7а) и одновременно совместить этикетки и контейнеры, расположенные на верхней и нижней ленте соответственно. Для решения этой задачи в работе разработана математическая модель процесса перемещения лент и предложен метод диагностирования положения лент на основе информации о координате одной из них.

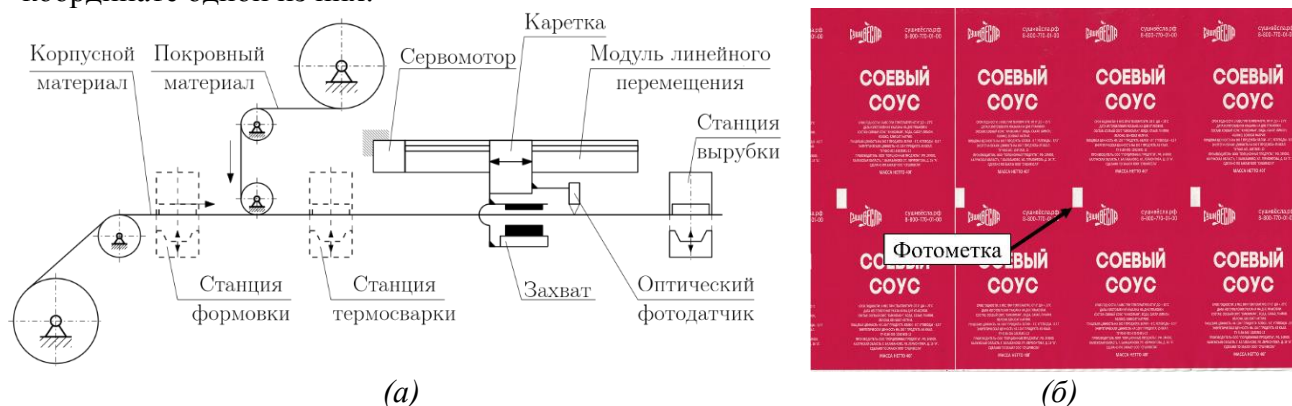


Рис. 6. (а) Система перемещения лент автоматической линии; (б) Этикетка с фотометкой.

В предложенной электромеханической системе используется сервопривод, вал которого соединен с модулем линейного перемещения. Сервопривод, оснащенный датчиком

угла поворота вала, перемещает каретку с установленными на ней захватом и фотодатчиком. При движении каретки вправо обе ленты, зажатые захватом, сматываются со своих рулонов и перемещаются вместе с кареткой. При возврате каретки в исходное положение захват отпущен, а ленты неподвижно удерживаются силовой станцией вырубки. При распознавании фотодатчиком метки опрашивается энкодер сервопривода, по показаниям которого рассчитывается координата положения переднего фронта фотометки.

Хранящиеся в памяти контроллера координаты фотометок можно представить в виде, показанном на рис. 7б. В работе рассматривается конфигурация, когда за один рабочий цикл линии каретка перемещает ленты на удвоенный шаг по меткам, то есть за одно перемещение датчик проходит две метки. Из рис. 7б можно выразить соотношение между координатой фотометки B , перемещением транспортера f и действительным расстоянием между фотометками L на i -ом цикле работы автоматической линии в математической модели:

$$B_i = B_{i-1} + f_i - 2L. \quad (1)$$

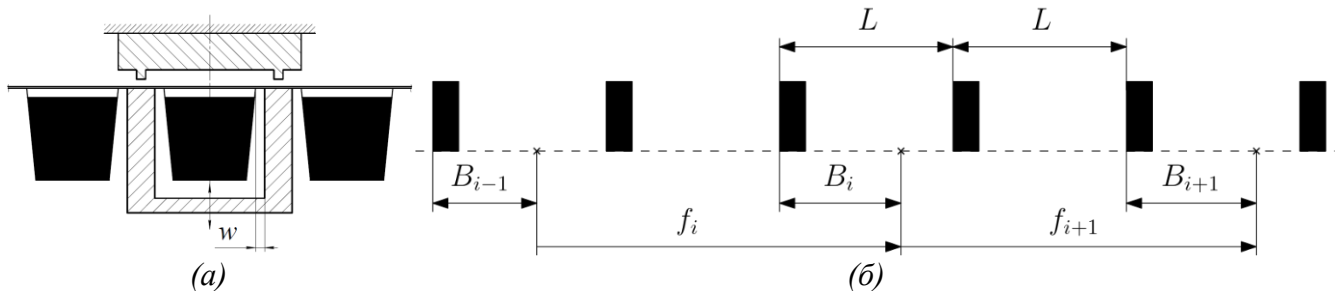


Рис. 7. (а) Зазор в инструменте термосварки и вырубки. (б) Схема координат фотометок, хранящаяся в памяти контроллера

Выражения для смещения контейнеров относительно станций термосваривания p^1 и станции вырубки p^2 принимают следующий вид:

$$p_i^1 = \sum_{j=0}^{m_1-1} f_{i-j} - p_w; \quad p_i^2 = \sum_{j=0}^{m_2-1} f_{i-j} - p_c. \quad (2)$$

где m_1 – количество позиций между станциями формования и термосварки, m_2 – количество позиций между станциями формования и вырубки, p_w – расстояние между станциями формования и сварки, p_c – расстояние между станциями формования и вырубки.

Задача совмещения этикетки и контура контейнера сводится к тому, что фотометка должна находиться в координате B_0 . Смещение фотометки Δ_i^Σ относительно заданного положения B_0 рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta_i^\Sigma = B_i - B_0. \quad (3)$$

Тогда нахождение фотометки в заданном положении B_0 с допускаемой точностью $[\Delta]$ можно представить в следующем виде:

$$|\Delta_i^\Sigma| < [\Delta]. \quad (4)$$

Смещение фотометки (а с ней и этикетки) относительно требуемого положения B_0 в математической модели рассчитывается следующим образом:

$$\Delta_i^\Sigma = \sum_{j=1}^i (f_j - 2L) - B_0. \quad (5)$$

Таким образом можно сформулировать условия, которые должны выполняться при перемещении лент на автоматической упаковочной линии:

$$1) |\Delta_i^\Sigma| < [\Delta]; \quad 2) |p_i^1| < w_w; \quad 3) |p_i^2| < w_c; \quad (6)$$

Система уравнений (1)-(6) формирует математическую модель процесса совмещения двух лент на автоматической линии.

На рис. 8 представлены виды возмущений, возникающие при автоматической сборке изделий из двух ленточных компонентов, учитываемые в математической модели.

1. Склейка (рис. 8а) возникает, когда рулон покровного материала заканчивается и его необходимо заменить. Вручную невозможно точно переклеить покровный материал без смещения. При этом система управления должна игнорировать показания сильно отличающиеся от показаний на предыдущем цикле работы, чтобы не вносить слишком большие возмущения в работу системы.

2. Стык печати (рис. 8б) является периодическим внешним воздействием, возникающим из-за наличия технологического зазора в печатной матрице, образующегося при ее установке на вал флексографической машины печати этикеток.

3. Погрешности измерительной системы (рис. 8в), зависящие от скорости распознавания метки и перемещения каретки, освещенности, состояния поверхности пленки и т.п. В настоящей работе принято нормальное распределение плотности вероятности срабатывания датчика при переходе с фона на фотометку.



(а)

(б)

(в)

Рис. 8. Виды возмущений при автоматической сборке:
(а) склейка на ленте; (б) стык печати; (в) погрешность измерения.

В четвертой главе описываются и анализируются алгоритмы расчета величины перемещения привода разработанной электромеханической системы.

Было предложено использовать массив S значений длиной n заполняемый определенным образом и затем рассчитывать величину f перемещения лент как его среднее значение. При этом на каждом цикле рассчитывается новое значение массива и ставится на место первого элемента, все остальные элементы сдвигаются, а последний удаляется.

$$S^i = [S_i \quad \dots \quad S_{i-j} \quad \dots \quad S_{i-(n-1)}], \quad j = \overline{0, n-1}; \quad f_i = \bar{S}^i = n^{-1} \sum_{j=0}^{n-1} S_{i-j}$$

Массив значений и его усреднение используются для того, чтобы уменьшить влияние возмущений на величину перемещения. В работе предложено 3 алгоритма расчета величины перемещения лент. **Алгоритм 1** заключается в расчете расстояния между соседними фотометками на основе определения их координат. В массив вносится удвоенное расстояния между фотометками $S_{i+1} = 2L$.

В таком случае можно оценить влияние случайной составляющей на величину перемещения:

$$M[f] = 2L; D[f] = 8D[\delta]/n. \quad (7)$$

Как видно из выражения (7), массив уменьшает дисперсию погрешности измерения только при $n > 8$. Значит использование массива меньшей длины не имеет смысла.

Алгоритм 2 основан на изменении координаты фотометки на двух соседних циклах. Формула для расчета каждого нового члена массива принимает следующий вид:

$$S_{i+1} = f_i - \Delta_{i-1}; \Delta_i = B_i - B_{i-1}$$

Алгоритм 2 можно свести к конечно-разностному уравнению, для которого можно показать его сходимость – корни характеристического уравнения должны быть по модулю меньше единицы, что справедливо при $n > 2$:

$$f_{i+n+1} - n^{-1}f_{i+n} + n^{-1}f_i = 2L; \\ k^{n+1} - n^{-1}k^n + n^{-1} = 0.$$

Также с помощью этого уравнения можно оценить дисперсию величины перемещения:

$$M[f] = 2L; D[f] \approx 2D[\delta]/n^2. \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что алгоритм 2 гораздо эффективнее уменьшает дисперсию случайного воздействия, чем алгоритм 1. Особенностью алгоритмов 1 и 2 является то, что они позволяют рассчитать величину перемещения лент, при которой контейнеры попадают в инструменты технологических станций, но не позволяют решить задачу совмещения этикетки и контейнера. Поэтому в дополнение к ним был разработан **алгоритм смещения одной ленты относительно другой**, блок-схема которого показана на рис. 9а. Для этого дополнительно введен счетчик M , максимальное значение которого равно числу циклов m нахождения одного контейнера на линии. Счетчик используется для того, чтобы не допустить введение нескольких смещений пока не закончится один производственный цикл.

В основу **алгоритма 3** положен ПИ-регулятор, что позволило рассчитать такую величину перемещения привода, при которой одновременно решаются задачи попадания контейнеров в инструменты технологических станций и совмещения этикетки с контуром контейнера. Пропорциональная (П) составляющая отвечает за расчет величины f , при которой контейнеры попадают в инструменты технологических станций, а интегральная (И) позволяет позиционировать этикетку относительно контейнера. Выражение для расчета величины перемещения лент транспортером имеет следующий вид:

$$x_i = B_i - B_0; \Delta x_i = x_i - x_{i-1}$$

$$f_{i+1} = f_i - T_0 \cdot \text{sign}(x_i) \cdot \min(|x_i|, w_w/2) - T_1 \cdot \text{sign}(\Delta x_i) \cdot \min(|\Delta x_i|, w_w/2)$$

Вклад переменных x_{i-1} и Δx_{i-1} ограничивается величиной $w_w/2$, чтобы избежать аварии на станциях термосваривания и вырубки. В работе принято, что за число циклов $2m$ условия автоматической сборки (6) должны будут выполняться при следующих возмущениях:

- начальная величина перемещения отличается от требуемой на 0,25 мм (моделирование стабилизации величины перемещения);
- на некотором цикле s значение абсолютной координаты метки резко меняется на 2 мм (моделирование склейки).

С помощью численного моделирования работы алгоритма 3, получена область допустимых значений параметров T_0 и T_1 , показанная на рис. 9б, при следующих значениях параметров:

$$L = 50 \text{ мм}; m_1 = 5; m_2 = 10; m = 10; p_w = 500 \text{ мм}; p_c = 1000 \text{ мм}; w_w = 1,5 \text{ мм}; w_c = 2,0 \text{ мм}.$$

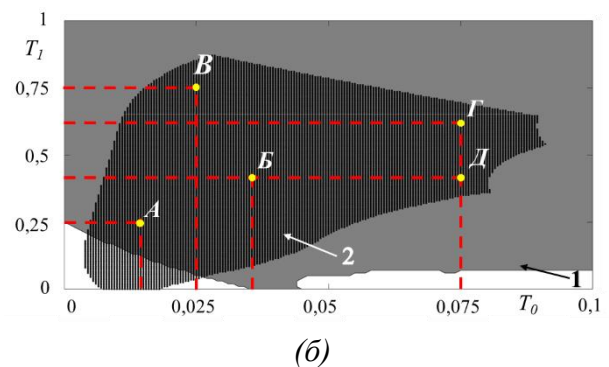
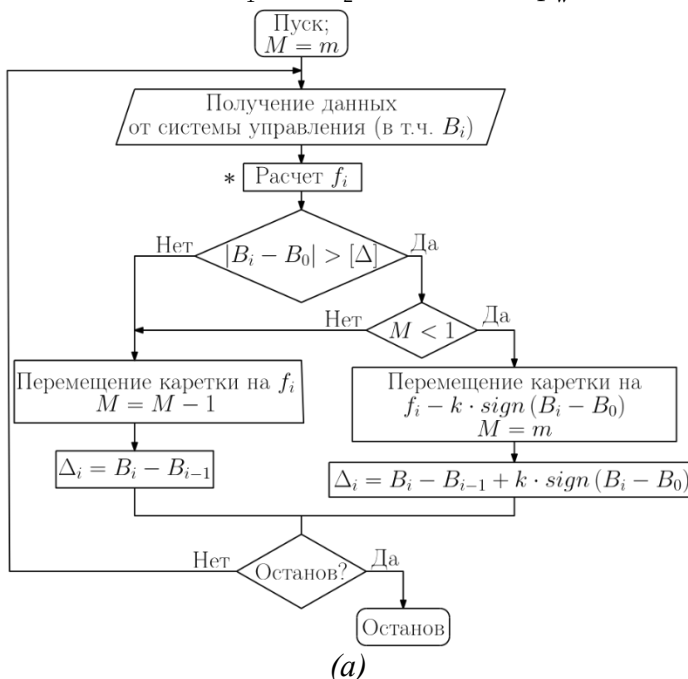


Рис. 9. (а) Блок-схема алгоритма смещения одной ленты относительно другой;
(б) Область допустимых значений параметров T_0 и T_1 алгоритма 3: 1 – для стабилизации перемещения; 2 – для склейки.

Далее было проведено численное моделирование работы автоматической линии при использовании предложенных алгоритмов. Использовались следующие параметры для численного моделирования работы алгоритмов 1 и 2:

$$n = [10; 14; 18]; L = 50 \text{ мм}; m_1 = 5; m_2 = 10; m = 10; p_w = 500 \text{ мм}; p_c = 1000 \text{ мм}; \\ w_w = 1,5 \text{ мм}; w_c = 2,0 \text{ мм}; M[\delta] = 0 \text{ мм}; S^0 = [100 \dots 100 \dots 100]; k = 0,5 \text{ мм};$$

$$\text{Алгоритм 1: } D[\delta] = 0,05^2 \text{ мм}^2; \text{Алгоритм 2: } D[\delta] = 0,90^2 \text{ мм}^2.$$

На рис. 10 представлены результаты численного моделирования работы алгоритма 1 с дополнительным алгоритмом смещения ленты при случайном внешнем воздействии. Видно, что среднее значение величины перемещения равно $2L$ (рис. 10а), при этом смещение фотометки относительно заданного положения остается в области допустимых значений (рис. 10б). Смещения контейнеров относительно инструментов термосварки и вырубки не превышают величины соответствующих зазоров (рис. 10в-г).

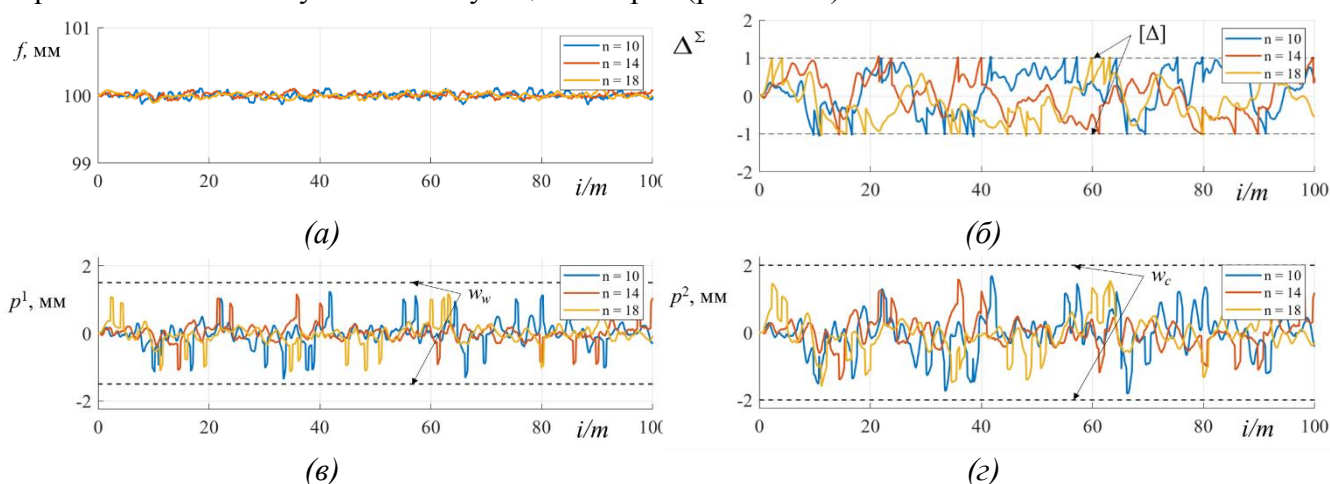


Рис. 10. Численное моделирование работы алгоритма 1: (а) стабилизация перемещения; (б) смещение фотометки; (в) смещение контейнеров относительно инструмента термосварки; (г) смещение контейнеров относительно инструмента вырубки.

На рис. 11 представлены результаты численного моделирования работы алгоритма 2 и дополнительного алгоритма смещения ленты при случайном внешнем воздействии. В данном случае моделирование проводилось при существенно большей дисперсии случайной величины. Результаты показывают, что среднее значение величины перемещения также остается равным $2L$ (рис. 11а), смещение фотометки остается в области допустимых значений, а при выходе из нее, возвращается обратно при помощи дополнительного алгоритма (рис. 11б). Смещения контейнеров относительно инструментов также не превышают величины соответствующих зазоров (рис. 11в-г).

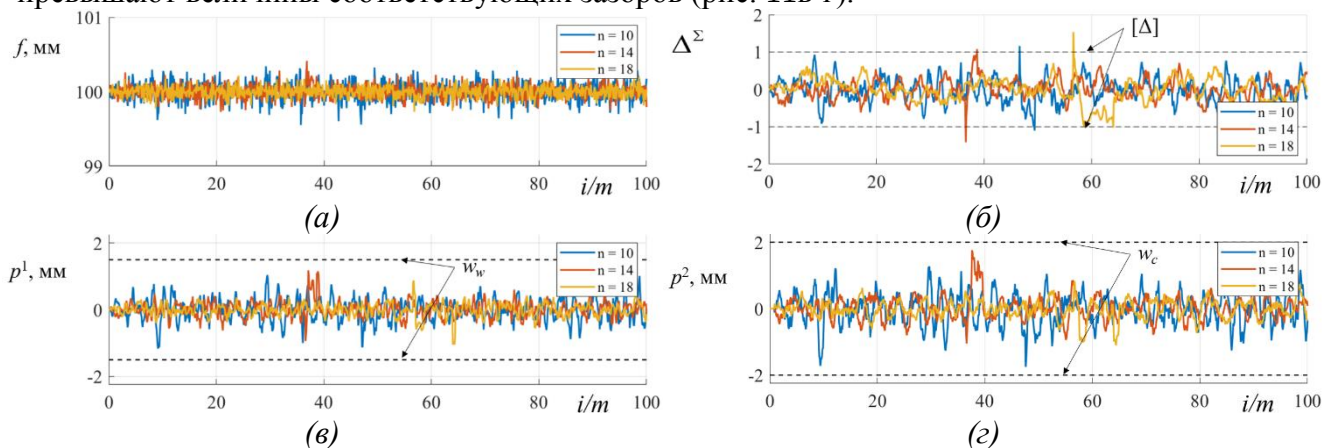


Рис. 11. Численное моделирование работы алгоритма 2: (а) стабилизация перемещения; (б) смещение фотометки; (в) смещение контейнеров относительно инструмента термосварки; (г) смещение контейнеров относительно инструмента вырубки.

Моделирование работы алгоритма 3 проводилось при следующих параметрах:

$$T_0 = 0,015; T_1 = 0,25; L = 50 \text{ мм}; m_1 = 5; m_2 = 10; m = 10; p_w = 500 \text{ мм}; p_c = 1000 \text{ мм}; \\ w_w = 1,5 \text{ мм}; w_c = 2,0 \text{ мм}; f_0 = 100 \text{ мм}; M[\delta] = 0 \text{ мм}; D[\delta] = 0,15^2 \text{ мм}^2.$$

Представленные результаты численного моделирования (рис. 12) показывают, что и в данном случае среднее значение величины перемещения равно $2L$ (рис. 12а), а фотометка не выходит за пределы области допустимых значений (рис. 12б). Смещения контейнеров относительно инструментов не превышают величин зазоров в них (рис. 12в-г).

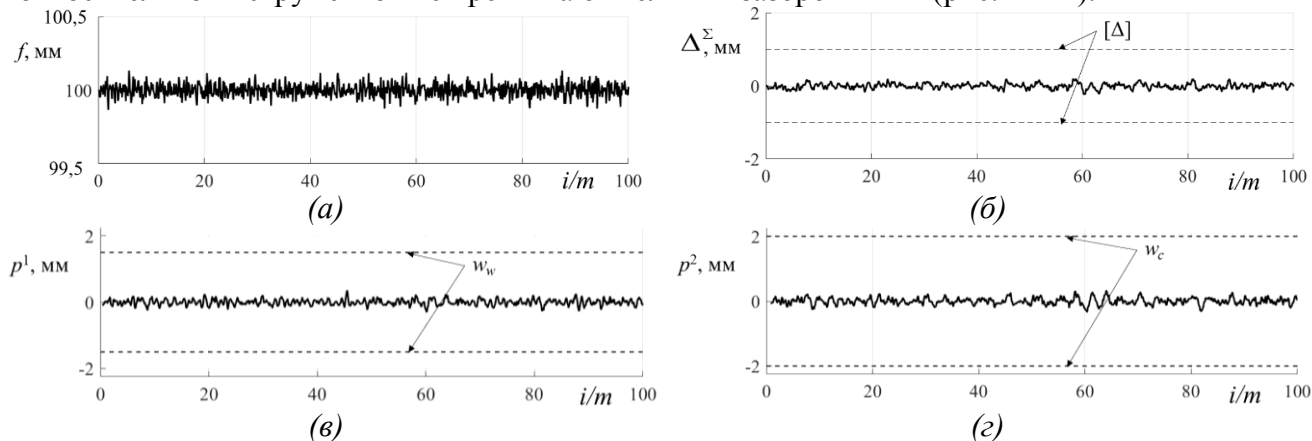


Рис. 12. Численное моделирование работы алгоритма 3: (а) стабилизация перемещения; (б) смещение фотометки; (в) смещение контейнеров относительно инструмента термосварки; (г) смещение контейнеров относительно инструмента вырубки.

Таким образом, численное моделирование работы автоматической линии при использовании всех трех предложенных алгоритмов показывает возможность их применения для перемещения двух лент на автоматических упаковочных линиях. Стоит отметить, что алгоритм 2 способен работать при наибольшей дисперсии случайного внешнего воздействия, и это делает его наименее требовательным к точности измерительной системы автоматической линии.

В пятой главе приведены результаты экспериментального исследования математической модели для описания процесса перемещения лент на автоматической упаковочной линии и работоспособность предложенных алгоритмов расчета величины их перемещения. Для этого на базе имеющегося в ИМАШ РАН стенда «Автоматическая линия блистерной упаковки АЛБ 165» собран прототип разработанной электромеханической системы и в соответствии с описанными алгоритмами подготовлены программы управления для автоматической упаковочной линии.

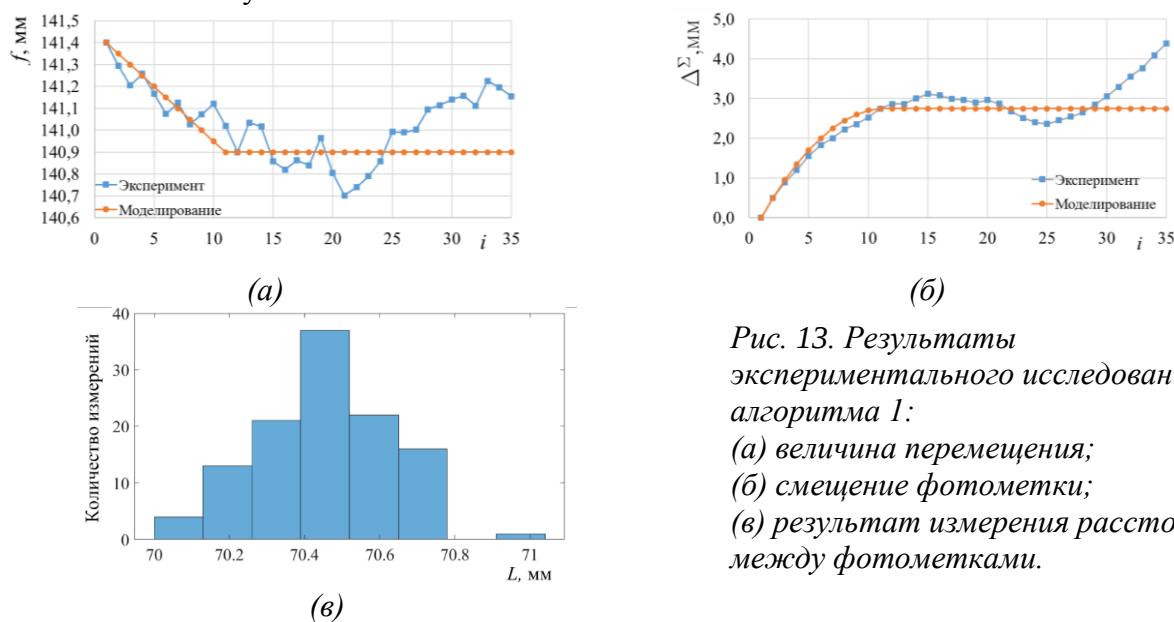


Рис. 13. Результаты экспериментального исследования алгоритма 1: (а) величина перемещения; (б) смещение фотометки; (в) результат измерения расстояния между фотометками.

После выполнения измерений фактического расстояния между фотометками было получено значение $L = 70,45$ мм, соответствующее величине перемещения $f = 2L = 140,9$ мм. Эти значения были использованы для численного моделирования и верификации математической модели. Экспериментальное исследование проводилось в режиме наладки, когда не формируются контейнеры, чтобы избежать аварийных остановок, пока рассчитывается требуемая величина перемещения. При использовании алгоритмов 1 и 2 на начальном этапе массив S заполнялся одинаковыми значениями, близкими к действительному расстоянию между фотометками:

$$S^0 = [141,40 \quad \dots \quad 141,40 \quad \dots \quad 141,40]; n=10; f_0 = \bar{S}^0 = 141,40 \text{ мм}; L = 70,45 \text{ мм}.$$

Экспериментальное исследование работы алгоритма 1 показало большой разброс полученных результатов относительно результатов численного моделирования (рис. 13а, б). Для выявления причины такого несоответствия с помощью используемой измерительной системы было определено расстояние между фотометками, результаты которого показаны на гистограмме (рис. 13в), соответствующей закону нормального распределения. По правилу трех сигм были получены характеристики и значения этой случайной величины:

$$\bar{L} = 70,45 \text{ мм}; S[L] = 0,17 \text{ мм}; L = 70,45 \pm 0,51 \text{ мм}.$$

Полученный результат свидетельствует о существенной погрешности имеющейся измерительной системы, а алгоритм 1 не может быть эффективно применим.

При экспериментальном исследовании алгоритма 2, результаты которого представлены на рис. 14, было показано, что результаты моделирования соответствуют результатам эксперимента. Требуемое перемещение рассчитывается за 20 циклов работы автоматической линии, что совпадает с результатами моделирования. Результаты эксперимента подтверждают адекватность выполненного численного моделирования и свидетельствуют о том, что алгоритм 2 можно использовать для управления разработанной электромеханической системой при автоматической сборке изделий из двух лент.

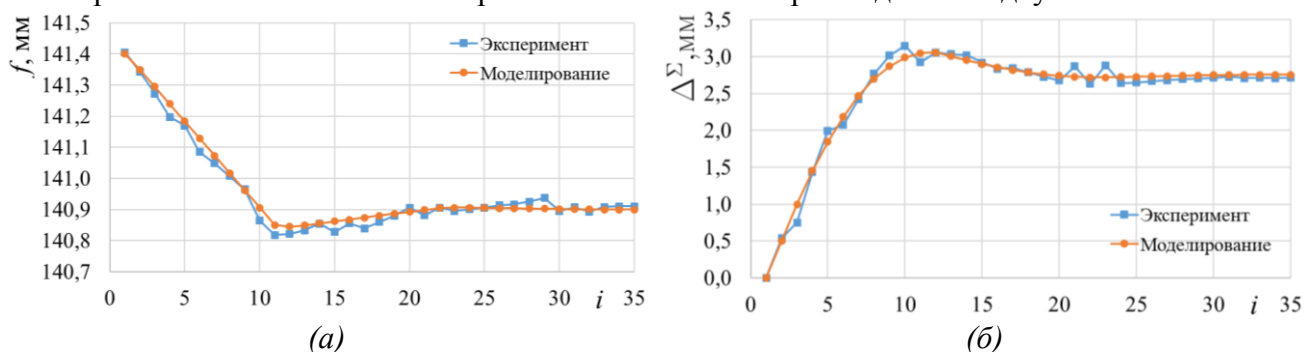


Рис. 14. Результаты экспериментального исследования алгоритма 2:
(а) величина перемещения; (б) смещение фотометки.

Для экспериментального исследования и численного моделирования работы автоматической линии под управлением алгоритма 3 использовались следующие параметры:

$$f_0 = 141,4 \text{ мм}; L = 70,45 \text{ мм}; T_0 = 0,015; T_1 = 0,25.$$

Полученные значения величины перемещения (рис. 15а) совпадают с данными численного моделирования работы алгоритма 3 с аналогичными параметрами. Результаты показаний смещения фотометки (рис. 15б) также совпадают с результатами численного моделирования. Фотометка возвращается в область допустимых значений ± 1 мм за 5 циклов работы автоматической линии. А через 20 циклов фотометка возвращается в исходное положение с некоторой погрешностью.

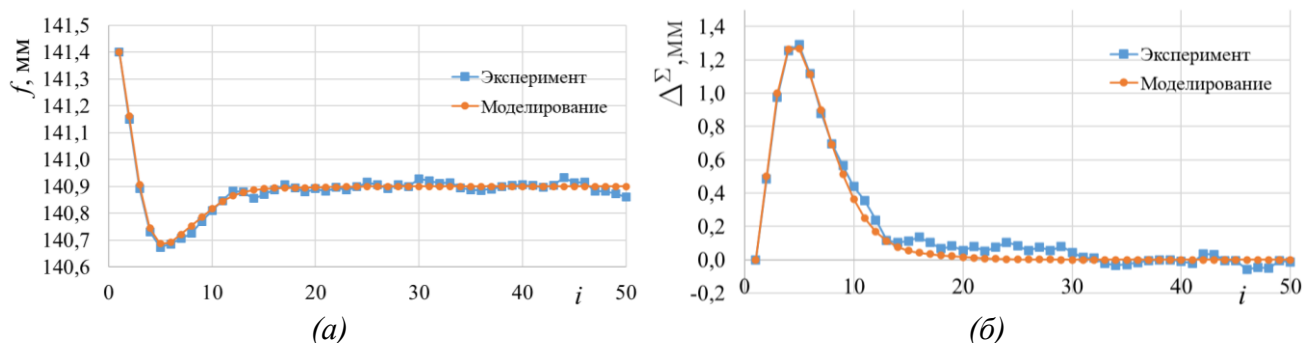


Рис. 15. Результаты экспериментального исследования алгоритма 3:

а) величина перемещения; б) смещение фотометки.

Основные выводы по работе:

1. Для обеспечения натяжения ленты и компенсации инерции разматываемого рулона выдвинута идея наложения кинематической обратной связи между приводом протягивания и рулоном в виде поворотного рычага, связанного с тормозным механизмом. На основе предложенной идеи выполнен структурный синтез механизма размотки, эффективно обеспечивающий требуемую силу натяжения ленты в процессе протягивания.

2. На основе анализа синтезированного механизма разматывания и протягивания ленточного материала теоретически показано, что при его использовании в процессе разматывания рулона сила натяжения ленты увеличивается в 1,6 раз, в то время как при использовании исходного механизма она уменьшается в 3 раза. Для оценки скачков силы натяжения выполнен динамический анализ синтезированного механизма при дискретном протягивании ленты, который показал, что эти скачки составляют 4% от среднего значения силы натяжения. Даны рекомендации по выбору конструктивных параметров и наладке механизма.

3. Выявлено влияние конструктивных параметров на работу синтезированного механизма, заключающееся в том, что увеличение отношения плеч рычага позволяет уменьшить влияние радиуса рулона на силу натяжения разматываемого материала, а использование колодочного тормоза позволило избежать инерционного выбега массивного рулона при дискретном режиме работы.

4. Применение электромеханического привода с обратной связью для подачи ленточных материалов позволило ликвидировать механические ограничители хода, параметризовать их и создать механизм перемещения ленточных материалов, отличающийся гибкостью настройки и адаптивностью, то есть автоматической подстройкой под меняющиеся условия эксплуатации технологического оборудования.

5. Разработана математическая модель следящей механической системы перемещения ленточных материалов с обратной связью, на основе компьютерного моделирования которой предложен метод оценки технического состояния упаковочной линии в реальном времени, позволяющий прогнозировать положение лент относительно технологических станций и не допускать аварий.

6. Экспериментальные исследования разработанной электромеханической системы перемещения ленточных материалов, метода оценки положений лент и предложенных алгоритмов расчета величины их перемещения на стенде «Автоматическая линия блистерной упаковки АЛБ 165» подтверждают корректность математической модели, работоспособность предложенных идей и эффективность разработанных методов.

7. Полученные результаты могут быть использованы в автоматическом оборудовании, где необходимы технологические операции разматывания и протягивания рулонных ленточных материалов, а также для автоматического совмещения и сборки компонентов, находящихся на двух лентах.

Основные результаты выполненного исследования:

1. Анализ научной и патентной литературы показал актуальность создания и исследования устройств разматывания и протягивания ленточных материалов. Основными требованиями к таким устройствам является обеспечение заданной силы натяжения материала и избежание чрезмерных скачков этой силы в моменты начала и конца процесса разматывания рулонов. Неудовлетворение этим требованиям при дискретном разматывании и протягивании ленточных материалов приводит к аварийным остановкам оборудования из-за попадания контейнеров в неподвижные инструменты на технологических станциях.

2. Изучены известные механизмы, методы и способы разматывания и протягивания ленточных материалов с заданной силой натяжения. На их основе был синтезирован механизм с кинематической обратной связью, предназначенный для разматывания и протягивания ленточных материалов преимущественно в дискретном режиме, обеспечивающий заданную силу натяжения ленты.

3. В результате структурного анализа и исследования кинематики разработанного устройства были определены возможные движения звеньев механизма и их рабочие зоны.

4. Предложена математическая модель работы механизма разматывания и протягивания ленточного материала, с использованием которой получена зависимость силы натяжения материала от конструктивных параметров механизма и определено влияние параметров механизма на скачки силы натяжения в процессе дискретной работы, что позволило провести параметрический синтез механизма.

5. Результаты анализа и обзора существующих научных работ и патентов показали, что в области позиционирования компонентов при перемещении лент на автоматической линии имеются проблемы, обусловленные отсутствием теоретической проработки и обоснования используемых методов, устройств позиционирования компонентов сборки. Это приводит к ограничениям в эффективности и производительности автоматических линий, что свидетельствует об актуальности совершенствования известных методов и устройств, а также созданию новых подходов к их разработке и исследованию.

6. Разработанная новая электромеханическая система перемещения ленточных материалов, отличающаяся адаптивностью к условиям эксплуатации и универсальностью используемых материалов.

7. Предложен метод оценки положений лент на автоматической линии, позволяющий позиционировать ленты относительно технологических станций и друг относительно друга.

8. Предложена математическая модель процесса автоматического совмещения двух лент. Модель позволила проанализировать и учесть возможные виды возмущений, возникающих при автоматической сборке.

9. Для разработанной электромеханической системы предложены три алгоритма расчета величины перемещения привода протягивания:

- а. Алгоритм 1 использует расстояние между соседними фотометками;
- б. Алгоритм 2 использует изменение абсолютного положения фотометки на двух последующих циклах работы автоматической линии;
- с. Алгоритм 3 построен по принципу ПИ-регулятора и обеспечивает позиционирование лент на основе координаты фотометки.

10. Для обеспечения заданного положения покровной ленты относительно корпусной разработан алгоритм коррекции положения фотометки, дополняющий алгоритмы 1 и 2.

11. Выполнено компьютерное моделирование работы технологического оборудования с использованием разработанных алгоритмов и подтверждена их способность реагировать на возникающие возмущения. По результатам численных экспериментов определены параметры, обеспечивающие стабильную и безаварийную работу автоматической линии.

12. В ходе экспериментальных исследований верифицирована корректность выдвинутых положений, созданных математических моделей и работоспособность предложенных в работе идей.

Список публикаций по теме диссертации

В журналах, входящих в перечень ВАК

1. Замурагин, Ю. М. Исследование механизма протягивания ленточного материала / Ю.М. Замурагин, Б.Л. Саламандра, К.Б. Саламандра // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2023. – № 3. – С. 125-132.
2. Замурагин, Ю. М. Адаптивная система синхронизации положений ленточных материалов при автоматической сборке / Ю.М. Замурагин, Б.Л. Саламандра, К.Б. Саламандра // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2023. – № 1. – С. 80-87.
3. Замурагин, Ю. М. Повышение надежности и ресурса силовых станций автоматических линий / Ю.М. Замурагин, К.Б. Саламандра // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 10(751). – С. 26-34.

В рецензируемых зарубежных изданиях (SCOPUS/Web of Sciences)

4. Zamuragin, Yu.M. Analysis of the Device for Unwinding the Tape Material / Yu.M. Zamuragin, B.L. Salamandra, K.B. Salamandra // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2023. – Vol. 52, No. S2. – P. S171-S179. *(переводная версия)*
5. Zamuragin, Yu.M. Adaptive System of Position Synchronization of Tape Materials in Automatic Assembly / Yu.M. Zamuragin, B. L. Salamandra, K. B. Salamandra // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2023. – Vol. 52, No. 7. – P. 791-799. *(переводная версия)*
6. Zamuragin, Yu.M. Mechatronic system parameters for automatic assembly of products from tape materials: Choice substantiation / Yu.M. Zamuragin, B.L. Salamandra, K.B. Salamandra // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3102. – P. 020016.
7. Zamuragin, Yu.M. Modeling of the quality of tape materials automatic assembly at periodic external influence // AIP Conference Proceedings. – 2025. – Vol. 3205. – P. 080006.

Патенты

8. Патент № 2790182 С1 Российская Федерация, МПК В65Н 59/00, В65Н 77/00. устройство разматывания и протягивания рулонного материала: № 2022119407: заявл. 15.07.2022: опубл. 15.02.2023 / Б.Л. Саламандра, К.Б. Саламандра, Ю.М. Замурагин; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.

Статьи, опубликованные в прочих изданиях

9. Замурагин, Ю.М. Применение алгоритмов стабилизации положения при автоматической сборке / Ю.М. Замурагин, Б.Л. Саламандра, К.Б. Саламандра // XXXIV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения: Сборник трудов конференции, Москва, 07–09 ноября 2022 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2022. – С. 164-169.
10. Замурагин, Ю.М. Обоснование выбора параметров мехатронной системы для автоматической сборки изделий из ленточных материалов / Ю.М. Замурагин, К.Б. Саламандра, Б.Л. Саламандра // Завалишинские чтения 23: Сборник докладов XVIII Международной конференции по электромеханике и робототехнике, Санкт-Петербург, 18–19 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. – С. 215-220.
11. Замурагин, Ю.М. Анализ устройства сматывания и протягивания ленточного материала с постоянной скоростью // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2023. – № 12. – С. 303-313.
12. Замурагин, Ю.М. Динамический анализ механизма протягивания ленточного материала / Ю.М. Замурагин, К.Б. Саламандра, Б.Л. Саламандра // XIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике: Сборник тезисов докладов. В 4-х томах, Санкт-

Санкт-Петербург, 21–25 августа 2023 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. – С. 495-497.

13. Замурагин, Ю.М. Моделирование качества автоматической сборки ленточных материалов при периодическом внешнем воздействии // XXXV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2023): Сборник трудов конференции, Москва, 13–14 ноября 2023 года. – Москва: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2023. – С. 349-355.

14. Замурагин, Ю.М. Моделирование процесса дискретного протягивания ленточного материала / Ю.М. Замурагин, К.Б. Саламандра // Вестник научно-технического развития. – 2024. – № 3(174). – С. 3-10.

15. Замурагин, Ю.М. Экспериментальная проверка алгоритмов управления мехатронной транспортной системой автоматической упаковочной линии / Ю.М. Замурагин, К.Б. Саламандра // XXXVI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС - 2024): Сборник трудов конференции, Москва, 04–06 декабря 2024 года. – Москва: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2024. – С. 337-342.