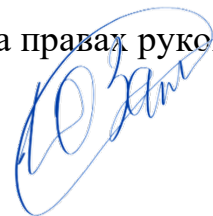


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Саламандра Константин Борисович

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

	С.
Введение.....	4
ГЛАВА 1 Обзор и анализ механизмов разматывания и перемещения лент на технологическом оборудовании	12
1.1 Механизмы разматывания и протягивания лент	12
1.2 Способы и методы перемещения лент на автоматических упаковочных линиях.....	22
1.3 Постановка цели и задач исследования	31
ГЛАВА 2 Синтез и анализ механизма разматывания и протягивания лент	33
2.1 Синтез механизма.....	33
2.2 Кинематический анализ.....	38
2.3 Статический анализ.....	40
2.4 Динамический анализ	44
2.5 Результаты и выводы	51
ГЛАВА 3 Система одновременного перемещения двух лент и метод оценки их положений.....	53
3.1 Основные элементы системы перемещения двух лент на основе сервопривода.....	53
3.2 Математическая модель процесса перемещения двух лент	56
3.3 Виды внешних воздействий при технологической обработке рулонных материалов	62
3.4 Результаты и выводы	66
ГЛАВА 4 Разработка и анализ алгоритмов расчета перемещения привода.....	68
4.1 Алгоритм на основе измерения расстояний между фотометками.....	68
4.2 Алгоритм на основе изменения координаты фотометки	73
4.3 Алгоритм коррекции положения одной ленты относительно другой.....	77
4.4 Алгоритм на основе ПИ-регулятора	79

4.5 Численное моделирование работы автоматической линии	84
4.6 Результаты и выводы	117
ГЛАВА 5 Экспериментальное исследование разработанных механизмов и метода оценки положения лент	119
5.1 Экспериментальная установка.....	120
5.2 Испытания механизма разматывания и протягивания рулонного материала в дискретном режиме.....	121
5.3 Планирование экспериментального исследования системы перемещения двух лент и метода оценки их положений.....	124
5.4 Результаты экспериментального исследования.....	126
5.5 Результаты и выводы	134
Заключение	137
Список литературы	141
Приложение А1.	155
Приложение Б1	156
Приложение Б2	157

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Реализация различных 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 [1-5]. Построение автоматических линий на основе использования современных технологий позволяет улучшить потребительские качества оборудования, повысить производительность, гибкость и функциональность, уменьшить объем наладочных операций, внедрить алгоритмы автонастройки под изменяющиеся условия эксплуатации. Следует также отметить, что применение интеллектуальных производственных решений и роботизированных систем в современном машиностроении является одним из приоритетных направлений Стратегии научно-технического развития Российской Федерации¹.

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

¹ Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145.

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 сборки изделий из двух лент, 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. Кутьина, 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 научных 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, недостаточна степень теоретического обоснования выбора рациональных конструкций и их параметров. 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 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, заключающийся в оценке положения лент на автоматической линии на основании информации о координате одной из лент.

- 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» (Приложение Б1) и ООО Производственная Компания «Мед России» (Приложение Б2).

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, 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, учитывающий возможные изменения 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.

ГЛАВА 1 ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ РАЗМАТЫВАНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЛЕНТ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

В настоящей главе приведено описание объектов исследования – это механизмы разматывания и протягивания рулонных материалов, а также механизмы, устройства и способы перемещения и позиционирования лент. Приводится анализ научной, патентной и технической литературы, обсуждаются области применения этих механизмов, достоинства и недостатки известных решений. На основании проведенных обзора и анализа ставятся цели и задачи диссертационного исследования.

1.1 Механизмы разматывания и протягивания лент

Гибкие листовые материалы широко используются в полиграфии, текстильной промышленности, а также для производства изделий из металла, пластика, бумаги и т.п. Для удобства транспортировки, хранения и использования листовые материалы заготавливаются в рулонах. Как показывает исследование литературы, операции сматывания и наматывания рулонов влияют на внутренние свойства материалов и качество производимых из них изделий.

В металлургии движения прокатного стана оказывают существенное влияние на качество получаемой полосы при прокате [6, 7]. Регулирование силы натяжения полосы позволяет добиться высокого качества поверхности листа. При этом колебания силы натяжения при прокатке приводят к появлению разнотолщинности. Также стоит отметить, что слишком большая сила натяжения может привести к обрыву листа, из-за наличия динамических эффектов (разгон/торможение стана, проскальзывание стальной полосы относительно валков и т.п. [8]) или усадке листа в поперечном направлении [9-10].

Существенное влияние процесс намотки оказывает и на напряженно-деформированное состояние материала в рулоне [7-14].

При изготовлении основы композиционных материалов – препрегов также используются операции сматывания [15, 16]. Большая сила натяжения тонких (от 0,061 мм [17]) лент используемых материалов, наличие динамических эффектов при разгоне и торможении, и нагрев материала в сушильной печи для полимеризации может привести к разрыву лент. Поэтому технология автоматизированного изготовления деталей из композиционных материалов требует обеспечения постоянства скорости, точности и силы натяжения ленты материала [18-23].

В полиграфии большие силы натяжения бумаги между роликами печатной машины могут приводить к ее разрыву, при этом провис ленты приводит к несовпадению слоев наносимой краски и замятию бумаги. Для того чтобы этого избежать используются стабилизаторы натяжения печати и регуляторы натяжения рулона как для разматывания, так и для наматывания. Высокие скорости подачи материала, протяженность рабочей зоны дополнительно усложняют процесс [24, 25]. Похожие задачи встречаются в том числе в текстильной промышленности, где необходимо обеспечивать натяжение сматываемых и наматываемых материалов при высоких скоростях [26-32].

Натяжение материалов критически важно в упаковочной технике. Например, в машинах, использующих гибкую пленку и формирующих из нее рукав, натяжение материала определяет целостность изделия и товарный вид готовой продукции [33]. Другим примером являются автоматические упаковочные линии (рисунок 1.1), одновременно выполняющие операции формования контейнеров, фасовки продукта, запайки контейнеров и вырубки готовых изделий. Готовая продукция этих линий представляет собой изделие, собранное из двух видов рулонных материалов [34-36]. Потеря натяжения лент приводит к их относительному смещению, влияет на качество изготавливаемых изделий и может являться причиной замятия материалов в узлах машины. В то же

время избыточное натяжение может привести к обрыву ленты и аварийной остановке.

(а)



(б)

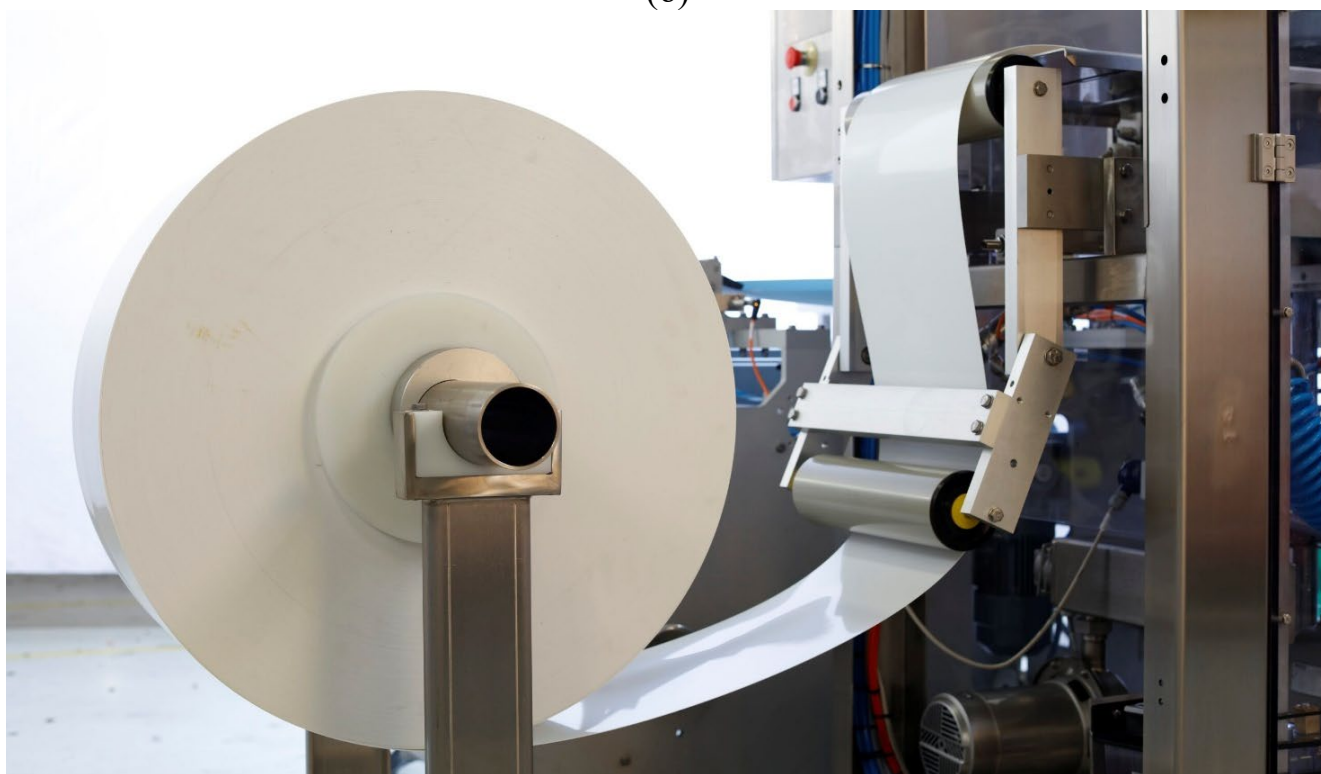


Рисунок 1.1 – Автоматическая упаковочная линия Hassia [35]:

(а) общий вид; (б) рулон полимерного материала.

Существуют различные устройства и механизмы натяжения лент, сматываемых из рулонов. Наиболее интересные из них рассмотрены ниже. Первыми рассматриваются устройства, обеспечивающие требуемую силу натяжения при переносе материала с постоянной скоростью. Их общей особенностью является то, что в них регулирование силы натяжения материала осуществляется в установившемся режиме движения, а моменты начала и конца движения не рассматриваются.

Для обеспечения постоянного натяжения ленты *1* при перематке с постоянной скоростью вводится один [37] (или несколько [38]) натяжной ролик *2* (рисунок 1.2), который регулируется приводом *3* с силовым датчиком. Блок управления *4* на основании показаний силового датчика определяет такое положение ролика *2*, при котором обеспечивается заданная сила натяжения материала. Пары роликов *5* и *6* обеспечивают отсутствие проскальзывания ленточного материала.

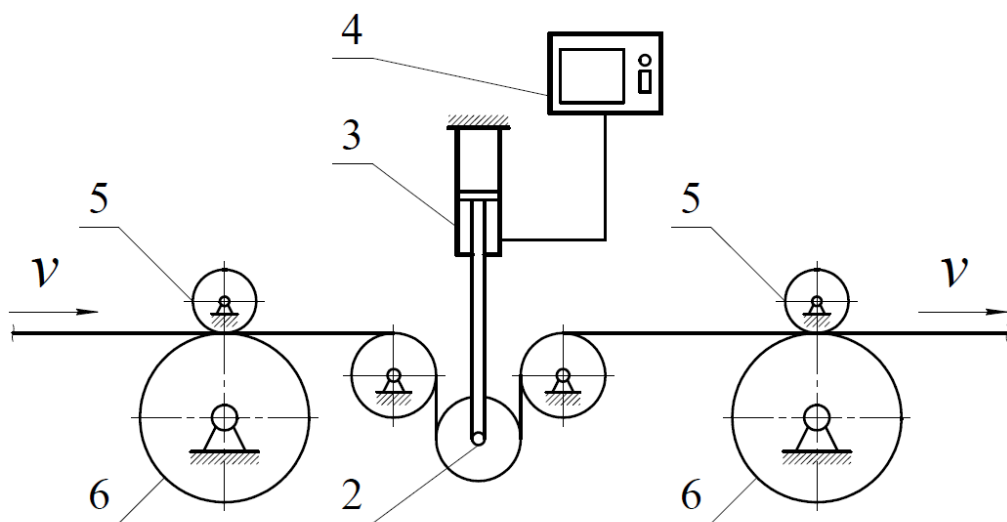


Рисунок 1.2 – Устройство натяжения по патенту [37].

В устройстве [39], показанном на рисунке 1.3, реализовано управление скоростями и моментами вращения при наматывании ленты в рулон *1*. Ролик *3* в данном случае вращается с некоторой заданной постоянной скоростью ω_3 , ролик *4* обеспечивает прижатие рулонного материала *6* к ролику *3* для отсутствия

проскальзывания. Заданная сила натяжения ленточного материала *б* обеспечивается за счет регулирования вращающего момента в намоточном устройстве 2. Неподвижные ролики 5 определяют путь движения ленты при ее наматывании.

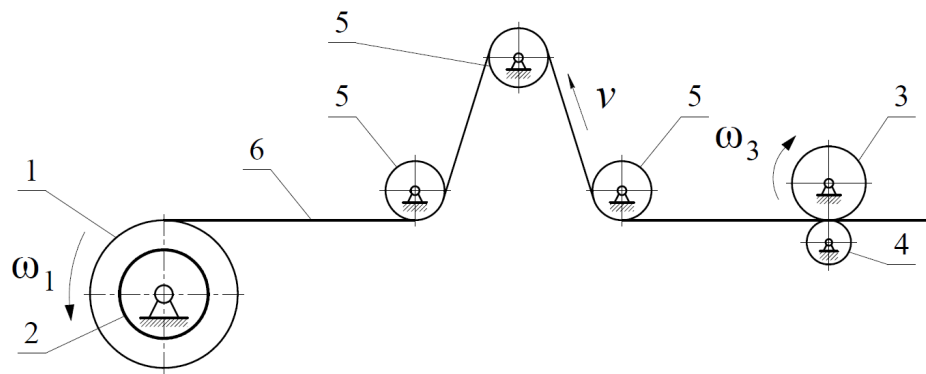


Рисунок 1.3 – Устройство регулирования силы натяжения при наматывании материала по патенту [39].

Известно устройство [40] для регулирования натяжения рулонного материала *1*, в котором скорость намотки регулируется в зависимости от текущего радиуса рулона. Значение радиуса определяется по отклонению стержня с роликом 5 (рисунок 1.4), в блоке 4 рассчитывается требуемая скорость вращения рулона и подается в блок управления намоткой рулона 3. Это позволяет обеспечивать постоянную силу натяжения материала независимо от изменения радиуса рулона. Ролики 6 обеспечивают отсутствие проскальзывания ленты.

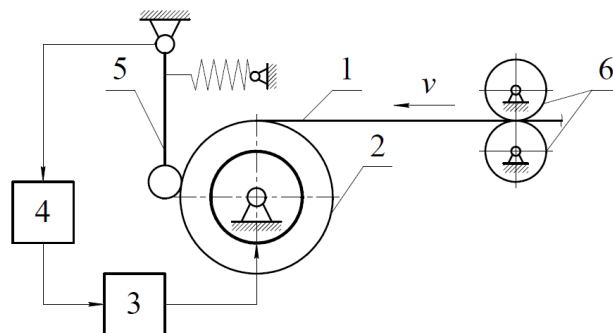


Рисунок 1.4 – Устройство регулирования силы натяжения при наматывании материала по патенту [40].

В [41] предложено размоточное устройство, обеспечивающее постоянную силу натяжения материала, схема которого представлена на рисунке 1.5. Механизм содержит колодочный тормоз, барабан 2 которого соосен с рулоном 3 разматываемого материала 4. Тормозной барабан 2 прижимается к неподвижной колодке 1 за счет силы поджатия пружины растяжения 5, передаваемой коромыслом 6. Усилие натяжения материала 4 при разматывании преодолевает усилие пружины 5, тормозной момент уменьшается и рулон 3 растормаживается. В момент начала протягивания ленты привод разматывания воспринимает нагрузку от момента инерции массивного рулона, а при торможении будет иметь место инерционный выбег рулона и потеря натяжения рулонного материала. Поэтому такой механизм не подходит для работы в дискретном (старт-стоп) режиме работы.

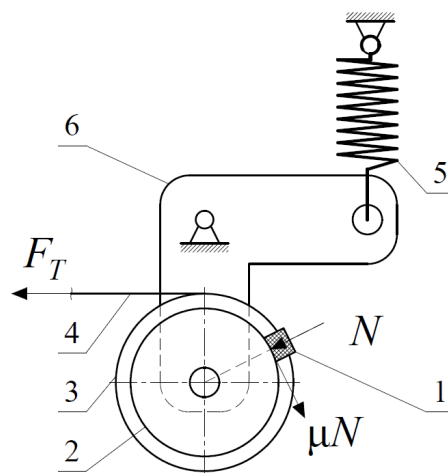


Рисунок 1.5 – Устройство регулирования силы натяжения разматываемого материала по патенту [41].

Далее рассматриваются устройства, которые позволяют осуществлять регулирование силы натяжения при разгоне. В устройствах [42, 43] используется коромысло 1 на шарнирной опоре (рисунок 1.6), на одном конце которого установлен подвижный ролик 2 с пружиной растяжения 3, а на втором тормозная колодка 4, контактирующая с тормозным барабаном 5, соосным с разматываемым

рулоном 6. Также возможно исполнение с пружиной, прижимающей колодку к барабану. Использование коромысла 1 позволяет регулировать силу натяжения разматываемого материала 7 путем регулирования веса подвижного ролика 2 или усилия пружины 3. При использовании устройства в дискретном режиме оно обеспечивает натяжение рулонного материала 7 при разгоне за счет веса подвижного ролика 2 и при установившемся движении за счет равенства момента от силы натяжения и момента трения. В процессе торможения, несмотря на максимальный тормозной момент, возможен инерционный выбег рулона и потеря натяжения.

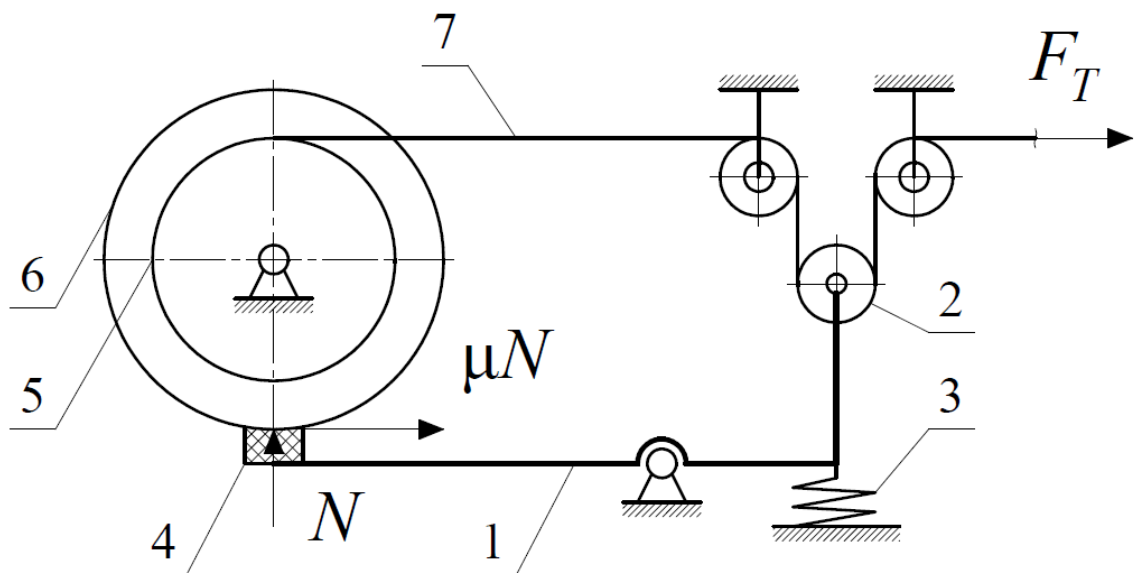


Рисунок 1.6 – Устройство регулирования силы натяжения разматываемого материала по патенту [42].

Механизм, предложенный в [44] предназначен для регулирования силы натяжения материала при его разматывании с постоянной скоростью. Для этого используется двуплечий рычаг 1, на одном конце которого установлен ролик 2, через который перематывается материал 3, а на другом противовес 4 с изменяемой массой P_2 (рисунок 1.7). Конструкция допускает деформирование рычага для компенсации скачка значения силы натяжения при разгоне. В момент начала разматывания катушки 5 тормозной элемент 7 поворачивается вместе с

тормозным барабаном 6, что приводит к поднятию гири 8 и сжатию пружины 9. Затем тормозной элемент 7 проскальзывает и обеспечивает постоянный тормозной момент от веса P_1 гири 8. С помощью изменения массы противовеса 4 регулируется сила натяжения материала 3 в процессе его разматывания. Такое устройство обладает несколькими недостатками. Одним из них являются габариты устройства, так как для большей податливости при отсутствии существенных деформаций длина рычага должна быть существенной. В то же время принцип работы тормоза допускает скачок силы натяжения в момент начала движения, необходимый для преодоления силы трения покоя тормозного элемента 7 о тормозной барабан 6.

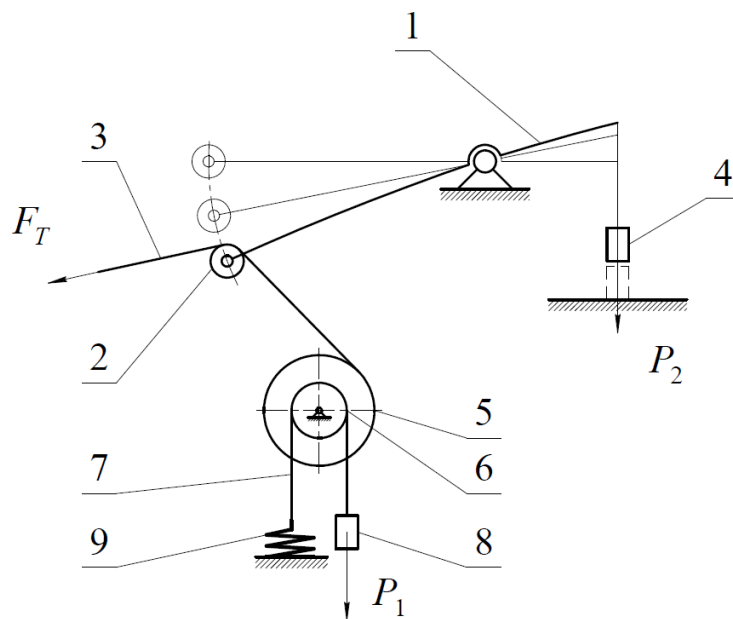


Рисунок 1.7 – Устройство регулирования силы натяжения разматываемого материала по патенту [44].

Далее рассмотрим варианты устройств, предназначенных для дискретного разматывания и протягивания рулонных материалов. В работах [45, 46] предложено ввести дополнительный привод 1 с натяжным роликом 2 для разматывания рулона 3 при зажатой ленте 4 (рисунок 1.8). Смотываемого с рулона участка ленты хватает на выполнение нескольких циклов работы машины,

после чего снова срабатывает привод разматывания. Данное устройство позволяет обеспечить постоянное натяжение ленты весом натяжного ролика и уменьшить нагрузку на привод протягивания, так как необходимо преодолевать нагрузку только от силы натяжения ленты и инерционности натяжного ролика. Но данное устройство работоспособно, только когда момент сопротивления вращению рулона превышает момент, действующий на рулон со стороны натяжного ролика. Если это условие не выполняется, то натяжной ролик будет разматывать рулон и переместится до своего естественного упора, что приведет к потере натяжения ленты.

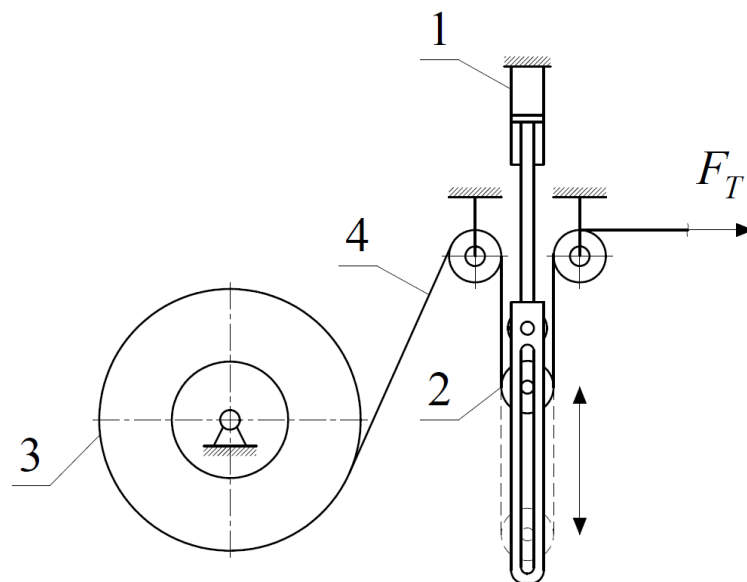


Рисунок 1.8 – Устройство для обеспечения силы натяжения разматываемого материала по патенту [46].

Еще один вариант системы разматывания и протягивания рулонных материалов представлен в работах [47, 48] и применяется на автоматических линиях блистерной упаковки. Основные компоненты системы разматывания и протягивания представлены на рисунке 1.9. В отличие от устройства, показанного на рисунке 1.8, данная система совершает разматывание рулона на каждом цикле работы. В начале цикла стол 3 находится в крайнем левом положении, определяемом упором 5, подвижный захват 7 зажат, неподвижный захват 8

отпущен, а шток двустороннего пневмоцилиндра 4 выдвинут, (давление подается в поршневую полость). Для разматывания и протягивания материала давление подается в штоковую полость пневмоцилиндра и обе ленты 1 и 2 зажатые подвижным захватом перемещаются вместе со столом до упора 6. При обратном движении неподвижный захват зажимает ленты, подвижный захват отпускается, давление подается в поршневую полость цилиндра и ролики производят разматывание материалов при движении стола влево. Для недопущения свободного разматывания рулонов предусмотрены колодочные тормоза, барабаны которых жестко соединены с осями рулонов.

Натяжение покровного материала обеспечивается натяжным роликом с пружиной с одной стороны и захватами с другой. Очевидно, что при недостаточном тормозном моменте, рулон будет свободно разматываться и натяжение не будет обеспечено. При слишком большом тормозном моменте возможны скачки силы натяжения в рулонном материале, проводящие к его растяжению или обрыву.

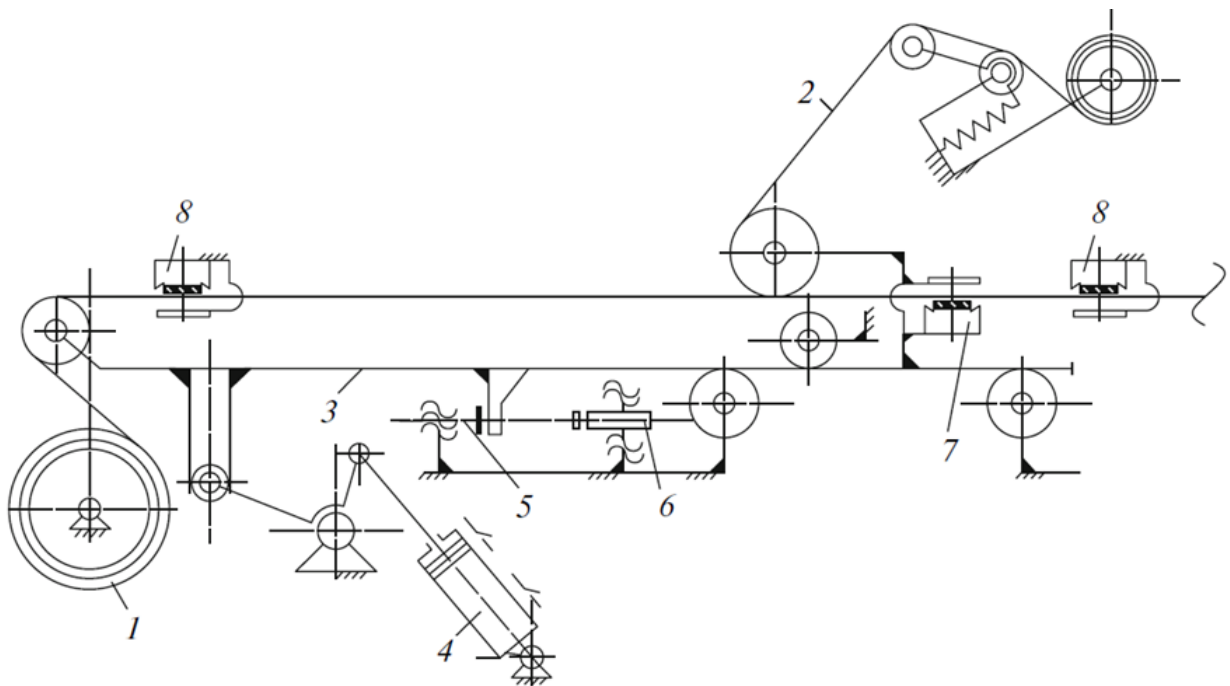


Рисунок 1.9 – Система разматывания и протягивания рулонных материалов автоматической линии блистерной упаковки.

Особенностью системы, показанной на рисунке 1.9 является плавное увеличение скорости перемещения стола 3, которое достигается за счет наличия двуплечего рычага, связанного со штоком пневмоцилиндра 4, и ролика, перемещающегося в вертикальной плоскости относительно стола 3. Упор 6 выполнен в виде гидродемпфера для гашения кинетической энергии при подходе стола к правому положению.

Таким образом, выявлены два важных качественных условия бесперебойной работы технологического оборудования обработки рулонных материалов:

1. Обеспечить постоянное натяжение ленты рулонного материала с некоторым усилием, не допускающим провис на длине обрабатываемого участка.
2. Минимизировать инерционную нагрузку на привод разматывания рулона, чтобы с одной стороны снизить энергетические требования к приводу, а с другой – не позволить чрезмерно размотать материал под действием инерции массивного рулона.

Задача удовлетворения указанным условиям требует поиска решений и определяет цель и актуальность разработки новых механизмов для оборудования, на котором производится обработка рулонных материалов.

1.2 Способы и методы перемещения лент на автоматических упаковочных линиях

Автоматическое производство изделия требует четкую организацию этого процесса [49]: специальную оснастку для перемещения и ориентации компонентов сборки, специальные машины и оборудование, выполняющие промежуточные сборочные и технологические операции, системы контроля и т.п.

Функционально процесс автоматической сборки изделия из нескольких компонентов можно разделить на передачу компонентов и информации.

Последнее содержит данные о положении компонента, ориентации в пространстве и позволяет произвести его позиционирование относительно собираемого изделия, управлять процессом передачи и обработки компонентов. Передача компонентов и информации между машинами или элементами одной машины может выполняться как последовательно, так и одновременно.

Процесс обработки или сборки изделий осуществляется машинами-автоматами (манипуляторы, технологические машины и т.п.), управление процессом происходит при помощи программируемых логических контроллеров (ПЛК), а информация о расположении и состоянии изделий получается от измерительной системы (датчики положения, камеры, весы и т.п.). Такие комплексы можно отнести к промышленным автоматизированным производственным системам [50, 51]. Обобщенная схема такой системы показана на рисунке 1.10.

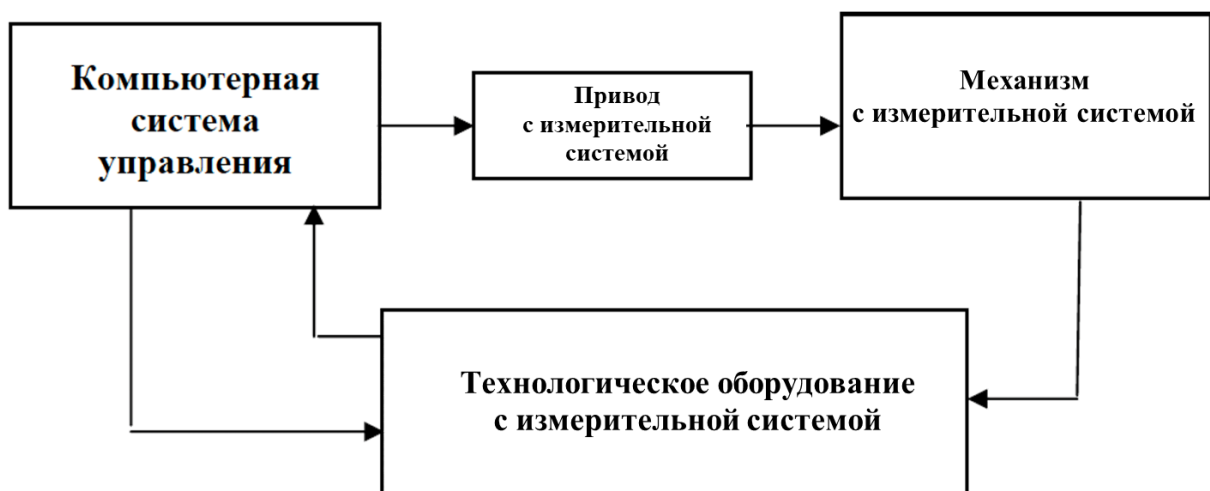


Рисунок 1.10 – Схема промышленной автоматизированной производственной системы.

Примером промышленной автоматизированной производственной системы, используемой в массовом производстве, является конвейер автоматической сборки. Сборка на таком конвейере представляет собой набор последовательных операций переноса заготовок на специально подготовленные позиции для их

обработки или соединения с дополнительными компонентами с помощью специальных машин и оборудования. На рисунке 1.11 показан пример конвейерной упаковки пищевых продуктов [35]. Изделия перемещаются с помощью конвейера между несколькими технологическими станциями. Аналогичным образом собираются сложные электронные изделия, печатные платы, часы, станки и любые другие изделия, процесс сборки которых можно разделить на отдельные операции.



Рисунок 1.11 – Автоматическая упаковочная линия.

Важной и специфической задачей при упаковке различных изделий является задача маркировки и обеспечения требуемого положения этикетки, содержащей значимую информацию о товаре, относительно упаковки. Эта задача довольно легко решается при использовании одного упаковочного материала, как это показано на рисунке 1.12. Например, при упаковке в бумажные, полимерные или другие рулонные материалы с заранее отпечатанными в заданном месте с определенным шагом этикетками и фотометками, являющимися источником информации для контроля процесса упаковывания. Шаг печати фотометок соответствует длине упаковываемого штучного изделия или объему фасуемого

жидкого или сыпучего продукта. После формирования рукава проводится его протягивание до метки с последующей склейкой и разрезкой рукава [33, 52-55].

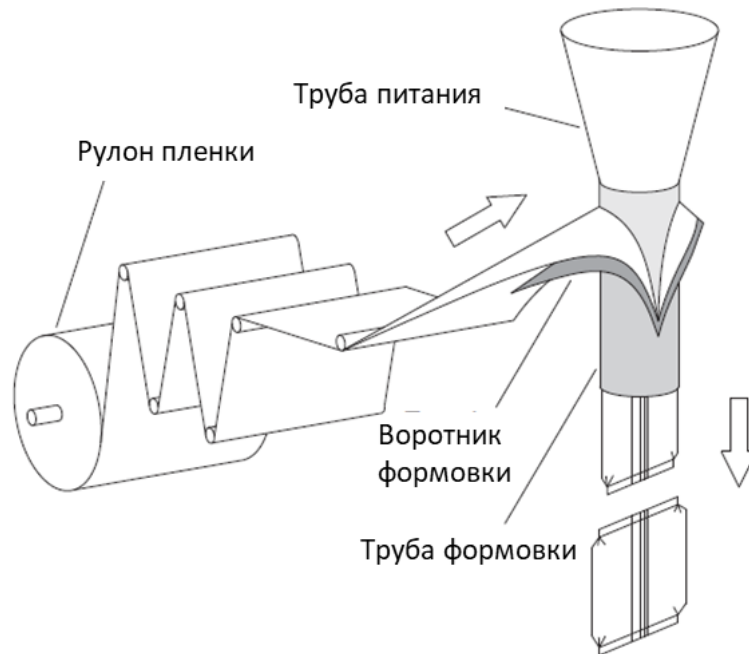


Рисунок 1.12 – Схема процесса упаковки в пакет.

Другим примером последовательной автоматической сборки продукции из нескольких упаковочных материалов является стакан с приклеенной платинкой из гибкого упаковочного материала (фольга или полимер) и пластиковой крышкой. Автоматическое оборудование для сборки подобных изделий относится к конвейерному типу и чаще всего представляет собой поворотный стол с ячейками, в которых перемещаются стаканы. Вокруг поворотного стола установлены механизм подачи стаканов в ячейки, дозирующее устройство, механизм подачи платинок, устройство приклейки платинки к стакану, устройство подачи пластиковых крышек, механизм прижима крышек и их фиксации по контуру стакана, выталкиватель готовых изделий из ячеек поворотного стола [56, 57]. Все эти операции выполняются одновременно на разных позициях при циклическом повороте стола на заданный угол (рисунок 1.13).

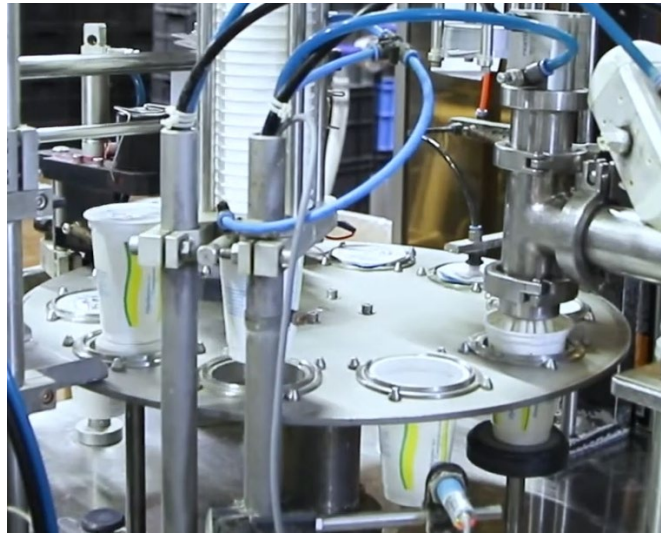


Рисунок 1.13 – Фасовочный автомат с поворотным столом.

Последние два примера являются примерами последовательной автоматической сборки изделий из нескольких компонентов. Для крупносерийного производства в промышленности применяются высокопроизводительные упаковочные машины (автоматические линии), на которых изделие автоматически собирается одновременно из двух упаковочных материалов, подающихся на линию в виде сматываемых с рулонов лент (рисунок 1.14).

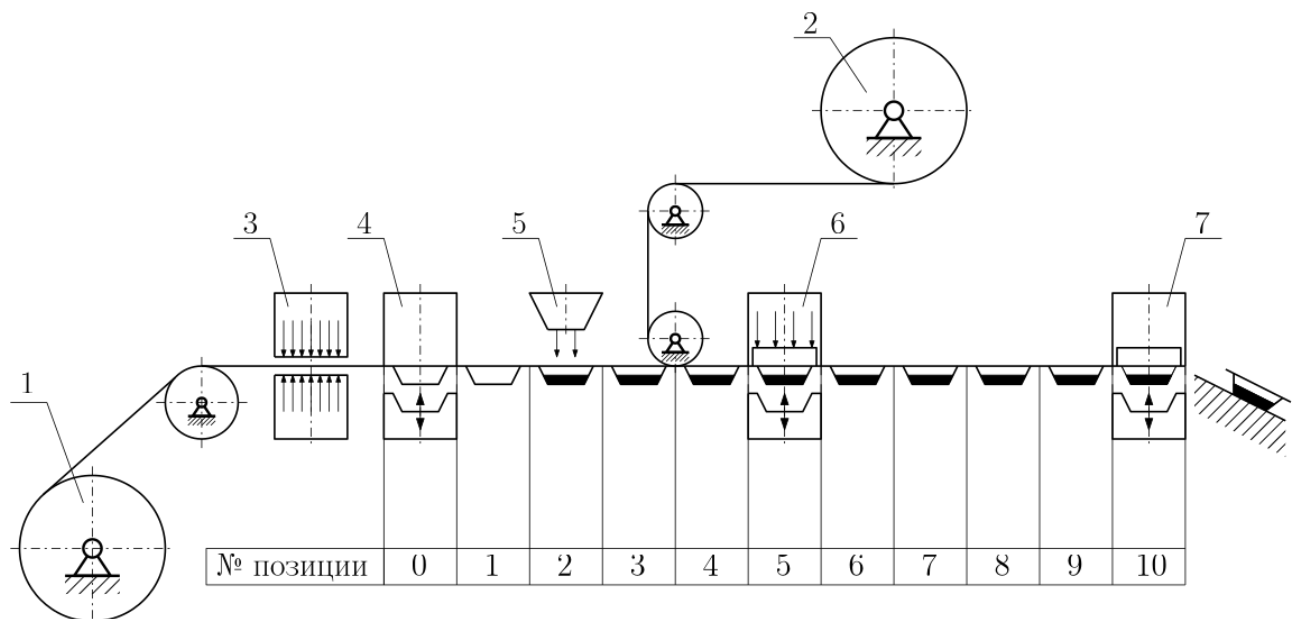


Рисунок 1.14 – Технологическая схема автоматической линии:

1 – корпусной материал; 2 – покровный материал; 3 – нагреватель; 4 – станция формовки; 5 – дозатор; 6 – станция термосварки; 7 – станция вырубki.

При этом перемещение корпусной ленты с контейнерами и покровной ленты, несущей напечатанные с постоянным шагом этикетки и метки, осуществляется одним приводом. Действительное расстояние между этикетками (и фотометками) отличается от номинального (шаг печати) из-за особенностей технологического процесса. Например, при термосварке материалов расстояние между фотометками уменьшается за счет вдавливания одной ленты в другую. При этом глубина вдавливания зависит от температурного режима сварки и силы давления [58]. Также могут присутствовать различные погрешности печати [59] (стыки печати, не пропечатанные участки и т.п.). Из-за несоответствия действительного расстояния между этикетками номинальному, с каждым циклом работы линии наблюдается эффект «смещения» верхней ленты относительно нижней, и, соответственно, этикетка «сползает» с отформованного контейнера. Поэтому первая задача, требующая решения, заключается в расчете величины перемещения лент на основе информации о фактическом расстоянии между фотометками после технологических операций и с учетом погрешностей печати.

Решение этой задачи обеспечивает отсутствие «сползания» этикетки с отформованного контейнера, но не гарантирует ее правильное расположение относительно его контура. Отсюда вытекает вторая задача, заключающаяся в смещении и удержании фотометки (а, соответственно, и этикетки) в заданном положении, при котором этикетка будет соответствовать контуру контейнера.

Известны различные технические решения, применяемые производителями автоматических упаковочных линий для решения этих задач [60-63]. Все они содержат фотоэлектрический датчик, фиксирующий положение этикетки по меткам, напечатанным с тем же шагом, что и этикетки.

В [36, 62] предложено устройство для пластической деформации верхнего материала. Одна из его модификаций показана на рисунке 1.15. При этом шаг перемещения лент транспортной системой линии чуть больше шага печати этикеток. Считывание показаний фотодатчика производится после перемещения ленты на следующий шаг и в нормальном режиме работы автоматической линии

фотодатчик не фиксирует метку. В случае смещения этикетки относительно контейнера фотодатчик «видит» метку и передает сигнал системе управления. Получив сигнал от системы управления, разработанное устройство производит пластическую деформацию верхней ленты, сдвигая ее относительно нижней. Так как механическое воздействие производится только с верхней лентой, аварий на автоматической упаковочной линии не возникает – нижняя лента, несущая контейнеры, всегда попадает в технологические станции. Недостатком такого метода является то, что это устройство подходит для работы с ограниченным набором материалов, например, алюминиевой фольгой. Спектр современных упаковочных материалов весьма широк и далеко не все из них допускают пластическую деформацию [64].

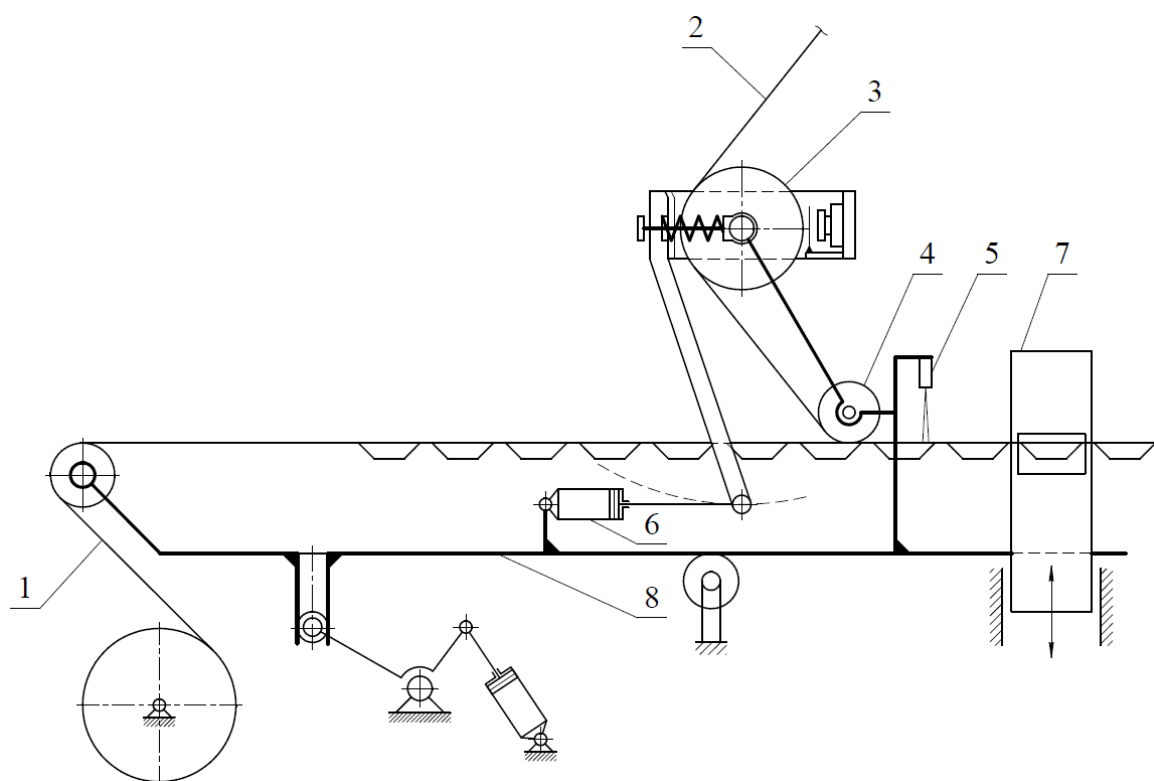


Рисунок 1.15 – Устройство пластической деформации материала:
 1 – полимерная лента; 2 – лента с этикетками; 3 – верхний ролик;
 4 – нижний ролик; 5 – оптический датчик; 6 – пневмоцилиндр вытяжки;
 7 – силовая станция сварки; 8 – стол подвижный.

Для материалов, не допускающих пластической деформации, разработан способ [63] коррекции верхней ленты относительно нижней за счет изменения

времени внедрения верхнего материала в нижний (рисунок 1.16). Этот способ работает в случае формирования узкого ленточного шва по контуру контейнера. При фиксации фотодатчиком метки производится коррекция, которая заключается в увеличенном времени вдавливания верхнего материала в нижний (h – глубина внедрения верхнего материала в нижний на рисунке 1.16). Таким образом, большее количество покровного материала будет смотано с рулона верхней ленты. Также, как и в предыдущем случае, контейнеры нижней ленты всегда попадают в инструмент технологических станций, при этом данный способ ограничивает тип используемых материалов, и позволяет корректировать шаг перемещения верхней ленты лишь на малую величину, следствием этого является сложность настройки оборудования.

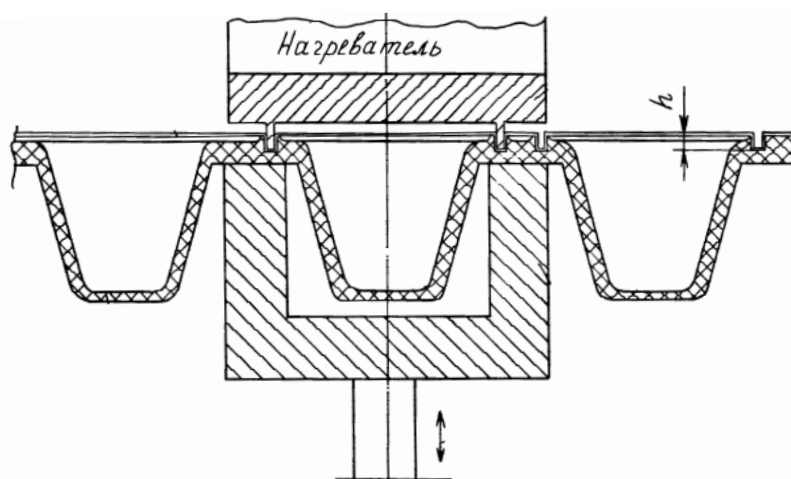


Рисунок 1.16 – Схема термосваривания двух материалов.

В работах [60, 65] предложено по показаниям фотодатчика изменять величину перемещения лент. Как указывалось выше, величина перемещения лент определена неподвижными упорами транспортной системы и равна некоторому значению x . При этом величина x немного превышает шаг печати этикеток и меток на верхней ленте. При фиксации фотодатчиком метки следующее перемещение лент будет уменьшено на некоторую величину y за счет вставки пластины толщиной y между неподвижными упорами транспортной системы. Одна из возможных технических реализаций такого способа коррекции

перемещения лент представлена на рисунке 1.17. Это устройство устанавливается в систему ограничителей движения транспортной системы, показанной на рисунке 1.9.

Основной недостаток данного способа заключается в том, что шаг подачи материалов является некоторой средней величиной, учитывающий периодическое введение коррекции при вставке пластины 2 между неподвижными упорами. Существенное рассогласование положений лент материалов приводит к тому, что данная механическая система будет работать с постоянно вставленной или, наоборот, опущенной пластиной (в зависимости от того в каком направлении необходимо сместить верхнюю ленту относительно нижней). Это в свою очередь приводит к изменению шага подачи лент материалов и является следствием аварий – заминанием нижней ленты с контейнерами в технологических станциях упаковочной линии. В результате, для безаварийной работы оборудования необходимо с довольно высокой точностью устанавливать упоры транспортной системы, определяющие величину x , и повторно регулировать положения упоров в случае незначительного изменения шага печати этикеток, вызванного сменой дизайна или производителя ленты с этикетками.

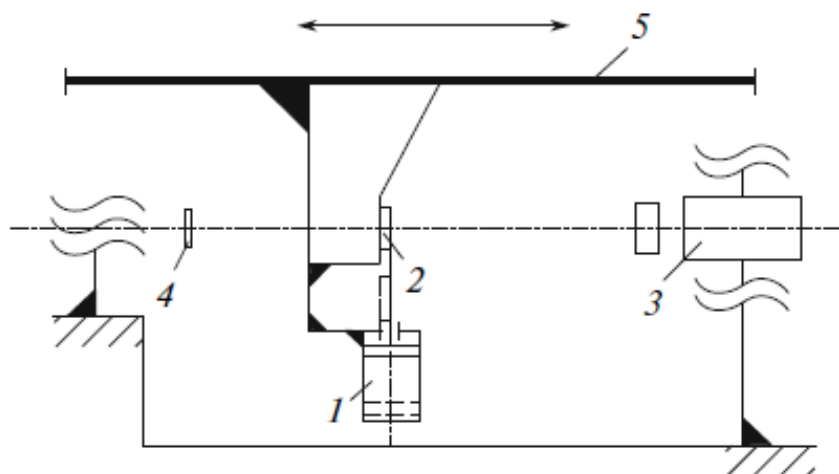


Рисунок 1.17 – Механизм изменения шага подачи стола:
1 – пневмоцилиндр; 2 – калиброванная пластина (толщина D);
3 – гидродемпфер-упор; 4 – упор; 5 – стол подвижный.

В результате выполненного обзора различных систем автоматической сборки изделий из ленточных материалов показаны основные недостатки известных методов. Наиболее значимыми из них являются ограничения на тип используемых материалов и отсутствие контроля положений рулонных материалов относительно технологических станций автоматической упаковочной линии. Все описанные выше механизмы и способы совмещения лент предполагают проведение дополнительной, зачастую трудоемкой, наладки оборудования даже при малых изменениях внешних условий. Таким образом необходимо разработать эффективный механизм и метод автоматического позиционирования ленточных материалов друг относительно друга, который не требует дополнительных наладочных операций при изменении типа материалов и их характеристик.

1.3 Постановка цели и задач исследования

Качественная технологическая обработка рулонных материалов требует обеспечения их натяжения с некоторым усилием, не допускающим провис на длине обрабатываемого участка, а также чрезмерной силы натяжения, вследствие которой может произойти растягивание или разрыв материала. Наличие провисов и растяжений ленты может привести к аварийным остановкам оборудования из-за попадания контейнеров в неподвижные инструменты на технологических станциях. Кроме того, необходимо минимизировать инерционную нагрузку на привод протягивания рулонного материала, а также не допускать разматывания массивного рулона под действием его инерции при торможении.

Выполненный обзор систем перемещения заготовок из двух лент показал отсутствие универсальных механизмов и методов, позволяющих совмещать компоненты сборки, находящихся на различных лентах и при этом попадать точно в инструменты на технологических станциях при изменяющихся условиях

эксплуатации технологического оборудования (тип материалов, размеры, механические характеристики и т.п.).

Сформулированные проблемы определяют цель настоящего диссертационного исследования, заключающуюся в повышении эффективности и безотказности работы технологического оборудования путем модернизации системы подачи лент, которая должна быть универсальной в части используемых материалов и адаптивной, то есть автоматически корректировать параметры своей работы в соответствии с изменяющимися условиями эксплуатации.

Основные задачи диссертационного исследования:

1. Синтез и анализ механизма натяжения лент при разматывании и протягивании, обеспечивающего минимальную нагрузку, действующую на привод разматывания, и не позволяющего рулону совершать инерционный выбег.

2. Разработка системы и методов перемещения рулонных материалов, позволяющую позиционировать ленты относительно технологических станций и друг друга, универсальную с точки зрения используемых материалов и адаптивную к меняющимся условиям эксплуатации.

ГЛАВА 2 СИНТЕЗ И АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА РАЗМАТЫВАНИЯ И ПРОТЯГИВАНИЯ ЛЕНТ

В настоящей главе описаны синтез и анализ механизма для разматывания и протягивания рулонных материалов с постоянной скоростью или в дискретном режиме. За основу были взяты известные решения, позволяющие обеспечивать требуемую силу натяжения лент при их разматывании из рулонов с постоянной скоростью. Для того, чтобы обеспечить натяжение ленты в дискретном режиме работы, не допуская скачков силы ее натяжения, было предложено добавить в механизм натяжной ролик, установленный на поворотном рычаге, кинематически связанном с колодочным тормозом на барабане рулонного материала. Приведены статический и динамический анализ синтезированного механизма.

2.1 Синтез механизма

Как было указано в предыдущей главе, необходимо синтезировать механизм, который обеспечивает, во-первых, требуемое натяжение ленточного материала при его разматывании из рулона и протягивании, а, во-вторых, минимальную инерционную силу, действующую на привод протягивания ленты.

Синтез механизма заключается в проектировании кинематической цепи или цепей, воспроизводящих заданные движения одного или нескольких звеньев путем непосредственного их воздействия друг на друга или путем введения между ними промежуточных звеньев [66]. Соответственно образованная кинематическими цепями кинематическая схема синтезируемого механизма должна удовлетворять ряду заданных параметров, представляющих собой структурные, кинематические и динамические условия или ограничения, формирующие техническое задание на проектирование механизма.

Требуемая функциональность синтезируемого механизма определяет условия и ограничения, накладываемые него. За основу берется исходная кинематическая схема, показанная на рисунках 1.1б и 2.1. Синтезируемый механизм, в свою очередь, должен преобразовывать поступательное движение привода протягивания во вращательное движение рулона. При этом необходимо добиться выполнения следующих основных требований:

1. Минимизировать силу натяжения ленты процессе работы, зависящую от текущего радиуса рулона:

$$F_T(R) \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

где R – радиус рулона.

Критериями для силы натяжения, с одной стороны является условие отсутствия провиса ленты на длине обрабатываемого участка, а с другой должно быть соблюдено условие прочности $F_T < [F]$, где $[F]$ допускаемая сила натяжения, исключая продольную деформацию ленты.

2. Уменьшить влияние инерционности рулона на процесс разматывания и протягивания ленты. При этом в исходном механизме ускорение рулона связано с силой натяжения ленты и сопротивлением вращению рулона через дифференциальное уравнение вращательного движения твердого тела:

$$\begin{aligned} J(t)\ddot{\phi} &= F_T(t)R(t) - \mu N(t)r, \\ N(t) &= m(t)g, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где $J(t)$ – момент инерции рулона относительно оси его вращения; $\ddot{\phi}$ – угловое ускорение вращающегося рулона; μ – коэффициент трения в опорах; $N(t)$ – вес рулона; r – радиус опоры, $m(t)$ – масса рулона, g – ускорение свободного падения. Точками над переменной обозначена операция дифференцирования по текущему времени t .

3. Необходимо избежать того, чтобы движение привода протягивания преобразовывалось непосредственно во вращение рулона. В исходном механизме скорость привода протягивания связана со скоростью вращения рулона (с учетом уравнения архимедовой спирали [22, 67]) следующим образом:

$$\dot{x} = \dot{\varphi} \left(R_0 - \frac{d}{2\pi} \varphi \right), \quad (2.3)$$

где $\dot{x}$ – линейная скорость привода разматывания; R_0 – начальный радиус рулона; d – толщина ленты; $\varphi, \dot{\varphi}$ – угловые координата и скорость вращения рулона соответственно.

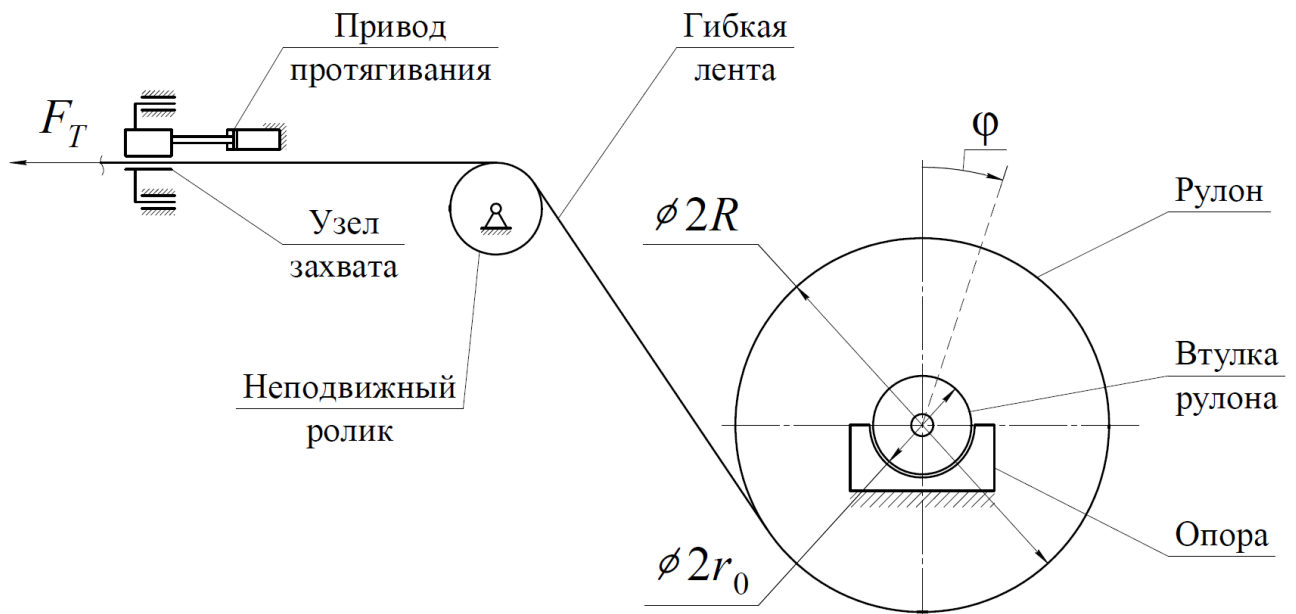


Рисунок 2.1 – Исходная кинематическая схема.

Механизм, представленный на рисунке 1.8, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к устройствам разматывания и протягивания рулонного материала, а именно: лента всегда натянута весом натяжного ролика; привод протягивания преодолевает нагрузку только от усилия натяжения ленты и постоянной инерционности натяжного ролика и не нагружен переменной инерционной составляющей рулона при его разматывании. Для того чтобы избежать потерю натяжения ленты и получить возможность регулирования усилия ее натяжения при разматывании рулона вместо дополнительного привода разматывания (рисунок 1.8) установим рычаг, который с одной стороны будет иметь натяжной ролик, а с другой стороны поворотную планшайбу с кулачками, взаимодействующими с поворотными рычагами, на которых установлены

колодки, воздействующие на тормозной барабан рулона и обеспечивающие тормозной момент.

Кинематическая схема разработанного механизма [68-73] представлена на рисунке 2.2. В предложенном устройстве используется колодочный тормоз, создающий тормозной момент на рулоне ленточного материала, и не позволяющий ему произвольно разматываться при кратковременном воздействии вращающего момента.

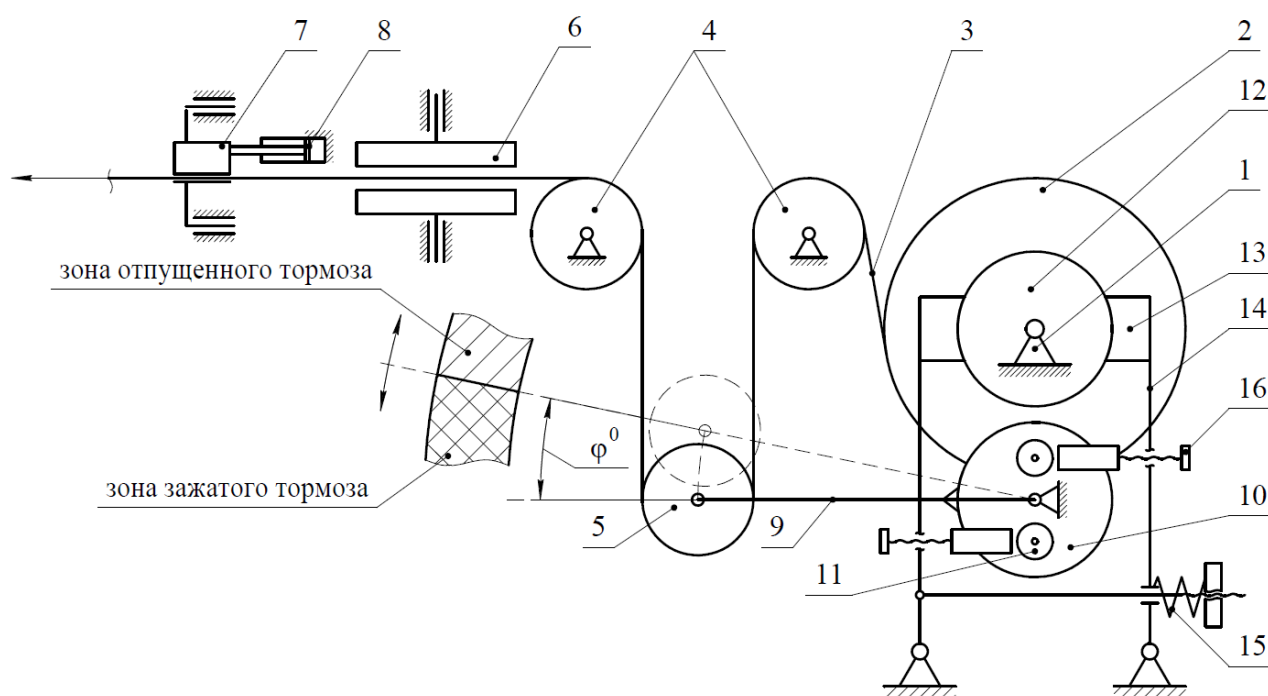


Рисунок 2.2 – Кинематическая схема синтезированного механизма:
 1 – узел установки рулона, 2 – рулон, 3 – гибкая лента, 4 – неподвижные ролики,
 5 – натяжной ролик, 6 – технологическая станция, 7 – узел захвата, 8 – привод протягивания, 9 – поворотный рычаг, 10 – планшайба, 11 – кулачки,
 12 – барабан колодочного тормоза, 13 – тормозные колодки,
 14 – поворотный рычаг, 15 – пружина, 16 – регулируемые упоры.

Для обеспечения натяжения ленты добавлен натяжной ролик весом P (рисунок 2.3в), закрепленный на поворотном рычаге. Поворотный рычаг в свою очередь кинематически связан с колодочным тормозом, реализуя принцип отрицательной обратной связи в зависимости от угла его отклонения. Это позволяет регулировать силу прижатия тормозных колодок к барабану, и, соответственно, тормозной момент, приложенный к рулону. В таком случае сила

натяжения в материале при начале разматывания и торможении должна меняться более плавно. Кроме того, это позволяет разгрузить привод протягивания, которому необходимо преодолевать только инерционность подвижного ролика, а не массивного рулона ленточного материала. Устройство в первую очередь предназначено для разматывания ленточных материалов на упаковочных машинах и работы в дискретном режиме, но также может использоваться для непрерывного разматывания лент в другом оборудовании.

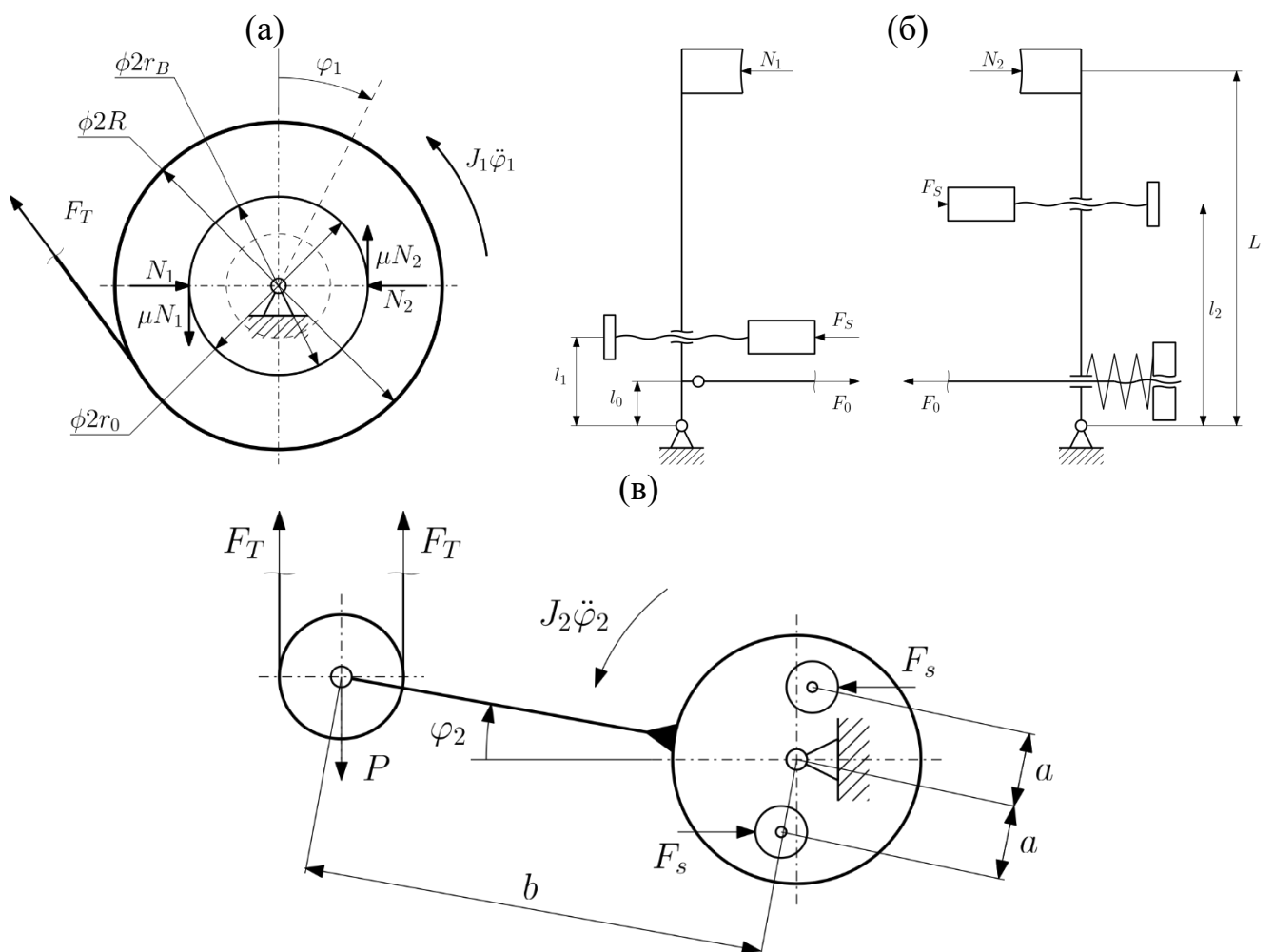


Рисунок 2.3 – Геометрические параметры элементов устройства и силы, возникающие в них: (а) рулон с тормозным барабаном; (б) стойки с тормозными колодками; (в) поворотный рычаг с планшайбой.

Рассмотрим общий принцип дискретного протягивания рулонного материала на автоматических линиях. В начальный момент захват 7 (рисунок 2.2) зажимает ленту 3, технологическая станция 6 линии открыта, привод

протягивания 8 находится в крайнем правом положении. По сигналу от системы управления привод с помощью захвата перемещает ленту 3 через технологическую станцию, сматывая ее с рулона 2. После перемещения ленты для выполнения требуемой операции технологическая станция закрывается, фиксируя ленту. Захват отпускает ленту, привод протягивания возвращается в исходное положение, и захват снова зажимает ленту.

Составные элементы устройства, их геометрические параметры и силы возникающий в них представлены на рисунке 2.3. Важным параметром является отношение плеч a и b в поворотном рычаге с планшайбой (рисунок 2.3в), так как оно определяет передаточное отношение для сил и вместе с поджатием пружины 15 влияет на изменение силы натяжения ленточного материала во время работы механизма.

2.2 Кинематический анализ

Далее проведем анализ разработанного механизма. Рассматриваемый механизм обладает двумя степенями свободы – угол поворота φ_1 рулона 2, угол поворота φ_2 поворотного рычага 9. Крайнее положение поворотного рычага показано на рисунке 2.2. Исходным положением поворотного рычага является горизонтальное. Предложенный механизм обладает двумя характерными положениями, разделяющими две зоны работы механизма – зону зажатого тормоза и зону отпущенного тормоза. Когда подвижный рычаг находится в исходном положении или поворачивается на некоторый угол, при котором между кулачками на планшайбе и упорами остается зазор – рычаг находится в зоне зажатого тормоза, так как тормозные колодки прижаты к барабану с полным усилием поджатия пружины. Когда подвижный рычаг поднят на угол φ^0 , он входит в зону отпущенного тормоза – кулачки на планшайбе начинают контактировать с упорами и уменьшать силу прижатия тормозных колодок к

барабану, что позволяет рулону раскручиваться, пока подвижный рычаг опять не опустится ниже угла φ^0 и не перейдет обратно в зону зажатого тормоза, после чего под действием тормозного момента рулон останавливается.

Очевидно, что в начале процесса протягивания, привод тянет ленту и поднимает только подвижный ролик до тех пор, пока не перекроется зазор между кулачками и упорами. Далее, когда кулачки начинают давить на упоры, механизм переходит из зоны зажатого тормоза в зону отпущенного тормоза. За этим следует увеличение силы натяжения ленточного материала, вызванное необходимостью преодолеть силу сжатия в пружине *15* и ослабить поджатие тормозных колодок к барабану. При ослаблении поджатия тормозных колодок к барабану, уменьшается и тормозной момент на рулоне, что приводит к его разматыванию, опусканию подвижного ролика, возврату механизма в зону зажатого тормоза и остановке вращения рулона. В момент опускания подвижного ролика происходит уменьшение силы натяжения рулонного материала ввиду свободного разматывания рулона и выхода кулачков из контакта с упорами.

Зоны зажатого и отпущенного тормоза определяются величиной зазора Δ между кулачком и регулируемым упором (рисунок 2.4). Так как зазор имеет малую величину относительно плеч a и b рычага, угол φ^0 , при условии, что $a \gg \Delta$ определяется следующим соотношением:

$$\varphi^0 = \Delta/a. \quad (2.4)$$

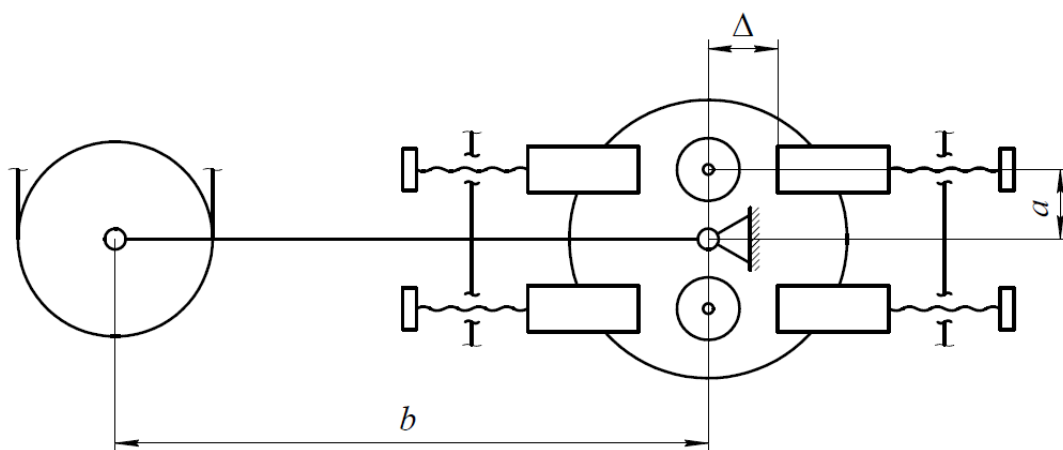


Рисунок 2.4 – Зазор между кулачком и упором.

Очевидно, что сила натяжения ленточного материала, сматываемого с рулона, зависит от соотношения длин рычагов a и b . Для определения оптимальных величин этих параметров необходимо провести статический анализ механизма.

2.3 Статический анализ

Для проведения силового анализа механизмов воспользуемся принципом Даламбера [66, 68]. Из условия равновесия моментов в элементах устройства (рисунок 2.3а-в), рассматривая рулонный материал как нерастяжимый, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} J_1(t)\ddot{\phi}_1 = F_T(t)R(t) - \mu(N_1(t) + N_2(t))r_B \\ J_2\ddot{\phi}_2 = (2F_T(t) - P)b - 2F_S(t)a \\ N_1(t)L + N_2(t)L = 2F_0(t)l_0 - F_S(t)(l_1 + l_2). \end{cases} \quad (2.5)$$

Необходимо отметить, что все силы и момент инерции рулона зависят от его текущего радиуса, который зависит от времени. В первую очередь исследуем влияние радиуса рулона на силы, возникающие в механизме. Рассмотрим статическое равновесие системы, когда механизм неподвижен, либо лента сматывается из рулона с постоянной скоростью. В таком случае значения сил зависят от радиуса рулона и система (2.5) принимает следующий вид:

$$\begin{cases} F_T(R)R = \mu(N_1(R) + N_2(R))r_B \\ (2F_T(R) - P)b = 2F_S(R)a \\ N_1(R)L + N_2(R)L = 2F_0(R)l_0 - F_S(R)(l_1 + l_2). \end{cases} \quad (2.6)$$

Для анализа механизма приведем все значения к безразмерному виду. Использование безразмерных параметров и переменных позволяет исключить влияние габаритных размеров механизма на результаты расчетов и сократить количество варьируемых параметров при исследовании их влияния на работу

механизма. При грамотном выборе безразмерных параметров удастся увеличить точность и скорость вычислений за счет повышения обусловленности задачи [74]. Также упрощается проектирование реальных механизмов по синтезированной кинематической схеме, поскольку все реальные размеры становятся однозначно связанными между собой. Таким образом, вводятся следующие безразмерные величины и переменные:

$$\begin{aligned} \xi = R/r_0; \xi_B = r_B/r_0; \xi_0 = R_0/r_0; \lambda = (l_1 + l_2)/L; \lambda_0 = l_0/L; \kappa = a/b; \\ \Phi_T = F_T/P; \Phi_S = F_S/P; \Phi_0 = F_0/P; N = (N_1 + N_2)/P. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Преобразовав систему (2.6) и подставив в нее соотношения (2.7), получим выражения для силы натяжения в ленточном материале, силы реакции в упорах и силы прижатия тормозных колодок к барабану:

$$\begin{cases} \Phi_T(\xi) = \frac{\mu \xi_B (4\lambda_0 \kappa \Phi_0 + \lambda)}{2(\kappa \xi + \mu \lambda \xi_B)} \\ \Phi_S(\xi) = \frac{4\mu \lambda_0 \Phi_0 \xi_B - \xi}{2(\kappa \xi + \mu \lambda \xi_B)} \\ N(\xi) = \frac{\xi (4\lambda_0 \kappa \Phi_0 + \lambda)}{2(\kappa \xi + \mu \lambda \xi_B)}. \end{cases} \quad (2.8)$$

Проанализируем полученные зависимости. Исходя из выражений (2.8), можно подобрать усилие поджатия пружины Φ_0 , при котором массивный рулон не будет разматываться под действием веса натяжного ролика. Для этого необходимо чтобы сила реакции в упорах Φ_S при любом значении безразмерного радиуса рулона ξ была положительна, то есть $\Phi_S > 0$. Из этого условия следует неравенство для силы поджатия пружины:

$$\Phi_0 > \xi_{\max} / 4\mu \lambda_0 \xi_B. \quad (2.9)$$

Наибольший интерес представляет выражение для силы натяжения Φ_T ленточного материала при его протягивании. Из выражения (2.8) следует, что для обеспечения минимального изменения силы натяжения за время разматывания рулона (уменьшения безразмерного радиуса от ξ_0 до 1), необходимо выполнение условия:

$$k\xi_{\max} \ll \mu\lambda. \quad (2.10)$$

В соответствии с (2.7) величина k описывает отношение длин плеч рычага a и b . Исходя из условия (2.10), изменение силы натяжения материала за время разматывания будет минимальным, когда $b \gg a$. Опираясь на полученные зависимости, можно подобрать конструктивные параметры механизма для его эффективной работы.

Рассмотрим также известный механизм, который являлся исходным для разработанного устройства (рисунок 2.1). В таком механизме тормозной момент создается за счет веса рулона, которым он воздействует на опору. В таком случае силу натяжения ленточного материала можно выразить следующим образом:

$$F_T^2 = \frac{\mu_2 (m_1 + m_2) g r_B}{R}. \quad (2.11)$$

где m_1 – масса рулона, m_2 – масса втулки, μ_2 – коэффициент трения втулки об опору.

Введем дополнительно следующие безразмерные величины:

$$\sigma = r_0 / g T_0^2; \quad k_p = \rho_2 / \rho_1; \quad T_0 = \sqrt{\rho_1 \pi H r_0^3 / P}. \quad (2.12)$$

Подставив (2.7) и (2.12) в (2.11), получим выражение силы натяжения при использовании исходного устройства в безразмерном виде

$$\Phi_T^2 = \frac{\mu_2 \xi_B (\xi^2 + k_p - 1)}{\sigma \xi}. \quad (2.13)$$

Недостатком исходного механизма является то, что тормозной момент создается весом рулона, которым он действует на опору и зависит от его текущего радиуса. Соответственно, по мере разматывания рулона, его вес уменьшается, а вместе с ним уменьшается и тормозной момент. При малом радиусе (и весе) рулона это может привести к потере натяжения ленточного материала и его провису, что недопустимо с технологической точки зрения.

На рисунке 2.5 представлены зависимости (2.8) и (2.13) для следующего набора параметров системы:

$$\lambda_0 = 1,25; \lambda = 2; \Phi_0 = 4; \kappa = 1/7; \mu = 0,3; \mu_2 = 0,1;$$

$$k_p = 2; \sigma = 0,5; T_0 = 0,035; \xi_B = 1,6.$$

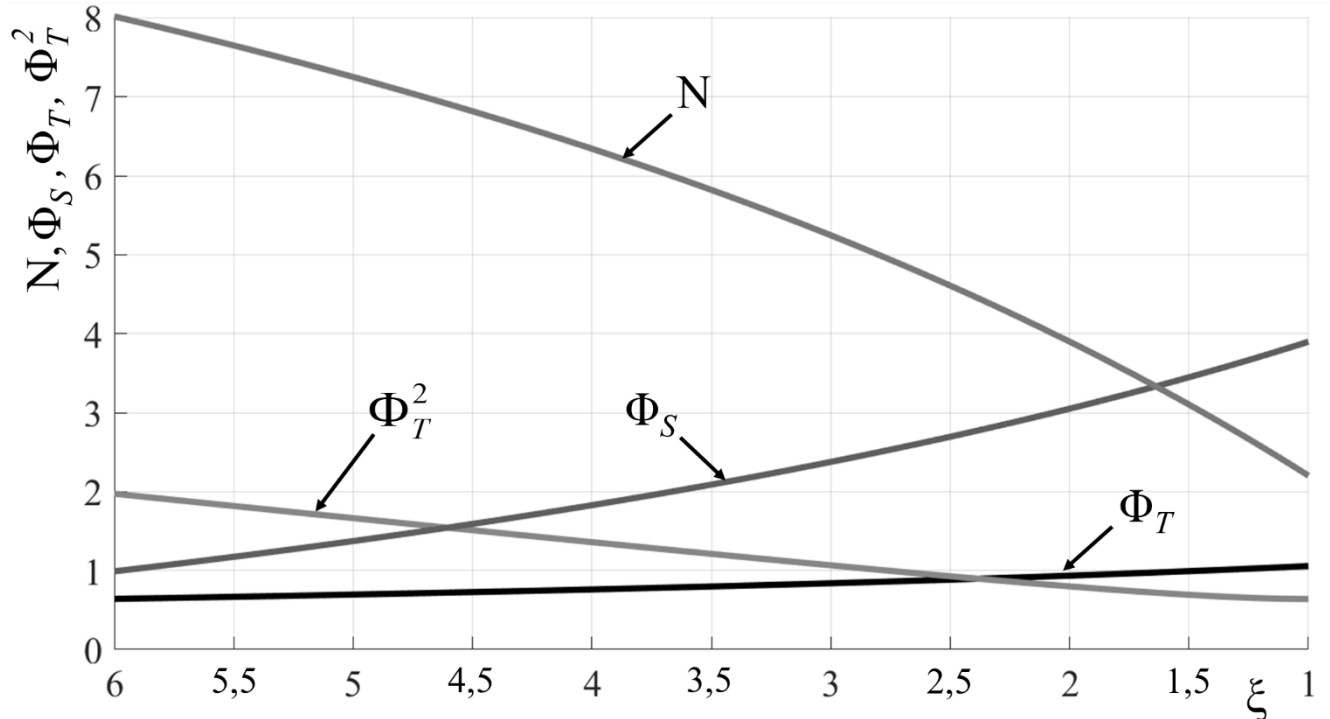


Рисунок 2.5 – Зависимости сил от радиуса рулона.

Из рисунка 2.5 видно, что на протяжении всего процесса разматывания рулона кулачки находятся в контакте с упорами и $\Phi_S > 0$. Это свидетельствует о том, что подвижный рычаг находится на верхней границе рабочих зон (рисунок 2.2). За счет давления кулачков на упоры в процессе разматывания уменьшается сила прижатия тормозных колодок к барабану (кривая N на рисунке 2.5) и, соответственно, тормозной момент на рулоне. Это объясняется тем, что уменьшение радиуса рулона сопровождается уменьшением плеча силы Φ_T , разматывающей рулон. Что приводит к увеличению силы натяжения материала, требуемой для разматывания рулона (кривая Φ_T на рисунке 2.5) при одновременном уменьшении тормозного момента. Видно, что при разматывании рулона, при заданных параметрах, сила натяжения за все время меняется в пределах 60%. При использовании исходного механизма сила натяжения ленточного материала Φ_T^2 с уменьшением радиуса рулона уменьшается в 3 раза.

Сила натяжения ленточного материала при использовании разработанного механизма стабильнее, чем при исходном механизме. При этом исходный механизм теряет эффективность, когда масса рулона мала (при R близких к r_0), в то время как новый сохраняет силу натяжения.

2.4 Динамический анализ

Здесь рассмотрим случай, когда элементы системы движутся с ускорением, то есть справедливы соотношения (2.5). Необходимо рассчитать моменты инерции подвижных элементов. Важно заметить, что радиус рулона R является переменной во времени величиной. Момент инерции рулона рассчитывается как момент инерции составного диска (внутри металлическая втулка, снаружи ленточный материал):

$$J_1 = \int_m r^2 dm = \int_0^R r^2 \rho(r) 2\pi H r dr = \frac{1}{2} \rho_1 \pi H R^4 + \frac{1}{2} (\rho_2 - \rho_1) \pi H r_0^4, \quad (2.14)$$

где ρ_1 – плотность ленточного материала, ρ_2 – плотность материала втулки, H – ширина рулона, r_0 – радиус втулки.

Момент инерции рычага с натяжным роликом рассчитывается в приближении, что радиус ролика существенно меньше длины рычага и его моментом инерции можно пренебречь. Тогда по теореме Гюйгенса-Штейнера [68]:

$$J_2 = m_r b^2 = P b^2 / g, \quad (2.15)$$

где m_r – масса натяжного ролика.

Скорости элементов системы связаны следующим соотношением [68]:

$$\dot{\phi}_2 b = (\dot{x} - \dot{\phi}_1 R) / 2, \quad (2.16)$$

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

Для получения связи между ускорениями элементов системы, необходимо продифференцировать выражение (2.16) по времени, с учетом того, что радиус

рулона R меняется в зависимости от угла φ_1 (рисунок 2.3а) по закону Архимедовой спирали [22, 67]:

$$R = R_0 - \frac{d}{2\pi} \varphi_1, \quad (2.17)$$

где d – толщина рулонного материала.

Подставив (2.17) в (2.16) и продифференцировав по времени, получим выражение, связывающее ускорения рулона, подвижного рычага и привода протягивания:

$$R_0 \ddot{\varphi}_1 = \ddot{x} + \frac{d}{2\pi} \dot{\varphi}_1^2 - 2b \ddot{\varphi}_2. \quad (2.18)$$

Таким образом, система уравнений (2.5) и соотношение (2.18) позволяют получить систему дифференциальных уравнений движения звеньев механизма. В описанном механизме движение задается приводом протягивания. Для него известен закон изменения его скорости за время протягивания и расстояние, которое он при этом преодолевает. Таким образом, внешнее воздействие в полученной системе уравнений задается законом изменения скорости $\dot{x}(t)$. Система работает в дискретном режиме (старт-стоп). Рассматривается случай, когда в первой половине цикла (время от 0 до $T/2$) привод перемещает ленту на некоторое расстояние A и разматывает рулон, затем (время от $T/2$ до T) отпускает ленту и возвращается в исходное положение. Во время возврата привода, лента и рулон удерживаются технологической станцией b и за счет этого остаются неподвижными. Ограничение, накладываемое на функцию изменения скорости привода протягивания, опираясь на вышеописанное, имеет следующий вид:

$$\int_0^{T/2} \dot{x}(t) dt = A. \quad (2.19)$$

Введем дополнительно следующие безразмерные величины и переменные:

$$\begin{aligned} \beta &= b/r_0; \delta = d/2\pi r_0; \Lambda = A/r_0; \tau = t/T_0; \nu = T_0 \dot{x}/r_0; \\ \phi_1 &= \varphi_1; \phi_1' = T_0 \dot{\varphi}_1; \phi_1'' = T_0^2 \ddot{\varphi}_1; \phi_2 = \varphi_2; \phi_2' = T_0 \dot{\varphi}_2; \phi_2'' = T_0^2 \ddot{\varphi}_2. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Закон изменения скорости протягивания приводом ленточного материала в безразмерном виде $v(\tau)$ показан на рисунке 2.6. Отметим, что скорость при протягивании ленточного материала должна изменяться плавно, чтобы не допустить рывков в начале и конце перемещения лент. Скорость привода во время его возврата в исходное положение (вторая половина цикла на рисунке 2.6) принимается нулевой, так как в это время привод возвращается в исходное положение, а лента остается неподвижной.

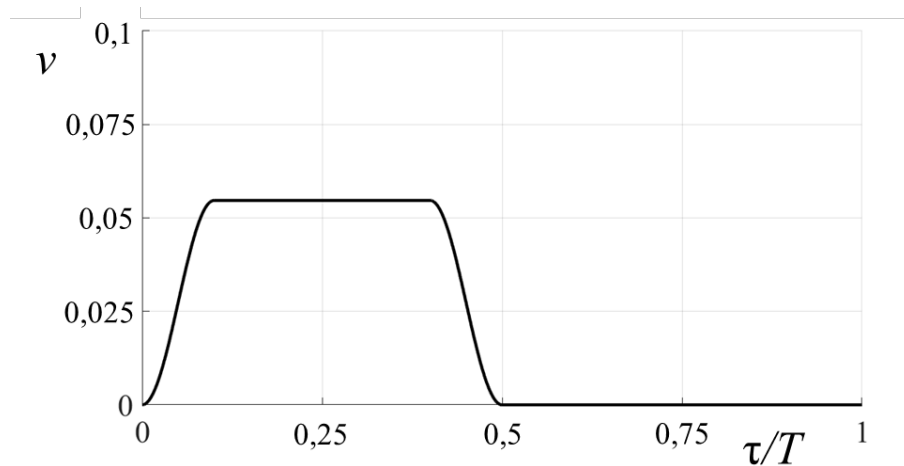


Рисунок 2.6 – Закон изменения скорости движения привода протягивания в безразмерном виде.

После преобразований системы (2.5) с использованием выражения (2.17), а также безразмерных величин и переменных (2.7) и (2.20), получена система нелинейных дифференциальных уравнений движения рулона и рычага с натяжным роликом в безразмерном виде:

$$\begin{cases} \phi_1'' + 2\beta\phi_2'' - \frac{v' + \delta\phi_1'^2}{\xi_0 - \delta\phi_1} = 0 \\ \left((\xi_0 - \delta\phi_1)^3 + \frac{(k_p - 1)\xi_k^4}{\xi_0 - \delta\phi_1} \right) \phi_1'' - \beta\sigma\phi_2'' + \frac{2\mu N\xi_B}{\xi_0 - \delta\phi_1} - 1 - \Phi_s\kappa = 0. \end{cases} \quad (2.21)$$

Численное интегрирование полученной системы дифференциальных уравнений второго порядка [75, 76] проведено при параметрах, приведенных ниже. Результаты представлены на рисунках 2.7 и 2.8.

$$\delta = 10^{-2}; k_p = 2; \lambda_0 = 1,25; \lambda = 2; \kappa = 1/7; \beta = 4,2;$$

$$T = 8; \Phi_0 = 4; T_0 = 0,035; \mu = 0,3; \Lambda = 2,5; \sigma = 0,5.$$

На рисунке 2.7 показаны результаты численного моделирования работы механизма на трех циклах протягивания. Видно, 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 силы натяжения на показанных циклах работы составляют $\pm 4\%$ от среднего значения силы натяжения.

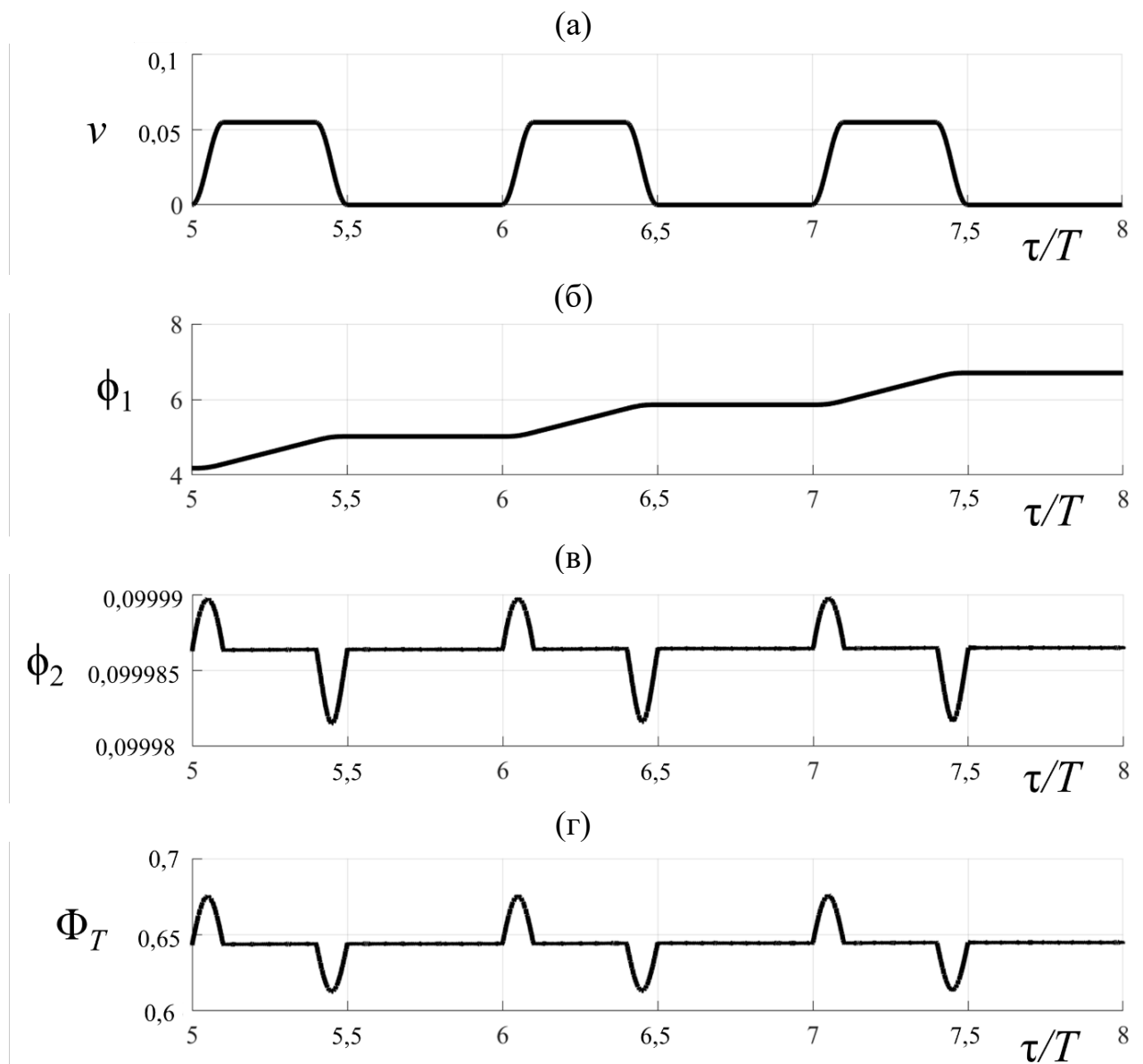


Рисунок 2.7 – Результаты моделирования работы механизма:

(а) скорость привода протягивания; (б) угол поворота рулона ленточного материала; (в) угол поворота рычага с натяжным роликом; (г) сила натяжения ленточного материала.

Из рисунка 2.8а видно, что разматывание рулона идет неравномерно. Угол поворота рулона за цикл зависит от его диаметра. Это связано с тем, что расход ленты (т.е. длина сматываемого материала) за цикл остается постоянным, в то время как длина окружности рулона уменьшается. Закон движения поворотного рычага, представленный на рисунке 2.8б, показывает, что среднее значение угла ϕ_2 увеличивается с уменьшением диаметра рулона, что приводит к ослаблению прижатия тормозных колодок к барабану и уменьшению тормозного момента на рулоне.

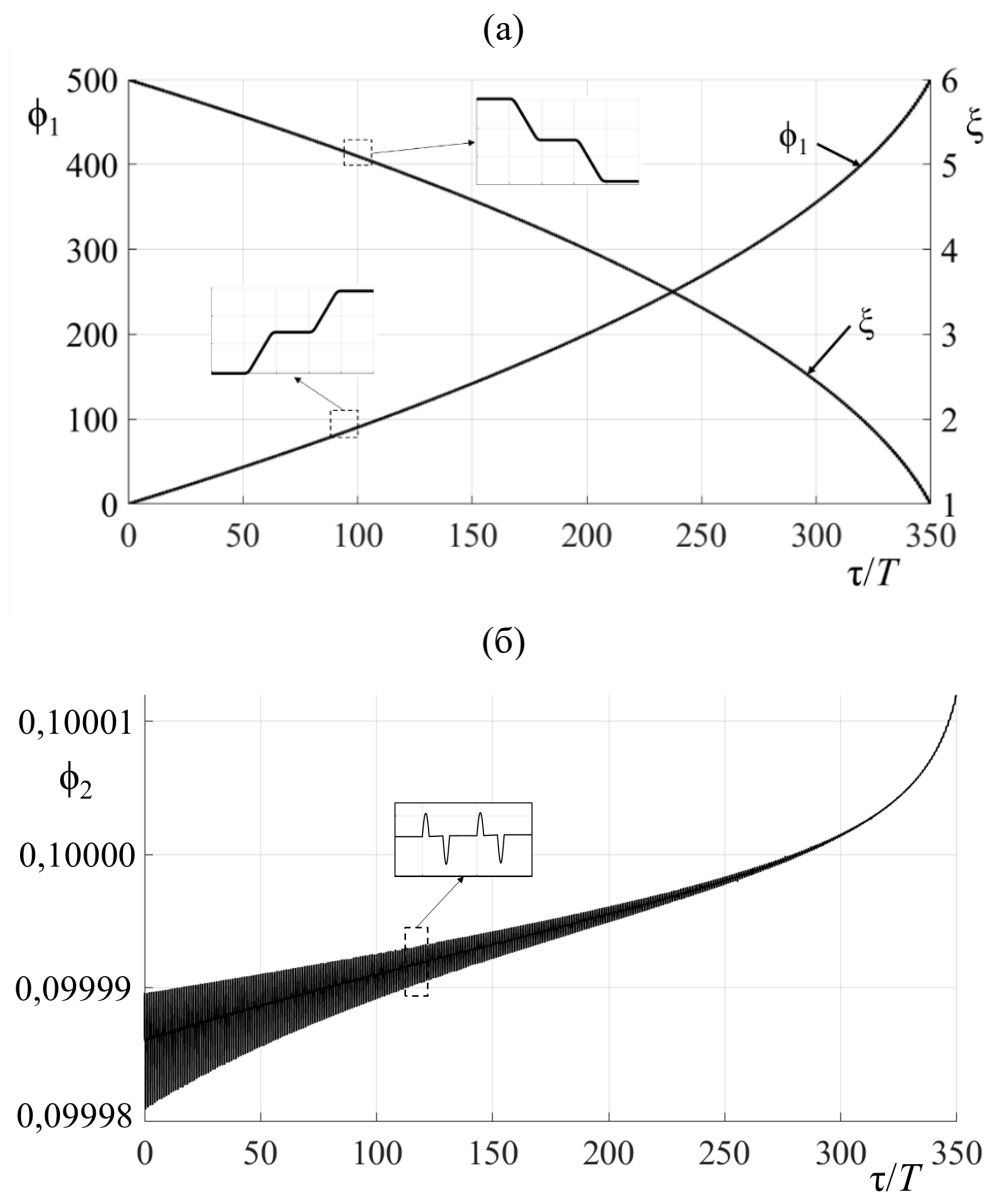


Рисунок 2.8 – Реализация работы механизма:

(а) – угол поворота и радиус рулона; (б) – угол поворота рычага.

На рисунке 2.9 показано как меняется сила натяжения материала за время разматывания рулона при использовании разработанного механизма (кривая 1) и при использовании исходного механизма (кривая 2). Из рисунка 2.9 видно, что наблюдаемые в моменты начала и конца движения привода скачки силы натяжения уменьшаются к концу процесса разматывания. Это объясняется тем, что величина скачков зависит от массы рулона, которая уменьшается по мере расхода материала. Отметим, что при использовании разработанного механизма средняя сила натяжения за цикл повторяет кривую, полученную при статическом анализе (раздел 2.3).

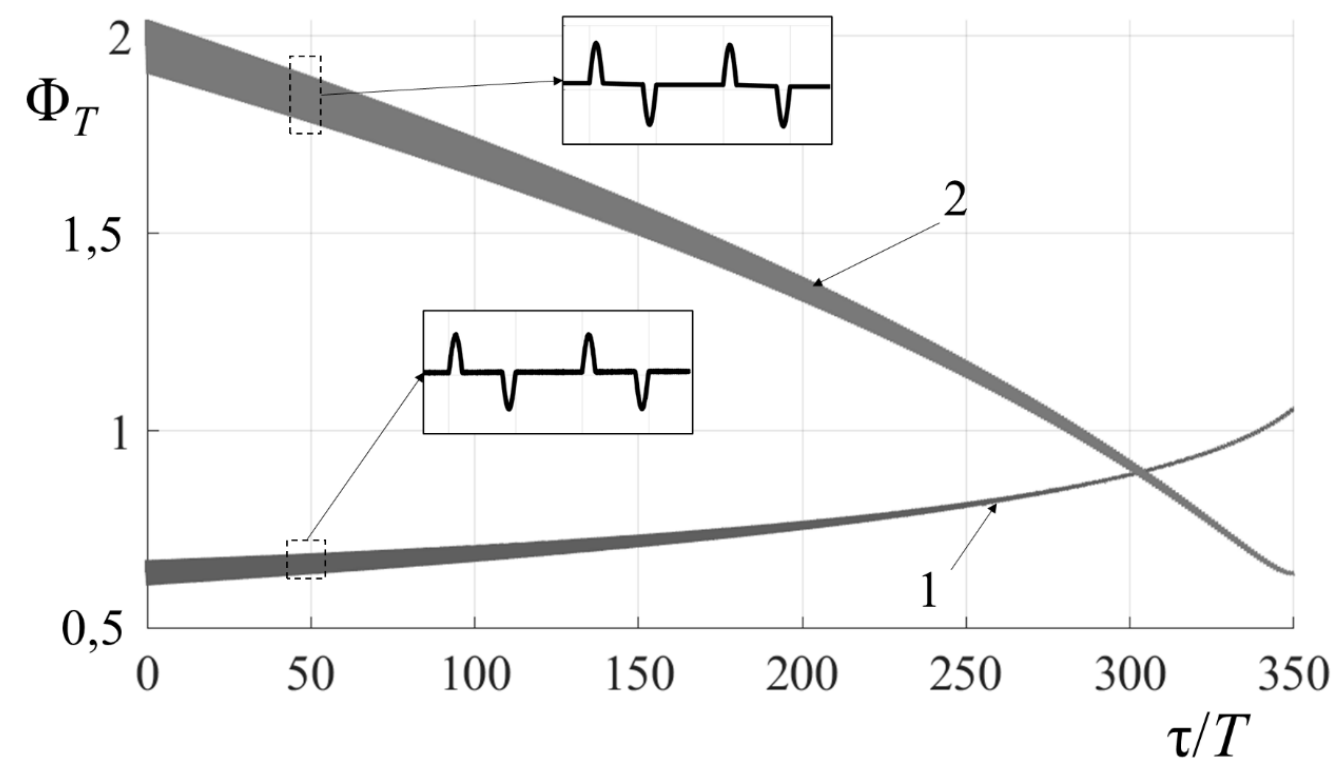


Рисунок 2.9 – Сила натяжения ленточного материала:

1 – разработанный механизм; 2 – исходный механизм.

Рассмотрим влияние силы поджатия пружины Φ_0 на силу натяжения Φ_T материала. На рисунке 2.10 показано изменение силы натяжения ленточного материала за время разматывания рулона при различной силе поджатия пружины Φ_0 . Из полученных результатов видно, что сила натяжения материала Φ_T

увеличивается вслед за увеличением силы поджатия пружины Φ_0 в соответствии с отношением (2.8). В то время как амплитуда скачков силы натяжения материала не зависит от величины Φ_0 при неизменных остальных параметрах устройства (рисунок 2.11а–г). Соответственно, величина скачка силы натяжения ленты Φ_T относительно ее среднего значения уменьшается с увеличением Φ_0 . Из введенных безразмерных величин (2.7) очевидно, что значение силы натяжения материала F_T зависит от веса натяжного ролика P . Опираясь на полученные результаты можно подобрать такие силу поджатия пружины и вес ролика, чтобы обеспечить необходимую силу натяжения материала F_T при разматывании рулона.

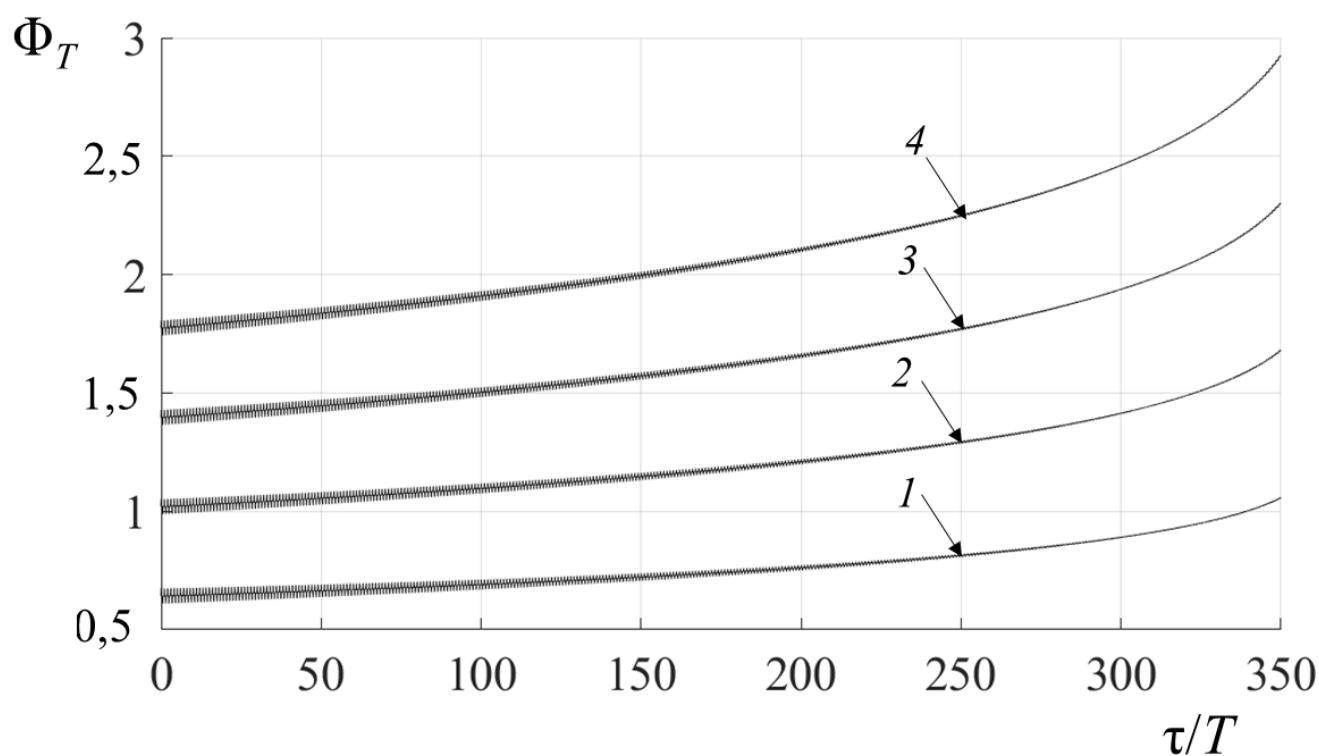


Рисунок 2.10 – Сила натяжения ленточного материала с устройством при различных Φ_0 : 1 – $\Phi_0 = 4$; 2 – $\Phi_0 = 8$; 3 – $\Phi_0 = 12$; 4 – $\Phi_0 = 16$.

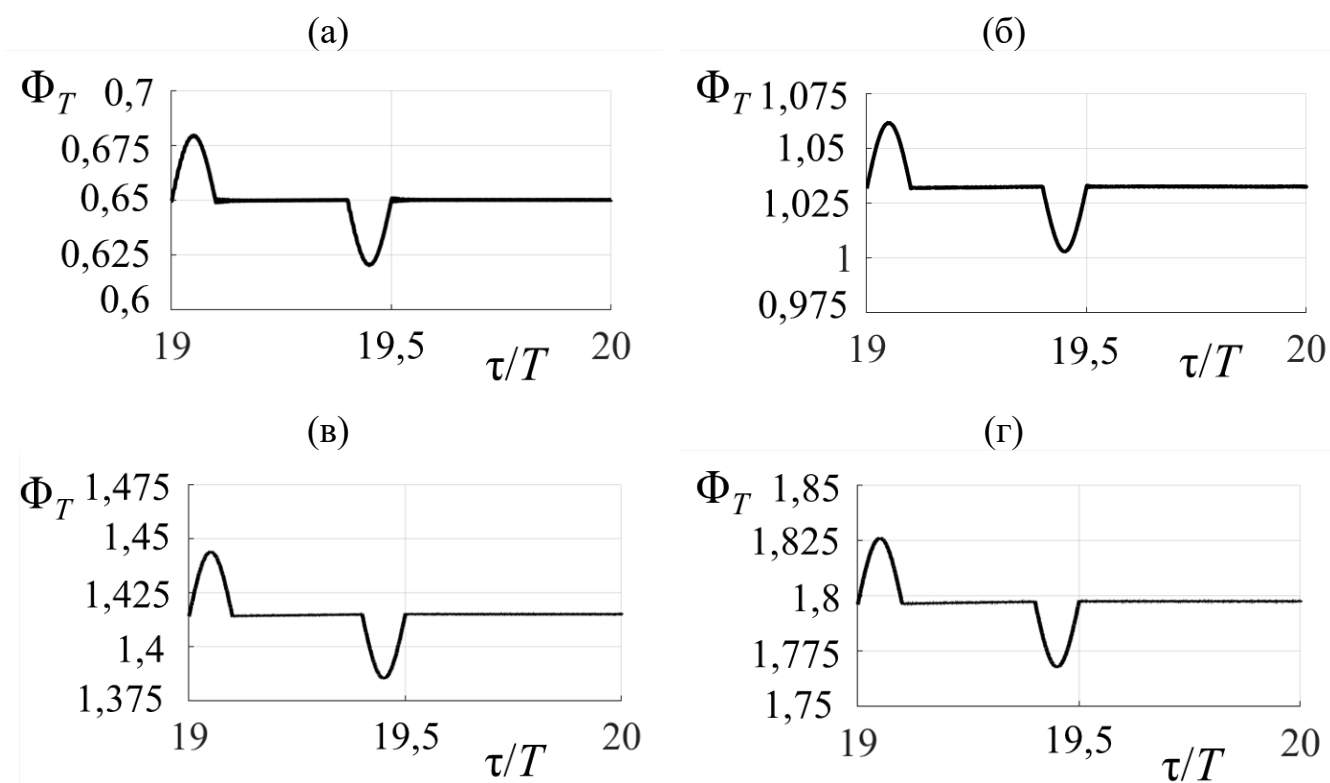


Рисунок 2.11 – Скачки силы натяжения ленточного материала с устройством при различных Φ_0 : (а) $\Phi_0 = 4$; (б) $\Phi_0 = 8$; (в) $\Phi_0 = 12$; (г) $\Phi_0 = 16$.

2.5 Результаты и выводы

1. Для механизма разматывания рулонного материала с требуемой силой предложена идея использования кинематической обратной связи, применение которой позволило синтезировать новую кинематическую схему механизма. Использование обратной связи, реализованной в виде поворотного рычага, кинематически связанного с колодочным тормозом, позволило обеспечить требуемую силу натяжения ленты, уменьшить нагрузку на привод протягивания и не допускать инерционный выбег рулона.

2. Разработана математическая модель синтезированного механизма, описывающая движение рулона и поворотного рычага, учитывающая кинематическую связь между поворотным рычагом и рулоном разматываемого материала. Лента в предложенной модели принимается нерастяжимой.

3. Статический анализ механизма показал возможность его применения для сматывания ленты из рулона с постоянной скоростью. В процессе разматывания рулона с использованием синтезированного механизма сила натяжения увеличивается в 1,6 раза, в то время как при использовании исходного механизма сила натяжения уменьшается в 3 раза. Динамический анализ позволил оценить колебания значений силы натяжения при дискретном протягивании рулонного материала. Скачки силы натяжения ленты с использованием синтезированного механизма составляют 4% от ее среднего значения.

4. Выявлено влияние конструктивных параметров на работу механизма, заключающееся в том, что увеличение отношения плеч рычага позволяет уменьшить влияние радиуса рулона на силу натяжения ленты при ее разматывании из рулона.

5. Как показали выполненные расчеты и моделирование, синтезированный механизм обеспечивает натяжение ленты с регулируемым усилием и не допускает ее провис на длине обрабатываемого участка; инерция массивного рулона материала не оказывает существенное влияние на привод разматывания и процесс протягивания ленты. При этом обеспечена регулировка силы натяжения и исключен инерционный выбег рулона при торможении.

6. Выполненное математическое моделирование и полученные зависимости позволяют выполнить параметрический синтез механизма с учетом требуемых габаритных размеров, технических характеристик и накладываемых ограничений.

7. Для подтверждения полученных результатов и верификации предложенной математической модели механизма требуется изготовление конструкторской документации, опытного образца механизма и его производственные испытания на оборудовании, работающем в дискретном режиме, где в качестве расходных материалов используется лента, смотанная в рулон.

ГЛАВА 3 СИСТЕМА ОДНОВРЕМЕННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДВУХ ЛЕНТ И МЕТОД ОЦЕНКИ ИХ ПОЛОЖЕНИЙ

В настоящей главе описывается новая система перемещения двух лент и метод оценки технического состояния автоматической упаковочной линии, заключающийся в диагностировании положения лент относительно технологических станций и друг относительно друга на основе координат одной из лент. Метод базируется на идее перехода от механических ограничителей хода к цифровым при помощи современной компонентной базы. Разработана дискретная математическая модель, описывающая работу автоматической упаковочной линии и процесс перемещения двух лент, позволяющая оценивать и прогнозировать положение обеих лент, а также состояние технологического оборудования. Приводятся виды внешних воздействий, встречающихся при технологической обработке рулонных материалов.

3.1 Основные элементы системы перемещения двух лент на основе сервопривода

Рассмотренные в первой главе известные технические решения для перемещения ленточных материалов обладают похожими ограничениями. Во всех этих устройствах величина перемещения материалов является фиксированной из-за наличия механических упоров или ограничителей хода. Такое техническое решение лишает устройство адаптивности, так как при необходимости изменить величину перемещения, нужно производить переналадку оборудования, что приводит к остановке производственного процесса.

Применение электропривода для протягивания ленточных материалов позволяет ликвидировать механические ограничители хода, заменив их на цифровые. Основным преимуществом предложенной новой системы

перемещения лент является свойство адаптивности, то есть автоматической подстройки величины перемещения материалов под текущее расстояние между этикетками, так как цифровой ограничитель хода можно менять от цикла к циклу во время работы автоматической линии, подстраиваясь под изменяющиеся внешние условия.

Рассмотрим принцип работы автоматической линии, для которой такая задача является наиболее актуальной — это фасовочно-упаковочная машина типа «формовка-фасовка-укупорка», на которой происходит автоматическая сборка изделий из двух компонентов. Этими компонентами являются контейнеры, находящиеся в нижней ленте, и этикетка, напечатанная с постоянным шагом на верхней ленте. Необходимо обеспечить попадание контейнеров в инструменты технологических станций термосваривания и вырубки, а также совместить этикетки с контуром контейнеров в процессе работы автоматической линии. Технологическая схема такой машины представлена на рисунке 1.14 [36]. Принцип ее работы следующий. термопластичный материал 1 поступает в нагреватель 3, где под контролем терморегулятора переходит из твердого состояния в высокопластичное. Далее он поступает на первую силовую станцию 4, где сжатым воздухом осуществляется формование контейнеров. Отформованные контейнеры с помощью объемного дозатора 5 заполняются продуктом, закрываются покровным материалом 2 с напечатанными этикетками и поступают на вторую силовую станцию 6, где осуществляется термосварка корпусного и покровного материалов. Далее заполненные и герметичные контейнеры поступают на третью силовую станцию 7, оснащенную штампом для вырубки отдельных контейнеров или их блоков.

Модернизированная система перемещения лент на автоматической линии с электроприводом представлена на рисунке 3.1. В ней для перемещения лент расходных материалов используется сервопривод 3, вал которого соединен с модулем линейного перемещения 4, представляющим собой шариковинтовую передачу. Сервопривод оснащен датчиком угла поворота вала и цифровым

преобразователем (энкодером), что позволяет отслеживать положение вала с большой точностью [79]. Сервопривод перемещает каретку 5 с установленными на ней захватом 6 и фотодатчиком 8. При движении каретки вправо обе ленты (нижняя 1 и верхняя 2), зажатые захватом 6, сматываются со своих рулонов и перемещаются вместе с кареткой 5. Для обеспечения плавности перемещения контейнеров с продуктом движение каретки выполняется по трапецеидальному закону изменения скорости (рисунок 2.6). При возврате каретки 5 в исходное положение, ленты неподвижно удерживаются силовыми станциями вырубki 7 и термосваривания 8, при этом захват 6 отпущен, а фотодатчик 9 срабатывает при обнаружении метки. При срабатывании фотодатчика опрашивается энкодер привода, по показаниям которого рассчитывается абсолютная координата положения переднего фронта метки.

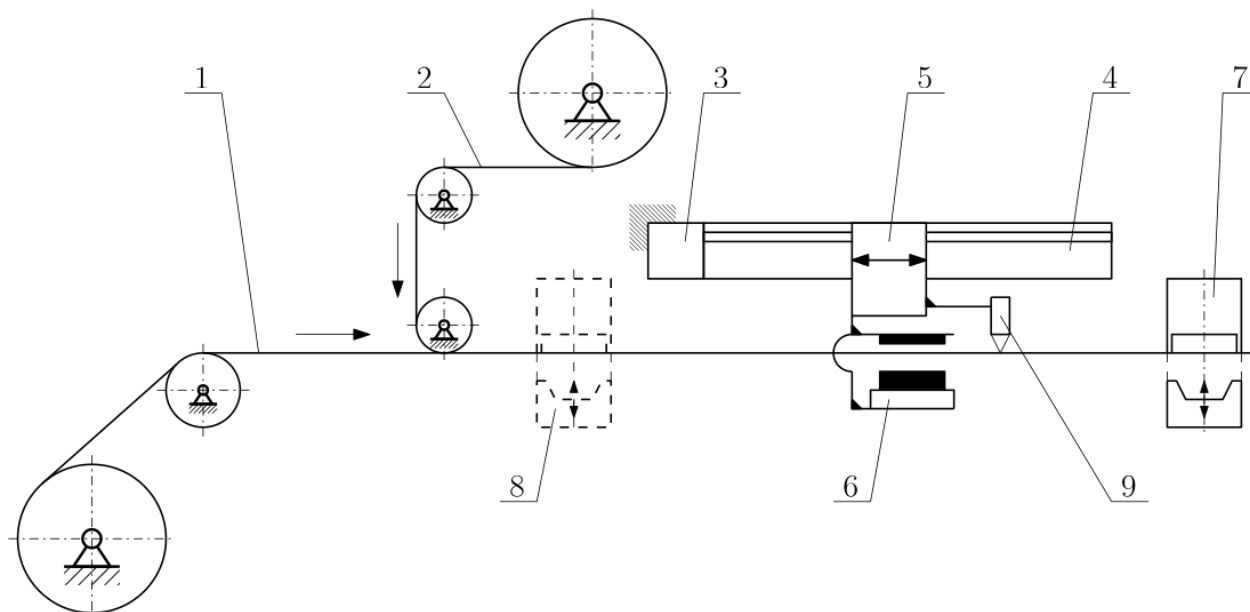


Рисунок 3.1 – Схема новой системы перемещения лент на автоматической линии.

Разработанная электромеханическая система перемещения лент располагается на автоматической линии между станциями термосварки и вырубki (позиции 6 и 7 на рисунке 1.14). Привод должен осуществлять перемещение лент с плавным изменением скорости (рисунок 2.6) чтобы избежать выплескивания продукта из контейнеров [36, 80]. Далее рассмотрим математическую модель процесса перемещения двух лент на автоматической упаковочной линии.

3.2 Математическая модель процесса перемещения двух лент

Чтобы при перемещении двух лент обеспечить их позиционирование относительно технологических станций и друг относительно друга необходимо разработать математическую модель процесса их перемещения, выполнить ее анализ и создать методы и алгоритмы расчета величины перемещения привода предложенной электромеханической системы [81-88]. Так как работа автоматической линии представляет собой циклический процесс, наиболее подходящим будет использование дискретной математической модели [89, 90].

Фотометки, напечатанные на верхней ленте с тем же шагом, что и этикетки, распознаются фотоэлектрическим датчиком. При его срабатывании опрашивается энкодер сервопривода и рассчитывается координата метки, записываемая в память контроллера автоматической линии. Основная задача состоит в том, чтобы отформованные контейнеры попали точно в инструменты, расположенные на технологических станциях. В случае, если контейнер сместится относительно инструмента на величину большую, чем зазор w , показанный на рисунке 3.2, на автоматической линии произойдет авария – замятие контейнеров и разбрызгивание продукта внутри технологической станции. Устранение аварии потребует остановки технологического процесса, приводит к простоем оборудования, перерасходу материалов, дополнительным трудозатратам и снижению производительности. Дополнительно к указанной основной задаче оценки положений материалов относительно технологических станций упаковочной линии также необходимо решить задачу совмещения этикетки, отпечатанной на верхней ленте, с контуром контейнера, расположенного на нижней ленте.

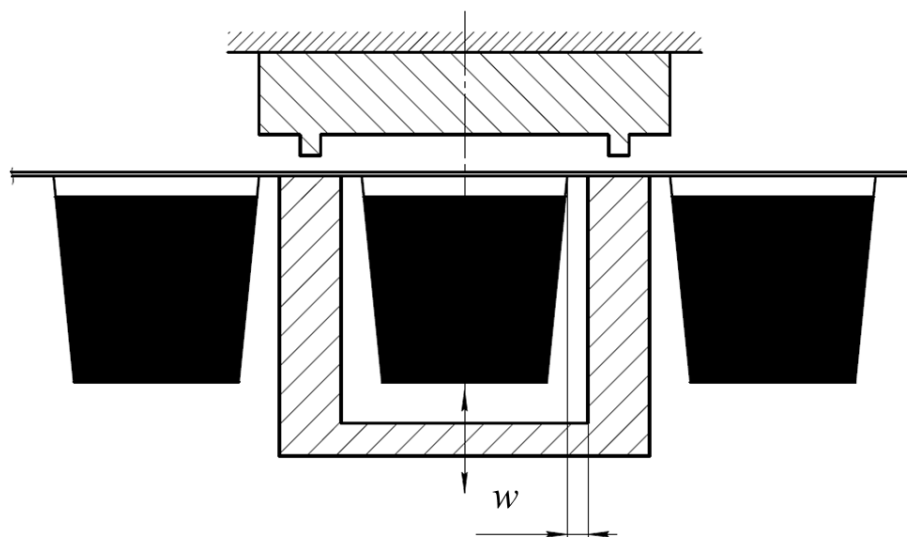


Рисунок 3.2 – Зазоры между контейнером и инструментом.

Предлагаемый метод сводит обе эти задачи к удержанию координаты фотометки в заданном положении. Соответственно, для контроля технического состояния автоматической линии математическая модель должна рассчитывать положение фотометки на каждом цикле ее работы. Рисунок 3.3 иллюстрирует виртуальные (то есть хранящиеся в памяти ПЛК) координаты фотометок на i -ом и $(i+1)$ -ом перемещениях каретки. Здесь рассматривается конфигурация, при которой за один цикл каретка перемещает ленты на удвоенный шаг f_i по меткам, соответствующий двум этикеткам, то есть за одно перемещение датчик проходит две метки. Расстояние между фотометками L определяется как расстояние между передними фронтами двух соседних фотометок. Абсолютная координата B_i определяется по показаниям энкодера привода, как расстояние, которое проходит привод с того момента, как фотодатчик обнаружил передний фронт фотометки. Из рисунка 3.3 не составляет труда выразить абсолютную координату B на i -ом цикле работы автоматической линии:

$$B_i = B_{i-1} + f_i - 2L. \quad (3.1)$$

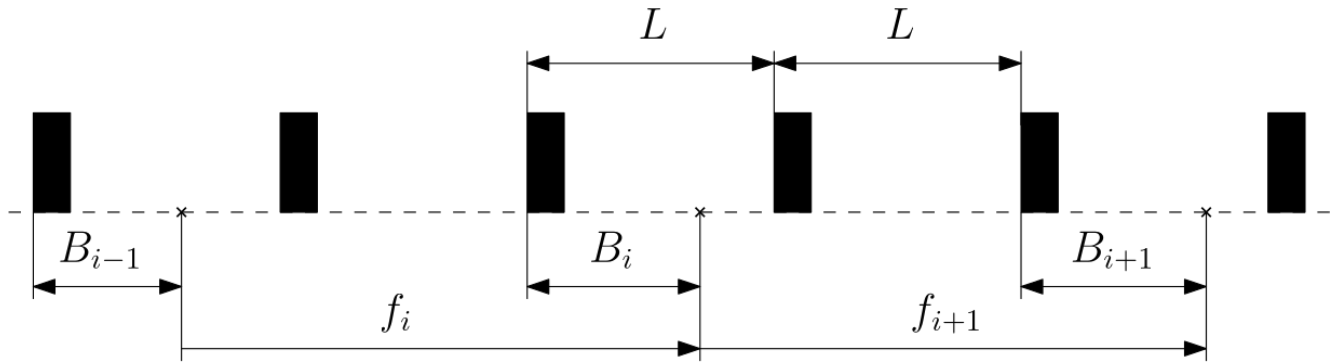


Рисунок 3.3 – Виртуальная картина координат фотометок, хранящаяся в памяти контроллера.

Расстояние L между фотометками после технологических операций отличается от номинального шага печати L_0 , известного от производителя покровного материала и зависит от режима работы автоматической линии. Изменение шага L_0 связано с технологическими операциями линии и может быть вызвано как удлинением покровного материала, если он допускает упругие и пластические деформации (алюминиевая фольга), так и вдавливанием покровного материала в корпусной при термосварке (см. рисунок 1.16). В математической модели используется предположение, что при установившемся режиме работы расстояние L остается постоянным.

Созданная транспортная система позволяет изменять величину перемещения f лент на каждом цикле работы автоматической линии. Зная эту величину и номера позиций станций термосваривания (позиция 6 на рисунке 1.14) и вырубки (позиция 7 на рисунке 1.14), с помощью математической модели можно рассчитать смещение контейнеров относительно инструментов соответствующих станций. Введем смещение p^1 контейнера относительно инструмента на станции термосварки и смещение p^2 контейнера относительно инструмента станции вырубки:

$$\begin{aligned} p_i^1 &= \sum_{j=0}^{m_1-1} f_{i-j} - p_w, \\ p_i^2 &= \sum_{j=0}^{m_2-1} f_{i-j} - p_c. \end{aligned} \quad (3.2)$$

где p_i^1 – смещение контейнера относительно станции сварки на i -ом цикле работы автоматической линии, p_i^2 – смещение контейнера относительно станции вырубки на i -ом цикле работы автоматической линии, 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.

Обычно расстояния p_w и p_c определяется количеством позиций между станцией формования и станцией сварки или станцией вырубки соответственно (рисунок 1.14):

$$\begin{aligned} p_w &= 2L m_1, \\ p_c &= 2L m_2. \end{aligned} \quad (3.3)$$

В случае, когда смещение контейнера равно или превышает зазор в инструменте (w_w – для станции термосварки, w_c – для станции вырубки), край инструмента замнет контейнер, а на автоматической линии произойдет авария. Отметим, что при смещениях p^1 и p^2 близким по величине к w_w и w_c соответственно, внешний вид изделия (упаковки) может не соответствовать предъявляемым к его внешнему виду требованиям, поэтому этого тоже необходимо избегать.

Задача совмещения этикетки и контура контейнера сводится к тому, что фотометка должна находиться в координате B_0 , определяемой размерами изготавливаемой продукции. Эта координата подбирается в зависимости от конфигурации автоматической линии и задается оператором через пульт управления. В действительности, невозможно обеспечить нахождение фотометки точно в заданной координате, поэтому допустимо некоторое отклонение $[\Delta]$ от заданного положения. Эта величина обычно принимается 1-2 мм, в зависимости от рисунка и размера изделий, изготавливаемых на автоматической линии. Если смещение фотометки относительно положения B_0 не превышает допустимое отклонение $[\Delta]$, будем считать, что она находится в заданном положении. Введем

понятие смещение фотометки Δ_i^Σ как разность между текущим положением B_i и заданным B_0 :

$$\Delta_i^\Sigma = B_i - B_0. \quad (3.4)$$

Тогда представить условие нахождения фотометки в требуемом положении можно в следующем виде:

$$|\Delta_i^\Sigma| < [\Delta]. \quad (3.5)$$

Для того чтобы в математической модели оценить смещение фотометки относительно требуемого положения введем такое понятие как рассогласование Δ_i , представляющее собой разность между перемещением транспортера и фактическим расстоянием между фотометками:

$$\Delta_i = f_i - 2L. \quad (3.6)$$

Соответственно, смещение фотометки за время работы автоматической линии рассчитывается как сумма рассогласований Δ_i по всем отработанным циклам за вычетом заданного положения:

$$\Delta_i^\Sigma = \sum_{j=1}^i \Delta_j - B_0. \quad (3.7)$$

Таким образом, с помощью математической модели можно будет оценить смещение фотометки при моделировании работы автоматической линии. Далее необходимо определить ограничения, накладываемые технологическим оборудованием на перемещение лент приводом протягивания.

Первым ограничением, определяющим стабильность работы автоматической линии и качество изготавливаемой продукции, является необходимость удерживать смещение p^1 контейнера относительно инструмента на станции термосварки и смещение p^2 контейнера относительно инструмента станции вырубки в области допустимых значений, то есть w_w и w_c соответственно. В результате условие, при котором кромка инструмента не врежется в контейнер и не вызывает аварии на автоматической линии принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} 1. \quad & |p_i^1| < w_w, \\ 2. \quad & |p_i^2| < w_c, \end{aligned} \quad (3.8)$$

Вторым ограничением, которое необходимо учитывать, при расчете величины перемещения f транспорта является условие, описываемое выражением (3.5), совмещения положения этикеток на ленте покровного материала с контуром контейнера, находящимся в ленте корпусного материала. Отметим, что нарушение этого условия не приведет к аварийной остановке линии.

На основе вышеперечисленного можно сформулировать условия, которые должны выполняться при перемещении лент на автоматической линии. В виде неравенств эти условия принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} 1. \quad & |\Delta_i^{\Sigma}| < [\Delta], \\ 2. \quad & |p_i^1| < w_w, \\ 3. \quad & |p_i^2| < w_c. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Важную роль в математической модели играет производственный цикл изделия [91] m – количество рабочих циклов, в течение которого один контейнер находится на автоматической линии. Обозначим эту величину m . В рассматриваемом примере производственный цикл изделия равен числу циклов работы автоматической линии, которые необходимо совершить, чтобы переместить контейнер от станции формования до станции вырубki (рисунок 1.14). Получается, что m равно количеству позиций m_2 .

Таким образом, система уравнений (3.1)-(3.9) представляет собой полную математическую модель процесса совмещения двух лент на автоматической линии.

Отдельно стоит рассмотреть процесс наладки автоматической линии, который включает в себя, в том числе, и определение установившегося расстояния L между фотометками после выполнения технологических операций. Как видно из выражений (3.2) и (3.9) при неверном выборе величины f

перемещения лент контейнер попадет на кромку инструмента, что приведет к его замятию и аварии. Таким образом, при неизвестном расстоянии между фотометками необходимо отключать формование контейнеров, чтобы система перемещения могла рассчитать величину L без возникновения аварий. Соответственно, при моделировании процесса наладки ограничения (3.9) не учитываются, а начальное значение перемещения может выбираться любым.

3.3 Виды внешних воздействий при технологической обработке рулонных материалов

Первым видом возмущения является погрешность измерительной системы. Ее можно представить в виде случайной величины δ с плотностью вероятности, подчиняющейся закону нормального распределения (распределение Гаусса) [92]. Нормальное распределение выбрано исходя из того, что, согласно центральной предельной теореме, этот закон распределения плотности вероятности является доминирующим в теории ошибок измерения [92-95]. Принятая в дальнейшем анализе плотность вероятности срабатывания фотодатчика на фотометке схематически показана на рисунке 3.4.

Вторым рассмотрим случай, когда происходит замена этикетки – изменяется рисунок или производитель. В таком случае меняется номинальный L_0 шаг печати этикетки (и фотометки), а соответственно и расстояние L между фотометками в установившемся режиме работы претерпевает некоторое изменение несмотря на то, что размеры продукции остаются неизменными. Этот случай можно отнести к систематическим погрешностям – печать происходит с некоторым отличным от номинального, постоянным шагом, так как в реальной системе невозможно добиться идеального процесса печати и существует допуск на точность для готовой продукции [96].

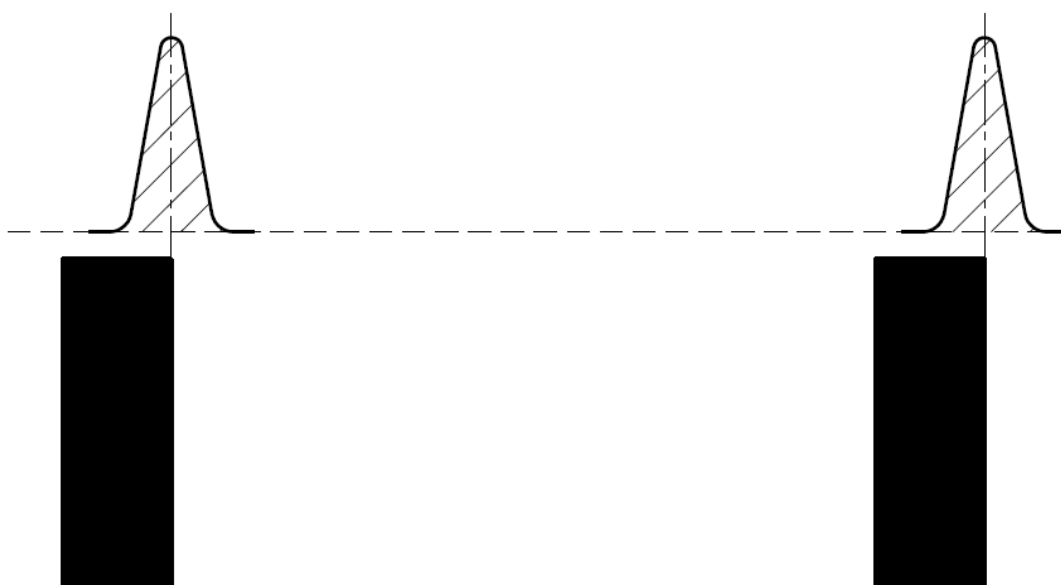


Рисунок 3.4 – Принятая в математической модели плотность вероятности срабатывания фотодатчика на фотометке.

Третьим видом возмущения является склейка. Она возникает в случае, когда рулон покровного материала заканчивается и необходимо его заменить. Невозможно вручную переклеить покровный материал так, чтобы рисунок на этикетке не сместился на некоторую величину q . На рисунке 3.5 показан кусок верхней ленты со склейкой. Зачастую смещение q этикетки у опытных операторов автоматических линий не превышает 2-3 мм. Чтобы не вносить излишних возмущений в систему управления предусмотрено игнорирование показаний, при которых измеренная на текущем цикле величина отличается от предыдущей более чем на 2-3 мм (величина выбирается в зависимости от шага печати этикетки). Такой подход приводит к тому, что этикетка какое-то время будет находиться за пределами допустимого интервала значений $[B_0 - [\Delta]; B_0 + [\Delta]]$ и поэтому одним из требований к разрабатываемым алгоритмам управления будет возврат этикетки обратно в этот интервал.



Рисунок 3.5 – Склейка на покровном материале.

Четвертым рассматриваемым случаем внешнего возмущения системы совмещения компонентов сборки является периодическое внешнее воздействие, вызванное особенностями способа печати этикетки. Обычно печать производится флексографским способом [97-99]. Это способ, представляющий собой ротационную печать (с использованием валов, как это показано на рисунке 3.6) быстровысыхающими жидкими красками. Рисунок отпечатывается на поверхности материала с помощью формного вала, на который наносится краска, печатный вал при этом используется как опора для материала. Для того, чтобы нанести краску на формный вал используются дукторный и анилоксовый валы. Дукторный вал используется для того, чтобы перенести краску из емкости на анилоксовый вал без излишков, а с анилоксового вала краска переносится уже на формный вал. Основным преимуществом флексографской печати является

использование гибких, мягких форм, что позволяет применять их для большого спектра материалов. Это привело к широкому использованию флексографии в печати упаковочных этикеток.

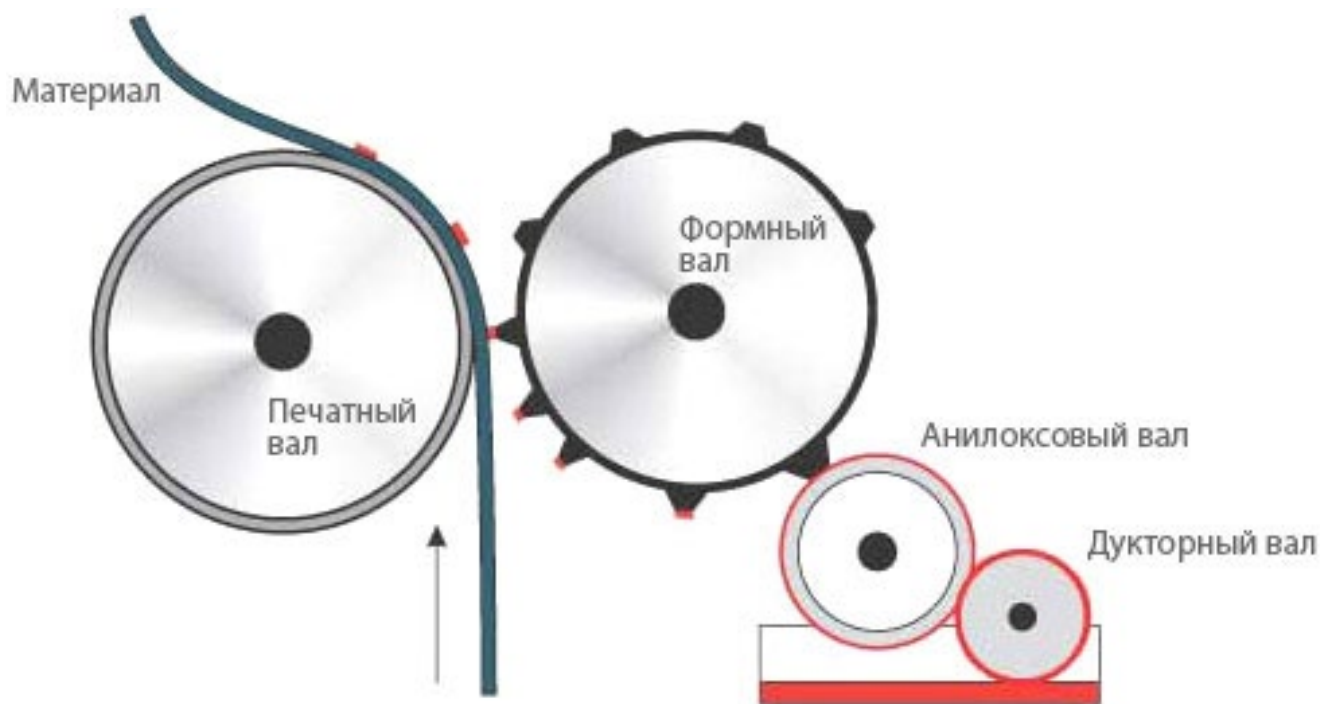


Рисунок 3.6 – Схема процесса флексографской печати.

Одной из технологических особенностей такого способа печати является невозможность изготовить и закрепить печатную форму на формный вал без зазора. Наличие такого зазора на формном валу приводит к возникновению стыков печати (рисунок 3.7) с определенной периодичностью. Частота l появления и ширина d стыков зависит от шага печати этикетки и диаметров печатного и формного валов. При этом величина d стыка обычно не превышает 1 мм.



Рисунок 3.7 – Пример стыка печати этикеток на покровном материале.

3.4 Результаты и выводы

1. С использованием современных компонентов выполнена модернизация системы перемещения лент автоматической линии. На основе сервопривода, контроллера, датчика угла поворота вала сервопривода, цифрового преобразователя и фотоэлектрического датчика метки для автоматического упаковочного оборудования разработана новая электромеханическая система перемещения ленточных материалов.

2. Применение электромеханического привода для перемещения лент позволило ликвидировать механические ограничители хода транспортной

системы заменив их цифровыми, которые таким образом становятся регулируемыми параметрами созданной электромеханической системы.

3. С использованием методов дискретного моделирования была разработана математическая модель процесса перемещения лент на автоматической упаковочной линии: корпусной ленты с контейнерами и покровной с заранее отпечатанными этикетками и фотометками. Предложен метод оценки положений лент относительно технологических станций и друг относительно друга. Проанализированы возможные виды внешних воздействий, оказывающие влияние на процесс совмещения лент на автоматических упаковочных линиях.

4. Для использования разработанной электромеханической системы требуется создать алгоритмы расчета величины перемещения лент приводом, способные обеспечить позиционирование лент на автоматической линии и друг относительно друга.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИВОДА

В настоящей главе описываются и анализируются предложенные автором алгоритмы расчета перемещения лент разработанной в предыдущей главе электромеханической системы автоматической упаковочной линии. Предложенные алгоритмы позволили в реальном времени оценивать техническое состояние упаковочной линии, прогнозировать положение лент относительно технологических станций и не допускать аварий. С помощью дискретной математической модели проведено численное компьютерное моделирование работы автоматической линии при различных видах внешних воздействий, возникающих при технологической обработке рулонных материалов. Рассмотрено влияние параметров электромеханической системы на работоспособность алгоритмов, даны рекомендации по настройке и отладке разработанной системы перемещения лент.

4.1 Алгоритм на основе измерения расстояний между фотометками

Для расчета перемещения лент приводом электромеханической системы было разработано несколько алгоритмов расчета требуемой величины хода привода протягивания. Первый из них основан непосредственно на измерении расстояния между фотометками – далее алгоритм 1. Контроллер записывает координаты двух соседних фотометок и рассчитывает расстояние L между ними (рисунок 3.3) как разность их координат. Из выражения (3.1) следует, что для того, чтобы координата фотометки за цикл не изменилась, привод должен переместить материалы на величину f_i равную удвоенному расстоянию между передними фронтами соседних фотометок (напомним здесь, что в работе принято, что за один цикл лента перемещается на удвоенный шаг печати, т.е. датчик

проходит две метки). В идеальной системе (без внешних воздействий, описанных в разделе 3.3) было бы достаточно одного измерения, чтобы рассчитать требуемую величину перемещения транспорта. В реальной системе это невозможно из-за наличия случайных погрешностей δ измерительной системы, склеек q и возникающих с периодом l стыков d печати.

Таким образом, одного измерения недостаточно для вычисления требуемой величины перемещения f транспорта. Чтобы сгладить влияние внешних воздействий, введем обновляемый на каждом цикле работы автоматической линии массив $\mathbf{S}$ длиной n , который на i -ом цикле работы будет выглядеть следующим образом:

$$\mathbf{S}^i = [S_i \quad \dots \quad S_{i-j} \quad \dots \quad S_{i-(n-1)}], j = \overline{0, n-1}. \quad (4.1)$$

Правило обновления массива следующее – удвоенное значение каждого нового измерения записывается в первую позицию массива, все остальные смещаются на одну позицию, а последний элемент удаляется. Очевидно, что в таком случае значение перемещения привода протягивания f на i -ом цикле работы автоматической линии рассчитывается как среднее значение массива $\mathbf{S}^i$ в соответствии с формулой:

$$f_i = \bar{S}^i = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} S_{i-j}. \quad (4.2)$$

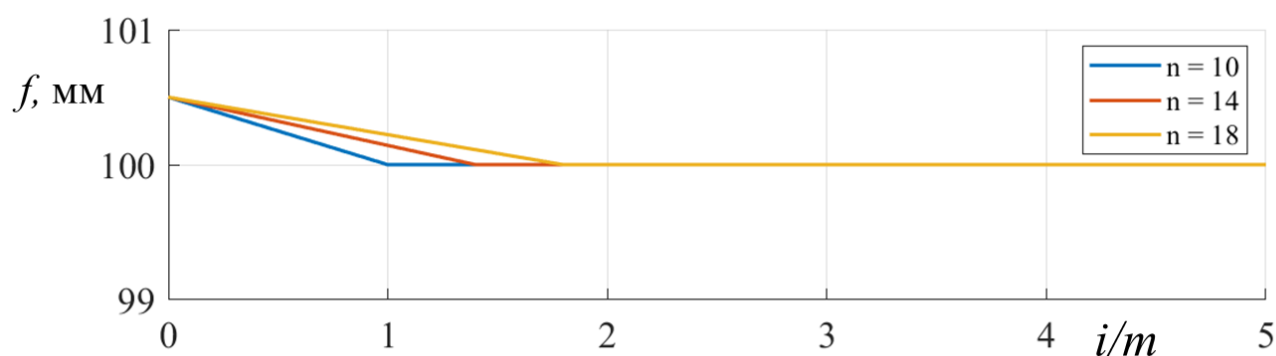
Рассмотрим реализацию работы алгоритма 1 при первоначальной наладке. На практике удобно изначально заполнить массив значениями равными удвоенному номинальному шагу печати L_0 и его среднее значение – величина первого перемещения лент f_0 принимает такое же значение. Будем считать процессы формования и термосварки установившимся, соответственно расстояние между фотометками становится равным L и его можно считать постоянным. Погрешности измерения и другие виды возмущений при этом не учитываются. В таком случае, каждое новое значение массива будет равно удвоенному расстоянию между соседними фотометками (за один цикл лента перемещается на два шага печати этикетки):

$$S_{i+1} = 2(B_{2i} - B_{2i-1}) = 2L. \quad (4.3)$$

Получим, что за количество циклов, равное длине n массива S значение величины f перемещения станет равно действительному расстоянию $2L$ между фотометками. В дальнейшем будем называть этот процесс стабилизацией перемещения. Проведем численное моделирование наладки автоматической линии с использованием алгоритма 1. Были использованы следующие параметры:

$$n = [10; 14; 18]; L = 50 \text{ мм}; [\Delta] = 1 \text{ мм}; S^0 = [100,5 \quad \dots \quad 100,5 \quad \dots \quad 100,5]. \quad (4.4)$$

(a)



(б)

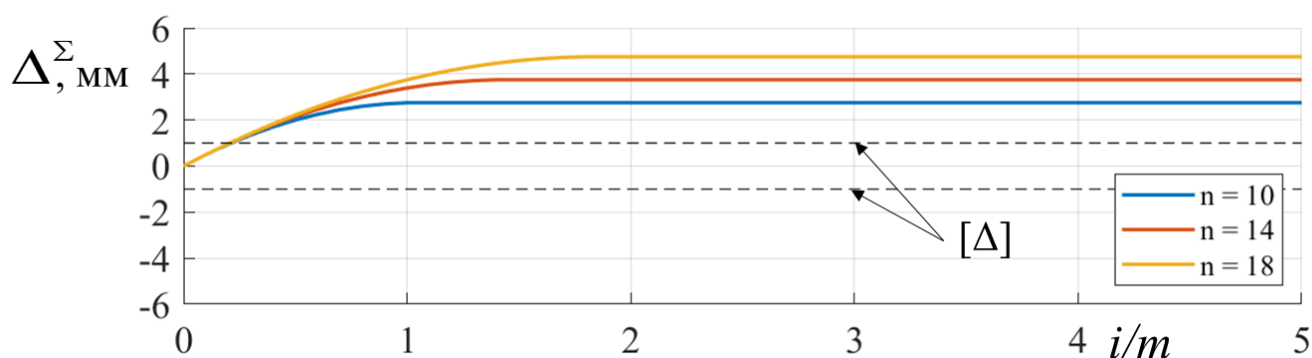


Рисунок 4.1 – Процесс наладки при работе по алгоритму 1:

(а) стабилизация перемещения; (б) смещение фотометки.

Из полученной реализации, показанной на рисунке 4.1а, видно, что с увеличением длины массива n , величина перемещения f дольше приходит к требуемому значению, равному удвоенному расстоянию между фотометками. Из рисунка 4.1б видно, что за время стабилизации перемещения транспортера, положение этикетки относительно контейнера смещается и выходит за пределы

области допустимых значений. Чем больше длина массива, тем больше смещение – это объясняется тем, что с увеличением длины массива увеличивается и время, за которое система выходит на требуемую величину перемещения. Таким образом, разработанный алгоритм позволяет рассчитать значение перемещения каретки, при котором фотометка не смещается от цикла к циклу, но не позволяет вернуть ее в область допустимых значений.

Рассмотрим какое влияние на систему оказывают погрешности измерительной системы. Погрешность измерения рассматривается как случайная величина δ , подчиняющаяся нормальному закону распределения плотности вероятности (рисунок 3.4). Рассмотрим учет случайной составляющей в математической модели. При использовании для расчета перемещения транспортера алгоритма 1 требуется два измерения координат фотометок, поэтому появляются две случайные величины в каждом новом элементе массива. С учетом случайной погрешности измерений δ , получено следующее выражение для каждого нового члена массива:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}^{i+1} &= \begin{bmatrix} S_{i+1} & \dots & S_{i+1-j} & \dots & S_{i-n+2} \end{bmatrix}, \\ S_{i+1} &= 2(L + \delta_{2,i+1} - \delta_{1,i+1}). \end{aligned} \quad (4.5)$$

где $\delta_{1,i+1}$ – случайная величина при первом измерении на $i+1$ цикле работы автоматической линии, $\delta_{2,i+1}$ – случайная величина при втором измерении на $i+1$ цикле работы автоматической линии.

Рассмотрим влияние случайной составляющей на расчет значения перемещения f транспортера. В соответствии с выражениями (4.2) и (4.5) перемещение f принимает следующий вид:

$$f_i = 2L + \frac{2}{n} (\delta_{2,i} + \delta_{2,i-1} + \dots + \delta_{2,i-(n-1)} - \delta_{1,i} - \delta_{1,i-1} - \dots - \delta_{1,i-(n-1)}). \quad (4.6)$$

Очевидно, что и перемещение f является случайной величиной. Не составляет труда найти ее числовые характеристики [92, 93]. Математическое ожидание величины перемещения:

$$M[f] = 2L + \frac{1}{n}(nM[\delta_2] - nM[\delta_1]). \quad (4.7)$$

Дисперсия величины перемещения:

$$D[f] = \frac{4}{n}(D[\delta_2] + D[\delta_1]). \quad (4.8)$$

При условии, что первое и второе измерения проводятся в одинаковых условиях, можно считать, что математические ожидания и дисперсии величин δ_1 и δ_2 одинаковы:

$$\begin{aligned} M[\delta_1] &= M[\delta_2] = M[\delta], \\ D[\delta_1] &= D[\delta_2] = D[\delta]. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Подставив (4.9) в (4.8) и (4.7) получим следующие числовые характеристики перемещения f :

$$\begin{aligned} M[f] &= 2L, \\ D[f] &= \frac{8}{n}D[\delta]. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Из полученного выражения для дисперсии f (4.10) можно сделать вывод об ограничении, накладываемом на размер массива S при использовании алгоритма 1. Видно, что при длине массива $n < 8$ дисперсия выходной величины, то есть перемещения f будет больше дисперсии входной величины – погрешности измерений δ , что является нерациональным. Соответственно, чтобы дисперсия перемещения f была меньше дисперсии погрешности измерений δ , длина массива должна удовлетворять условию $n > 8$.

Влияние на работу алгоритма 1 второго вида внешнего воздействия – изменение L_0 шага печати этикетки происходит аналогично процессу наладки с тем отличием, что разница между исходным расстоянием между фотометками и новым будет меньше.

Далее рассмотрим влияние третьего вида внешнего воздействия – склейки. Когда на покровном материале появляется склейка, как это показано на рисунке 3.5, расстояние между соседними метками уменьшается на

соответствующую величину. В таком случае выражение для нового члена массива на том цикле, когда она встречается, принимает следующий вид:

$$S_{i+1} = 2(L - q) = 2L - 2q. \quad (4.11)$$

В то же время происходит смещение фотометки на величину q .

$$B_{i+1} = B_i + q. \quad (4.12)$$

Следующим рассмотрим периодически возникающие стыки печати на этикетке. При наличии такого вида возмущения выражение (4.3) для обновления массива принимает следующий вид:

$$\begin{cases} S_{i+1} = 2(L + d) & \text{if } \text{mod}(i, l) = 0, \\ S_{i+1} = 2L & \text{else.} \end{cases} \quad (4.13)$$

А положение этикетки в эти моменты времени изменяется следующим образом:

$$\begin{cases} B_{i+1} = B_i - d & \text{if } \text{mod}(i, l) = 0, \\ B_{i+1} = B_i & \text{else.} \end{cases} \quad (4.14)$$

В таком случае, чтобы избежать длительного переходного процесса и аварийных ситуаций на станциях термосварки и вырубки, необходимо учесть наличие стыка d печати при задании начальных значений массива измерений $\mathbf{S}^0$. Зная действительное расстояние между фотометками L величину d и периодичность l появления склейки, можно рассчитать среднее значение величины перемещения $\bar{f}$ и заполнить им массив $\mathbf{S}^0$:

$$\begin{aligned} \bar{f} &= 2L + 2d/l, \\ \mathbf{S}^0 &= [\bar{f} \quad \dots \quad \bar{f} \quad \dots \quad \bar{f}]. \end{aligned} \quad (4.15)$$

4.2 Алгоритм на основе изменения координаты фотометки

Второй алгоритм, разработанный для расчета величины перемещения привода протягивания, основывается на использовании разности абсолютных

координат B переднего фронта метки на двух следующих друг за другом циклах работы автоматической линии (алгоритм 2). В данном случае также вводится массив S длиной n . Соответственно величина f перемещения как и в случае с алгоритмом 1 рассчитывается как среднее значение массива S по формуле (4.2). В отличие от алгоритма 1 каждое новое значение массива S_{i+1} рассчитывается путем вычитания из текущей величины перемещения f_i разности Δ_{i-1} между абсолютными положениями метки B_{i-1} и B_{i-2} на предыдущих циклах работы автоматической линии. Таким образом, правило обновления массива S принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} S_{i+1} &= f_i - \Delta_{i-1}, \\ \Delta_i &= B_i - B_{i-1}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Устойчивость и сходимость алгоритма 2 неочевидны и их необходимо проверить. Правило обновления массива (4.16) с использованием формулы вычисления f (4.2) и геометрических соотношений (рисунок 3.3), можно свести к следующему конечно-разностному уравнению [100]:

$$f_{i+n+1} - \frac{1}{n} f_{i+n} + \frac{1}{n} f_i = 2L. \quad (4.17)$$

Его характеристическое уравнение:

$$k^{n+1} - \frac{1}{n} k^n + \frac{1}{n} = 0. \quad (4.18)$$

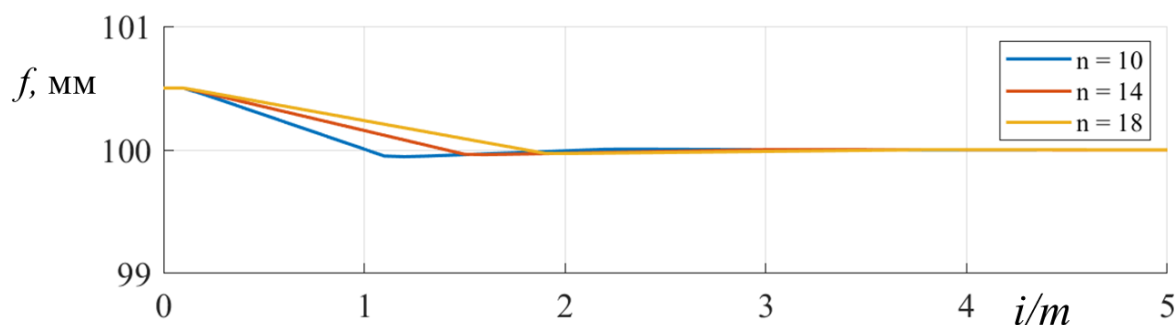
Конечно-разностное уравнение является асимптотически устойчивым, если корни его характеристического уравнения (4.18) по модулю меньше единицы [101]. Не составляет труда показать, что корни уравнения (4.18) удовлетворяют этому условию при $n \geq 2$. Таким образом, уравнение (4.17) асимптотически устойчиво и алгоритм 2 можно применять для расчета значения перемещения f .

Рассмотрим процесс первоначальной наладки автоматической линии при использовании алгоритма 2. При моделировании использовались параметры (4.4).

Из полученной реализации, показанной на рисунке 4.2а, видно, что, как и в случае применения алгоритма 1, с увеличением n длины массива величина перемещения f больше приходит к значению $2L$. Смещение фотометки также

увеличивается с увеличением длины массива (рисунок 4.2б). Здесь так же, как и при использовании алгоритма 1, система управления стабилизирует перемещение, но не возвращает фотометку в исходное положение. Отметим, что наблюдается перерегулирование системы, связанное с тем, что используется разность координат на предыдущих шагах (4.16), то есть присутствует запаздывание.

(а)



(б)

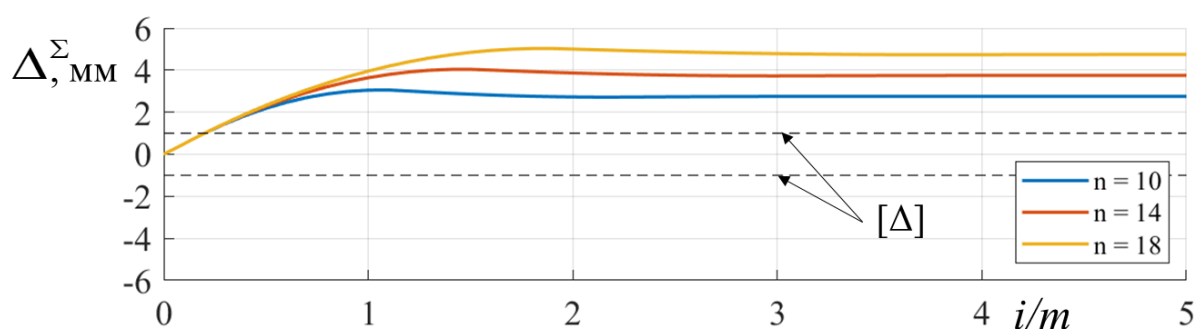


Рисунок 4.2 – Процесс наладки при работе по алгоритму 2:

(а) стабилизация перемещения; (б) смещение фотометки.

Далее рассмотрим влияние случайных погрешностей измерений на алгоритм 2. При использовании этого алгоритма проводится одно измерение для определения положения фотометки. Тогда разность координат на двух соседних циклах работы АЛ с учетом случайной составляющей будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta_i = B_i + \delta_i - (B_{i-1} + \delta_{i-1}). \quad (4.19)$$

Учитывая, что случайные величины δ_i и δ_{i-1} появляются в результате измерения одной и той же величины, их математические ожидания и дисперсии

будут одинаковы. Конечно-разностное уравнение (4.17) с учетом случайной составляющей принимает следующий вид:

$$f_{i+n+1} - \frac{1}{n} f_{i+n} + \frac{1}{n} f_i = 2L + \frac{1}{n} (\delta_{i-1} - \delta_{i+n-1}). \quad (4.20)$$

Математическое ожидание для значения f , рассчитываемого с помощью алгоритма 2 будет следующим [93]:

$$M[f] = 2L. \quad (4.21)$$

Можно найти приблизительное выражение для дисперсии f в этом случае. Пользуясь свойствами дисперсии и учитывая, что ковариация случайной величины самой с собой равна дисперсии этой величины [93], получено:

$$D[f] \approx \frac{2}{n^2} D[\delta]. \quad (4.22)$$

Из соотношения (4.22) видно, что при использовании алгоритма 2 дисперсия величины перемещения обратно пропорциональна квадрату длины массива n в отличие от алгоритма 1, где дисперсия обратно пропорциональна первой степени n (4.10). Также, стоит отметить, что алгоритм 2 уменьшает дисперсию входного воздействия при любой длине массива, в отличие от алгоритма 1. Рассмотрим моделирование работы системы с использованием алгоритма 2. Исходя из выражения (4.22), этот алгоритм позволяет задавать существенно большую дисперсию случайной величины δ , чем при использовании алгоритма 1.

Второй вид внешнего возмущения – изменение шага печати, как и в случае с алгоритмом 1 аналогичен процессу наладки автоматической линии.

Перейдем к рассмотрению влияния на алгоритм 2 следующего вида внешнего воздействия – склейки. Появление склейки q отразится на новом значении массива следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta_i &= q, \\ S_{i+2} &= f_{i+1} - \Delta_i = f_{i+1} - q. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Из (4.23) видно, что из-за наличия запаздывания, алгоритм управления отреагирует на появление склейки через один цикл после ее появления.

Далее рассмотрим периодически возникающие стыки печати на этикетке. Такой вид возмущения отражается в законе обновления массива следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta_i &= -d, \\ \begin{cases} S_{i+2} = f_{i+1} + d & \text{if } \text{mod}(i, l) = 0, \\ S_{i+2} = f_{i+1} & \text{else.} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Положение этикетки меняется так же как и в случае с алгоритмом 1, в соответствии с (4.14). Также остается справедливой формула (4.15) для расчета нового среднего значения величины f перемещения с учетом периодически возникающих стыков печати.

4.3 Алгоритм коррекции положения одной ленты относительно другой

Как было показано ранее, разработанные алгоритмы совмещения лент при автоматической сборке позволяют подобрать такую величину перемещения привода протягивания, чтобы этикетка оставалась в одном месте, но не позволяют переместить ее в заданное оператором положение. Для того чтобы обеспечить заданное положение верхней ленты относительно нижней разработан алгоритм коррекции положения этикетки относительно контейнера (т.е. изменения положения верхней ленты относительно нижней). Этот алгоритм опирается на смещение фотометки ($B_i - B_0$) относительно заданного положения. Реализуется он следующим образом. Дополнительно вводится счетчик M , максимальное значение которого равно числу циклов m нахождения одного контейнера на линии. Счетчик используется для того, чтобы не допустить введение нескольких коррекций на положение фотометки пока не закончится один производственный цикл. На каждом цикле работы автоматической линии вычисляется текущее

значение смещения фотометки, показывающее на сколько в данный момент времени смещена этикетка относительно контура контейнера. Необходимо задать также значение предельного смещения фотометки относительно контура контейнеров $[\Delta]$ и значение коррекции k (обычно 0,5-1 мм), определяемое геометрией инструментов на силовых станциях термосварки и вырубки (рисунок 3.2). Блок-схема, описывающая алгоритм коррекции положения верхней ленты относительно нижней, представлена на рисунке 4.3.

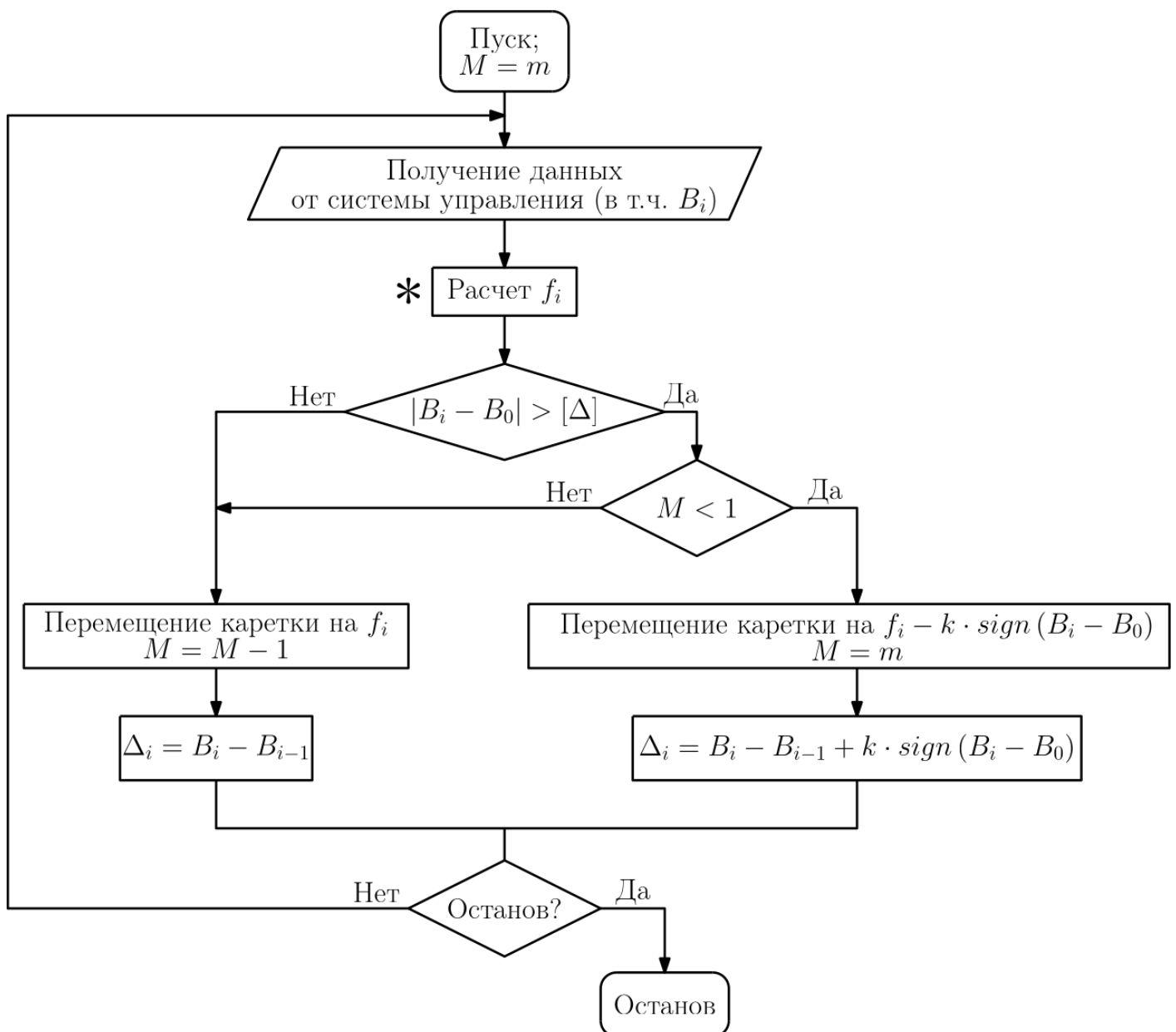


Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритма коррекции положения фотометки.

В блоке, отмеченном * на рисунке 4.3, выполняется расчет величины перемещения транспортера с использованием одного из ранее описанных алгоритмов. Важно отметить, что при использовании алгоритма 2, в случае изменения величины перемещения f , на величину $k \cdot \text{sign}(B_i - B_0)$, также вносится изменение в значение Δ_i на величину $-k \cdot \text{sign}(B_i - B_0)$. Это делается для того, чтобы изменение расстояния, на которое переместится транспортер, не повлияло на разность Δ_i абсолютных положений фотометок и не изменило значение величины перемещения f .

4.4 Алгоритм на основе ПИ-регулятора

Рассмотренные ранее алгоритмы 1 и 2 (см. разделы 4.1, 4.2) позволяют рассчитать требуемую величину f перемещения, при которой фотометка остается неподвижна относительно контейнера, но не позволяют сместить фотометку (и этикетку) в требуемое положение. Для ее смещения в заданное положение дополнительно используется алгоритм коррекции положения фотометки.

Для совместного решения этих задач был разработан алгоритм 3, в основу которого положен ПИ-регулятор [86, 101]. Определим координату x_i фотометки относительно заданного положения B_0 и ее первую разность Δx_i следующим образом:

$$x_i = B_i - B_0; \quad \Delta x_i = x_i - x_{i-1}. \quad (4.25)$$

В этом случае задача сводится к удержанию фотометки в нулевой координате. Пропорциональная (П) составляющая используется для вычисления требуемого значения величины f перемещения. При использовании только П регулирования [101, 102] возникает статическая ошибка координаты x . Интегральная (И) составляющая, позволяет избежать статической ошибки и вернуть значение координаты x к требуемому значению [101, 102]. Выражение для расчета величины f перемещения принимает следующий вид:

$$f_{i+1} = f_i - T_0 \cdot \text{sign}(x_i) \cdot \min(|x_i|, w_w/2) - T_1 \cdot \text{sign}(\Delta x_i) \cdot \min(|\Delta x_i|, w_w/2). \quad (4.26)$$

Вклад переменных x_{i-1} и Δx_{i-1} ограничивается величиной $w_w/2$. Это обусловлено принципом работы автоматической линии и формой инструмента на станциях сварки и вырубки. Необходимо ограничить изменение шага величиной меньшей w_w чтобы избежать аварии на станциях термосваривания и вырубки – контейнер не должен попадать на кромку инструмента (рисунок 3.2). На практике какой из зазоров в инструменте меньше – w_w в инструменте сварки или w_c в инструменте вырубки, определяется конфигурацией автоматической линии. В данной работе рассматривается случай, когда зазор в инструменте термосварки меньше и его величина w_w используется в алгоритме в качестве ограничителя.

Необходимо определить область допустимых значений параметров T_0 и T_1 , при которых разработанный алгоритм является работоспособным и пригодным к использованию для сборки изделий из нескольких компонентов на автоматических линиях. В процессе работы автоматической линии не должно возникнуть аварий, и, в случае выхода фотометки за пределы допустимых значений, она должна вернуться в заданное положение за количество циклов, не превышающее удвоенный производственный цикл изделия ($2m$). Такое время выбрано, опираясь на время возврата фотометки в область допустимых значений с помощью алгоритма коррекции абсолютного положения фотометки (раздел 4.3). Другими словами, за отведенное количество циклов $2m$ должны выполняться условия автоматической сборки (3.9), при следующих возмущениях:

- начальная величина перемещения f_0 , отличается от действительной на 0,25 мм (моделирование стабилизации величины перемещения)
- на некотором цикле s значение абсолютной координаты метки B_s 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 рисунке 4.4, при следующих значениях параметров:

$$\begin{aligned}
 L = 50 \text{ мм}; m_1 = 5; m_2 = 10; m = 10; p_w = 500 \text{ мм}; \\
 p_c = 1000 \text{ мм}; w_w = 1,5 \text{ мм}; w_c = 2,0 \text{ мм}.
 \end{aligned}
 \tag{4.27}$$

Полученные области допустимых значений параметров изображенные на рисунке 4.4 показывают, что разным видам возмущений соответствуют разные множества значений (области 1 и 2 на рисунке 4.4). Искомым множеством значений параметров является пересечение этих областей.

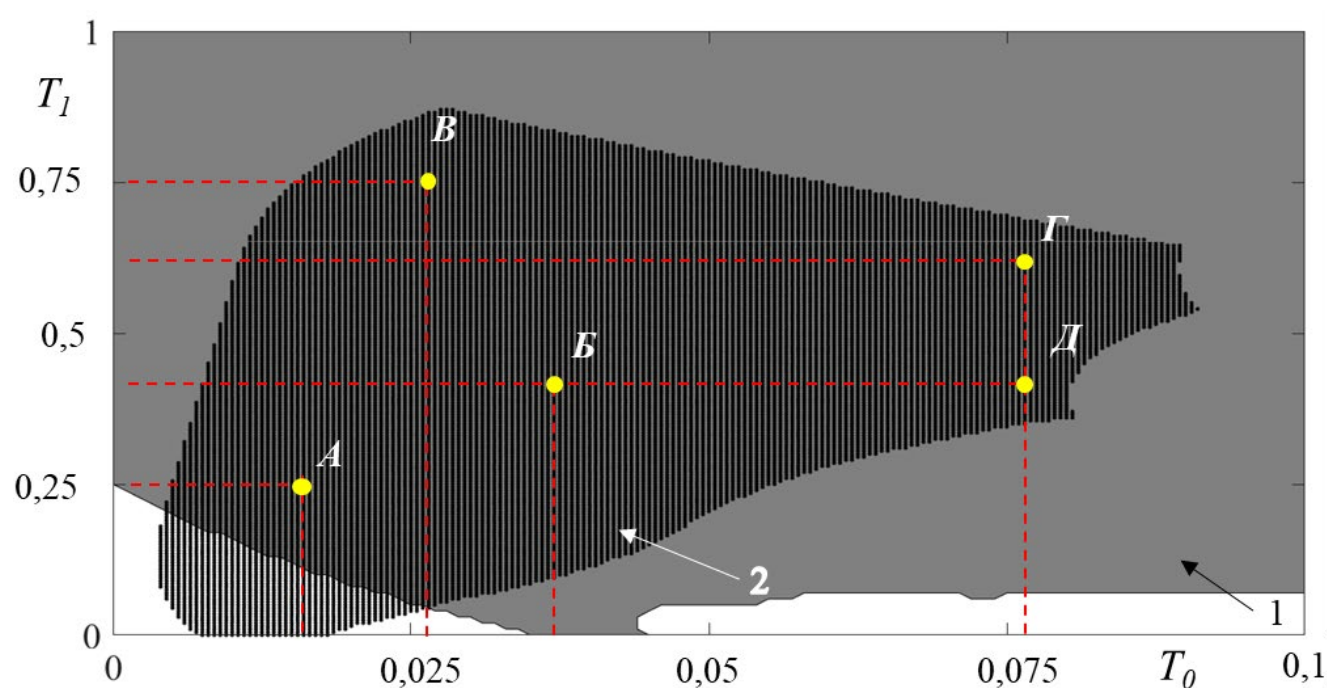


Рисунок 4.4 – Область допустимых значений параметров:

1 – для стабилизации перемещения; 2 – для склейки.

Смоделируем работу алгоритма 3 при описанных ранее возмущениях. В начальный момент времени задано значение перемещения отличное от действительного, далее при $i = 6t$ моделируется склейка. Рассмотрим одну из точек, принадлежащих области допустимых значений (точка *A* на рисунке 4.4). В этом случае параметры T_0 и T_1 будут следующими:

$$A: \quad T_0 = 0,015; \quad T_1 = 0,25.$$

На первых $6t$ циклов моделирования происходит стабилизация величины перемещения при неизвестном действительном значении шага печати этикетки.

Из рисунка 4.5а видно, что алгоритм 3 выходит на требуемое значение перемещения менее, чем за два производственных цикла изделия. При этом этикетка не выходит из области допустимых значений (рисунок 4.5б). На вторых $6m$ циклов моделируется появление склейки. Из-за ее наличия величина перемещения f и смещение этикетки Δ^Σ изменяются скачкообразно, но в соответствии с наложенными на модель ограничениями, за $2m$ циклов возвращаются в область допустимых значений.

Значения смещения контейнеров относительно инструментов сварки (рисунок 4.5в) и вырубки (рисунок 4.5г) в соответствии с формулами (3.2) начинают рассчитываться с циклов $i = m_1$ и $i = m_2$ соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о том, что моделируемые возмущения не приводят к авариям, так как смещения контейнеров относительно инструментов остаются в допустимых пределах.

Рассмотрим влияние случайной составляющей на работу алгоритма. Случайная составляющая δ в математической модели учитывается при расчете переменной x следующим образом:

$$x_i = B_i + \delta_i - B_0; \quad \Delta x_i = B_i - B_{i-1} + (\delta_i - \delta_{i-1}). \quad (4.28)$$

Как и в случае с алгоритмами 1 и 2 будем рассматривать влияние случайного воздействия, описываемого нормальным законом распределения Гаусса [92, 93] с математическим ожиданием $M[\delta]=0$ и дисперсией $D[\delta]=\sigma^2$.

При появлении склейки переменные x_i и Δx_i меняются следующим образом:

$$x_i = B_i - B_0 - q; \quad \Delta x_i = B_i - B_{i-1} - q. \quad (4.29)$$

А при периодически возникающих стыках d печати с периодичностью l в свою очередь:

$$\begin{cases} x_i = B_i - B_0 + d; & \Delta x_i = B_i - B_{i-1} + d & \text{if } \text{mod}(i, l) = 0, \\ x_i = B_i - B_0; & \Delta x_i = B_i - B_{i-1} & \text{else.} \end{cases} \quad (4.30)$$

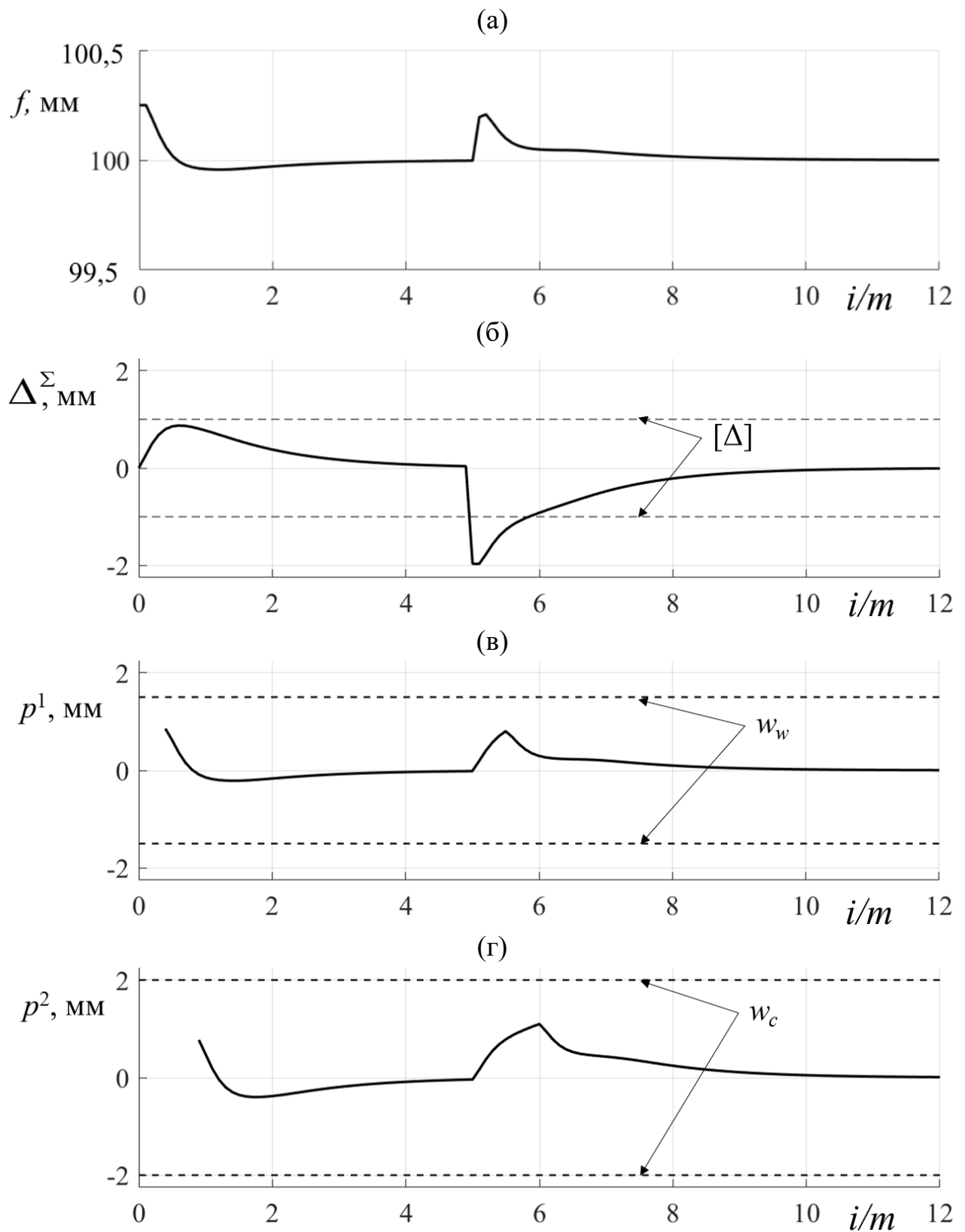


Рисунок 4.5 – Моделирование работы автоматической линии по алгоритму 3:
 (а) стабилизация перемещения; (б) смещение фотометки; (в) смещение
 контейнера относительно станции термосварки; (г) смещение контейнера
 относительно станции вырубki

4.5 Численное моделирование работы автоматической линии

Проведем численное моделирование работы автоматической линии при использовании описанных ранее алгоритмов. Рассмотрим алгоритм 1 при случайном внешнем воздействии. Для моделирования приняты следующие параметры системы:

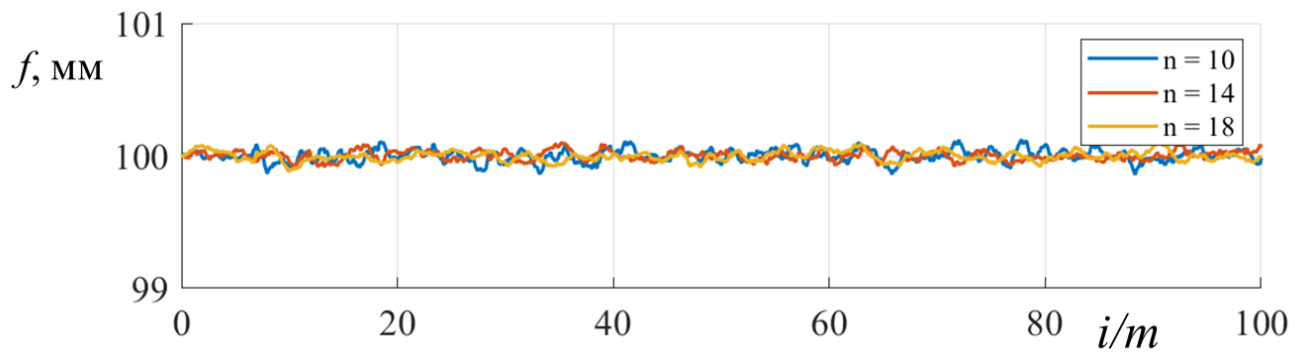
$$\begin{aligned} n &= [10; 14; 18]; L = 50 \text{ мм}; m_1 = 5; m_2 = 10; m = 10; p_w = 500 \text{ мм}; \\ p_c &= 1000 \text{ мм}; w_w = 1,5 \text{ мм}; w_c = 2,0 \text{ мм}; M[\delta] = 0 \text{ мм}; \\ D[\delta] &= 0,05^2 \text{ мм}^2; S^0 = [100 \quad \dots \quad 100 \quad \dots \quad 100]; \end{aligned} \quad (4.31)$$

Результаты, полученные при моделировании работы автоматической линии (рисунок 4.6а), подтверждают возможность использования алгоритма при наличии случайных погрешностей системы измерения для расчета перемещения f . Реализации работы алгоритма имеют следующие характеристики:

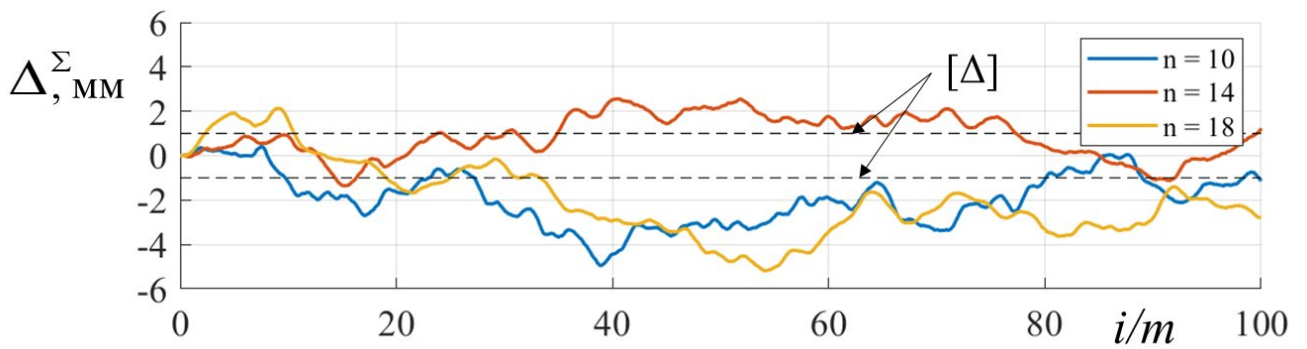
$$\begin{aligned} n = 10: M[f] &= 100 \text{ мм}; D[f] = 0,031^2 \text{ мм}^2; f = 100 \pm 0,093 \text{ мм}; \\ n = 14: M[f] &= 100 \text{ мм}; D[f] = 0,027^2 \text{ мм}^2; f = 100 \pm 0,081 \text{ мм}; \\ n = 18: M[f] &= 100 \text{ мм}; D[f] = 0,023^2 \text{ мм}^2; f = 100 \pm 0,069 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Полученные значения подтверждают справедливость выведенных ранее формул (4.10). В то же время смещение этикетки относительно контейнера (рисунок 4.6б) через некоторый промежуток времени выходит из области допустимых значений при всех рассмотренных вариантах длины массива. Результаты, представленные на рисунке 4.6в-г, показывают, что при заданных параметрах контейнеры относительно инструментов сварки и вырубки смещаются незначительно. Можно сделать вывод, что при рассмотренной величине внешнего воздействия (4.31), наличие погрешности в измерительной системе не приведет к аварии на автоматической линии или появлению продукции, не соответствующей требованиям, предъявляемым к ее внешнему виду.

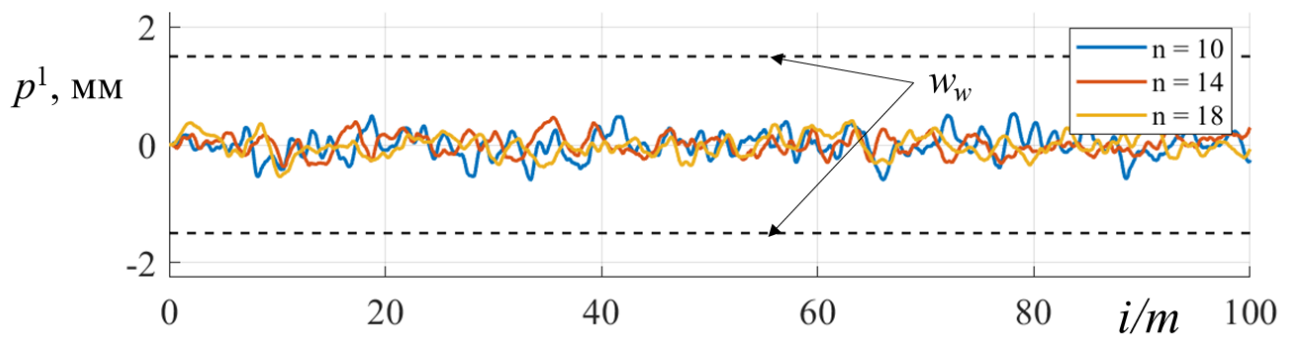
(a)



(б)



(в)



(г)

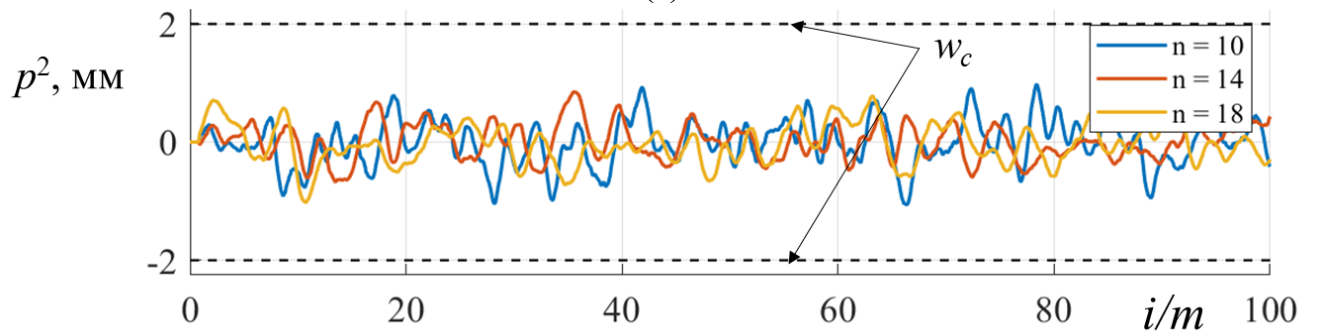


Рисунок 4.6 – Реализация при работе по алгоритму 1:
 (а) стабилизация перемещения; (б) смещение фотометки; (в) смещение контейнеров относительно инструмента термосварки; (г) смещение контейнеров относительно инструмента вырубки.

Далее приводится численное моделирование работы линии при использовании алгоритма 1 совместно с алгоритмом коррекции положения фотометки при параметрах (4.31) и величине k смещения алгоритма коррекции фотометки:

$$k = 0,50 \text{ мм.} \quad (4.32)$$

Из результатов, представленных на рисунке 4.7 видно, что дополнительный алгоритм коррекции положения фотометки помогает удерживать фотометку в области допустимых значений (рисунок 4.7б). При этом смещения контейнеров относительно инструментов термосварки и вырубки (рисунок 4.7в, г) остаются в области допустимых значений.

Далее проведем численное моделирование работы линии с использованием алгоритма 2. Для моделирования использованы параметры (4.31) за исключением:

$$D[\delta] = 0,9^2 \text{ мм}^2 \quad (4.33)$$

Моделирование расчета перемещения f с помощью алгоритма 2 (рисунок 4.8а) показывает его работоспособность и возможность его применения при наличии случайных погрешностей системы измерения. Получены следующие характеристики для реализаций работы алгоритма при различной длине массива:

$$n = 10: M[f] = 100; D[f] = 0,127^2; f = 100 \pm 0,381 \text{ мм,}$$

$$n = 14: M[f] = 100; D[f] = 0,096^2; f = 100 \pm 0,288 \text{ мм,}$$

$$n = 18: M[f] = 100; D[f] = 0,072^2; f = 100 \pm 0,216 \text{ мм.}$$

Результаты, полученные при численном моделировании работы алгоритма 2 согласуются с оценкой математического ожидания и дисперсии величины перемещения, полученными ранее (4.22). Из рисунка 4.8б видно, что имеются места, где смещение фотометки превышает допустимую величину смещения $[\Delta]$. Результаты, полученные для смещения контейнеров относительно инструментов термосварки и вырубки (рисунок 4.8в, г) показывают, что величина смещения во всех случаях меньше величины зазора в инструменте соответствующей технологической станции. Из этого можно сделать вывод, что аварий за время работы автоматической линии не будет.

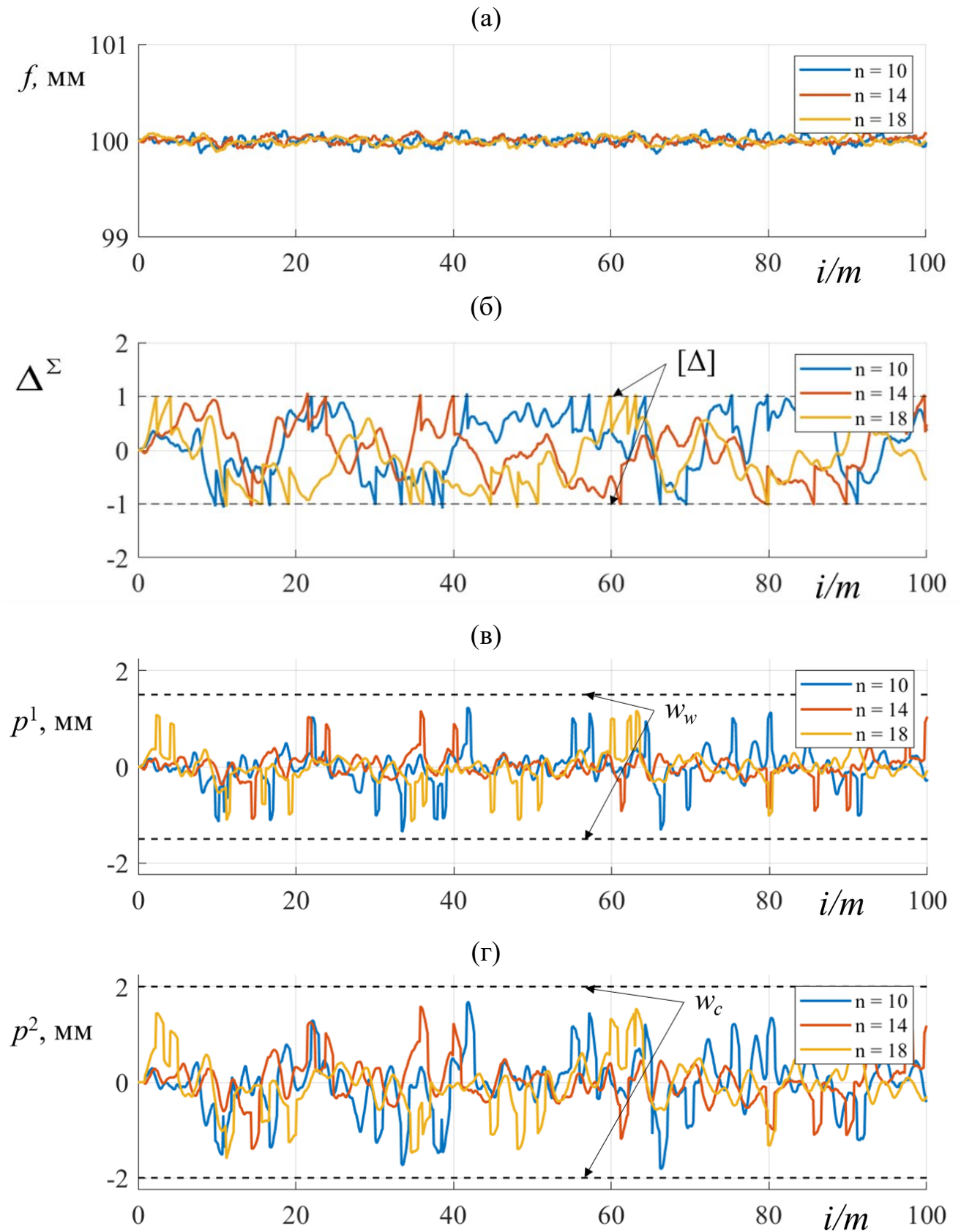


Рисунок 4.7 – Реализация при работе по алгоритму 1 и алгоритму коррекции положения фотометки: (а) стабилизация перемещения; (б) смещение фотометки; (в) смещение контейнеров относительно инструмента термосварки; (г) смещение контейнеров относительно инструмента вырубки.

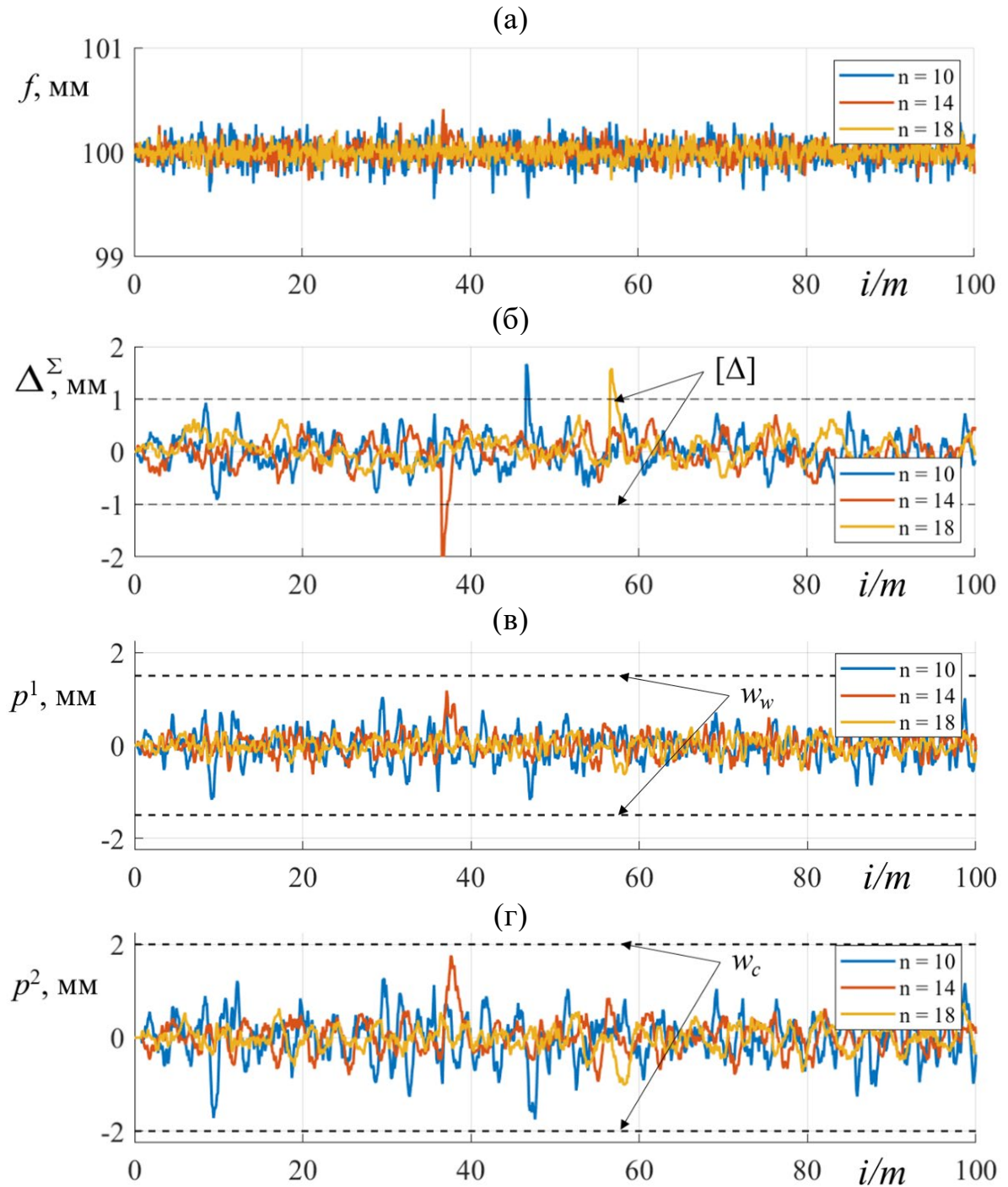


Рисунок 4.8 – Реализация при работе по алгоритму 2:
 (а) стабилизация перемещения; (б) смещение фотометки;
 (в) смещение контейнеров относительно инструмента термосварки;
 (г) смещение контейнеров относительно инструмента вырубки.

Далее рассматривается совместная работа алгоритма 2 и алгоритма коррекции положения фотометки с параметрами (4.32) и (4.33). Из результатов, показанных на рисунке 4.9 видно, что алгоритм коррекции положения фотометки возвращает ее в область допустимых значений (рисунок 4.9б). При этом

смещения контейнеров относительно станций термосварки и вырубки не превышают величину зазора в инструментах, что в свою очередь не должно приводить к авариям.

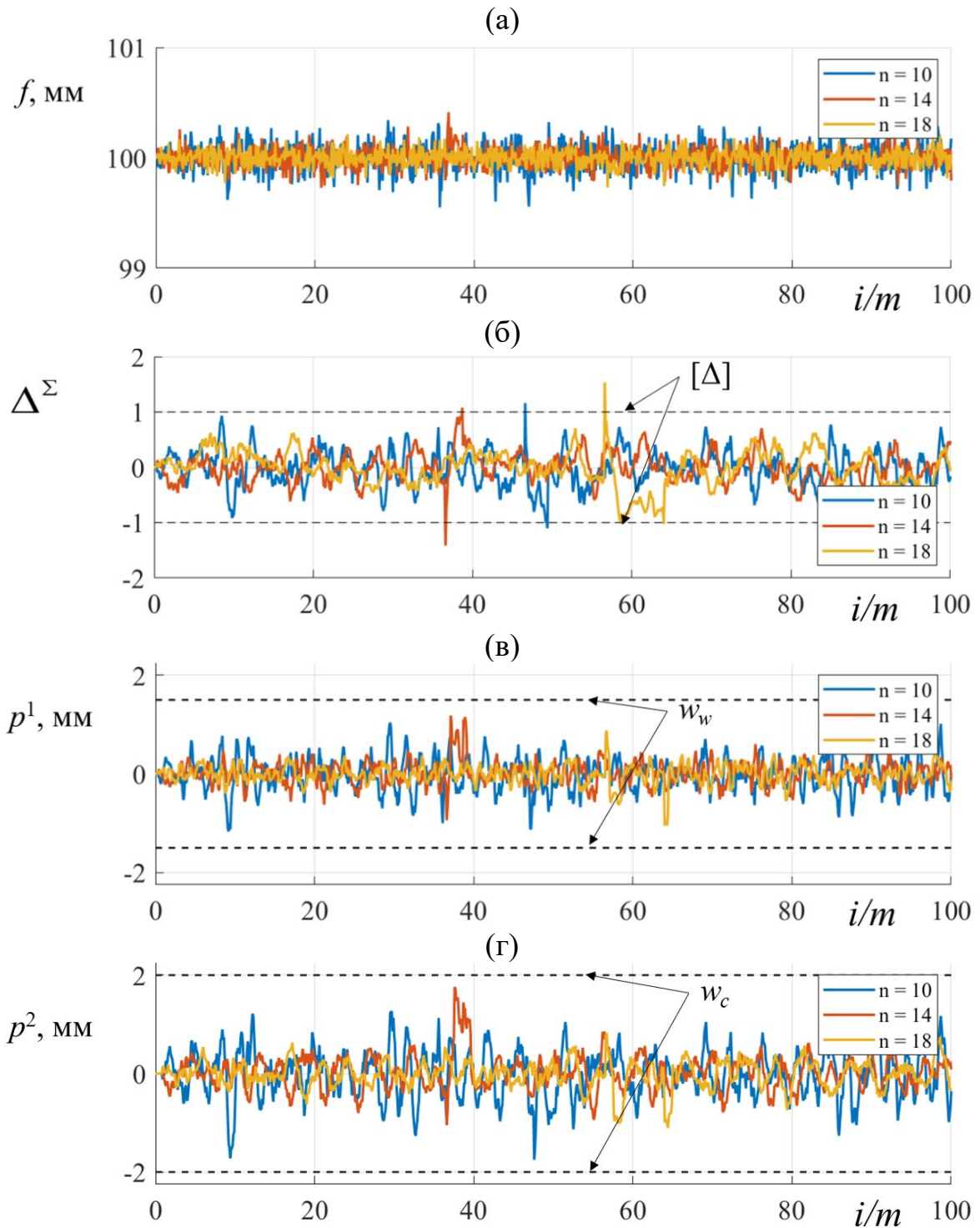


Рисунок 4.9 – Реализация при работе по алгоритму 2 и алгоритму коррекции положения фотометки: (а) стабилизация перемещения; (б) смещение фотометки; (в) смещение контейнеров относительно инструмента термосварки; (г) смещение контейнеров относительно инструмента вырубки.

Проведем численное моделирование работы алгоритма 3 при случайных внешних воздействиях. Для этого выберем несколько значений параметров из области допустимых значений. Рассмотрим точки на границах и в центре полученной области. Значения параметров T_0 и T_1 используемые при моделировании приведены в таблице 4.1:

Таблица 4.1 – Рассматриваемые параметры из области допустимых значений.

Параметры	T_0	T_1
А	0,015	0,25
Б	0,030	0,40
В	0,025	0,75
Г	0,075	0,60
Д	0,075	0,40

Выполним численное моделирование работы алгоритма 3 при параметрах А и следующих характеристиках случайного внешнего воздействия (параметры (4.27) остаются неизменными):

$$f_0 = 100 \text{ мм}; M[\delta] = 0 \text{ мм}; D[\delta] = 0,15^2 \text{ мм}^2.$$

Результат численного моделирования расчета величины перемещения показан на рисунке 4.10а, откуда видно, что величина перемещения обладает некоторым разбросом из-за наличия случайного возмущения, но ее среднее значение равно удвоенному действительному шагу печати. Смещение фотометки при таких параметрах (рисунок 4.10б) остается в области допустимых значений. На рисунках 4.10в-г показаны смещения контейнеров относительно инструментов сварки и вырубки. В обоих случаях смещения контейнеров обладают небольшим разбросом около нулевого положения. Это не приведет ни к аварийной остановке, ни к потере качества изделий, что подтверждают полученные числовые характеристики смещений контейнеров (таблица 4.2).

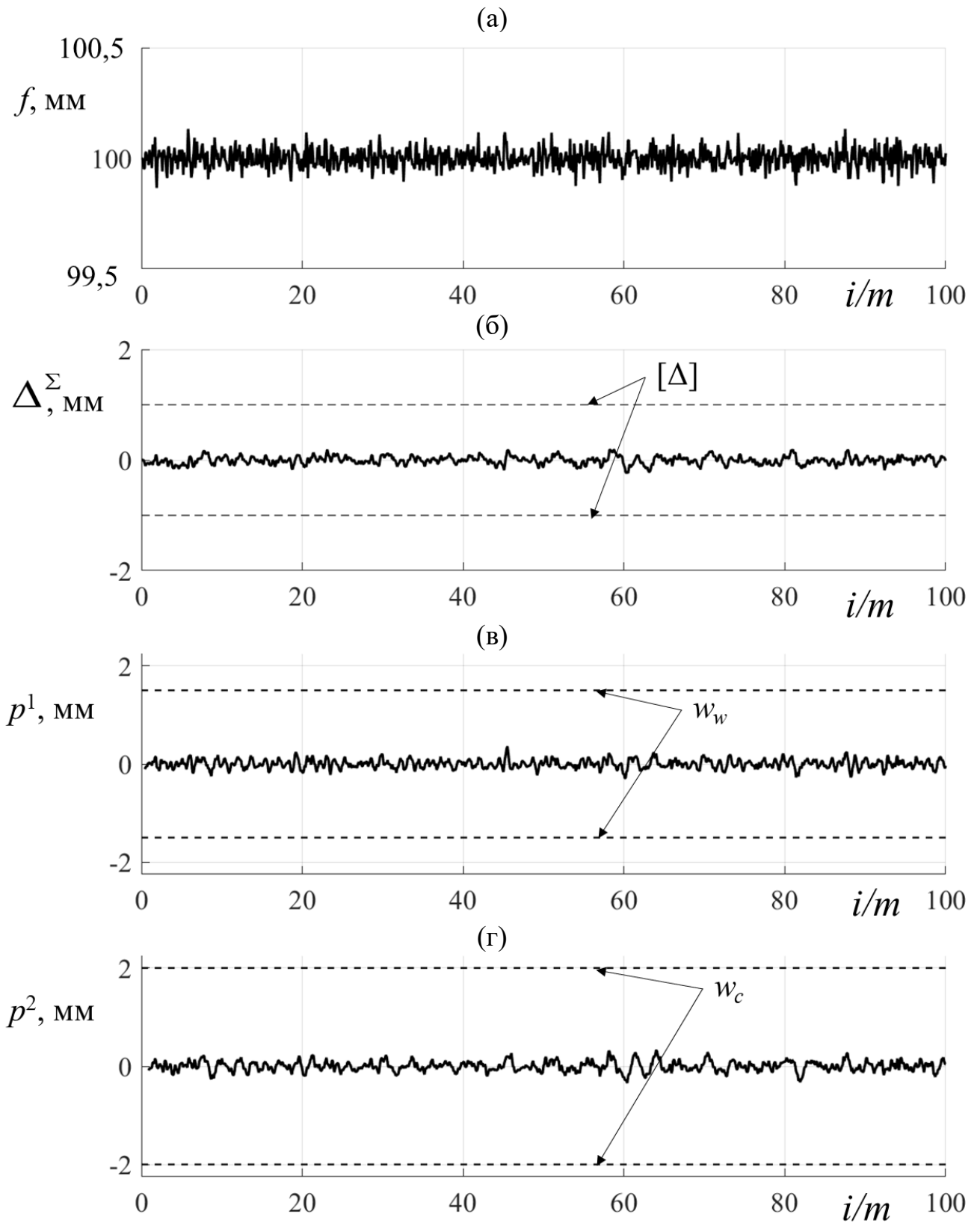


Рисунок 4.10 – Реализация при работе по алгоритму 3 с набором параметров А:
 (а) стабилизация перемещения; (б) смещение фотометки;
 (в) смещение контейнеров относительно инструмента термосварки;
 (г) смещение контейнеров относительно инструмента вырубки.

Ниже представлена таблица с результатами моделирования работы автоматической линии с параметрами T_0 и T_1 из таблицы 4.1.

Таблица 4.2 – Результаты моделирования работы алгоритма 3 при случайном внешнем воздействии.

Параметры	f , мм	Δ^Z , мм	p^1 , мм	p^2 , мм
А	$100 \pm 0,139$	$0 \pm 0,504$	$0 \pm 0,291$	$0 \pm 0,315$
Б	$100 \pm 0,228$	$0 \pm 0,546$	$0 \pm 0,486$	$0 \pm 0,450$
В	$100 \pm 0,624$	$0 \pm 0,837$	$0 \pm 1,008$	$0 \pm 1,101$
Г	$100 \pm 0,465$	$0 \pm 0,727$	$0 \pm 0,941$	$0 \pm 0,831$
Д	$100 \pm 0,273$	$0 \pm 0,610$	$0 \pm 0,645$	$0 \pm 0,570$

Как видно из полученных результатов (таблица 4.2) не все возможные значения параметров из области допустимых значений оптимальны для решения. Например, при выборе параметров B было получено большое смещение фотометки относительно заданного положения, а также большие смещения контейнеров относительно инструментов, что может привести к потере качества изделий и аварии. Наиболее оптимальными являются параметры A , при которых смещения фотометки и контейнеров относительно инструментов минимальные среди рассмотренных вариантов параметров. Это объясняется тем, что среди всех рассмотренных значений, в точке A параметры T_0 и T_1 принимают наименьшие значения, соответственно уменьшается и вклад случайной величины в величину перемещения. Эти параметры будут использоваться при дальнейшем моделировании.

Далее рассмотрим численное моделирование работы линии при изменении шага печати. Моделирование работы алгоритма 1 совместно с алгоритмом коррекции положения фотометки проводится при следующих параметрах:

$$\begin{aligned}
 n &= [10; 14; 18]; L = 50 \text{ мм}; m_1 = 5; m = m_2 = 10; p_w = 500 \text{ мм}; \\
 p_c &= 1000 \text{ мм}; [\Delta] = 1 \text{ мм}; k = 0,5 \text{ мм}; w_w = 1,5 \text{ мм}; w_c = 2,0 \text{ мм}; \\
 S^0 &= [100,2 \quad \dots \quad 100,2 \quad \dots \quad 100,2].
 \end{aligned} \tag{4.34}$$

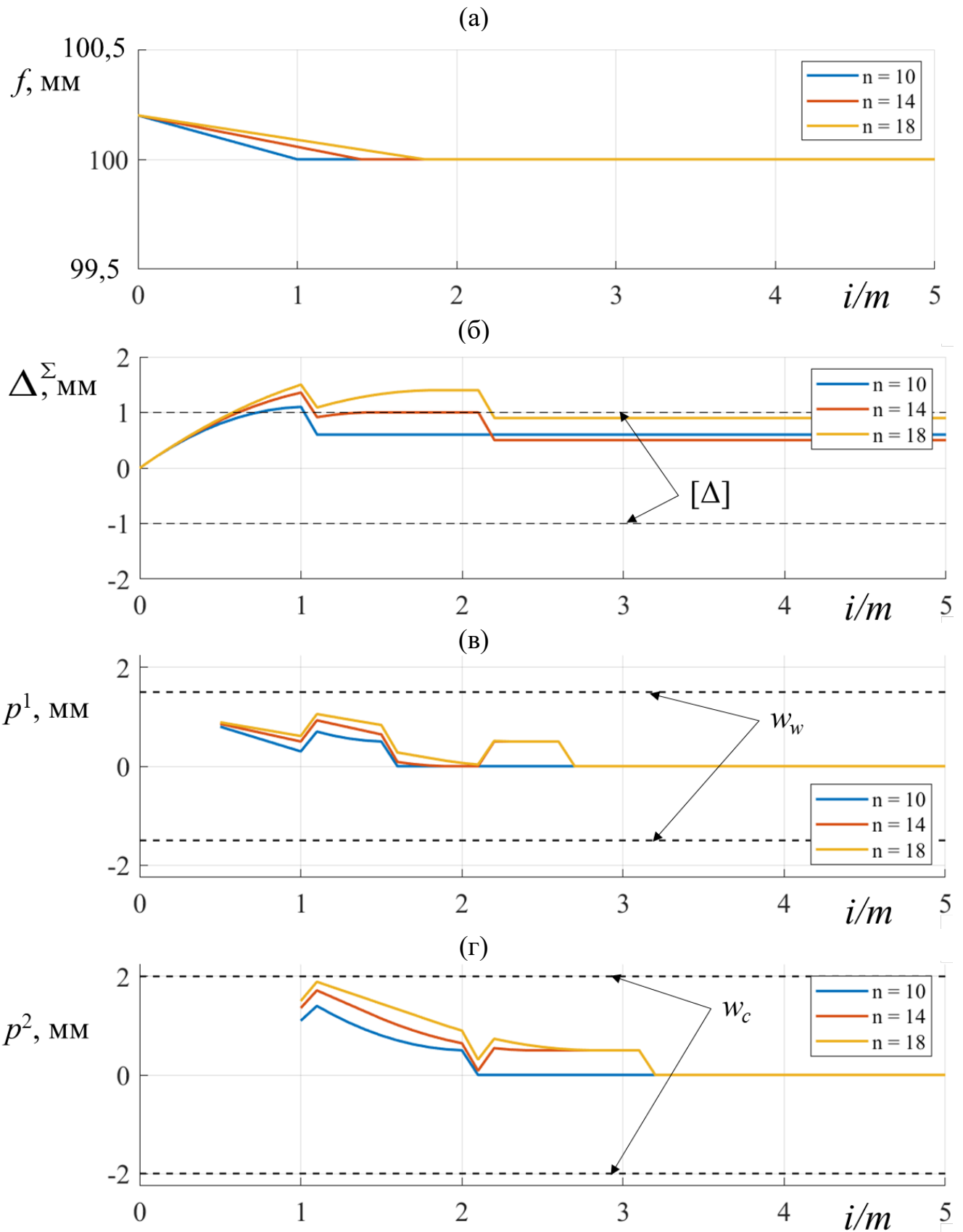


Рисунок 4.11 – Реализация при работе по алгоритму 1 и алгоритму коррекции положения фотометки: (а) стабилизация перемещения; (б) смещение фотометки; (в) смещение контейнеров относительно инструмента термосварки; (г) смещение контейнеров относительно инструмента вырубки.

Очевидно, что применение алгоритма коррекции положения покровной ленты никак не скажется на величине перемещения f при его расчете с помощью алгоритма 1 (рисунок 4.11а), так как независимо от величины k дополнительного смещения на одном из циклов, расстояние между соседними метками останется неизменным. На рисунке 4.11б показано изменение смещения положения фотометки. Видно, что в зависимости от длины n массива S меняется и время возврата этикетки в область допустимых значений. Смещение контейнеров относительно станций сварки (рисунок 4.11в) и вырубки (рисунок 4.11в) находится в допустимых пределах в соответствии с условием (3.8) для всех рассмотренных длин n массива S . Стоит отметить, что несмотря на то, что аварий при полученных смещениях не возникнет, контейнеры с большим смещением относительно инструмента зачастую не соответствуют требованиям, предъявляемым к внешнему виду готовой продукции. В таком случае рекомендуется использовать массив меньшей длины (например, при $n=10$ смещение существенно меньше, чем при $n=18$), либо отправлять несоответствующую требованиям продукцию в брак.

Далее рассматривается моделирование работы алгоритма 2 совместно с алгоритмом коррекции положения фотометки. Математическое моделирование проводилось при параметрах (4.34).

За время стабилизации перемещения (рисунок 4.12а) имеет место смещение фотометки за пределы области допустимых значений (рисунок 4.12б). С помощью алгоритма коррекции положения фотометки удастся вернуть фотометку (и этикетку) в область допустимых значений. Отметим работа алгоритма коррекции положения фотометки не влияет на величину перемещения, так как его срабатывание учитывается при расчете разницы координат фотометок. При этом смещение контейнеров относительно инструмента сварки находится в допустимых пределах (рисунок 4.12в), в то время как смещение контейнеров относительно инструмента вырубки (рисунок 4.12г) при длине массива $n = 18$ может привести к попаданию контейнера на край инструмента, что приведет

аварии. Таким образом, несмотря на то что увеличение длины массива позволяет уменьшить дисперсию выходного значения, оно также приводит и к более долгому выходу на требуемую величину перемещения транспортера, большему смещению фотометки за время стабилизации перемещения и большему смещению контейнеров относительно инструментов.

Моделирование работы алгоритма 3 при изменении шага печати представлено на рисунке 4.5 (первые 6*m* циклов). Как указывалось ранее, с помощью алгоритма 3 система выходит на требуемую величину f перемещения (рисунок 4.5а) и одновременно с этим удерживает фотометку в заданном положении (рисунок 4.5б). При этом смещение контейнеров относительно инструментов сварки и вырубки (рисунок 4.5в, г) остается в допустимых пределах и не приведет ни к аварии, ни к потере качества изготавливаемой продукции.

Далее моделируется возникновение склейки при замене рулона. Первым рассматривается реализация работы линии под управлением алгоритма 1. Задано появление склейки q на 10-ом цикле работы линии. Используются следующие параметры:

$$\begin{aligned} n &= [10; 14; 18]; L = 50 \text{ мм}; m_1 = 5; m_2 = 10; m = 10; p_w = 500 \text{ мм}; \\ p_c &= 1000 \text{ мм}; [\Delta] = 1 \text{ мм}; q = 0,9 \text{ мм}; w_w = 1,5 \text{ мм}; w_c = 2,0 \text{ мм}; \\ S^0 &= [100 \quad \dots \quad 100 \quad \dots \quad 100]. \end{aligned} \quad (4.35)$$

Результаты, полученные для смещений контейнеров относительно инструментов термосварки и вырубки показаны на рисунке 4.13в, г. Видно, что при заданной величине склейки смещение контейнеров остается в допустимых пределах, при этом, чем больше длина массива, тем меньше смещение. Стоит отметить, что для заданной величины склейки при длине массива $n=10$ смещение контейнера относительно инструмента вырубки принимает значение близкое к величине зазора, что не приведет к аварии, но скажется на внешнем виде изготавливаемой продукции.

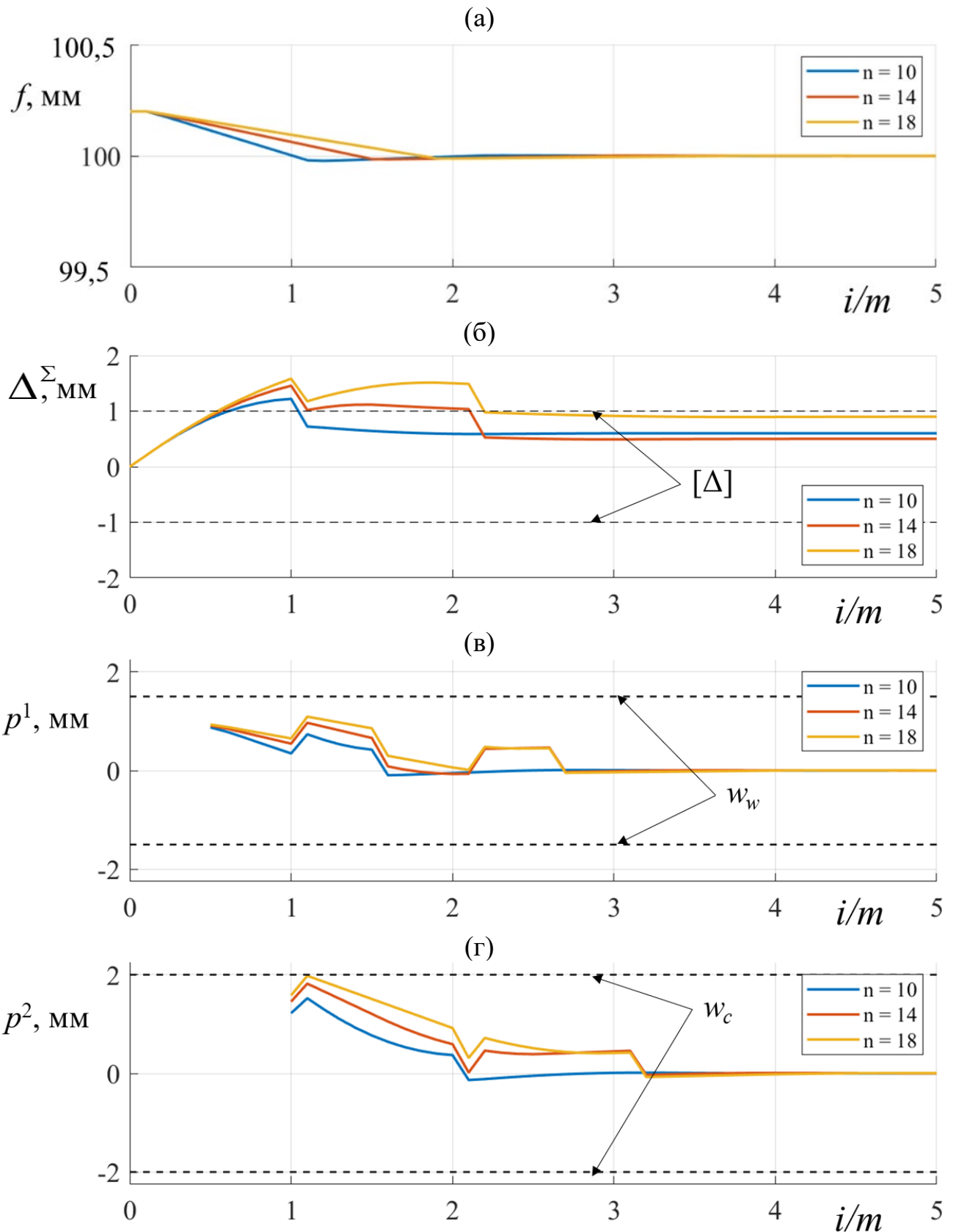


Рисунок 4.12 – Реализация при работе по алгоритму 2 и алгоритму коррекции положения фотометки: (а) стабилизация перемещения; (б) смещение фотометки; (в) смещение контейнеров относительно инструмента термосварки; (г) смещение контейнеров относительно инструмента вырубки.

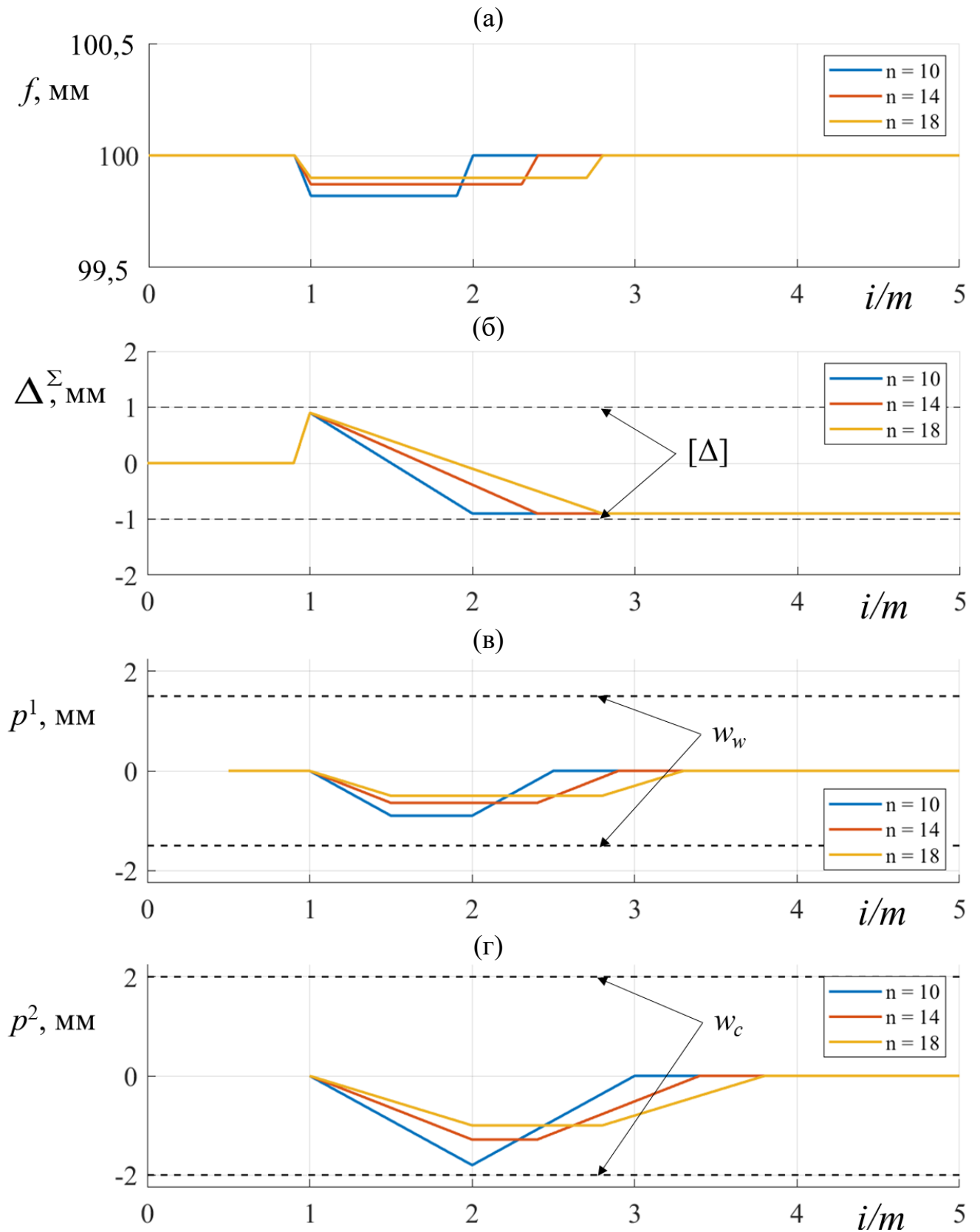


Рисунок 4.13 – Реализация при работе по алгоритму 1:

(а) стабилизация перемещения; (б) смещение фотометки;

(в) смещение контейнеров относительно инструмента термосварки;

(г) смещение контейнеров относительно инструмента вырубки.

Далее проведем численное моделирование работы автоматической линии при использовании для управления алгоритма 2 также с набором параметров (4.35) за исключением:

$$q = 1,75 \text{ мм.}$$

Из результатов, представленных на рисунке 4.14а, видно, что при появлении склейки величина перемещения уменьшается на некоторое значение, зависящее от длины массива и величины склейки. Как и в случае использования алгоритма 1 при меньшей длине массива перемещение изменяется на большую величину, но быстрее возвращается к требуемому значению, при большей длине массива изменение меньше, а время возврата дольше.

На рисунке 4.14б представлено смещение фотометки при появлении склейки. Аналогично случаю, когда использовался алгоритм 1, чем больше длина массива, тем дольше фотометка возвращается в исходное положение. Существенным отличием от алгоритма 1 является то, что фотометка к концу стабилизации перемещения возвращается в исходное положение, так как в данном случае не происходит удвоения значения возмущения, учитываемого при расчете величины перемещения.

Результаты, полученные для смещения контейнеров относительно инструментов сварки и вырубки (рисунок 4.14в, г) показывают, что при наименьшей ($n=10$) из рассмотренных длин массива контейнеры смещаются слишком близко к краю инструмента вырубки (рисунок 4.14г). Это связано с тем, что при меньшей длине массива, величина перемещения претерпевает наибольшие изменения, что выражается в наибольшем смещении относительно инструментов и приводит к появлению продукции, не соответствующей требованиям, предъявляемым к внешнему виду изделий. Несмотря на это, аварии на автоматической линии не будет, так как смещение остается в допустимых пределах. В остальных случаях смещение контейнеров относительно инструментов можно считать незначительным.

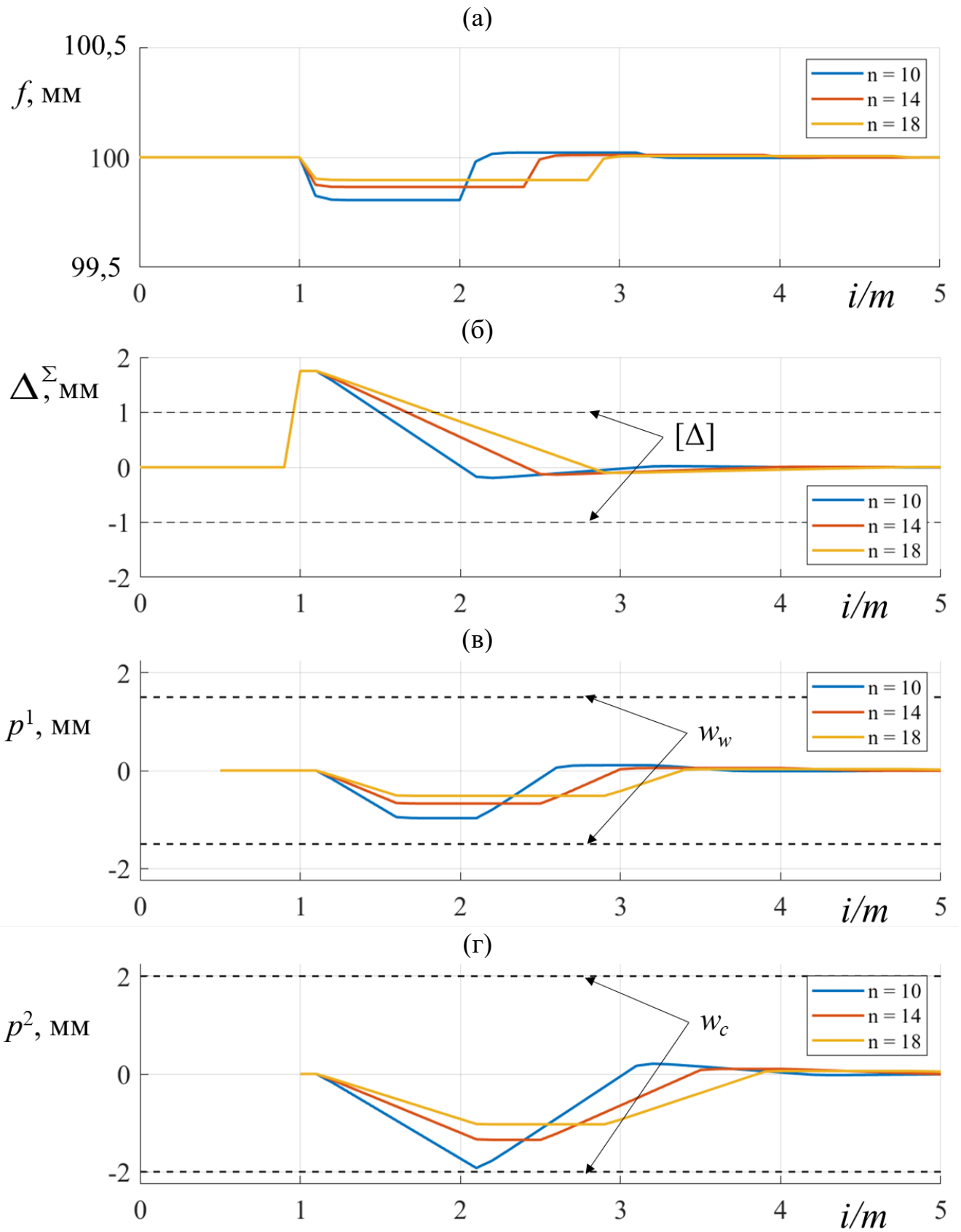


Рисунок 4.14 – Реализация при работе по алгоритму 2:

(а) стабилизация перемещения; (б) смещение фотометки;

(в) смещение контейнеров относительно инструмента термосварки;

(г) смещение контейнеров относительно инструмента вырубki.

Моделирование работы алгоритма 3 при появлении склейки представлено на рисунке 4.5 (вторые $6m$ циклов). В данном случае также имеет место кратковременное изменение величины перемещения (рисунок 4.5а) и выход фотометки за пределы области допустимых значений (рисунок 4.5б). При этом за количество циклов равное m длине производственного цикла изделия фотометка возвращается в область допустимых значений, а еще через $2m$ циклов приходит в заданное положение. Смещения контейнеров относительно станций сварки и вырубки (рисунок 4.5в, г) незначительны.

Далее рассмотрим моделирование работы системы при периодическом внешнем воздействии. Получим реализацию работы алгоритма 1 при следующих параметрах:

$$\begin{aligned} n = 10; L = 50 \text{ мм}; m_1 = 5; m_2 = 10; d = 1 \text{ мм}; [\Delta] = 1 \text{ мм}; \\ w_w = 1,5 \text{ мм}; w_c = 2,0 \text{ мм}; S^0 = [\bar{f} \quad \dots \quad \bar{f} \quad \dots \quad \bar{f}]. \end{aligned} \quad (4.36)$$

Величина, которой изначально заполняется массив S зависит от периода возникновения склейки и рассчитывается по формуле (4.15). Значения, использованные при различных вариантах моделирования представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Начальные значения величины перемещения.

Периодичность появления стыка l	Рассчитанное среднее значение $\bar{f}$, мм
5	100,40
8	100,25
10	100,20
12	100,17

Из полученных результатов (рисунок 4.15) видно, что при периодическом внешнем воздействии величина перемещения f транспортера не является постоянной и ее среднее значение увеличивается на некоторую величину, зависящую от величины d стыка и частоты l его появления.

Первым рассмотрим случай, когда $l \leq n$. В частном случае, когда n делится на l без остатка, f будет постоянным (рисунок 4.15а, в). В ином случае f будет чередовать максимальное и минимальное значение с периодом l (рисунок 4.15б). Максимальное и минимальное значения f в таком случае будут вычисляться следующим образом:

$$\begin{aligned} \min(f) &= A + \frac{2d}{n} \operatorname{div}(n, l), \\ \left[\begin{aligned} \max(f) &= \min(f) && \text{if } \operatorname{mod}(n, l) = 0, \\ \max(f) &= A + \frac{2d}{n} (\operatorname{div}(n, l) + 1) && \text{else.} \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (4.37)$$

При $l > n$ также будет иметь место чередование максимального и минимального значений f величины перемещения с периодом l (рисунок 4.15г). Максимальное и минимальное значения f будут вычисляться в соответствии с выражением, приведенным ниже.

$$\begin{aligned} \min(f) &= A, \\ \max(f) &= A + 2d/n. \end{aligned} \quad (4.38)$$

Рассмотрим, как периодическое внешнее воздействие влияет на смещение фотометки.

Из результатов, представленных на рисунке 4.16, видно, что при заданной величине d стыка печати при любой частоте его появления смещение этикетки выходит за пределы области допустимых значений. Это связано с тем, что в соответствии с (4.13) в массив **S** попадает удвоенное значение d стыка, которое приводит к увеличению величины f перемещения и смещению фотометки на величину $2d$. В то же время в соответствии с (4.14) компенсируется смещение фотометки на величину $-d$. Таким образом, с каждым появлением стыка печати фотометка смещается на d . При данном виде внешнего воздействия алгоритм 1 не способен решить задачу расчета величины перемещения, при которой положение фотометки остается постоянным.

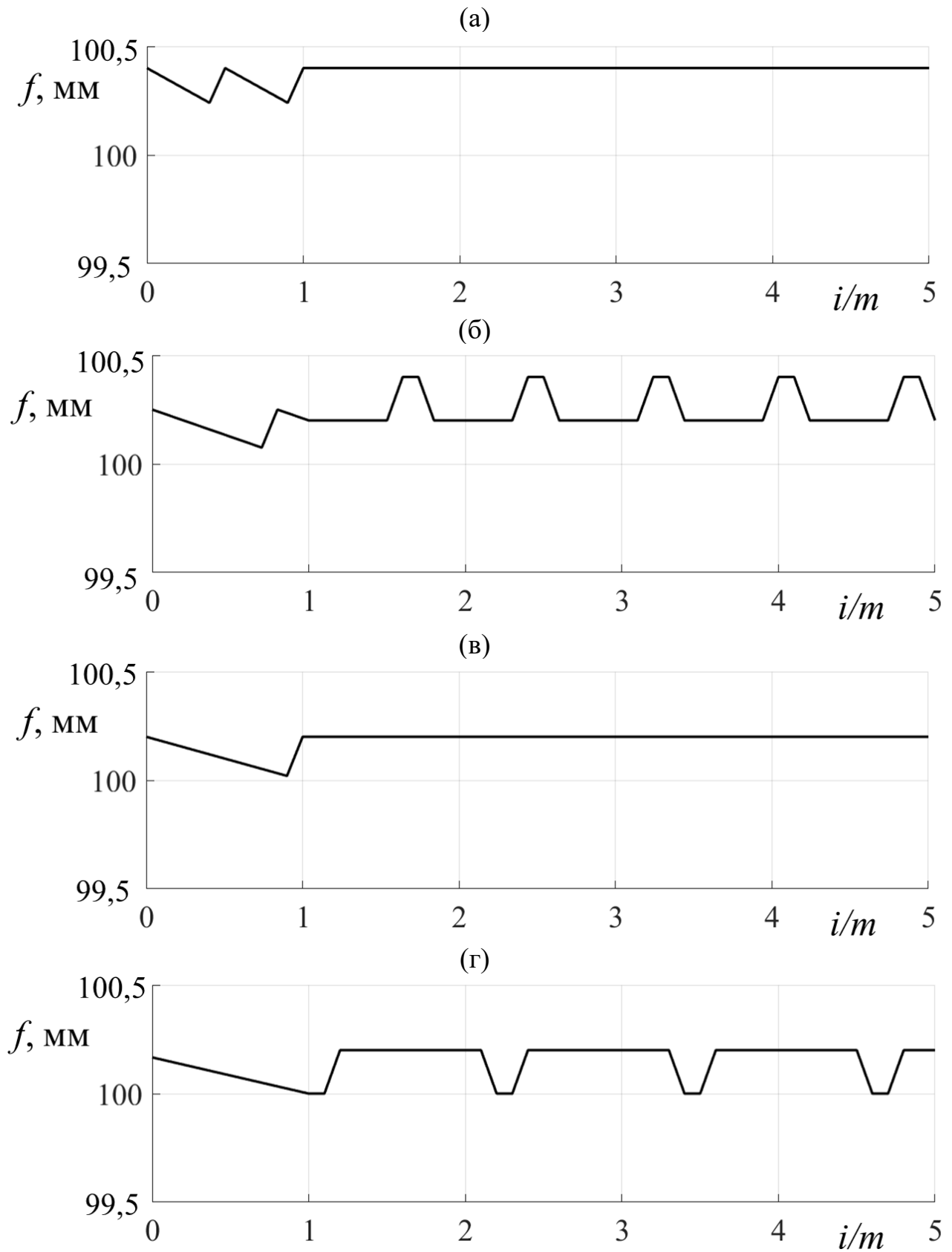


Рисунок 4.15 – Стабилизация перемещения при работе по алгоритму 1 при периодическом внешнем воздействии: (а) $l = 5$; (б) $l = 8$; (в) $l = 10$; (г) $l = 12$.

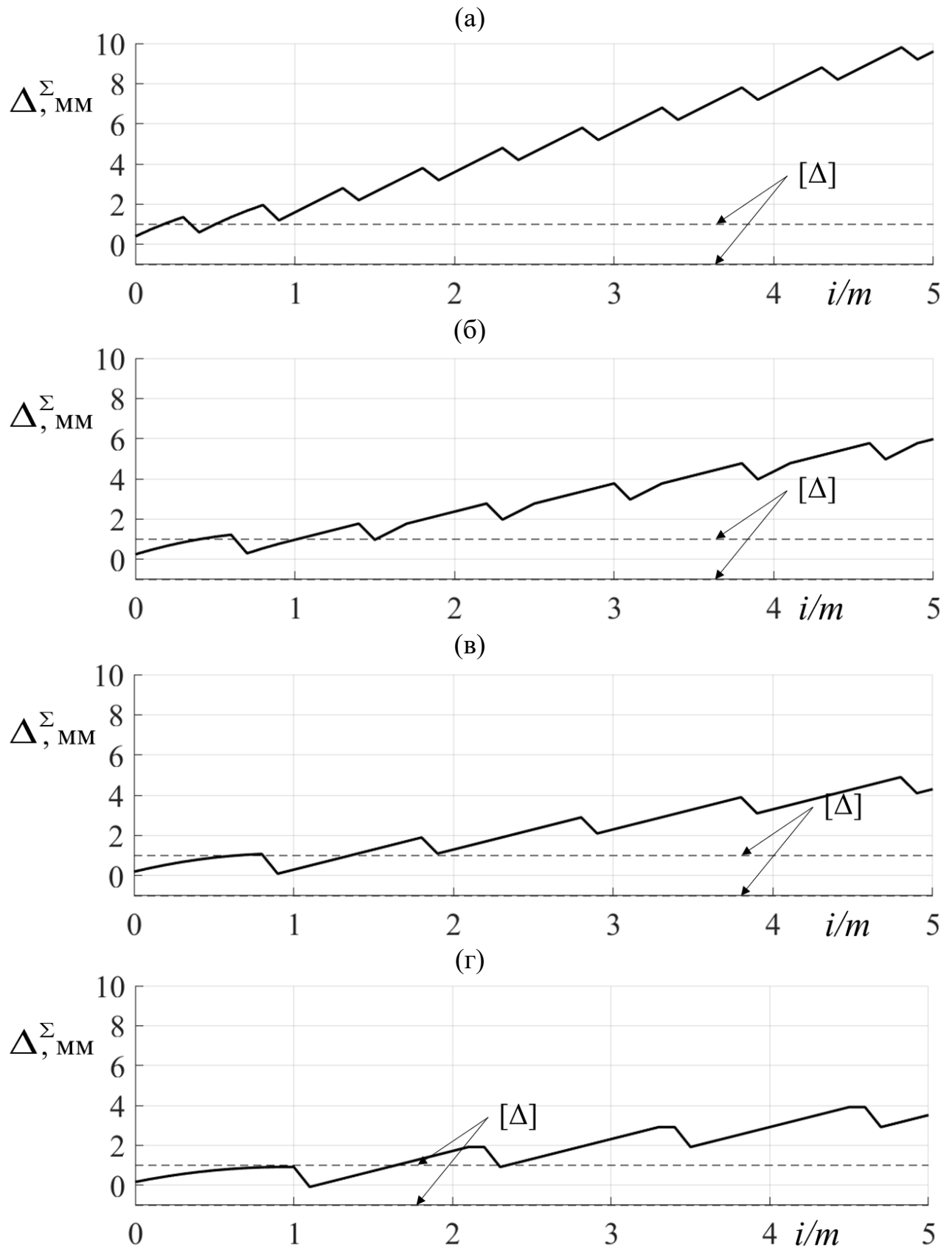


Рисунок 4.16 – Смещение фотометки при работе по алгоритму 1 при периодическом внешнем воздействии: (а) $l = 5$; (б) $l = 8$; (в) $l = 10$; (г) $l = 12$

Далее, рассмотрим влияние периодического воздействия на смещение контейнеров относительно инструментов сварки и вырубки. Поскольку среднее значение f величины перемещения при наличии стыков увеличивается, опираясь на выражение (3.2) можно сделать вывод, что в таком случае выражения (3.3) для расчета расстояний между станцией формовки и станциями термосварки p_w и вырубки p_c не подходят. Чтобы удовлетворить условиям (3.8) и избежать аварий, необходимо учитывать наличие стыка при выборе позиций станций термосварки и вырубки. Положения станций с учетом ширины d стыка и частоты l его появления, очевидно, проще всего учитывать с помощью выражений, приведенных ниже.

$$\begin{aligned} p_w &= m_1 (A + 2d/l), \\ p_c &= m_2 (A + 2d/l). \end{aligned} \quad (4.39)$$

Получим смещения контейнеров относительно станций сварки и вырубки при наличии периодического внешнего воздействия для параметров (4.36). Результаты (рисунок 4.17 и рисунок 4.18) свидетельствуют о том, что выражения (4.39) позволяют подобрать положения станций таким образом, чтобы избежать аварий при работе автоматической линии и не допустить смещения контейнеров к краям инструмента, а в некоторых случаях (когда период l появления стыка является величиной, кратной длине n массива) смещение контейнера относительно инструментов отсутствует.

Таким образом, по результатам моделирования работы автоматической линии под управлением алгоритма 1 при наличии периодического внешнего воздействия, можно сделать вывод о том, что данный алгоритм не подходит для решения задачи автоматической сборки изделий из двух лент на автоматической упаковочной линии, так как он не позволяет остановить смещение этикетки относительно контейнера. При этом аварийной остановки технологического оборудования не будет, так как смещения контейнеров относительно технологических станций находится в допустимых пределах.

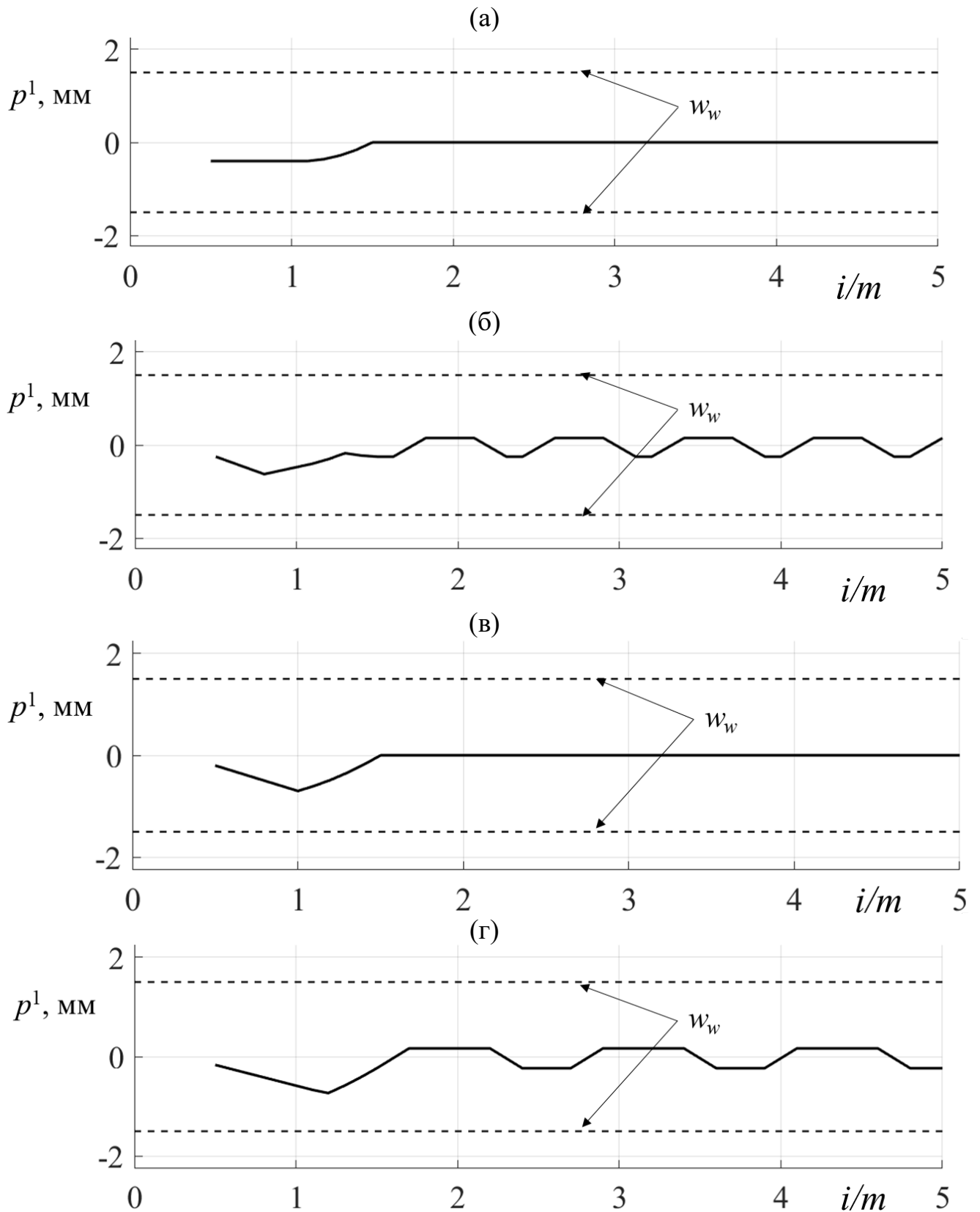


Рисунок 4.17 – Смещение контейнера относительно инструмента термосварки при периодическом внешнем воздействии: (а) $l = 5$; (б) $l = 8$; (в) $l = 10$; (г) $l = 12$.

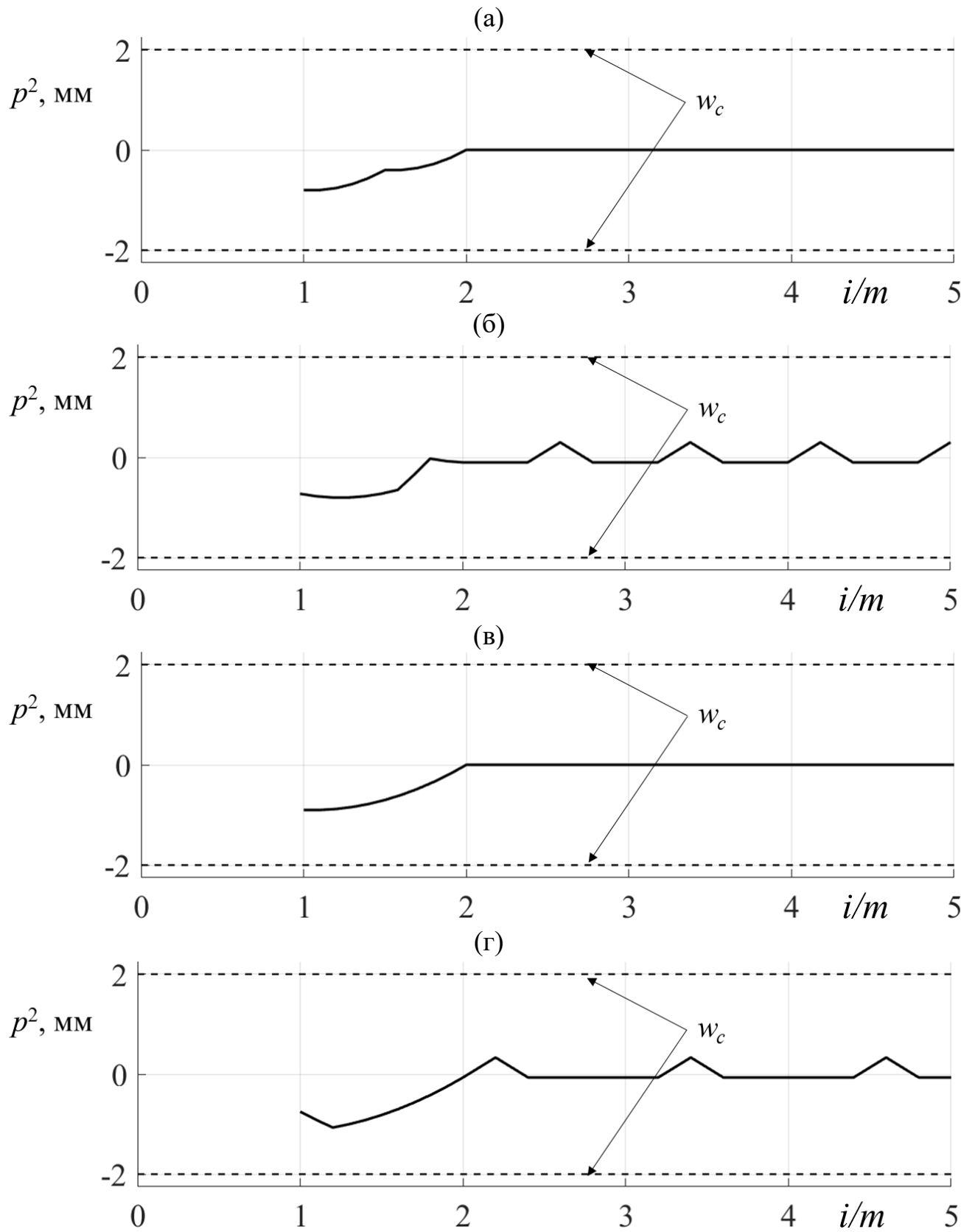


Рисунок 4.18 – Смещение контейнера относительно инструмента вырубki при периодическом внешнем воздействии: (а) $l = 5$; (б) $l = 8$; (в) $l = 10$; (г) $l = 12$.

Далее рассматривается реализация работы алгоритма 2 при периодическом внешнем воздействии для того же набора параметров, что и для алгоритма 1.

На рисунке 4.19 показана реализация работы алгоритма при различной частоте внешнего воздействия (появления стыка). При использовании алгоритма 2 величина перемещения f изменяется, как и в случае использования алгоритма 1. Но претерпевают изменения выражения (4.37) для максимального и минимального значения перемещения в зависимости от величины стыка и частоты его появления в связи с тем, что при использовании алгоритма 2 величина d стыка не удваивается при попадании в массив измерений S :

$$\begin{aligned} \min(f) &= A + \frac{d}{n} \operatorname{div}(n, l), \\ \left[\begin{aligned} \max(f) &= \min(f) && \text{if } \operatorname{mod}(n, l) = 0. \\ \max(f) &= A + \frac{d}{n} (\operatorname{div}(n, l) + 1) && \text{else.} \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (4.40)$$

Далее рассмотрим смещение фотометки при периодическом внешнем воздействии. Результаты моделирования, показанные на рисунке 4.20, свидетельствуют о том, что смещения фотометки при использовании алгоритма 2 остаются в области допустимых значений для всех рассмотренных периодов l внешнего воздействия.

Рассмотрим влияние периодического внешнего воздействия на смещение контейнеров относительно инструментов сварки и вырубки. В данном случае, как и при использовании алгоритма 1, имеет место увеличение среднего значения f величины перемещения. В связи с этим, также необходимо вносить изменение в положение станций термосварки и вырубки относительно станции формовки. Для определения требуемого смещения используются следующие формулы:

$$\begin{aligned} p_w &= m_1 (A + d/l), \\ p_c &= m_2 (A + d/l). \end{aligned} \quad (4.41)$$

Отличие от использованных ранее формул (4.39) также объясняется тем, что в при использовании алгоритма 2 величина d стыка не удваивается при попадании в массив S , как в случае с алгоритмом 1 (4.13).

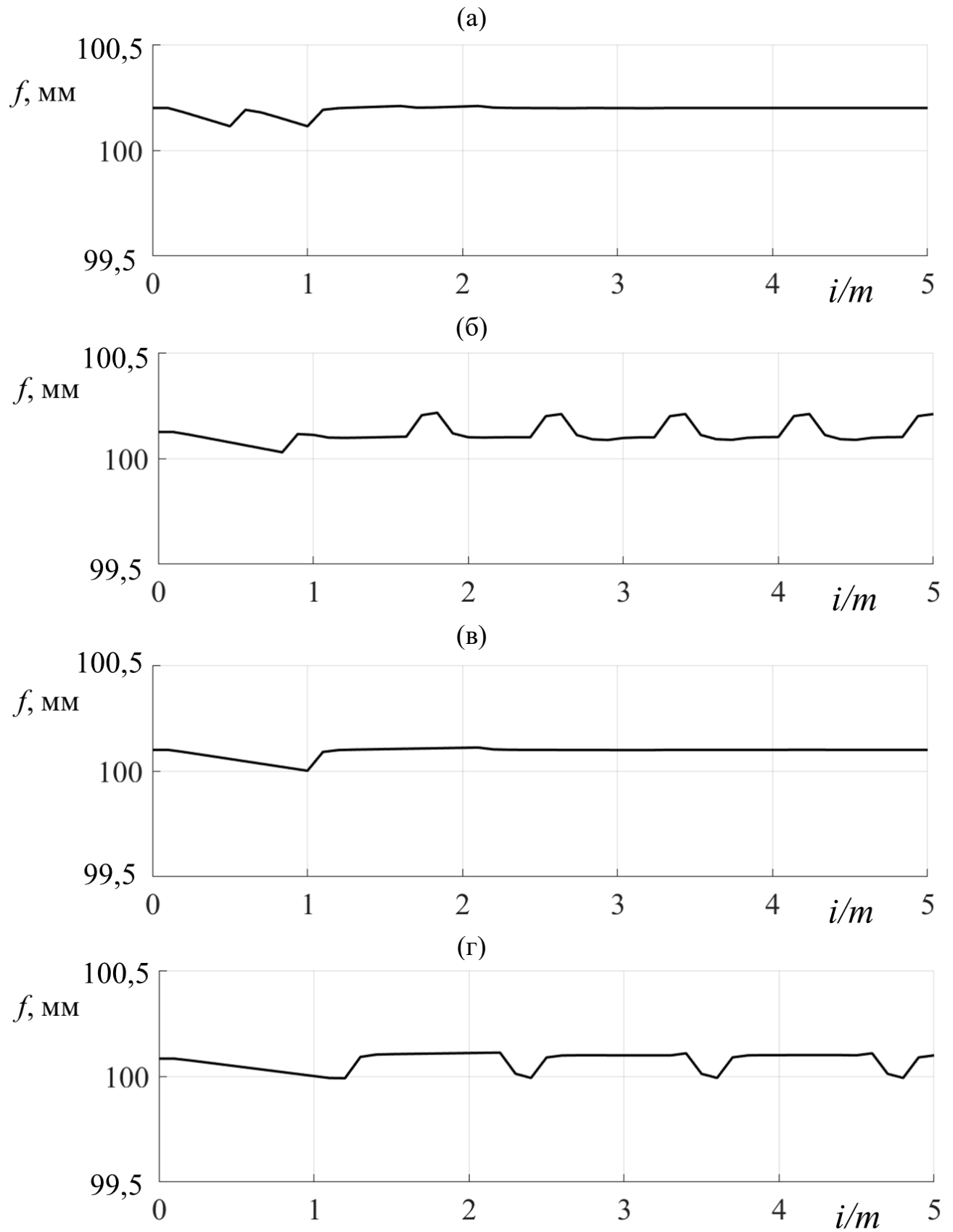


Рисунок 4.19 – Стабилизация перемещения при работе по алгоритму 2 при периодическом внешнем воздействии: (а) $l = 5$; (б) $l = 8$; (в) $l = 10$; (г) $l = 12$.

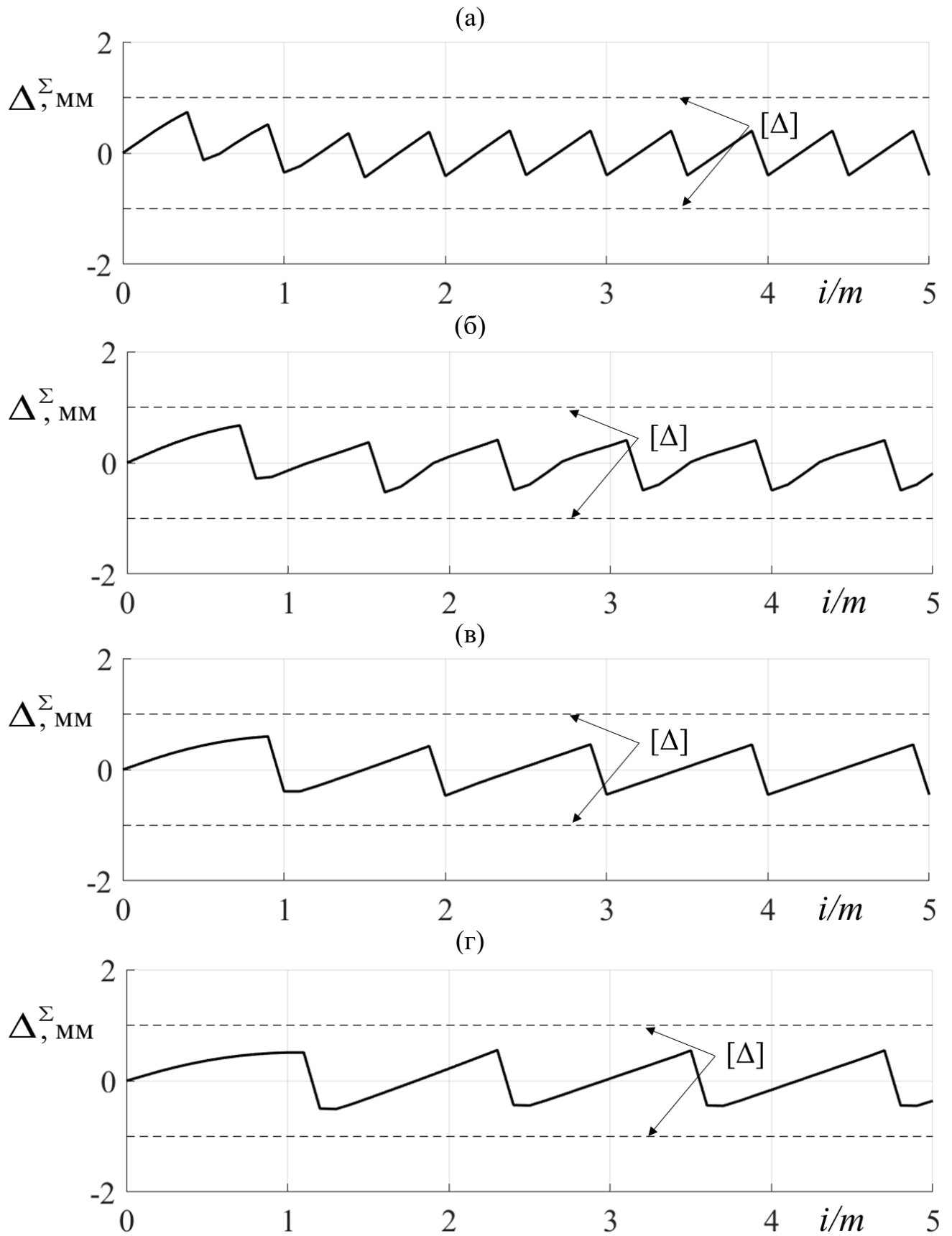


Рисунок 4.20 – Смещение фотометки при периодическом внешнем воздействии:

(а) $l = 5$; (б) $l = 8$; (в) $l = 10$; (г) $l = 12$

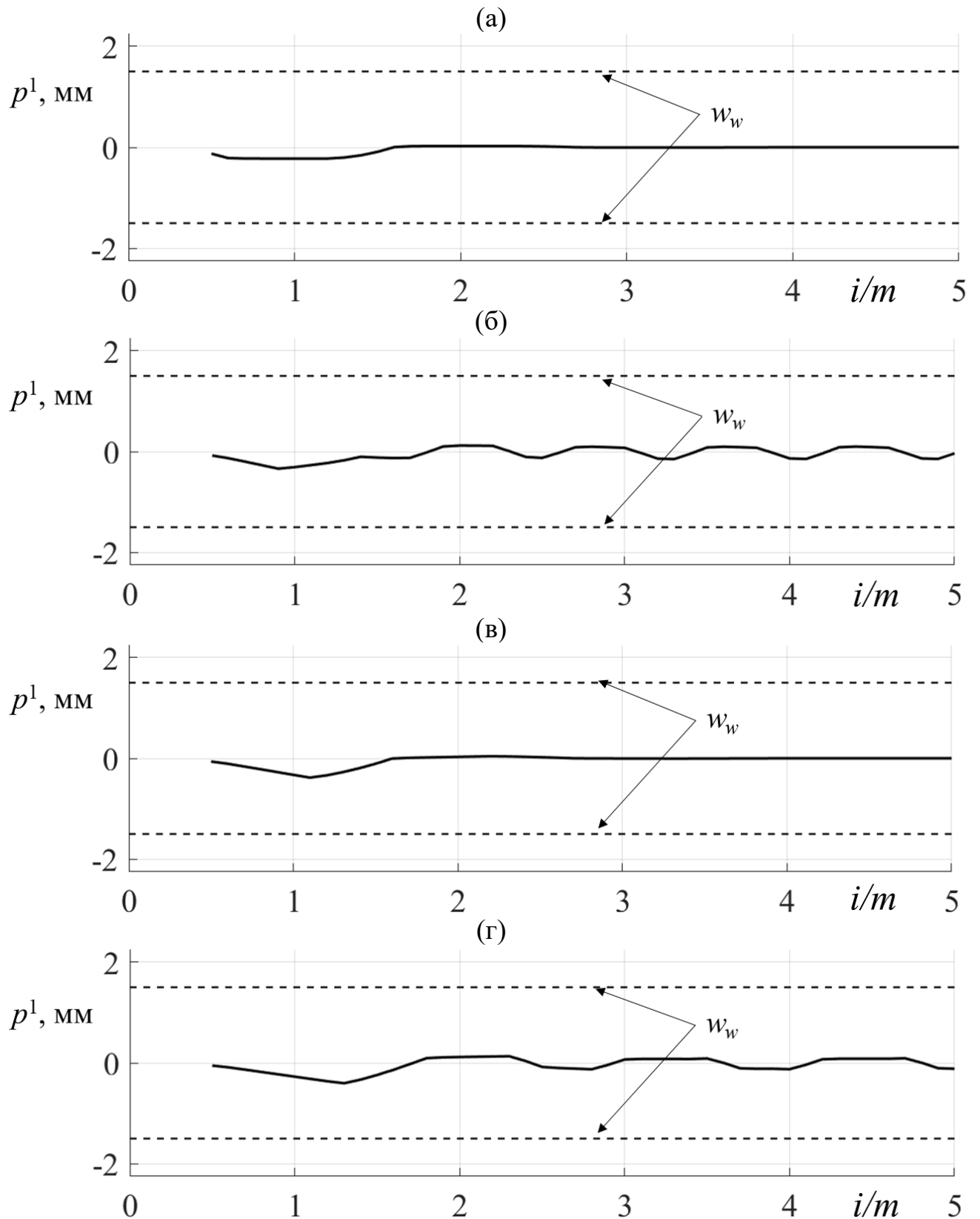


Рисунок 4.21 – Смещение контейнера относительно инструмента термосварки при периодическом внешнем воздействии: (а) $l = 5$; (б) $l = 8$; (в) $l = 10$; (г) $l = 12$.

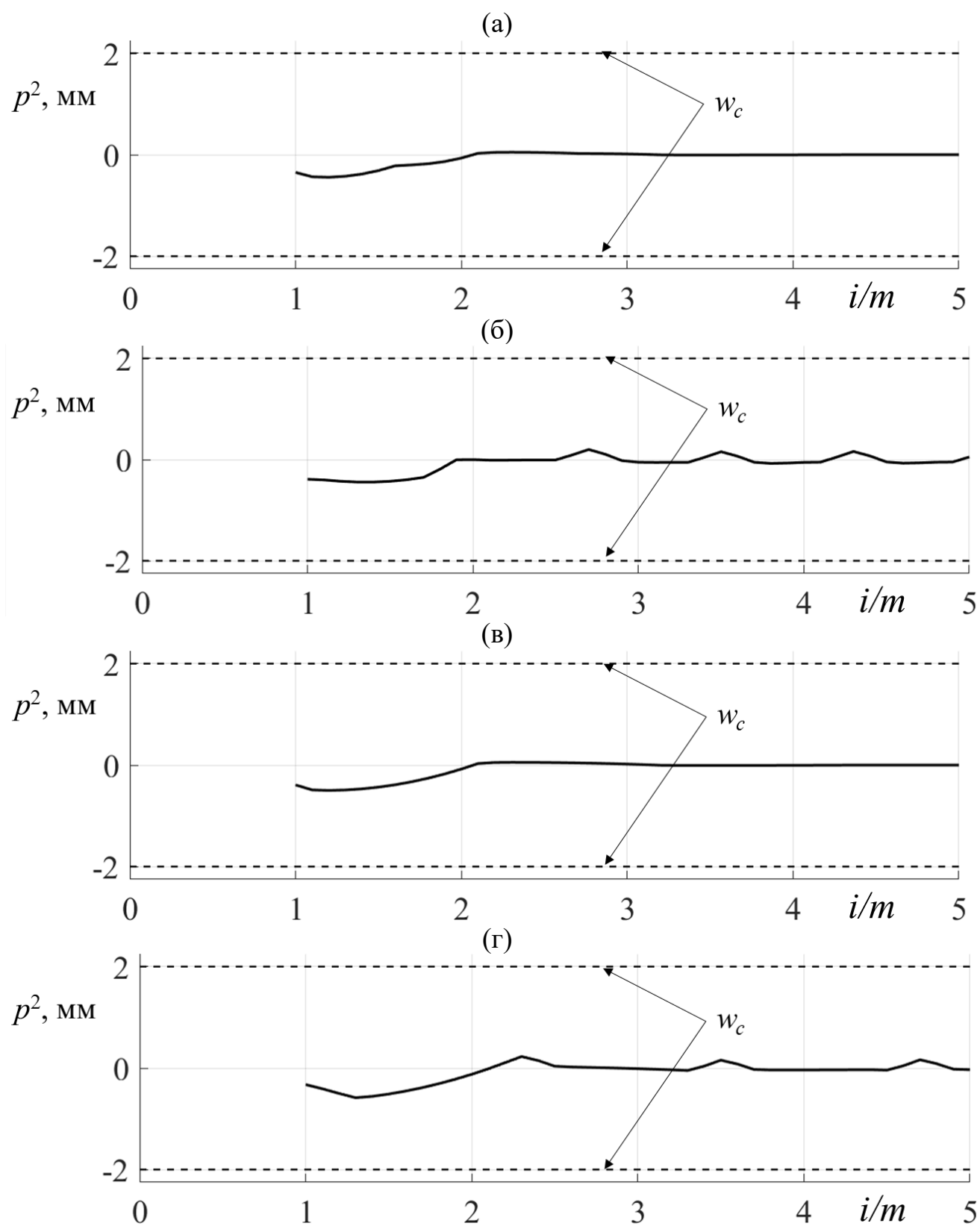


Рисунок 4.22 – Смещение контейнера относительно инструмента вырубki при периодическом внешнем воздействии: (а) $l = 5$; (б) $l = 8$; (в) $l = 10$; (г) $l = 12$.

Результаты, представленные на рисунках 4.21 и 4.22 показывают, что используемые формулы позволяют подобрать положение силовых станций таким образом, что наличие стыка печати не приводит к возникновению аварийных ситуаций.

Далее моделируется работа системы по алгоритму 3 при наличии периодического внешнего воздействия. Используется следующий набор параметров:

$$m = 10; L = 50 \text{ мм}; d = 1 \text{ мм}; l = [5; 8; 10; 12];$$

$$[\Delta] = 1 \text{ мм}; f_0 = 100 \text{ мм}; w_w = 1,5 \text{ мм}; w_w = 2,0 \text{ мм}.$$

Результаты численного моделирования, представленные на рисунке 4.23 показывают, что величина перемещения при периодическом внешнем воздействии также изменяется периодически около среднего значения, которое можно вычислить с помощью следующей формулы:

$$\bar{f} = 2L + d/l. \quad (4.42)$$

Численное моделирование смещения фотометки при периодическом внешнем воздействии показано на рисунке 4.24. Из полученных результатов видно, что при заданных параметрах смещение фотометки остается в области допустимых значений для всех рассмотренных периодов возникновения стыка печати. Далее рассмотрим смещения контейнеров относительно инструментов на станциях термосваривания и вырубки, предварительно отметив, что положения этих станций при наличии стыков печати так же, как и в случае алгоритма 2 рассчитываются с помощью выражений (4.41).

На рисунках 4.25 и 4.26 показаны смещения контейнеров относительно инструментов термосваривания и вырубки при периодическом внешнем воздействии. Численное моделирование показывает, что смещение контейнеров остается в допустимых пределах для всех рассмотренных случаев частоты возникновения стыка печати.

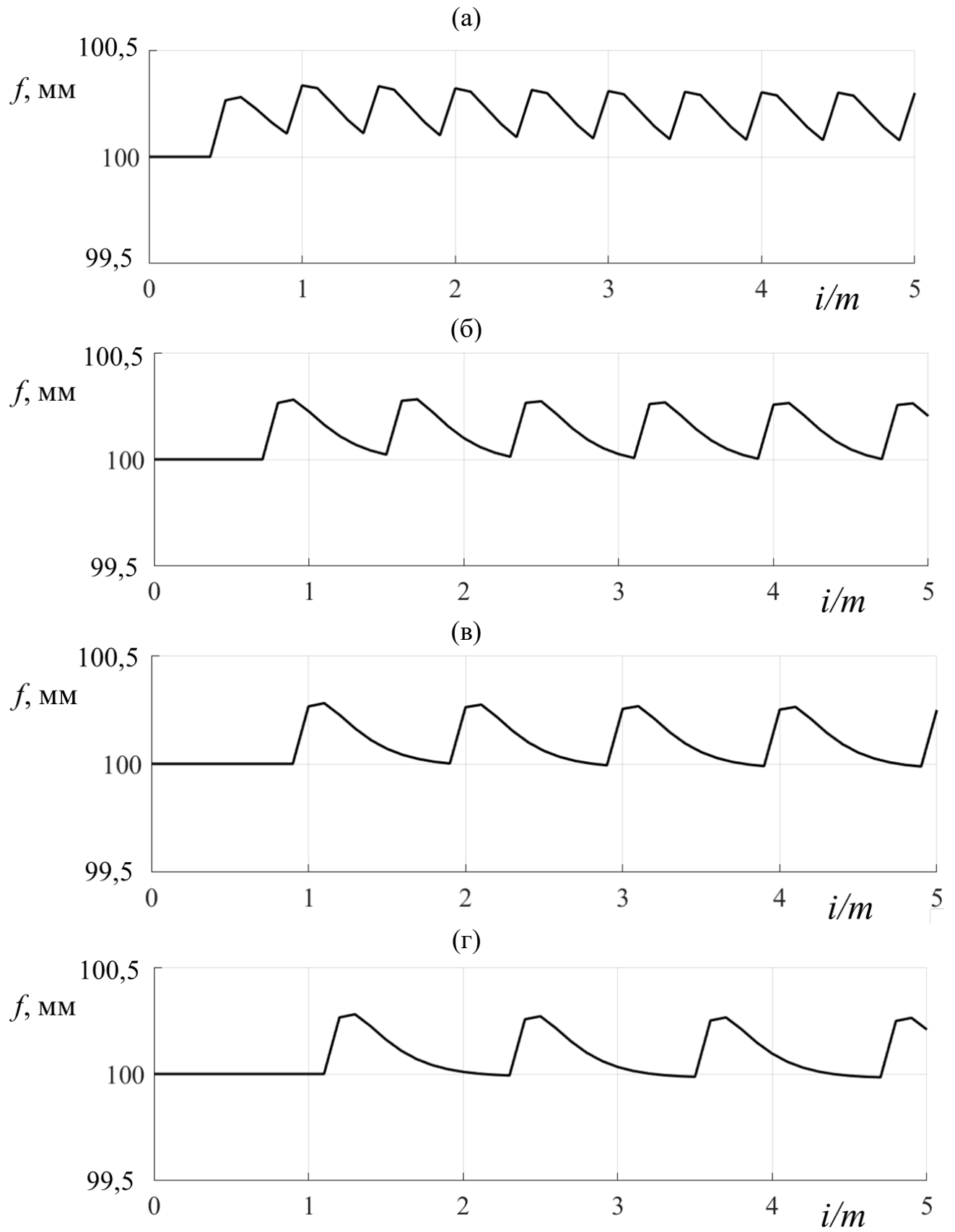


Рисунок 4.23 – Стабилизация перемещения при работе по алгоритму 3 при периодическом внешнем воздействии: (а) $l = 5$; (б) $l = 8$; (в) $l = 10$; (г) $l = 12$.

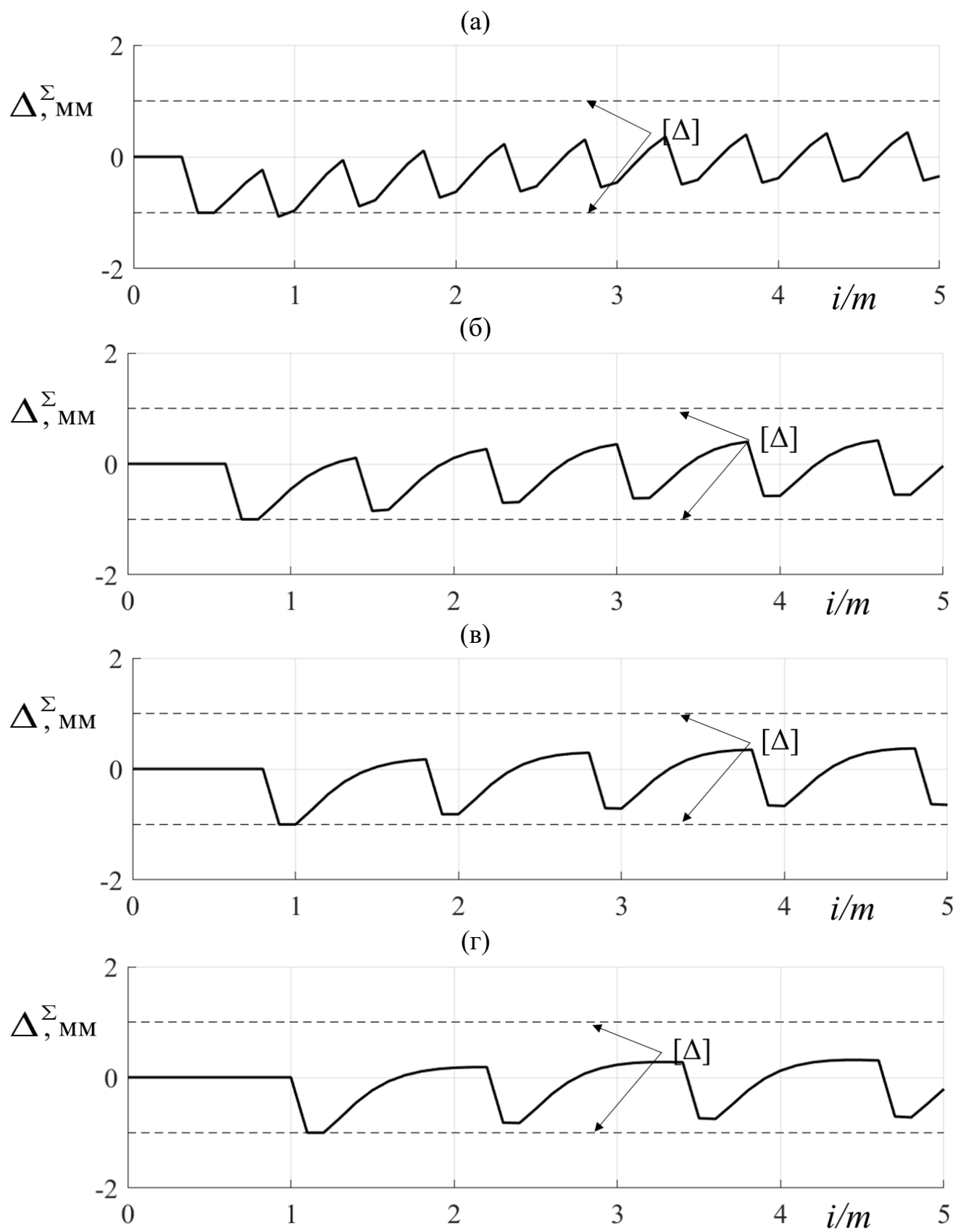


Рисунок 4.24 – Смещение фотометки при работе по алгоритму 3 при периодическом внешнем воздействии: (а) $l = 5$; (б) $l = 8$; (в) $l = 10$; (г) $l = 12$.

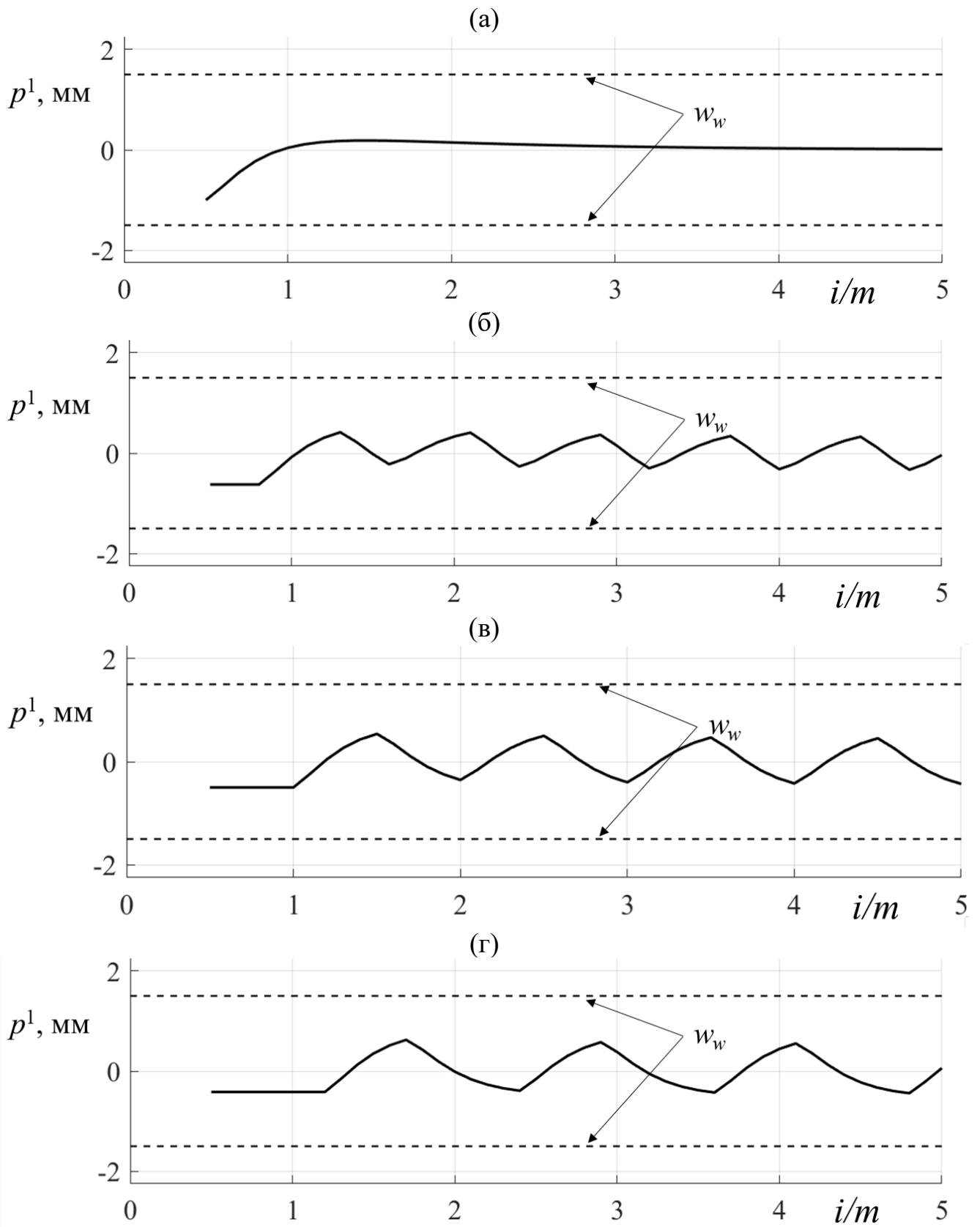


Рисунок 4.25 – Смещение контейнера относительно инструмента термосварки при периодическом внешнем воздействии: (а) $l = 5$; (б) $l = 8$; (в) $l = 10$; (г) $l = 12$.

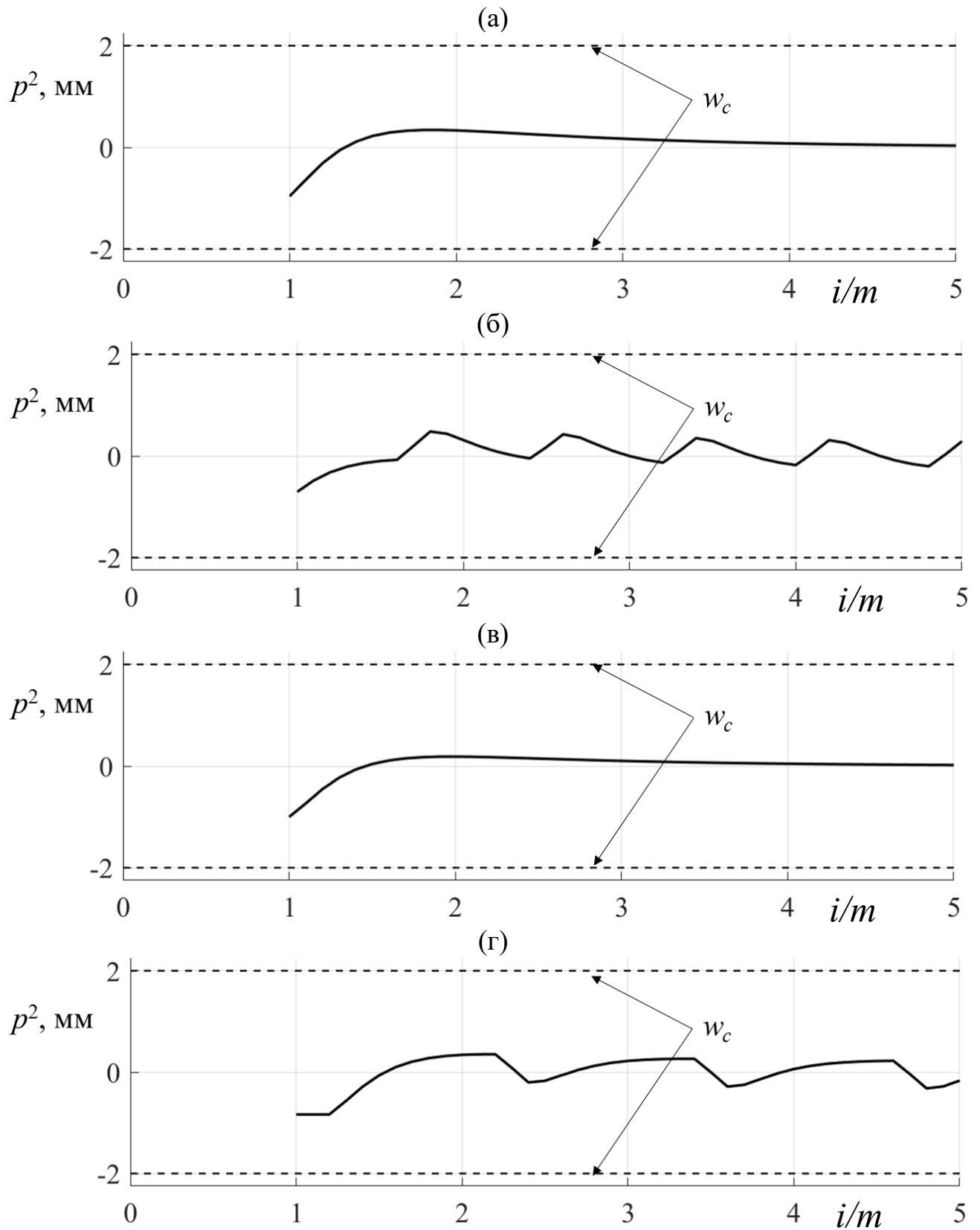


Рисунок 4.26 – Смещение контейнера относительно инструмента вырубki при периодическом внешнем воздействии: (а) $l = 5$; (б) $l = 8$; (в) $l = 10$; (г) $l = 12$.

4.6 Результаты и выводы

1. Для предложенной электромеханической системы разработано три алгоритма расчета величины перемещения двух лент приводом протягивания на автоматической упаковочной линии, позволяющих позиционировать ленты относительно технологических станций и друг относительно друга.

2. Алгоритмы 1 и 2 основываются на усреднении показаний измерительной системы каждый по своему сформулированному определенному правилу. Как показали исследования и выполненное численное моделирование, эти алгоритмы обеспечивают попадание контейнеров в инструменты станций термосваривания и вырубки, а также удержание фотометки (и этикетки) в определенном положении, но не позволяют сместить этикетку в заданную позицию, то есть совместить этикетку и контур контейнера. Для решения этой задачи автором предложен дополнительный алгоритм смещения одной ленты относительно другой.

3. Алгоритм 3 построен на базе ПИ-регулятора и позволяет обеспечить попадание контейнеров в инструменты и удерживать фотометку в заданном положении без использования дополнительных алгоритмов коррекции ее положения и обладает большой гибкостью настройки за счет наличия в нем нескольких изменяемых параметров.

4. Анализ эффективности предложенных алгоритмов расчета перемещения двух лент приводом проводился при помощи дискретной математической модели этого процесса, описанной в главе 3. Было выполнено моделирование работы автоматической линии с использованием предложенных алгоритмов при различных внешних воздействиях: изменение шага печати этикетки, склейка верхней ленты, периодическая погрешность печати и случайное воздействие, вызванное погрешностями измерительной системы.

5. В результате компьютерного моделирования работы алгоритмов было показано, что они могут быть применены на упаковочной линии для

позиционирования контейнеров относительно технологических станций и двух лент друг относительно друга. Выполненные численные эксперименты позволили определить параметры алгоритмов, обеспечивающие стабильную и безаварийную работу технологического оборудования. Необходимо заметить, что при использовании алгоритма 1 и наличии периодического внешнего воздействия не удалось определить величину перемещения лент, при которой фотометка оставалась бы в постоянном положении.

6. Для подтверждения выдвинутых предположений и полученных результатов необходимо провести экспериментальное исследование работы автоматической упаковочной линии с предложенной электромеханической системой и расчетом величины перемещения лент с помощью разработанных алгоритмов. Требуется собрать ее прототип и подготовить соответствующие программы управления для испытательного стенда.

ГЛАВА 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МЕХАНИЗМОВ И МЕТОДА ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ ЛЕНТ

В ходе экспериментального исследования ставились задачи провести производственные испытания разработанного механизма разматывания и протягивания рулонного материала, экспериментальное исследование электромеханической системы перемещения лент на упаковочной линии и метода оценки положения лент. Для механизма разматывания и протягивания целью было подтвердить его работоспособность и обеспечение натяжения рулонного материала при дискретной работе оборудования. Для электромеханической системы в свою очередь необходимо подтвердить применимость дискретной математической модели для описания процесса автоматической оценки технического состояния автоматической линии, адекватность и работоспособность предложенных алгоритмов расчета величины перемещения лент. Для этого на базе имеющегося в ИМАШ РАН стенда «Автоматическая линия блистерной упаковки АЛБ 165» были собраны прототипы разработанного механизма разматывания и протягивания рулонного материала и электромеханической системы перемещения двух лент. В соответствии с описанными алгоритмами подготовлены программы управления для автоматической упаковочной линии. Испытания синтезированного механизма показало его соответствие заявленным характеристикам. Экспериментальное исследование предложенных автором алгоритмов для электромеханической системы показало, что математическая модель соответствует описываемому процессу, а алгоритмы управления позволяют решить задачу расчета величины перемещения лент и их позиционирования на автоматической упаковочной линии.

5.1 Экспериментальная установка

Для экспериментального исследования разработанной электромеханической системы и механизма разматывания и протягивания рулонных материалов использовался имеющийся в ИМАШ РАН стенд «Автоматическая линия блистерной упаковки АЛБ165», внешний вид которого представлен на рисунке 5.1 [77, 78]. Этот стенд конструктивно и функционально соответствует одноименной упаковочной линии, серийно выпускаемой ООО фирма «Рекупер». Подобное оборудование используется в пищевом производстве для фасовки и упаковки жидких и полужидких продуктов в термоформуемые контейнеры. Производительность линии составляет от 4000 до 11000 упаковок в час в зависимости от размеров изготавливаемых контейнеров.

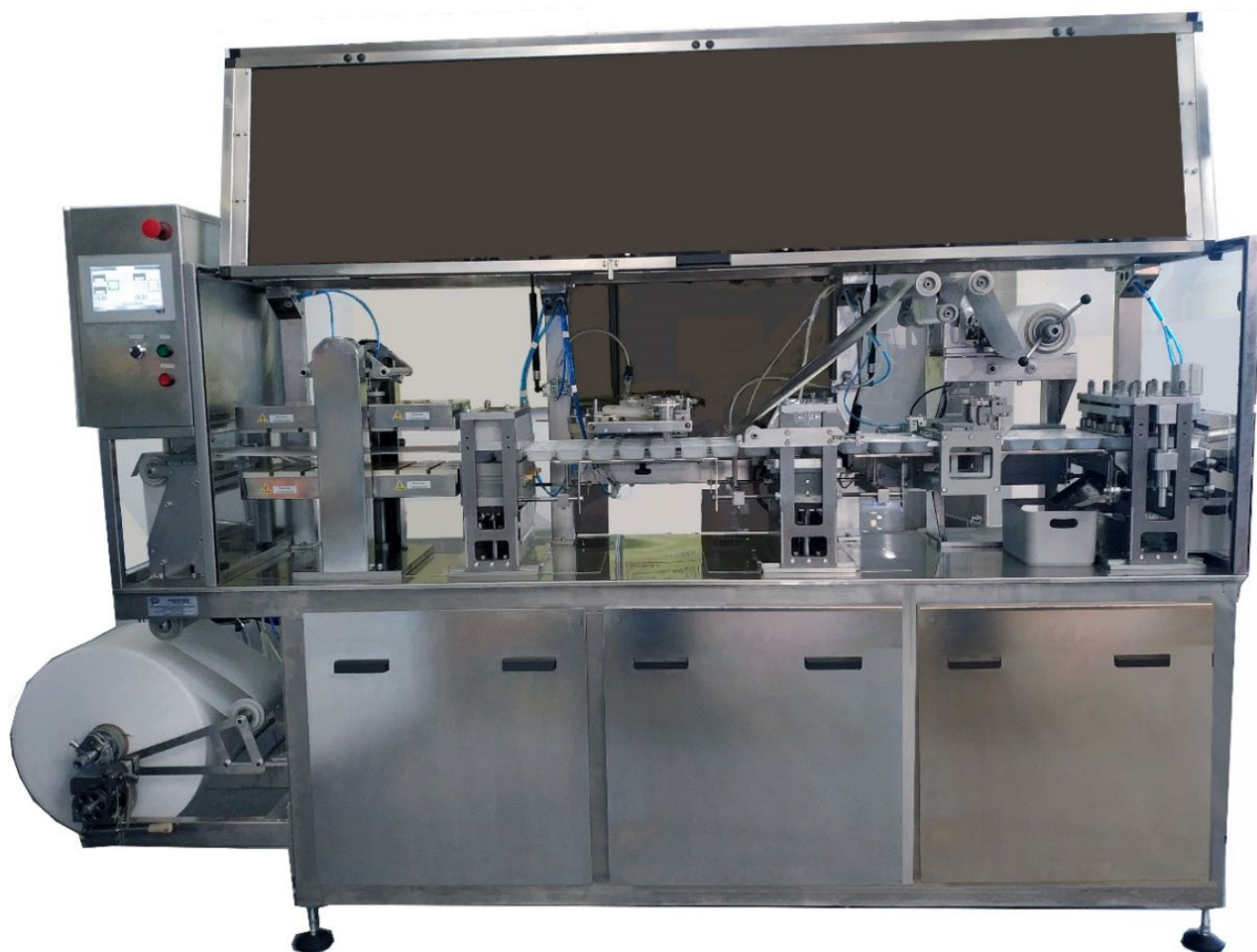


Рисунок 5.1 – Автоматическая линия блистерной упаковки АЛБ165.

Разработанная электромеханическая система перемещения, обеспечивающая совмещение компонентов сборки расположенных на двух лентах вместе с синтезированным в главе 2 устройством разматывания и протягивания рулонного материала были установлены на экспериментальный стенд. Новая электромеханическая система перемещения двух лент была построена с использованием следующих основных комплектующих:

- Сервопривод Mitsubishi HG-KN43JK-S100 с дифференциальным инкрементальным энкодером;
- Серводрайвер Mitsubishi MR-JE-40A;
- Линейный модуль CTМУ-2/0210/101000 с шагом шариковинтовой передачи 10 мм (производитель ООО «ЗМИ»);
- Фотоэлектрический датчик метки Omron E3ZM-V86 OMS;
- Панель управления B&R Automation 4PPC70.0702-20W с интегрированным контроллером, оснащенный процессором Intel Atom 333 MHz.

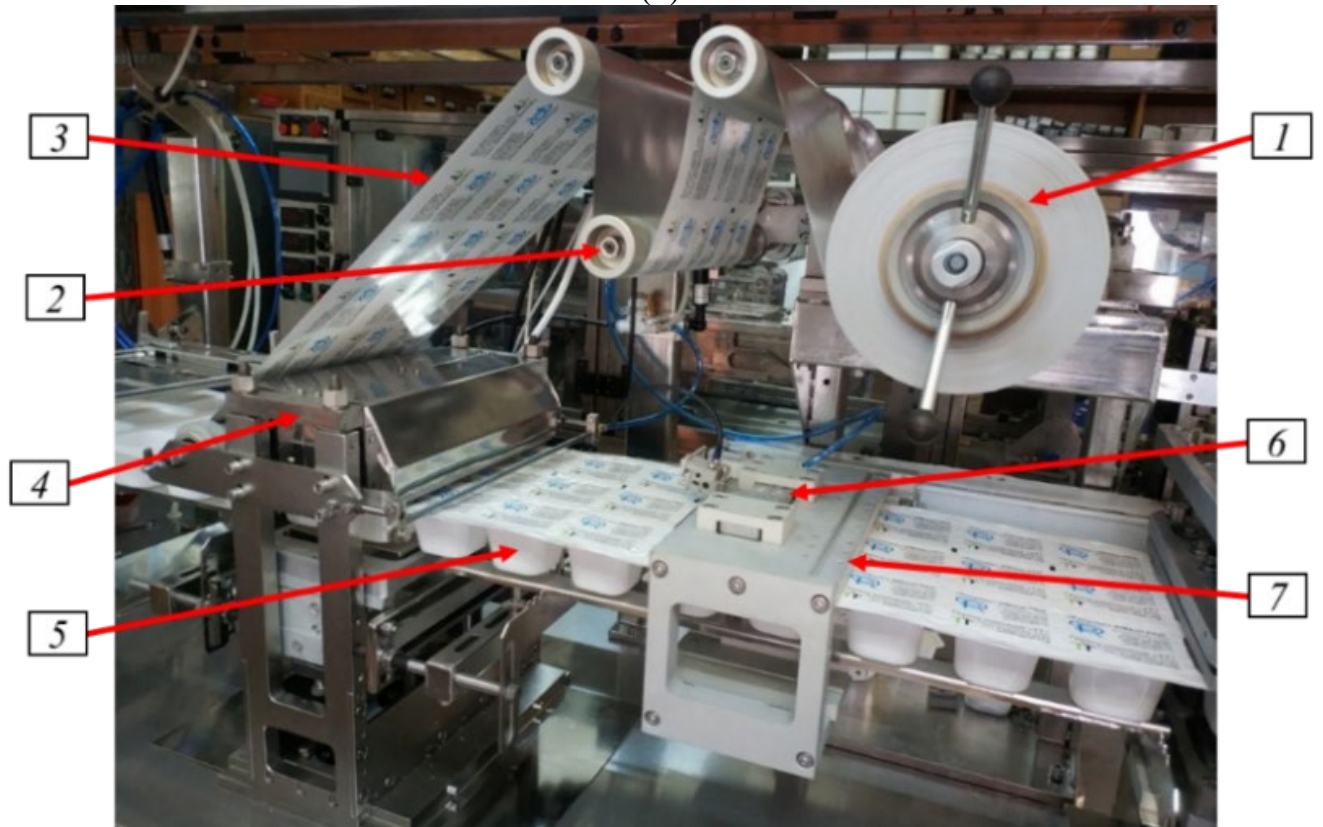
5.2 Испытания механизма разматывания и протягивания рулонного материала в дискретном режиме

Для проверки результатов расчетов и выполненного моделирования в ИМАШ РАН в соответствии с кинематической схемой (рисунок 2.2) был изготовлен опытный образец механизма. Внешний вид и основные конструктивные элементы показаны на рисунке 5.2. Фрагмент сборочного чертежа с основными размерами представлен на рисунке 5.3. Изготовленный механизм имеет следующие геометрические параметры:

$$a = 30 \text{ мм}; b = 210 \text{ мм}; R_0 = 150 \text{ мм}; r_B = 40 \text{ мм};$$

$$l_1 = 50 \text{ мм}; l_2 = 110 \text{ мм}; l_0 = 100 \text{ мм}; L = 80 \text{ мм}.$$

(а)



(б)

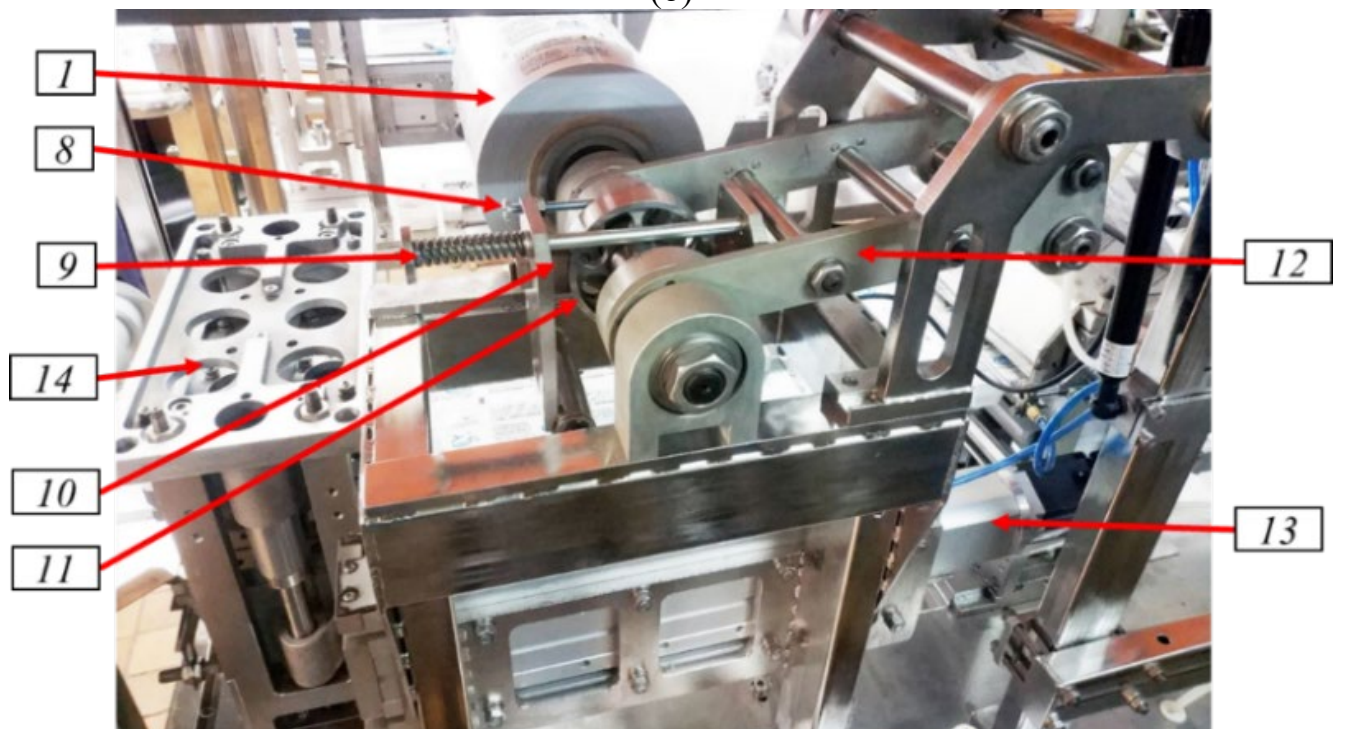


Рисунок 5.2 – Реализованное устройство: (а) вид спереди; (б) вид сзади:
 1 – рулон покровного материала; 2 – натяжной ролик; 3 – покровная лента с этикетками; 4 – технологическая станция соединения лент; 5 – лента с отформованными контейнерами; 6 – пневматический захват лент; 7 – подвижная каретка; 8 – регулируемый упор; 9 – пружина; 10 – колодка; 11 – тормозной барабан; 12 – поворотный рычаг с натяжным роликом; 13 – привод протягивания.



Рисунок 5.3 – Фрагмент сборочного чертежа устройства разматывания и протягивания рулонных материалов с основными размерами (в мм).

Испытания разработанного механизма проводились в ИМАШ РАН, где изготовленное устройство было установлено на автоматическую линию блистерной упаковки АЛБ165 [77, 78]. На линии в автоматическом режиме происходит дискретное протягивание рулонных ленточных материалов для их обработки на технологических станциях. Технологическая схема линии показана на рисунке 1.14.

Испытания механизма на современных покровных материалах, таких как микспап (многослойный материал на основе бумаги, фольги и полимерной пленки) и алюминиевая фольга показали, что при их разматывании и протягивании не наблюдается провисание ленты материала. При использовании алюминиевой фольги не наблюдалось пластических деформаций.

Таким образом, подтверждена работоспособность разработанного устройства и соответствие предъявляемым требованиям. Исходя из этого, оно может быть использовано для разматывания и протягивания рулонного материала в дискретном режиме на автоматических упаковочных линиях.

5.3 Планирование экспериментального исследования системы перемещения двух лент и метода оценки их положений

Первая цель экспериментального исследования заключается в валидации разработанной математической модели процесса перемещения двух лент и метода оценки их положений на автоматической упаковочной линии. Второй целью является подтверждение выдвинутых в главе 4 предположений о возможности использования разработанных алгоритмов для автоматического позиционирования компонентов сборки относительно технологических станций и друг относительно друга.

Для достижения поставленных целей необходимо на экспериментальной установке провести натурные испытания каждого алгоритма расчета

перемещения привода. Полученные результаты следует сравнить с результатами численного моделирования при аналогичных параметрах системы и начальных условиях. В случае совпадения результатов экспериментального исследования и численного моделирования, можно утверждать, что поставленные цели экспериментального исследования достигнуты [103, 104].

Для контроля работы алгоритмов расчета перемещения привода были получены образцы изделий и измерено действительное расстояние между фотометками после всех технологических операций. Было получено значение $L = 70,45$ мм. Таким образом, требуемая величина перемещения f равна $2L = 140,9$ мм. Эти значения были использованы при компьютерном моделировании эксперимента для верификации математической модели [105].

Для наглядности эксперимента рассмотрим случай наладки автоматической линии (раздел 3.2), при которой не будет использован алгоритм коррекции положения покровной ленты совместно с алгоритмами 1 и 2. При их использовании на начальном этапе массив $\mathbf{S}$ заполняется одинаковыми значениями, близкими к действительному удвоенному расстоянию между фотометками и обычно соответствующими удвоенному номинальному шагу печати этикеток. Эта величина известна из спецификации, предоставляемой производителем этикетки. Напомним, что при наладке используется режим работы автоматической линии, при котором не происходит формование контейнеров. Это сделано для того, чтобы избежать аварийных остановок линии, вызванных замятием контейнеров в станциях термосваривания и вырубки, когда начальное значение величины перемещения существенно отличается от расстояния между фотометками после технологических операций.

Для алгоритмов 1 и 2 проводилось по 2 эксперимента – в первом случае массив заполнен значениями, которые больше требуемой величины перемещения, во втором случае значениями меньшими, чем требуемая величина перемещения.

$$\begin{aligned} 1. \mathbf{S}^0 &= [141,40 \quad \dots \quad 141,40 \quad \dots \quad 141,40]; \quad f_0 = \bar{S}^0 = 141,40 \text{ мм}, \\ 2. \mathbf{S}^0 &= [140,40 \quad \dots \quad 140,40 \quad \dots \quad 140,40]; \quad f_0 = \bar{S}^0 = 140,40 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Для экспериментального исследования алгоритма 3 использовались параметры T_0 и T_1 подобранные на основании результатов численного моделирования (раздел 4.5). Использовалась пара параметров A (рисунок 4.4), так как с ними были получены наилучшие результаты.

По аналогии с предыдущими алгоритмами, для алгоритма 3 также задаются два варианта начального значения перемещения транспортера – больше расстояния между фотометками на 1 мм и меньше него на ту же величину:

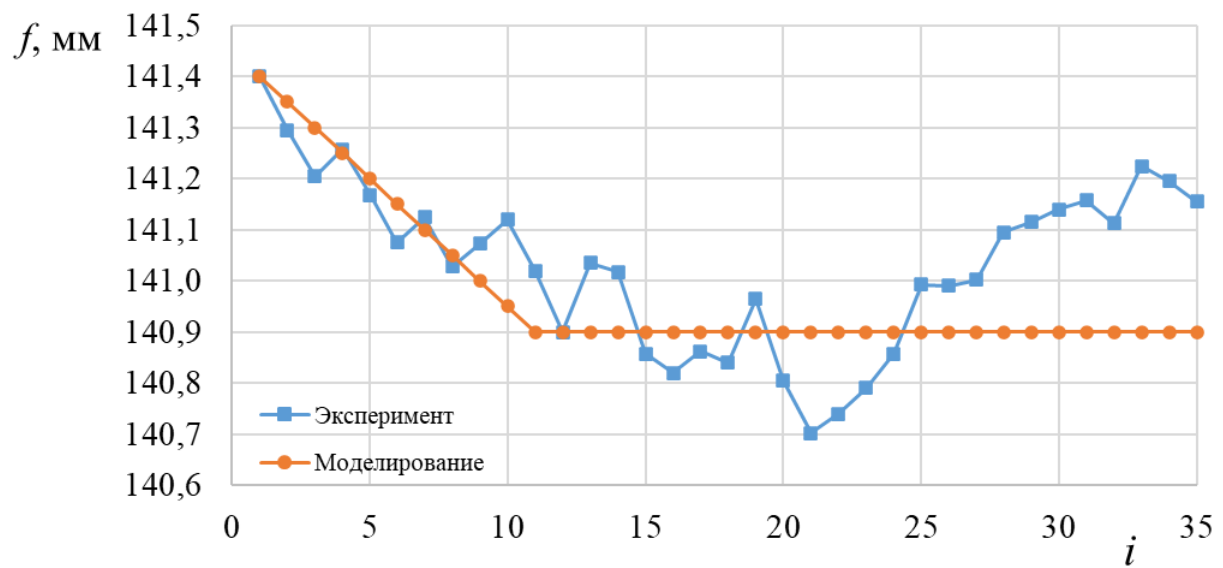
1. $f_0 = 141,4$ мм,
 2. $f_0 = 140,4$ мм.
- (5.2)

5.4 Результаты экспериментального исследования

Далее приводятся результаты проведенных экспериментов и их сравнение с компьютерным моделированием работы системы при аналогичных параметрах и начальных условиях. Ниже представлены результаты для алгоритма 1.

На рисунках 5.4 и 5.5 изображены результаты расчета величины перемещения (рисунки 5.4а и 5.5а) и измерения положения фотометки (рисунок 5.4б, рисунок 5.5б) для начальных условий, указанных в (5.1). Исследование показало, что при использовании алгоритма 1 экспериментально полученные данные имеют довольно большой разброс относительно результатов численного моделирования. Для выявления причины такого несоответствия был проведен эксперимент по определению расстояния между фотометками с помощью используемой измерительной системы, результаты которого показаны в виде гистограммы на рисунке 5.6.

(a)



(б)

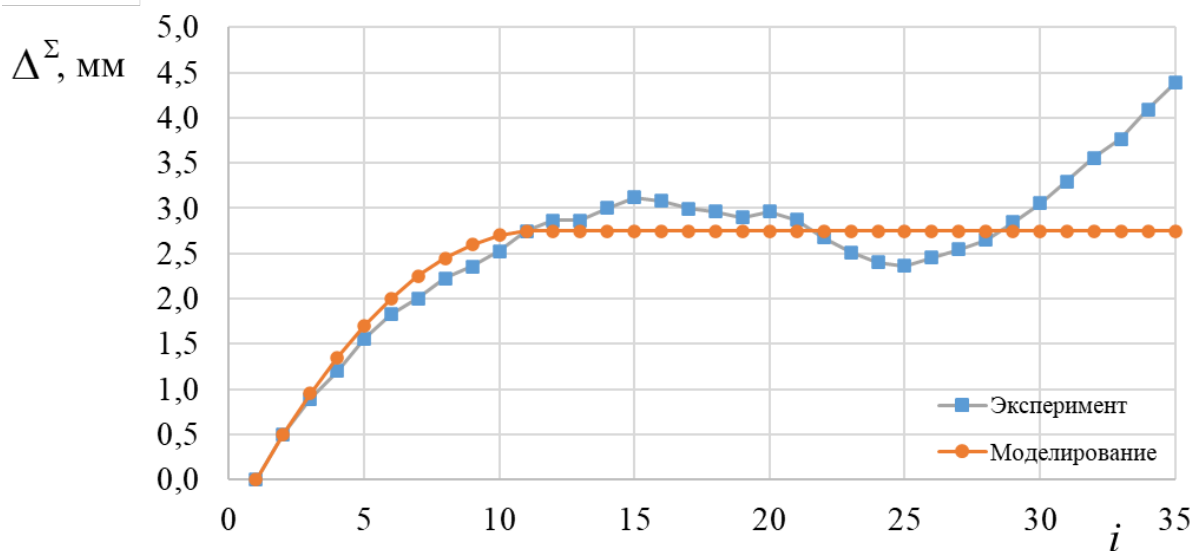


Рисунок 5.4 – Алгоритм 1 эксперимент 1:

а) величина перемещения; б) смещение фотометки.

Результат измерений можно представить в виде нормального распределения со следующими характеристиками [92, 93]:

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

Таким образом расстояние между фотометками по правилу трех сигм [92, 93] равно:

$$L = 70,45 \pm 0,51 \text{ мм}.$$

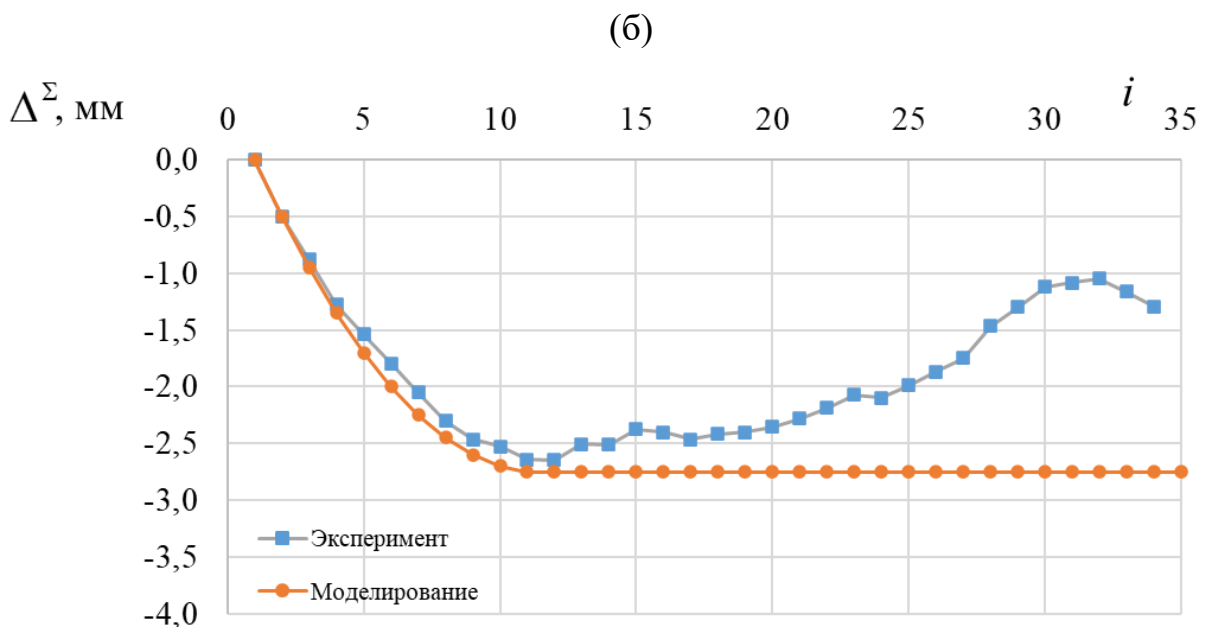
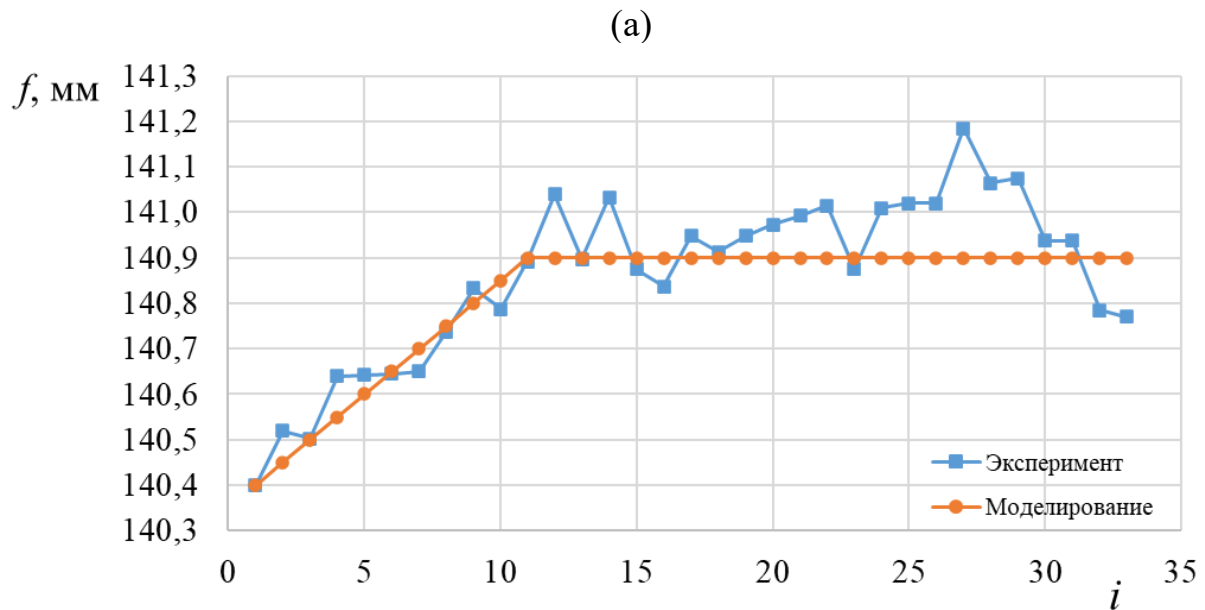


Рисунок 5.5 – Алгоритм 1 эксперимент 2:

а) величина перемещения; б) смещение фотометки.

Полученный результат свидетельствует о том, что расстояние между фотометками, получаемое с помощью измерительной системы имеет существенную погрешность, что сказывается на результатах расчета величины перемещения транспортера. Показания энкодера, на основании которых рассчитывается расстояние между фотометками, считываются в момент срабатывания фотоэлектрического датчика. Он выдает сигнал в систему управления при переходе с фона на контрастную фотометку (рисунок 3.5).

Точность его срабатывания зависит от таких факторов как освещенность, скорость перемещения транспортера, волны на покровном материале, контрастность цветов фона и фотометки. Наличие столь большого числа факторов может быть причиной такой погрешности измерительной системы. Также стоит отметить, что с точки зрения случайного воздействия алгоритм 1 наименее эффективен из трех разработанных алгоритмов. Таким образом, алгоритм 1 невозможно эффективно применять с использованием имеющейся измерительной системы.

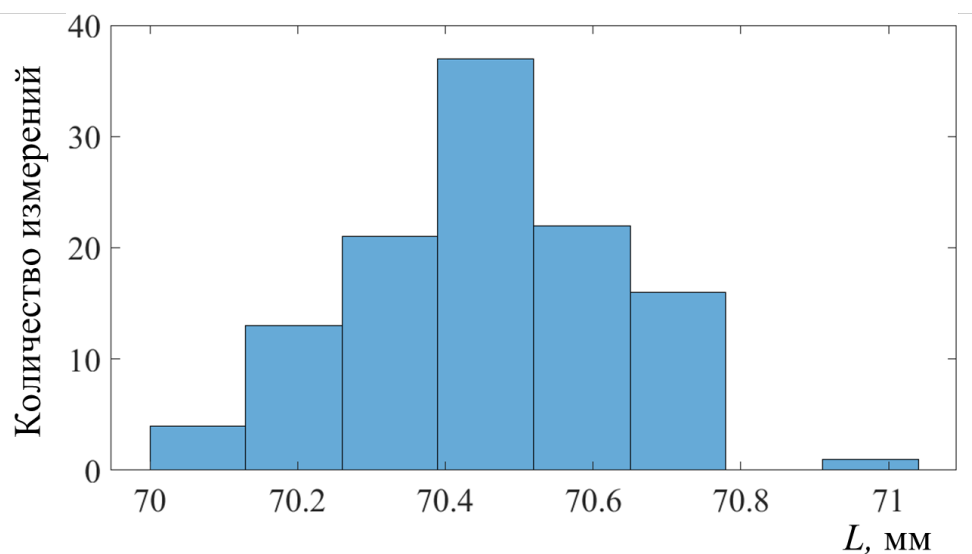


Рисунок 5.6 – Результат измерения расстояния между фотометками.

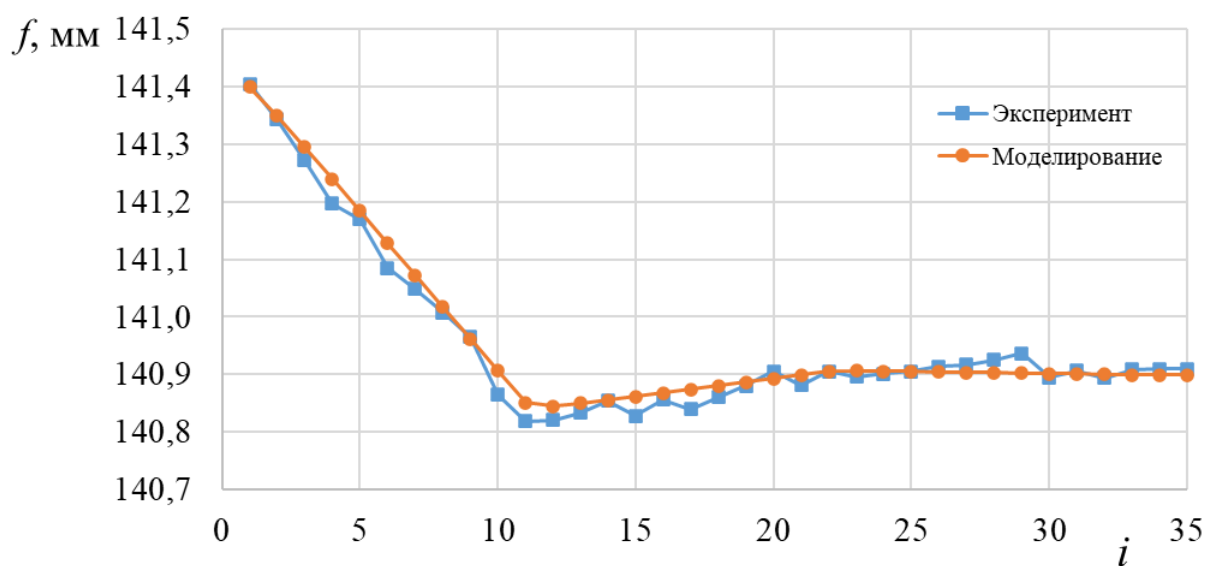
Далее проводится исследование алгоритма 2. Для его экспериментальной проверки использовался такой же подход, как и для алгоритма 1. Для первого эксперимента использовались первые начальные условия в соответствии с (5.1).

Из рисунка 5.7 видно, что результаты моделирования соответствуют результатам эксперимента. В данном случае требуемое перемещение рассчитывается за 20 циклов работы автоматической линии, что для данного размера контейнеров соответствует двум производственным циклам и совпадает с результатами моделирования.

Полученный во втором эксперименте для алгоритма 2 результат (рисунок 5.8) показывает, что математическая модель точно описывает процесс перемещения лент на автоматической упаковочной линии. Также, из рисунка 5.8а

видно, что с помощью алгоритма 2, требуемая величина перемещения, как и в предыдущем случае, рассчитывается за 20 циклов, что совпадает с результатами математического моделирования работы системы с заданными условиями. Результаты экспериментов подтверждают адекватность выполненного численного моделирования и свидетельствуют о том, что алгоритм 2 можно использовать для расчета перемещения привода для позиционирования двух лент относительно технологических станций и друг относительно друга.

(a)



(б)

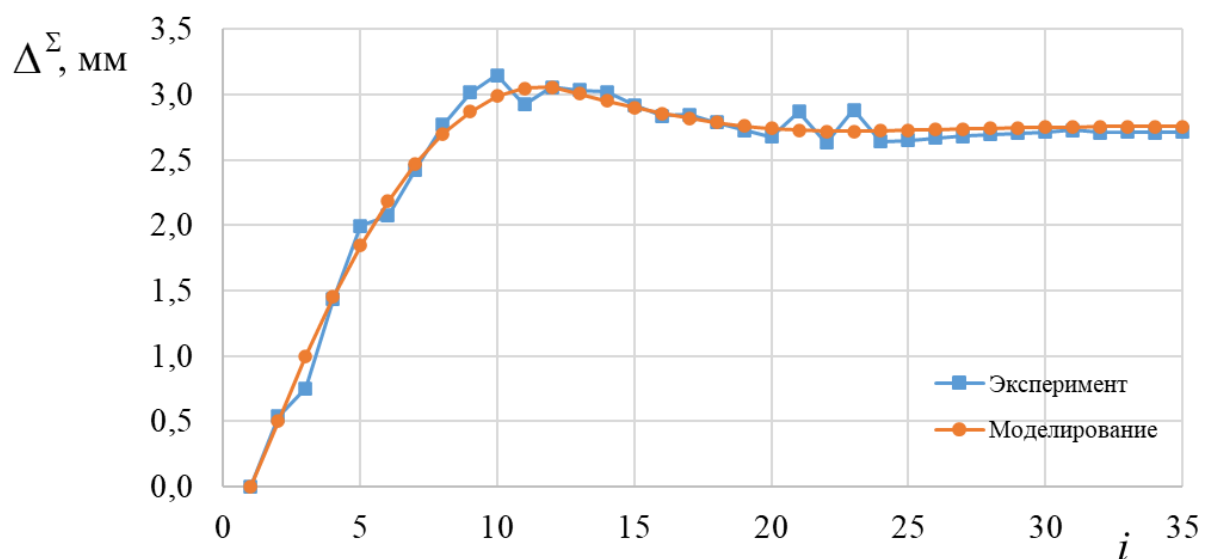


Рисунок 5.7 – Алгоритм 2 эксперимент 1:

а) величина перемещения; б) смещение фотометки.

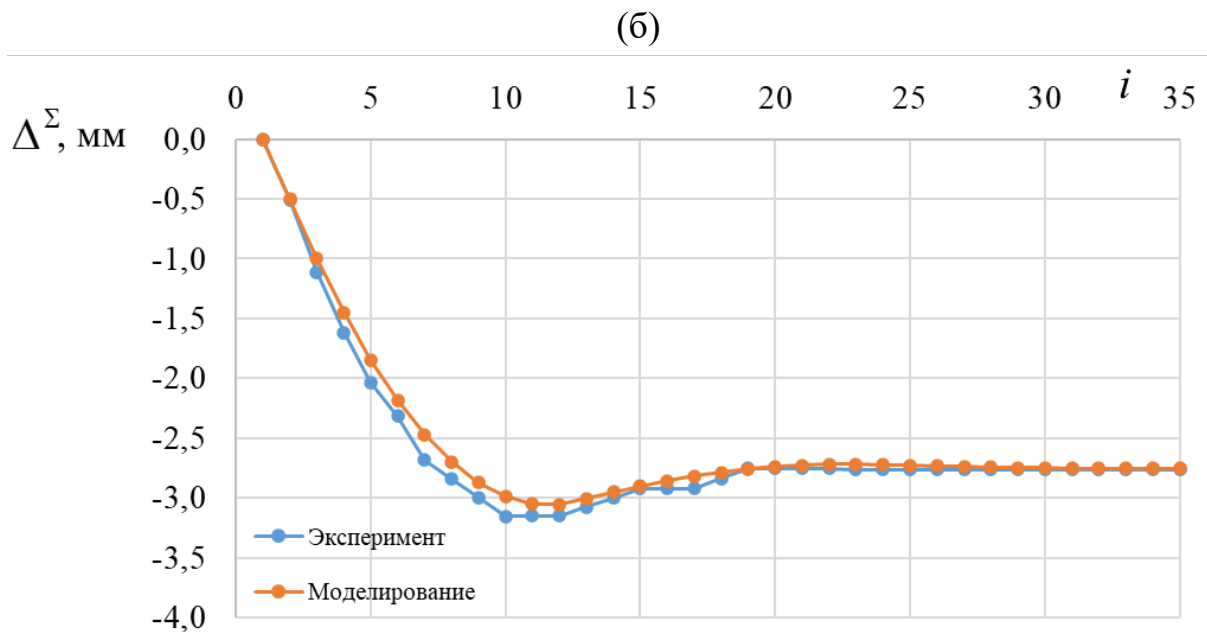
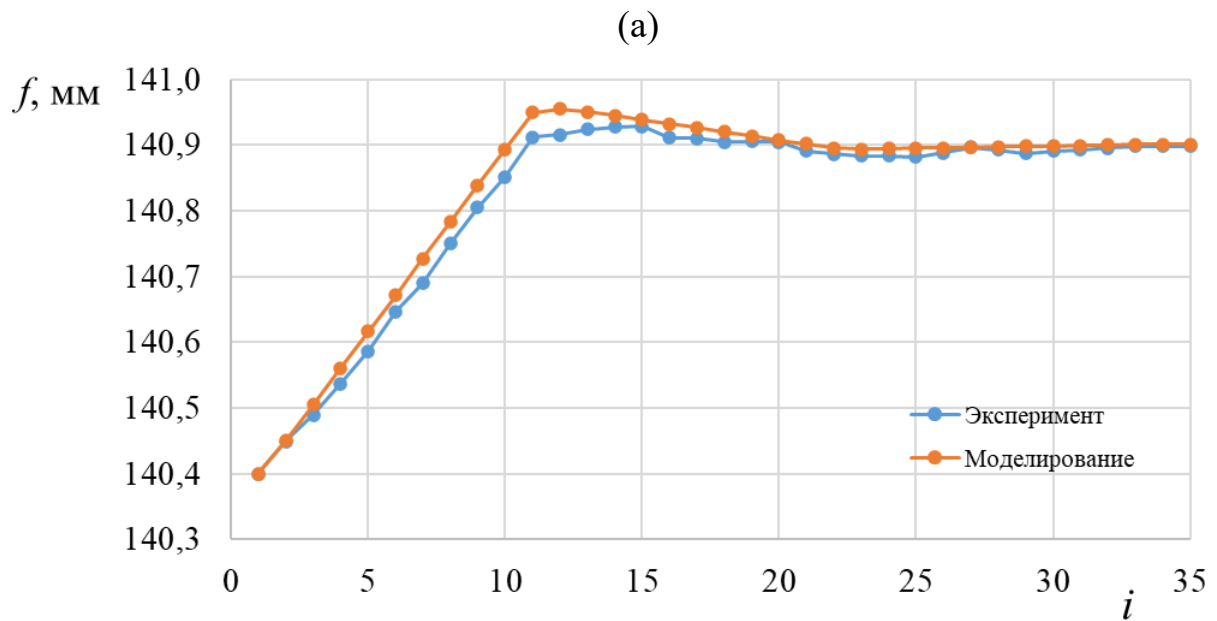


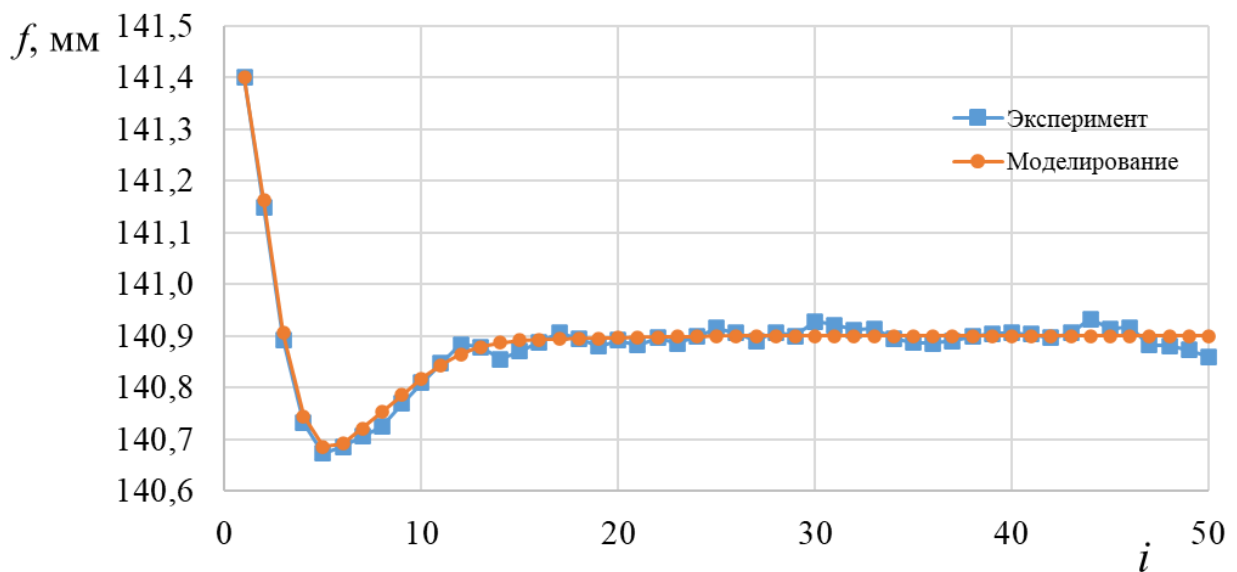
Рисунок 5.8 – Алгоритм 2 эксперимент 2:

а) величина перемещения; б) смещение фотометки.

Ниже представлены результаты экспериментального исследования работы транспортной системы с использованием алгоритма 3 при параметрах A (рисунок 4.4). Результаты эксперимента с первыми начальными условиями (5.2) представлены на рисунке 5.9. Видно, что полученные значения величины перемещения (рисунок 5.9а) совпадают с данными численного моделирования работы алгоритма с аналогичными параметрами. Результаты показаний смещения

фотометки (рисунок 5.9б) также совпадают с результатами численного моделирования. Отметим, что положение фотометки возвращается в область допустимых значений ± 1 мм за 5 циклов работы автоматической линии. Далее через 20 циклов после начала работы автоматической линии фотометка возвращается к исходному положению с некоторой погрешностью, а величина перемещения становится равной требуемой для удержания фотометки в заданном положении.

(a)



(б)

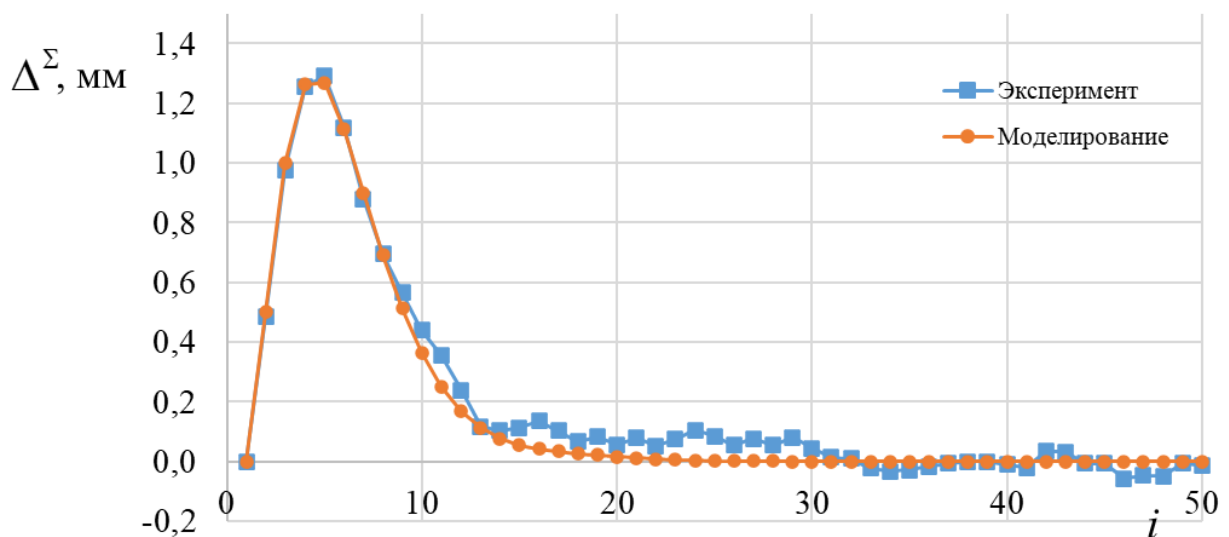
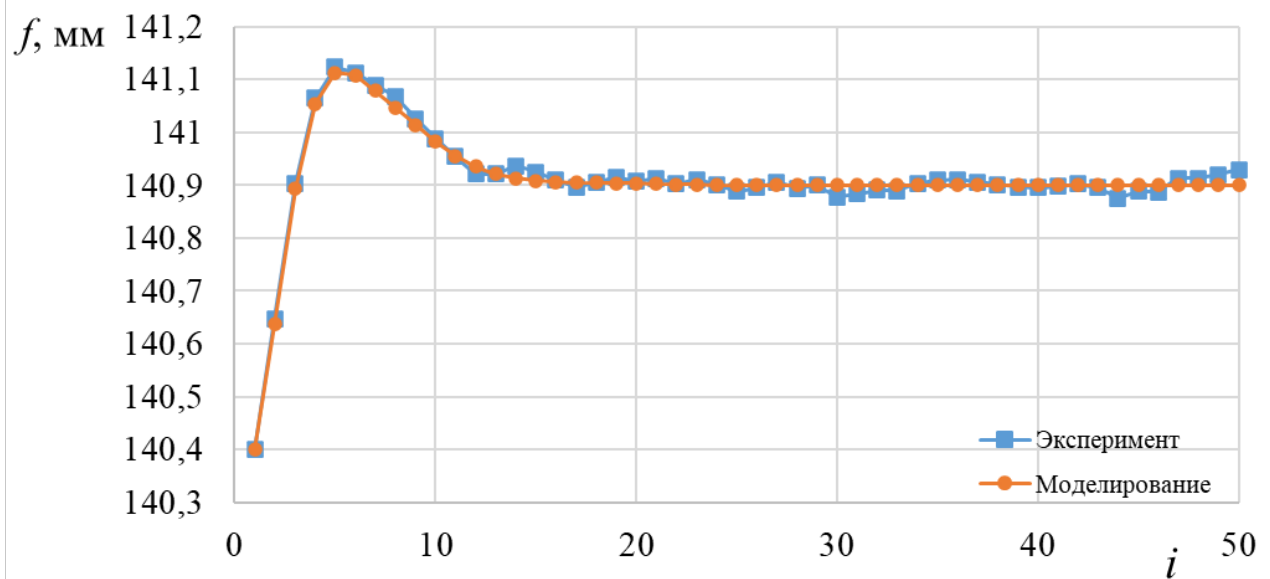


Рисунок 5.9 – Алгоритм 3 параметры A эксперимент 1:

а) величина перемещения; б) смещение фотометки.

(a)



(б)

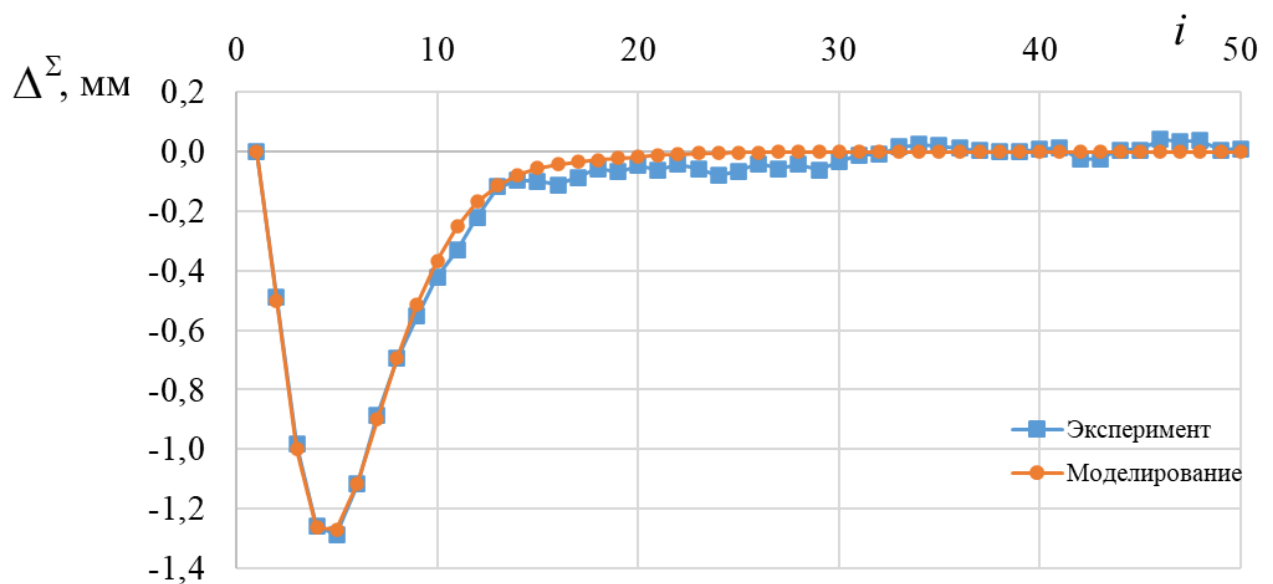


Рисунок 5.10 – Алгоритм 3 параметры A эксперимент 2:

а) величина перемещения; б) смещение фотометки.

Результаты эксперимента со вторыми начальными условиями из (5.2) представлены на рисунке 5.10. В данном случае также видно, что экспериментально полученные результаты расчета величины перемещения (рисунок 5.10а) и смещения фотометки (рисунок 5.10б) совпадают с результатами, полученными при численном моделировании работы автоматической линии. В

данном эксперименте фотометка возвращается в область допустимых значений также за 6 циклов работы автоматической линии, а через 20 циклов работы фотометка возвращается к исходному положению, так же, как и в предыдущем эксперименте с некоторой погрешностью. К этому же времени величина перемещения становится равной требуемой для удержания фотометки в заданном положении.

По результатам экспериментального исследования работы электромеханической системы с использованием для расчета величины перемещения привода алгоритма 3, можно сделать вывод о том, что разработанный на основе ПИ-регулятора алгоритм управления позволяет решить задачу совмещения положений компонентов при автоматической сборке. Преимуществом алгоритма 3 является то, что он одновременно позволяет решить обе задачи: обеспечение попадания контейнеров в инструменты технологических станций и совмещение этикетки с контуром контейнера, расположенных на различных лентах. Также по результатам проведенного эксперимента видно, что разработанная математическая модель адекватно описывает процесс сборки изделий из двух компонентов на автоматической линии, соответственно предложенный метод может применяться для оценки положения лент на автоматической линии.

5.5 Результаты и выводы

1. На основе математической модели механизма разматывания и протягивания рулонного материала был выполнен синтез параметров и создан механизм с обратной связью, обеспечивающий натяжение ленты с требуемыми характеристиками.

2. Образец разработанного механизма разматывания и протягивания был изготовлен и испытан на стенде «Автоматическая линия блистерной упаковки

АЛБ 165» в ИМАШ РАН. Результаты испытаний подтвердили работоспособность механизма, корректность выполненных расчетов и моделирования, показали соответствие заявленным требованиям и простоту настройки механизма при разматывании и протягивании ленты покровного материала.

3. Собран прототип электромеханической системы перемещения двух лент на автоматической упаковочной линии. Для экспериментального исследования изготовленной системы использовался имеющийся в ИМАШ РАН стенд «Автоматическая линия блистерной упаковки АЛБ165».

4. Выполнены экспериментальные исследования трех разработанных алгоритмов расчета величины перемещения привода протягивания ленточных материалов. При этом требуемая величина перемещения лент была заранее неизвестна и рассчитывалась непосредственно при работе автоматической линии. На каждом цикле работы линии анализировались такие показания технического состояния технологического оборудования как положение фотометки и величина перемещения транспортера.

5. Результаты испытания алгоритма 1 показали наличие больших погрешностей измерений и достаточно низкую точность используемой измерительной системы, которые предположительно связаны с точностью срабатывания фотоэлектрического датчика меток. При этом усреднение накапливаемого и обновляемого массива перемещений не позволяют существенно уменьшить влияние погрешностей измерений. В итоге, из-за большого разброса диагностируемых значений расстояний между фотометками алгоритм 1 для созданной электромеханической системы перемещения двух лент следует считать неработоспособным.

6. Экспериментальные исследование работы алгоритмов 2 и 3 показали, что они существенно лучше справляются с погрешностями имеющейся измерительной системы. Требуемая величина перемещения рассчитывается за два производственных цикла изделия, что совпадает с результатами компьютерного моделирования работы автоматической линии при аналогичных начальных

условиях. Величина смещения фотометки в данном случае также совпадает со значением, полученном при численном моделировании.

7. По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что разработанная математическая модель точно описывает процесс перемещения двух лент на автоматической линии. Модель позволяет проводить оценку эффективности разрабатываемых алгоритмов до проведения экспериментальной проверки.

8. Выполненные эксперименты подтвердили работоспособность алгоритмов 2 и 3 для позиционирования лент на автоматической линии блистерной упаковки. При производственной эксплуатации предпочтение стоит отдать алгоритму 2, так как он показывает наиболее плавное изменение величины перемещения и ее стабильность при работе автоматической линии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

4. Применение электромеханического привода с обратной связью для подачи ленточных материалов позволило ликвидировать механические ограничители хода, параметризировать 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.

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. Разработан 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Введение в мехатронику: уч. пособие / А.И. Грабченко, В.Б. Клепиков, В.Л. Доброскок и др. – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – 264 с.
2. Азаров, А.С. Механизация и автоматизация технологических процессов в машиностроении. – М., Л.: Машгиз, 1963. – 415 с.
3. Артоболевский, С.И. Технологические машины-автоматы. – М.: Машиностроение, 1964. – 181 с.
4. Автоматизация технологической подготовки серийного производства / С.П. Митрофанов, Ю.А. Гульнов, Д.Д. Куликов и др. – М., Машиностроение, 1974. – 360 с.
5. Гаврилов, А. Н., Автоматизация производственных процессов в приборостроении и агрегатостроении / А. Н. Гаврилов, П. И. Ковалев, Н. Н. Ушаков. – М.: Высш. Шк. – 1968. – 416 с.
6. Рудской, А. И. Теория и технология прокатного производства: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению "Металлургия" / А. И. Рудской, В. А. Лунев; Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. – Санкт-Петербург: Наука, 2008.
7. Теория прокатки: Справочник / А. И. Целиков, А. Д. Томленов, В. И. Зюзин [и др.]. – Москва: Металлургия, 1982. – 335 с.
8. Гасияров, В. Р. Способ ограничения динамических нагрузок мехатронных систем клетки толстолистового прокатного стана / В. Р. Гасияров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 5-18.
9. Park C. J., Hwang I. C. New tension control at the head of strip in hot strip finishing mill //Journal of materials processing technology. – 2008. – Т. 206. – №. 1-3. – p. 69-77.
10. Lee C. Stresses and defects in roll products: A review of stress models and

control techniques //International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2018. – Т. 19. – №. 5. – С. 781-789.

11. Назарова, Е.С. Имитационная модель механического движения металла для реверсивного одноклетевого стана холодной прокатки / Е.С. Назарова, А.В. Пирожок, Ю.А. Супрун // Електротехніка і електроенергетика. – 2007. – №1. – С. 8-14.

12. Моделирование процесса наматывания нитей на жесткий цилиндр / В. М. Мусалимов, Ю. С. Монахов, А. Ю. Кутьин, Г. А. Соловьева // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 8. – С. 657-663.

13. Шохин, В. В. Моделирование прокатного стана с использованием физических и математических моделей / В. В. Шохин, А. И. Андреев, П. С. Морковина // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 2(35). – С. 13-18.

14. Мещеряков, В. Н. Математическое моделирование процесса намотки тонкой стальной полосы в рулон / В. Н. Мещеряков, С. В. Усов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 10-2. – С. 157-162.

15. Нелюб, В. А. Технология производства малотоннажных судов из композиционных материалов / В. А. Нелюб, М. Э. Францев, А. С. Бородулин. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. – 220 с.

16. Комков, М. А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения / М. А. Комков, В. А. Тарасов. – 2-е издание. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 432 с. – (Технологии ракетно-космического машиностроения).

17. Каталог продукции компании Carbon Studio [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://carbonstudio.ru/item/ud-prepreg-hs150-12k-t700-er450-28> (дата обращения: 10.01.2024).

18. Разработка технологии автоматизированной выкладки полимерного композиционного материала / К. С. Габриельс, О. А. Караева, А. М. Кудрин, Д. В.

Полухин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – Т. 13, № 3. – С. 139-143.

19. 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.

20. Кутьин, А. Ю. Моделирование армирующего слоя композиционного изделия с заданным напряженным состоянием / А. Ю. Кутьин, Г. А. Соловьева // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 8. – С. 651-656.

21. Кутьин, А. Ю. Моделирование процесса намотки композитных цилиндрических оболочек / А. Ю. Кутьин, Г. П. Арясов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 283-289.

22. Кутьин, А. Ю. Алгоритм управления спиральной намоткой торцевых зон композитных цилиндрических оболочек / А. Ю. Кутьин, В. М. Мусалимов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 2. – С. 157-162.

23. Патент № 2719038 С2 Российская Федерация, МПК В65Н 59/16, В65Н 59/38. Пассивная система натяжения для управления разматыванием композиционного материала: № 2018117382: заявл. 11.10.2016: опубл. 16.04.2020 / Д. Брокман, М. Ванилья; заявитель ФАЙВЗ МАШИНИНГ СИСТЕМЗ, ИНК.

24. Щербина, Ю. В. Системы управления натяжением ленты в рулонных печатных машинах / Ю. В. Щербина // Вестник МГУП имени Ивана Федорова. – 2011. – № 1. – С. 221-237.

25. Щербина, Ю. В. Математическое моделирование системы управления натяжением ленты с электрическим рулонным тормозом / Ю. В. Щербина // Вестник МГУП имени Ивана Федорова. – 2011. – № 1. – С. 215-220.

26. Математическое моделирование работы системы перемещения

полотна в процессе отбеливания ткани / В. А. Зайцев, Б. А. Головушкин, П. Н. Грименицкий, Е. В. Ерофеева // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2021. – Т. 64, № 12. – С. 91-97.

27. Глазунов, В. Ф. Управление вытяжкой полотна в системе электропривода непрерывного агрегата / В. Ф. Глазунов, А. В. Пруднов, М. А. Соломаничев // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии : Материалы международной научно-технической конференции : (XVIII Бенардосовские чтения), Иваново, 27–29 мая 2015 года. Том 3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2015. – С. 112-115.

28. Кутьин, А. Ю. Ключевые факторы при выборе модели процесса наматывания текстильных паковок рулонного типа / А. Ю. Кутьин, Ю. К. Кутьин, Э. Г. Галиаскаров // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2015. – № 1(41). – С. 117-120.

29. Соломаничев, М. А. Математическое моделирование системы управления взаимосвязанным электроприводом накатной машины, обеспечивающей стабилизацию плотности намотки ткани в рулон / М. А. Соломаничев // Наука и мир. – 2019. – № 2-1(66). – С. 61-65.

30. Соломаничев, М. А. Решение задачи стабилизации плотности осевой намотки гибких материалов при математическом моделировании системы взаимосвязанного электропривода текстильного агрегата / М. А. Соломаничев // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения): Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции, Иваново, 29–31 мая 2019 года. Том III. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2019. – С. 54-57.

31. Nevaranta, N., Niemela, M., Pyrhonen, J., Pyrhonen, O., and Lindh, T., 2012, “Indirect Tension Control Method for an Intermittent Web Transport System,” 2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), IEEE, Novi Sad, Serbia, p. DS2a.2-1-DS2a.2-6.

32. 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.
33. Modelling the Material Flow and Web Tension in the Vertical Form–Fill–Seal Packaging Process / J. Matthews, B.J. Hicks, G. Mullineux, J. Goodwin, A. Burke // Packaging Technology and Science. – 2011. – №24-8. – p. 435-450.
34. Coles R., McDowell D., Kirwan M. J. (ed.). Food packaging technology. – CRC press, 2003. – Т. 5., 346 p.
35. Официальный сайт «I.M.A. Industria Macchine Automatiche» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ima.it/foodanddairy> (дата обращения: 01.10.2024).
36. Об одной специфической задаче сборки в автоматических линиях упаковки типа "формовка-фасовка-укупорка-вырубка" / Г. К. Корендясев, Б. Л. Саламандра, К. Б. Саламандра, Л. И. Тывес // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 2. – С. 84-92.
37. Патент № 2020215814 А1, США, МПК В41F27/12; В41F3/06; В41F3/56; В41F9/00. Processing system and control method for handling continuous sheet of material: №202016823283: заявл. 18.03.2020: опубл. 09.07.2020 / К. Miyoshi, Т. Ando, К. Suzuki, S. Matsubara, Т. Hitomi, М. Ikeda, заявитель Sumitomo Heavy Industries; Ashai Chemical Ind.
38. Патент №111115324А, КНР, МПК В65Н23/182; В65Н23/192; В65Н23/198. Winding and unwinding system with automatic tension control function: №202010054224.6: заявл. 17.01.2020: опубл. 08.05.2020 / Y. Xia; заявитель Guangdong Kunchuan Ind Co Ltd.
39. Патент №3988485А1, Европа, МПК В65Н23/182; В65Н23/188; В65Н23/195. Parameterization of a traction controller: №21202327.9: заявл. 13.10.2021: опубл. 27.04.2022 / L.S. Rappel, U. Anschuber, R. Skotschek, М. Staudecker; заявитель B&R Automation.

40. Патент № 2559645 С1 Российская Федерация, МПК В65Н 23/00. устройство для регулирования натяжения ленточного материала: № 2014113377/13: заявл. 04.04.2014: опубл. 10.08.2015 / В. Ф. Глазунов, В. Т. Филичев; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ).

41. Патент №7338004 В2, США, МПК В65Н59/04. Let-off device with constant tension: №11/249185: заявл. 13.10.2005: опубл. 13.10.2005 / К. Niedder; заявитель К. Niedder.

42. Патент № 2162434 С1 Российская Федерация, МПК В65Н 77/00, D03D 49/04. Регулятор натяжения гибкого элемента, сматываемого с барабана: № 2000100405/12: заявл. 10.01.2000: опубл. 27.01.2001 / В. Г. Осипов, Н. Л. Шошунов; заявитель Открытое акционерное общество "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. С.П. Королева".

43. Патент № 2148535 С1 Российская Федерация, МПК В64G 1/00, В64G 1/22. Устройство выпуска троса связки двух космических аппаратов и система управления для него: № 99102357/28: заявл. 08.02.1999: опубл. 10.05.2000 / В. Г. Осипов, Н. Л. Шошунов; заявитель Открытое акционерное общество "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. С.П. Королева".

44. Патент № 2335447 С2 Российская Федерация, МПК В65Н 59/00. устройство для размотки длинномерного материала: № 2006130620/12: заявл. 24.08.2006: опубл. 10.10.2008 / Ю. М. Корякин, П. И. Голубев; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие "Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики" (ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ").

45. Жавнер, В. Л. Исследование мехатронного устройства для размотки и протягивания рулонных материалов в дискретном режиме / В. Л. Жавнер, Ч. Вэнь, У. Лун // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 4. – С. 322-329.

46. Патент № 2753622 С1 Российская Федерация, МПК В65В 1/02, В65В 41/12, В65В 41/16. Способ и устройство для разматывания и протягивания рулонного материала: № 2021108200: заявл. 26.03.2021: опубл. 18.08.2021 / В. Чжао, В. Л. Жавнер.
47. Саламандра, Б. Л. Анализ способов стабилизации положения этикетки на автоматических упаковочных машинах / Б. Л. Саламандра // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – № 2. – С. 106-112.
48. Об одной специфической задаче сборки в автоматических линиях упаковки типа "формовка-фасовка-укупорка-вырубка" / Г. К. Корендясев, Б. Л. Саламандра, К. Б. Саламандра, Л. И. Тывес // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 2. – С. 84-92.
49. Автоматизация типовых технологических процессов и установок: Учебник для вузов / А.М. Корытин, Н.К. Петров, С.Н. Радимов, Н.К. Шапарев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. 432 с.
50. Технология автоматизированного машиностроения: учеб. пособие: в 2 т. / Б. М. Голиб, А. А. Вакалюк, М. Б. Готлиб. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2012.
51. Готлиб Б. М. Введение в мехатронику: Учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного университета путей сообщения, 2007. – 782 с.
52. Hohmann, H.J. Filling Characteristics and Dosing Accuracy of Volumetric Dosing Devices in Vertical Form-fill-seal Machines / H.J. Hohmann // Packaging Technology and Science. – 1988. – Vol. 1. – № 3. – P. 123-135.
53. Desoki, A. General Design of the Forming Collar of the Vertical Form, Fill and Seal Packaging Machine Using the Finite Element Method / A. Desoki, H. Morimura, I. Hagiwara // Packaging Technology and Science. – 2011. – Vol. 24. – № 1. – P. 31-47.
54. Hughes H.A. Food Packaging Machinery // Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering. – Academic Press, 2019. P. 717.

55. Жавнер, В. Л. Исследование мехатронной системы дозирования сыпучих продуктов малыми дозами / В. Л. Жавнер, В. Чжао // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2018. – № 7. – С. 410-419.

56. Благодарский, В.А. Машины-автоматы для упаковки пищевых продуктов: Справочник / В.А. Благодарский, Н.С. Колесник, М.С. Зиновьева Киев: Техніка, 1985. – 230 с.

57. Оборудование и автоматизация перерабатывающих производств: учебник для ВУЗов / А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, А. С. Гордеев, А. И. Завражнов. – Москва: Издательство КолосС, 2007. – 591 с.

58. Шварцманн, П. Термоформование: [материалы, процессы, инструменты]: практическое руководство / П. Шварцманн; под ред. А. Иллига; пер. с англ. яз. под ред. М. А. Шерышева. – Санкт-Петербург: Профессия, 2007. – 287 с.

59. Полянский Н. Н. Основы полиграфического производства. Учебник для студентов полиграфических специальностей высших учебных заведений. – М: «Книга», 1991 – 351 с.

60. Патент № 111717710А, КНР, МПК В65В41/14; В65Н23/032; В65Н26/00. Color code detection and correction device and color code detection and correction method: №202010553356.3: заявл. 17.06.2020: опубл. 29.09.2020 / С. Zhang, С. Yin, Y. Hu; заявитель Jiangsu Jinwang Packaging Machinery Sci Tech Co Ltd.

61. Патент №1203718 А1 Европа, МПК В65В 9/20. Form-fill-seal machine: №01204136.4: заявл. 31.10.2001: опубл. 08.05.2002 / Henriks P., Tax W., Daal P.

62. Патент №3861983А США, МПК В29С 27/06, В65Н 25/06. Film positioning apparatus: №332030: заявл. 12.02.1973: опубл. 21.01.1975 / Harrell M.

63. Патент № 2256590 С2 Российская Федерация, МПК В65В 9/04. Способ коррекции относительного положения корпусного и покровного материалов в автоматических упаковочных машинах и устройство для его

осуществления: № 2003128093/12: заявл. 22.09.2003: опубл. 20.07.2005 / Б. Л. Саламандра, Л. И. Тывес.

64. Мяленко, Д. М. Новые направления в упаковке молочной продукции / Д. М. Мяленко, О. Б. Федотова // Молочная промышленность. – 2013. – № 1. – С. 8-9.

65. Concerning one specific task of assembly in the automatic packing lines of the "Forming-Pre-Packing-Sealing-Cutting" type / G. K. Korendyasev, B. L. Salamandra, K. B. Salamandra, L. I. Tyves // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2013. – Vol. 42, No. 2. – P. 159-165.

66. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин: учебник для студентов высших технических учебных заведений / И. И. Артоболевский. – 5-е издание, стереотипное. – Москва: Альянс, 2008. – 639 с.

67. Кутьин, А. Ю. О моделировании процесса формирования цилиндрических паковок рулонного типа / А. Ю. Кутьин, Ю. К. Кутьин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. - 2001. - № 2. - С. 113-117

68. Механика в техническом университете: Серия : В 8 т : учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. дипломир. специалистов в обл. техники и технологии / [В. И. Дронг и др.] ; под ред. К. С. Колесникова. – 3-е изд., стер.. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 735 с. – (Механика в техническом университете: в 8 т. ; Курс теоретической механики).

69. 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.

70. Замурагин, Ю. М. Анализ устройства сматывания и протягивания ленточного материала с постоянной скоростью / Ю. М. Замурагин // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2023. – № 12. – С. 303-313.

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

72. 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.

73. Zamuragin Y. M., Salamandra B.L., Salamandra K.B. Analysis of the Device for Unwinding the Tape Material //Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2023. – vol. 52. – №. 10. –p. 171-179.

74. Cheney W., Kincaid D. Numerical mathematics and computing. // International Thomson Publishing, 1998.

75. Титов, К. В. Практическое применение численных методов: учебное пособие / Титов К. В., Очков А. А.; МГТУ им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский ун-т). - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. - 177 с.

76. Федотов, А. А. Численные методы интегрирования, решения дифференциальных уравнений и задач оптимизации / А. А. Федотов, П. В. Храпов. – Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2015. – 78 с.

77. Патент № 2138427 С1 Российская Федерация, МПК В65В 9/04. Автоматическая упаковочная машина преимущественно для жидких и полужидких продуктов: № 98113167/13: заявл. 02.07.1998: опубл. 27.09.1999 / Е. Г. Вайсман, А. И. Корендясев, В. И. Новиков [и др.].

78. 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.

79. Усольцев, А. А. Электрический привод: Учебное пособие / А. А. Усольцев. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2012. – 242 с.

80. Патент №1461898A1, Германия, МПК B65B41/18. Abzugslaengensteuerung: №909804/0694: заявл. 09.11.1963; опубл. 23.01.1969 / К. Walter; заявитель Hassia Verpackung AG.

81. 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.

82. 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.

83. Yu. M. Zamuragin, K. B. Salamandra, B. L. Salamandra; Mechatronic system parameters for automatic assembly of products from tape materials: Choice substantiation. AIP Conf. Proc. 27 March 2024; 3102 (1): 020016.

84. 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.

85. Zamuragin Y. M., Salamandra B.L., Salamandra K.B. Adaptive System of Position Synchronization of Tape Materials in Automatic Assembly //Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2023. – vol. 52. – №. 7. – p. 147-155.

86. Замурагин, Ю. М. Моделирование качества автоматической сборки ленточных материалов при периодическом внешнем воздействии / Ю. М. Замурагин // 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.

87. Yu. M. Zamuragin, Modeling of the quality of tape materials automatic assembly at periodic external influence. AIP Conf. Proc. 25 February 2025; 3205 (1): 080006.

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

89. Самарский, А.А., Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А. А. Самарский, А. П. Михайлов – Москва, 2001. – 320 с.

90. Алиев, Т.И. Основы моделирования дискретных систем. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.

91. Баскакова, О. В. Экономика предприятия (организации) : Учебник / О. В. Баскакова, Л. Ф. Сейко. – Москва: Издательско-торговая корпорация "Дашков и К", 2018. – 372 с.

92. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей: учебник для студентов высших технических учебных заведений / Е. С. Вентцель. – Изд. 10-е, стер.. – Москва: Высш. шк., 2006. – 575 с.

93. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для студентов вузов / В. Е. Гмурман. – 9-е издание, стереотипное. – Москва: Издательство "Высшая Школа", 2003. – 278 с.

94. Анцыферов С. С. Общая теория измерений: учеб. пособие для вузов / С. С. Анцыферов, Б. И. Голубь; ред. Евтихий Н. Н. - М.: Горячая линия - Телеком, 2007. - 176 с.
95. Зайдель А.Н. Погрешности измерения физических величин / А.Н. Зайдель – Л.: Наука, 1985. – 112 с.
96. ГОСТ ИСО 12647-1-2009 Технология полиграфии. Контроль процесса изготовления цифровых файлов, растровых цветоделений, пробных и тиражных оттисков. Часть 1 – Параметры и методы измерения
97. ГОСТ ИСО 12647-6-2017 Технология полиграфии. Контроль процесса изготовления цифровых файлов, растровых цветоделений, пробных и тиражных оттисков. Часть 6 – Флексографская печать.
98. Громыко, И. Г. Технология допечатных и печатных процессов / И. Г. Громыко, М. И. Кулак; Белорусский государственный технологический университет. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2011. – 252 с.
99. Могинов, Р. Г. Упругая деформация флексографской печатной формы / Р. Г. Могинов, Б. А. Роев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 7. – С. 147-157.
100. Гельфонд, А. О. Исчисление конечных разностей: учеб. пособие для ун-тов / А. О. Гельфонд – Изд. 4-е, стер. – Москва: URSS, 2006.
101. Бесеркский, В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесеркский, Е.П. Попов – Москва, 1972. – 768 с.
102. Юревич, Е.И. Теория автоматического управления. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л., «Энергия», 1975. 416 с. с ил.
103. Сидняев, Н. И. Статистический анализ и теория планирования эксперимента: учебное пособие / Н. И. Сидняев. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 195, [5] с.: ил.

104. Задорожная, Е. А. Теория планирования эксперимента: учебное пособие / Е. А. Задорожная. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – 92 с.

105. 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.

Приложение А1.

Патент РФ на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2790182**УСТРОЙСТВО РАЗМАТЫВАНИЯ И
ПРОТЯГИВАНИЯ РУЛОННОГО МАТЕРИАЛА**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт машиноведения им. А.А.
Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)
(RU)*

Авторы: *Саламандра Борис Львович (RU), Саламандра
Константин Борисович (RU), Замурагин Юрий
Михайлович (RU)*

Заявка № 2022119407

Приоритет изобретения 15 июля 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 15 февраля 2023 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 15 июля 2042 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



Приложение Б1

Акт о внедрении электромеханической системы перемещения двух лент



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ПОРЦИОННЫЕ ПРОДУКТЫ»
РФ. 249037 Калужская область, г. Обнинск, ул. Красных Зорь д.46
ИНН: 4025434776 КПП: 400301001 ОГРН: 1124025009063
Тел.: 8(48438) 2-09-04

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «Порционные продукты»
 Козлов А.В.
02 2025

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации научного сотрудника ИМАШ РАН Замурагина
Юрия Михайловича

*«Разработка и анализ механизмов для натяжения и оценки
положений рулонных материалов в упаковочном оборудовании»*

Настоящим актом подтверждаем, что результаты кандидатской диссертации Замурагина Юрия Михайловича, относящиеся к разработке электромеханической системы перемещения ленточных материалов и методы автоматической сборки изделий на автоматической линии, внедрены на производственных линиях фасовки и упаковки соевого соуса и имбиря, установленных на нашем предприятии.

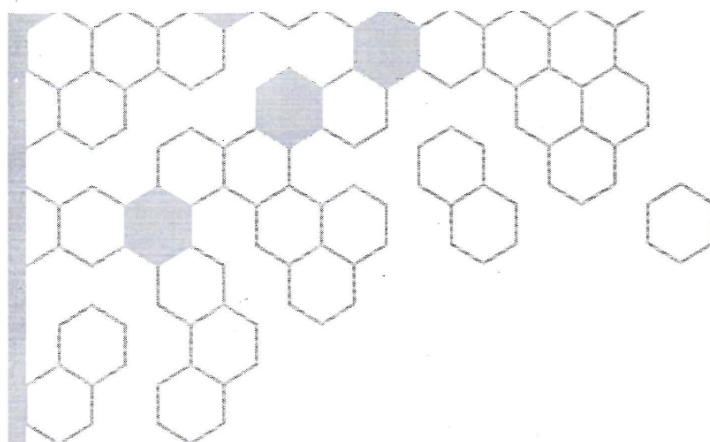
Использование предложенной в диссертации электромеханической транспортной системы позволило существенно сократить время наладочных операций на автоматических линиях фасовки и упаковки пищевых продуктов и упростить наладочные процессы, выполняемые оператором оборудования при замене рулона с напечатанными этикетками. Указанные преимущества достигнуты за счет разработанных в диссертации методов управления транспортной системой, адаптивно подстраивающих шаг перемещения материалов при изменении шага печати этикеток. Кроме того, благодаря использованию алгоритмов совмещения положений контейнеров и этикетки существенно уменьшено количество бракованной продукции.

Главный инженер

 Козлов Д.А.

Приложение Б2

Акт о внедрении механизма разматывания и протягивания рулонных материалов



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ КОМПАНИЯ "МР"
Юридический адрес / Фактический адрес / Почтовый адрес:
141011, Московская обл., Мытищинский р-он, г. Мытищи, ул.
4-я Парковая, строение 17
ОГРН: 1115029012438
ИНН / КПП: 5029158737 / 502901001
Тел.: +7 (499) 346-75-55; Е-mail: medrossii@mail.ru
8 800-333-25 00 (Звонок по России бесплатный)

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО ПК «МР»
Яфясова Т.Е.
«10» февраля 2025

АКТ об использовании механизма разматывания и протягивания рулонного материала

Настоящий актом подтверждаем, что «Устройство разматывания и протягивания рулонного материала» (патент РФ на изобретение №2790182), разработанное Замурагиным Ю.М., Саламандра К.Б., Саламандра Б.Л. (сотрудники Института машиноведения им. А.А. Благоднарова Российской Академии Наук) внедрено в Автоматическую линию блистерной упаковки АЛБ 165 зав. № 69 (2022 г.в.) в качестве механизма разматывания и протягивания покровного материала.

Учитывая то, что наши клиенты предъявляют различные требования к типу упаковочных материалов, а также широкий ассортимент выпускаемой на линии продукции следует отметить универсальность внедренного в автоматическую линию механизма.

Основным преимуществом указанного механизма является отсутствие провисания ленты материала при его разматывании и протягивании. А при использовании алюминиевой фольги не наблюдаются ее пластической деформации.

должность *Главный инженер Гамдуллаев Т.А.* *Т.А.* ФИО