



**ПОЛИТЕХ**  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

На правах рукописи

**Чжао Вэнь**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ  
АВТОМАТОВ ДЛЯ ДОЗИРОВАНИЯ И ФАСОВАНИЯ  
СЫПУЧИХ ПРОДУКТОВ**

05.02.05 - Роботы, мехатроника и робототехнические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: **Жавнер Виктор Леонидович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Мусалимов Виктор Михайлович**  
доктор технических наук, профессор  
преподаватель факультета систем управления и робототехники  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург

**Носиков Максим Владимирович**  
кандидат технических наук  
доцент кафедры «Автоматика», заведующий лабораторией научно-образовательного центра «Ракетостроение»  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью фирма «Рекупер», г. Москва

Защита состоится « 20 » мая 2022 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета У.05.02.05 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный корпус, аудитория 118).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»: <http://elib.spbstu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_ 202\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
У.05.02.05



О.В. Кочнева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Актуальность данной работы определяется необходимостью повышения производительности, снижения затрат энергии, уменьшения габаритов фасовочно-упаковочных автоматов и обеспечение требований к погрешности дозирования.

Основным направлением развития фасовочно-упаковочных автоматов является максимальная автоматизация производственных процессов с применением мехатронных принципов проектирования, сокращение цикла дозирования, контроль параметров, снижение энергетических затрат, мониторинг процесса дозирования, уменьшение санитарно-гигиенических и террористических рисков и влияние человеческого фактора на оборудование и дозируемый продукт.

Задача совершенствования технологических процессов дозирования, фасования и упаковывания сыпучих материалов решалась многими авторами, однако в научной литературе отсутствует системный подход к анализу и проектированию фасовочно-упаковочных автоматов этого типа.

На рынке фасовочно-упаковочных автоматов для сыпучих продуктов их ассортимент ограничен и в основном продается китайское оборудование, не всегда отличающееся надежностью. Остро стоит вопрос с фасованием сыпучих продуктов малыми дозами, что особенно актуально для предприятий фармацевтической и пищевой промышленности. Отметим также отсутствие российских разработок подобных устройств. Кроме того, на рынке отсутствуют фасовочно-упаковочные автоматы для малых предприятий.

Таким образом, актуальной **целью** исследования является: разработка принципов построения новых мехатронных автоматов дозирования и упаковки сыпучих продуктов малыми дозами с возможностью регулирования их производительности и обеспечения энергосбережения.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1) анализ известных способов и конструктивных решений установок точного дозирования и упаковывания сыпучих продуктов в диапазоне от 0,5 до 1000 г;

2) разработка новых технологических схем дозирования и упаковывания сыпучих продуктов малыми дозами и обоснование их технических параметров путем построения и исследования их математических моделей;

3) разработка универсального мехатронного дозатора сыпучих продуктов нового типа с многократным дозированием единичной массы и его исследование на математической модели и экспериментальном образце;

4) построение нового, более совершенного устройства складывания и протягивания упаковочного материала и его исследование;

5) предложение новой системы приводов устройств дозирования и протягивания упаковочного материала, определение их параметров с учетом компенсации диссипативных потерь и возможности рекуперации энергии;

б) разработка способа автоматического регулирования объема дозы в процессе фасования;

7) повышение производительности фасовочно-упаковочных автоматов при погрешности не более предусмотренной ГОСТ 8. 575-2002.

**Объект исследования** – мехатронные автоматы для дозирования и фасования сыпучих продуктов.

**Предмет исследования** – геометрические и динамические характеристики процесса дозирования и формирования пакетов; геометрические, силовые и динамические характеристики мехатронных пружинных приводов с рекуперацией энергии, применяемых в фасовочно-упаковочных автоматах.

**Научная новизна:**

1) предложен способ регулирования объемного дозирования сыпучих продуктов малыми дозами путем симметричного изменения величины хода шибера дозатора;

2) доказано, что значение фактического отрицательного отклонения номинальной дозы, полученной многократным последовательным дозированием единичных доз, меньше допускаемых отклонений;

3) создание условий для гармонического колебания дозатора, при перемещении дозатора позволяет быстроедействие на 10% по сравнению с традиционным режимом с использованием типовых пневматических цилиндров;

4) обосновано разделение движения упаковочного материала на два этапа: первый этап периодического разматывания рулона с упаковочным материалом в аккумулятор при включении привода во время дозирования и фасования продукта, второй этап – протягивание упаковочного материала в режиме постоянных нагрузок, что повышает надежность автоматов;

5) предложена геометрическая модель устройства для складывания упаковочного материала, обеспечивающего равномерное натяжение упаковочного материала, при условии, что складывающаяся щель имеет эллиптическую форму.

**Теоретическая и практическая значимость.** Предложен научно-обоснованный выбор конструкций дозаторов в зависимости от свойств продукта, допускаемых погрешностей дозирования и требуемой производительности:

1) даны рекомендации по выбору устройства дозирования, их главных характеристик, разработаны алгоритмы расчета основных конструктивных размеров дозаторов;

2) разработана мехатронная система дозирования сыпучих продуктов малыми дозами с массой меньше 5 г;

3) разработаны новые виды дозаторов, реализованные в виде экспериментальных образцов, некоторые из них используются в ООО «Аквамир»;

4) для пищевых и фармацевтических предприятий предложен ряд объемных дозаторов сыпучих продуктов с закрытыми мерными объемами с одновременной загрузкой одного или несколько пакетов;

5) разработан дозатор сыпучих продуктов для получения номинальной дозы способом последовательного многократного дозирования единичных доз, перекрывающий диапазон дозирования от 100 г до 1000 г;

6) разработано устройство разматывания рулонов с упаковочным материалом в дискретном режиме в интервале времени (патент РФ. № 2753622), отведенном на дозирование и фасование, что позволило обеспечить работу привода протягивания упаковочного материала, в режиме постоянной рабочей нагрузки, без снижения производительности и с минимальными затратами энергии;

7) разработано устройство формирования пакетов из ленточного упаковочного материала (патент РФ. № 2741139), позволяющее повысить скорость протягивания упаковочного материала и уменьшить его линейные габаритные размеры за счет того, что упаковочный материал после горизонтального направляющего ролика поступает в вертикальную щель, имеющую форму эллипса, где происходит его складывание;

8) разработан мехатронный пружинный привод для протягивания упаковочных материалов на базе кулисного механизма (патент РФ. № 2742446), показана возможность менять характеристики этого привода, за счет изменения предварительной деформации пружины;

9) разработанные мехатронные пружинные приводы с рекуперацией энергии позволяют, по крайней мере, в 5 раз снизить затраты энергии в приводах дозаторов и протягивания упаковочного материала.

**Методы исследования** – при решении поставленных задач использованы методы теоретической механики, теории механизмов и машин, роботов и мехатронных систем и математического компьютерного моделирования с использованием программы Mathcad.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1) методы расчета и проектирования зависимостей движения систем дозирования, разматывания и протягивания упаковочных материалов при использовании мехатронных пружинных приводов с рекуперацией энергии, входящих в состав робототехнических и мехатронных систем и машин, в том числе на основе принципов оптимизации;

2) исследование автоматизированных технологических процессов дозирования и фасования сыпучих продуктов, создаваемых на базе мехатронных систем, на стадии проектирования, изготовления и эксплуатации;

3) повышение производительности создаваемых систем дозирования и фасования сыпучих продуктов, разработка безопасных методов их эксплуатации;

4) методика определения производительности в зависимости от геометрических характеристики плунжера и мерных объемов;

5) предложена эллиптическая зависимость движения шиберов дозаторов в дискретном режиме при использовании мехатронных пружинных приводов, применение которых увеличивает быстродействие на 10% по сравнению с традиционным трапецеидальным законом с использованием типовых пневматических цилиндров.

**Реализация работы.** Полученные результаты диссертационной работы использованы для дозирования и фасования биологической добавки «Зостерин» с массой дозы 0,5 г на предприятии ООО «Аквामीр».

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались в СПбПУ на международной конференции «Современное машиностроение. Наука и образование» в 2017 и 2018 годах, на международной конференции «Проблемы механики современных машин материалы 7-ой международной научной конференции» (Улан-Удэ), на международной конференции «6-th international BART conference “POWER TRANSMISSIONS 2019”» (Болгария), а также на международной научно-практической конференции «Неделя науки СПбПУ» в 2017 и 2018 годах.

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертационной работы опубликовано 21 работа, из них 3 статьи опубликованы в международных журналах, индексируемых в реферативной базе Scopus, 5 работ опубликовано в журналах, рекомендуемых ВАК, получено 3 патента РФ на изобретение, на рассмотрении в Роспатенте находятся еще 2 заявки на изобретение.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** Основные результаты диссертации работы соответствуют специальности 05.02.05 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы по пунктам 5, 6 и 7, указанным в паспорте специальности.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Ее содержание изложено на 133 страницы, включает 70 рисунков и 7 таблиц. Список литературы включает 138 наименований, приложения даны на 19 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования.

**Первая глава** посвящена анализу научно-технической литературы по автоматическим системам дозирования и фасования сыпучих продуктов, устройствам для разматывания рулона с упаковочным материалом и его протягивания, устройствам формирования и протягивания пакетов, системам приводов и системам управления, а также по оценке погрешности и производительности дозирования.

При анализе работы, посвященные этим системам, обнаружено отсутствие научно-обоснованных рекомендаций по выбору принципов построения фасовочно-упаковочных автоматов, как на стадии их проектирования, так и при выборе и покупке функциональных модулей подобного оборудования; не применяется инструментальный контроль окончания процесса фасования, что ограничивает возможности для повышения производительности автомата; не в полной мере используются мехатронные принципы проектирования, обеспечивающие автономную работу оборудования без присутствия обслуживающего персонала.

На основании проведенного анализа сделан вывод о том, что необходимо исследовать и разработать мехатронный автомат с лучшими техническими характеристиками для дозирования и фасования сыпучих продуктов.

**Во второй главе** проведен анализ процесса дозирования сыпучих продуктов, разработана автоматическая мехатронная система дозирования в диапазоне меньше 5 г, исследованы зависимости движения шибера, определена теоретическая производительность дозаторов, исследована погрешность дозирования и фактическая производительность дозаторов сыпучих продуктов, разработанных при работе над диссертацией.

Разработана новая технологическая схема процесса фасования сыпучего продукта (рисунок 1), которая состоит из следующих операций: разматывание рулона, протягивание упаковочного материала вдоль технологического тракта, формирование пакета, термосваривание швов, дозирование и фасование сыпучего продукта и отрезание пакетов.

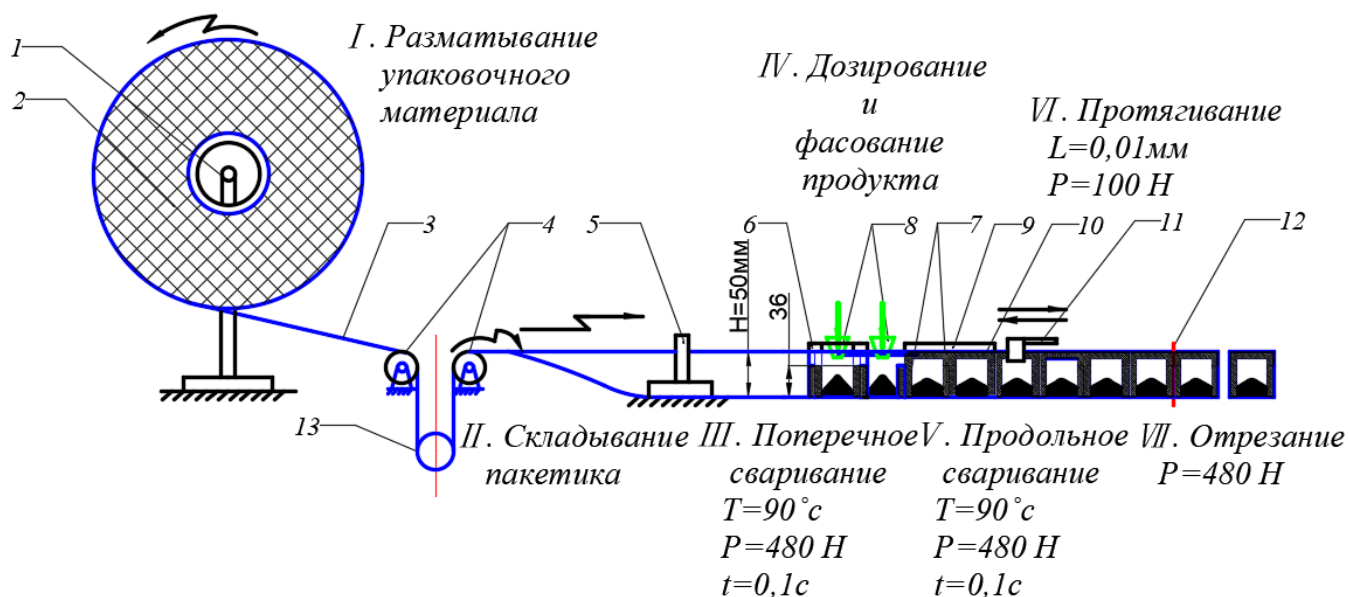


Рисунок 1 – Технологическая схема процесса фасования сыпучего продукта:

- 1 – опорное приспособление; 2 – рулон; 3 – упаковочный материал; 4 – ролики;
- 5 – устройство для складывания; 6, 9 – элементы сваривания пакетов;
- 7, 10 – сварные швы; 8 – сопла; 11 – устройство для протягивания; 12 – нож;
- 13 – блок

На рисунке 2 представлены конфигурации мехатронного дозатора сыпучих продуктов с малыми дозами, мерные объемы которого расположены в шибере, имеющем форму параллелепипеда и совершающем возвратно-поступательное движение, преимуществом этого дозатора является то, что в нем нет холостых ходов шибера.

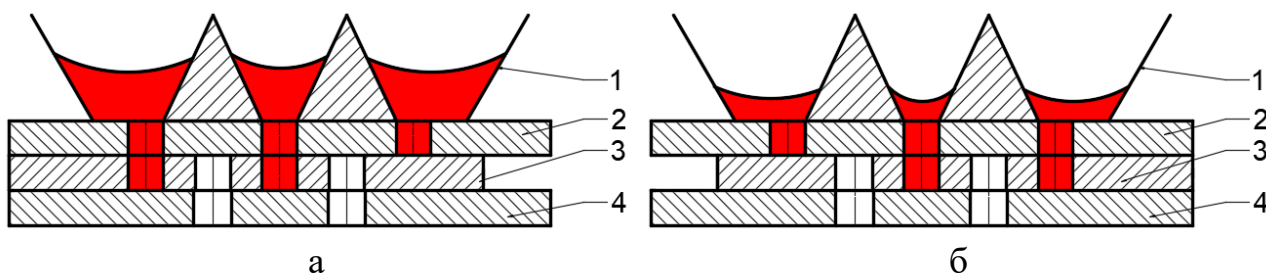


Рисунок 2 – Конфигурация шиберного дозатора в процессе дозирования: а) шибер смещен влево; б) шибер смещен вправо: 1 – нижний корпус; 2 – шибер; 3 – верхний корпус; 4 – шток цилиндра

В дозаторе регулирование дозы обеспечивается симметричным двухсторонним ограничением смещения шибера от нейтрального положения. Конфигурации шиберного дозатора с уменьшенной единичной дозой изображены на рисунке 3.

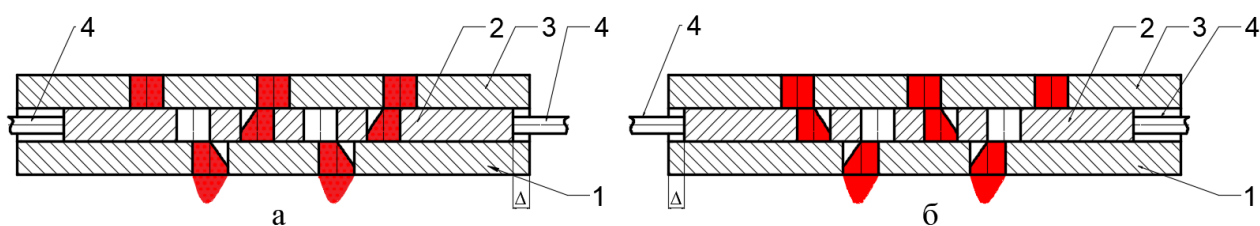


Рисунок 3 – Конфигурации шиберного дозатора с уменьшенными единичными дозами: а) шибер смещен влево; б) шибер смещен вправо: 1 – нижний корпус; 2 – шибер; 3 – верхний корпус; 4 – шток привода

Результаты и анализ тестовых испытаний показали, что данная система дозирования и фасования обеспечивает производительность не менее 40 пакетов в минуту. Погрешность дозирования дозы массой 0,5 г равна 0,01 г. Предельное отрицательное отклонение массы дозы 0,5 г не превышает 0,01 г.

На рисунке 4 представлены фотография устройства дозирования и фасования сыпучих продуктов.

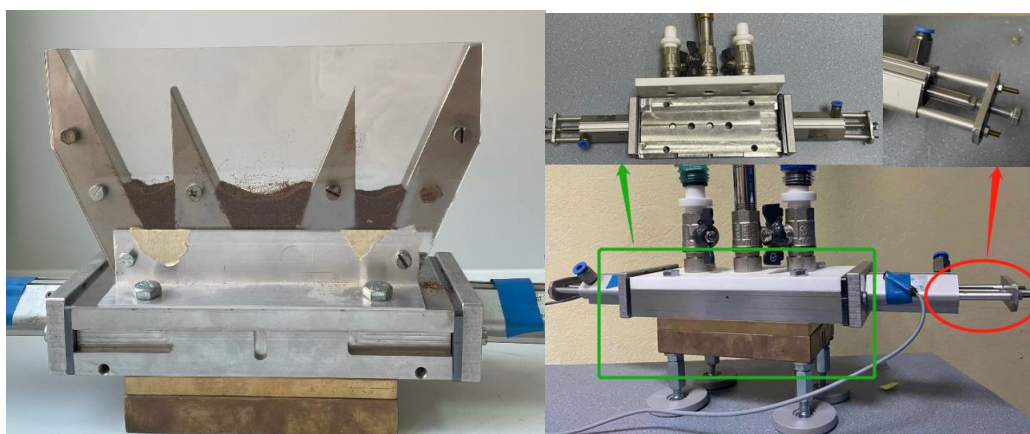


Рисунок 4 – Экспериментальный образец устройства дозирования и фасования



**В третьей главе** разработан и исследован мехатронный дозатор сыпучих продуктов для последовательного многократного дозирования единичных масс, перекрывающий диапазон дозирования от 100 г до 1000 г, приняты следующие положения:

- 1) все номинальные массы сыпучих продуктов разбиваются на несколько диапазонов;
- 2) в каждом диапазоне применяется только один дозатор с единичным объемом, что позволяет увеличить возможности для успешной работы;
- 3) многократное дозирование обеспечивает различные значения номинальных доз;
- 4) максимальное число кратных доз, при разработке программного обеспечения, принято равным – 10, но предпочтение следует отдать 5 кратным дозам.

Для номинальных доз в пределах 100 – 1000 г предложен плунжерный дозатор с минимальным регулируемым объемом в пределах 125 – 250 мл (рисунок 5).

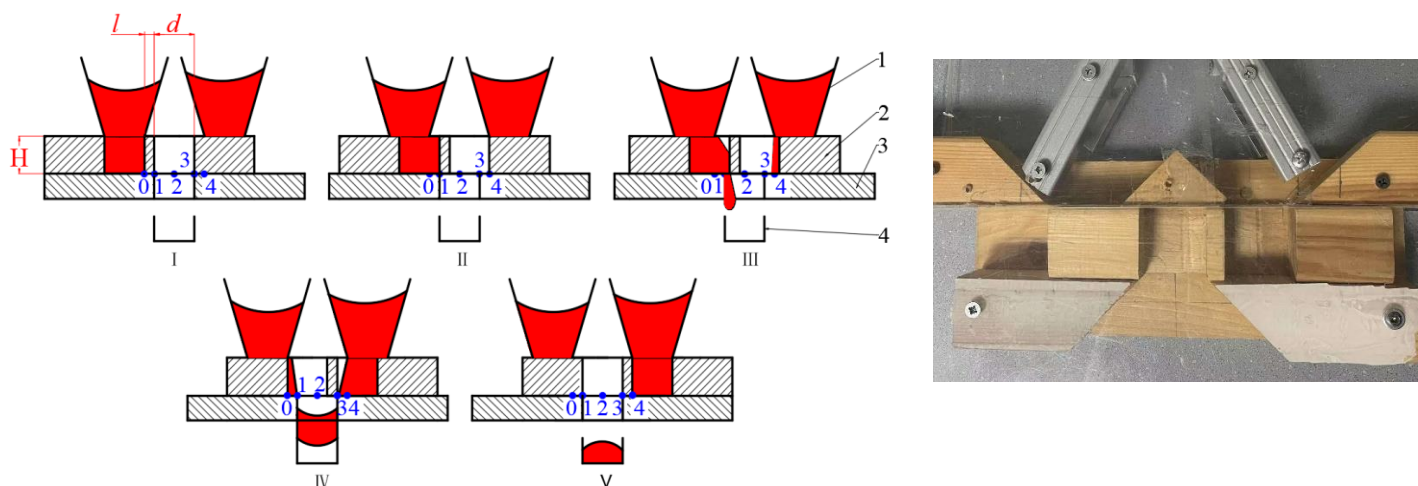


Рисунок 5 – Плунжерный дозатор и соответствующие фотографии макета:  
1 – бункер; 2 – плунжер; 3 – корпус; 4 – тара

Для обеспечения дискретного дозирования необходимо выполнить следующее условие: время движения плунжера из конфигурации II в конфигурацию IV должно быть меньше или равно времени падения продукта  $t_H$  на высоту мерного объема  $H$ .

Исследование зависимости движения плунжера показало, что использование эллиптической зависимости скорости плунжера от его перемещения, увеличивает быстродействие на 10% процентов по сравнению с традиционной трапецидальной зависимостью. На рисунке 6 на фазовой плоскости  $\dot{x}$ ,  $x$  изображены трапецидальная и эллиптическая зависимости движения.

Красные точки на рисунке 6 являются реперными, то есть при прохождении этих точек, происходит изменение конфигурации дозатора. Для удобства сравнения у них есть четыре общих точки, в которых значения скоростей совпадают.

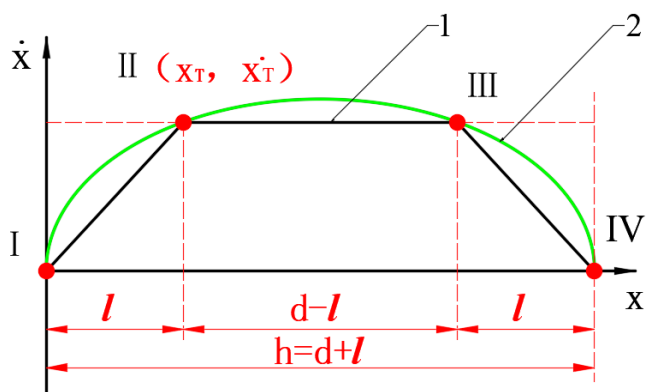


Рисунок 6 – Графики зависимости скорости плунжера от его перемещения:  
 1 – трапецидальная зависимость;  
 2 – эллиптическая зависимость

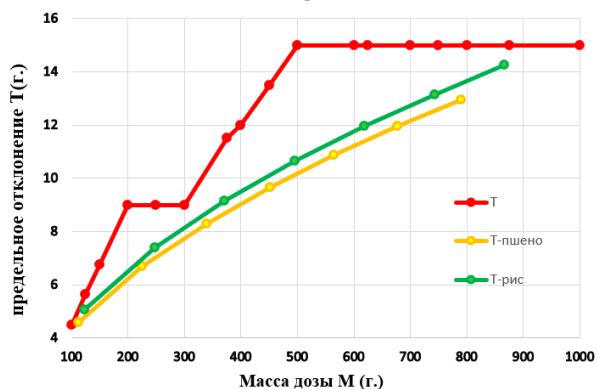


Рисунок 7 – Графики изменения отрицательных отклонений, допускаемых (1) и полученных при тестовых испытаниях дозатора с использованием риса и пшена

Многokратное дозирование обеспечивает, как правило, меньше значения отрицательного отклонения, чем допускается стандартом по ГОСТ 8. 575-2002. Графики допустимых отрицательных отклонений номинальных доз в зависимости от ее массы и значения фактических отрицательных отклонений доз, полученных пятикратным дозированием единичной дозы при тестовых испытаниях, представлены на рисунке 7.

Определены максимальные значения производительности исследуемых дозаторов.

Результаты и анализ экспериментальных исследований при фасовании пшена и риса показали, что разработанный дозатор при последовательном многократном дозировании обеспечивает требования к погрешности дозирования по ГОСТ 8. 575-2002.

**В четвертой главе** разработано устройство для разматывания, складывания и протягивания упаковочного материала.

Разработанное устройство разматывания рулонов с упаковочным материалом в дискретном режиме (рисунок 8), решает техническую проблему постоянного изменения инерционной нагрузки, обусловленного изменением массы рулона.

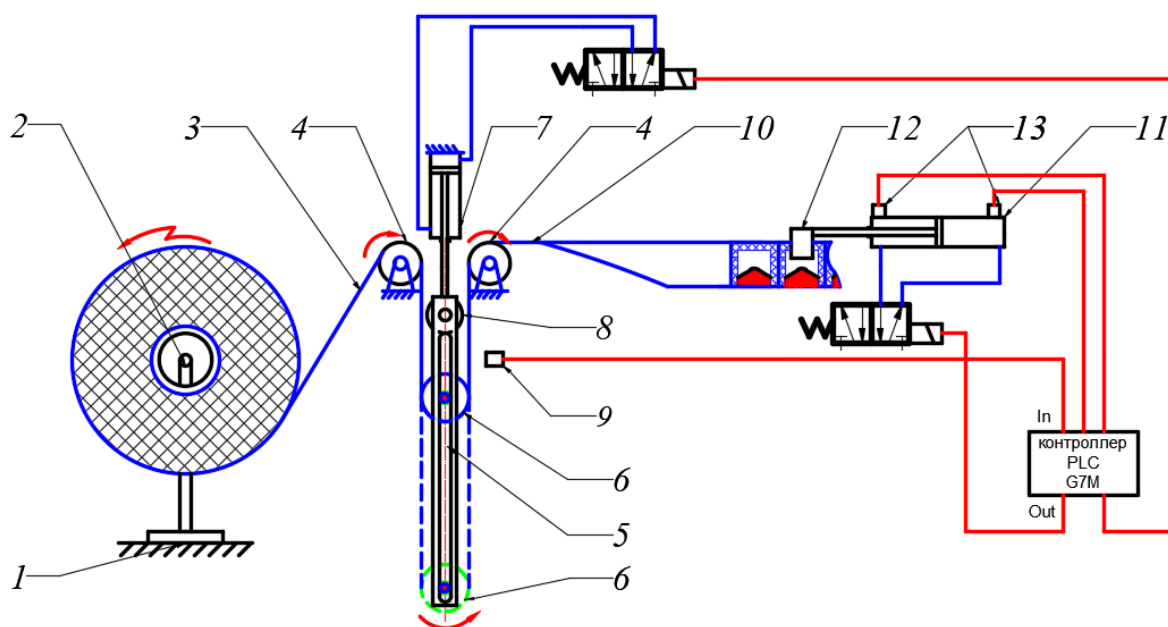


Рисунок 8 – Схема устройства разматывания и протягивания упаковочного материала: 1 – узел установки рулона; 2 – рулон; 3 – упаковочный материал; 4 – отклоняющие ролики; 5 – прорези; 6 – натяжной ролик; 7 – цилиндр разматывания рулона; 8 – толкающие ролики; 9, 13 – датчики положения; 10 – формователь пакетов; 11 – цилиндр протягивания; 12 – захват

Разработанное устройство использует два привода: один привод для разматывания рулона, а второй привод только для протягивания упаковочного материала, который находится в аккумуляторе упаковочного материала. В этом случае нагрузка на привод протягивания практически постоянна и определяется массой каретки, цилиндра захвата упаковочного материала и натяжного ролика. Переменной составляющей является масса упаковочного материала, которая находится в аккумуляторе упаковочного материала. Изменение массы происходит в пределах 20 – 30 г. При этом разматывание рулона происходит во время дозирования, когда упаковочный материал зафиксирован.

Стабильная и постоянная нагрузка на привод протягивания упаковочного материала исключает попадание сыпучего продукта в зону окончательного сваривания поперечного шва в начале и конце движения. В связи с этим для протягивания пакетов лучше иметь эллиптическую зависимость изменения скорости в зависимости от положения выходного звена привода.

С точки зрения снижения затрат энергии на протягивание упаковочного материала целесообразно иметь достаточно большую длину провисающего упаковочного материала, так как в этом случае отсутствуют затраты энергии на разгон рулона.

Определим массу натяжного ролика  $m_p$ . Для обеспечения неподвижности рулона, действующий на него момент от силы натяжения упаковочного материала  $M_{ym}$  должен быть равен или меньше момента трения в опоре  $M_{on}$  от веса рулона

$$M_{on} = 0,5 \cdot m_t \cdot g \cdot f \cdot d = M_{ym} = 0,5 m_p g R_t,$$

где  $m_t$  – текущее значение массы рулона;  $g$  – ускорение свободного падения;  $f$  – коэффициент трения;  $d$  – внутренний диаметр подшипника качения;  $R_t$  – текущее значение радиуса рулона.

Таким образом, наибольшее значение массы натяжного ролика

$$m_p = m f d / R_t.$$

На рисунке 9 предложена геометрическая модель устройства для складывания упаковочного материала, обеспечивающего равномерное натяжение упаковочного материала, при условии, что складывающая щель имеет эллиптическую форму. При этом, разработано устройство формирования пакетов из ленточного упаковочного материала, изображенное на рисунке 10.

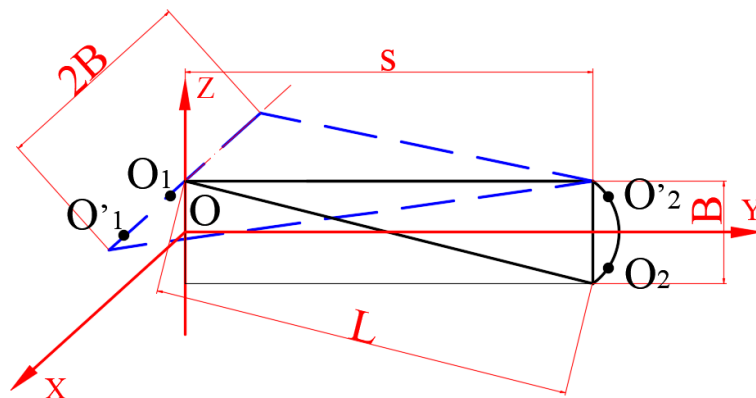


Рисунок 9 – Геометрическая модель устройства складывания упаковочного материала

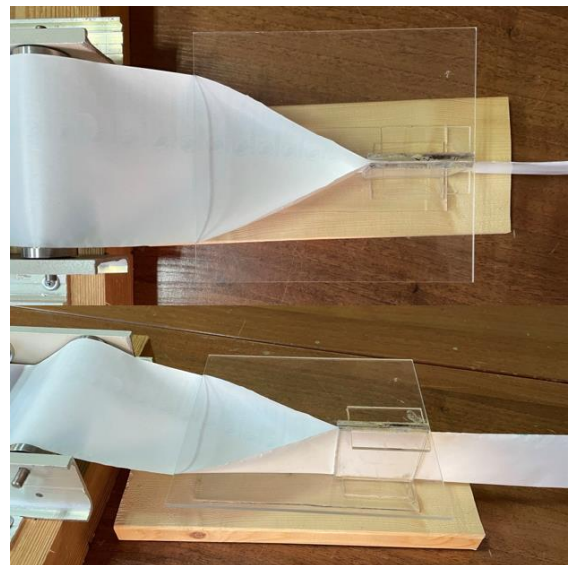
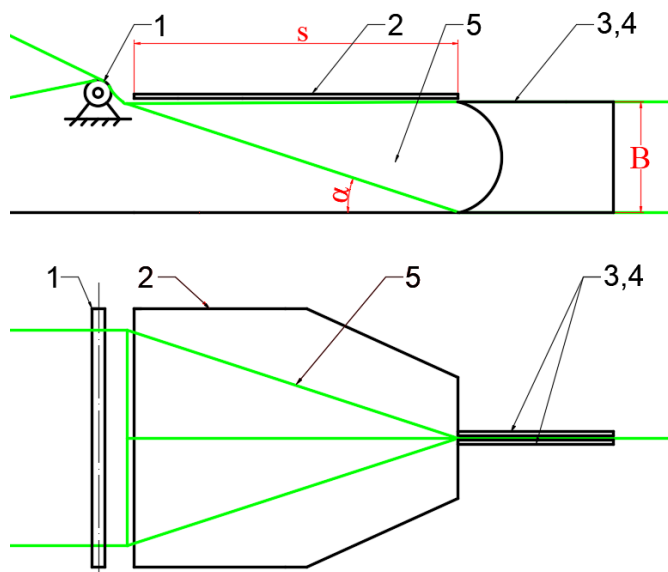


Рисунок 10 – Устройства складывания упаковочного материала: 1 – ролик; 2 – горизонтальная пластина; 3, 4 – плоские направляющие; 5 – упаковочный материал

Приняв значение  $L$  заданным, и учитывая то, что имеется определенная зависимость между координатой  $x_1$  и координатой  $z_2 = \frac{B}{2} - x_1$ , форма вертикальной щели примет вид эллипса

$$\frac{y^2}{L^2 - \frac{B^2}{2}} + \frac{z^2}{\frac{1}{2}(L^2 - \frac{B^2}{2})} = 1.$$

где  $B$  – значение высоты пакеты;  $L$  – расстояние между всеми сопрягаемыми точками.

**В пятой главе** исследованы и разработаны системы приводов для дозирования и протягивания упаковочного материала.

Разработан и исследован мехатронный пружинный привод с рекуперацией энергии для привода шибберных дозаторов, что позволило обосновать целесообразность компенсации диссипативных потерь и сил трения в шибберных дозаторах при постоянном включении подачи давления на всем протяжении хода поршня и обеспечивая фиксацию поршня в крайних положениях для обеспечения технологических пауз.

На рисунке 11 представлена пневматическая схема дозатора, реализованная с использованием двух пневматических цилиндров с возвратными пружинами и двух пневматических распределителей с прямым электромагнитным управлением.

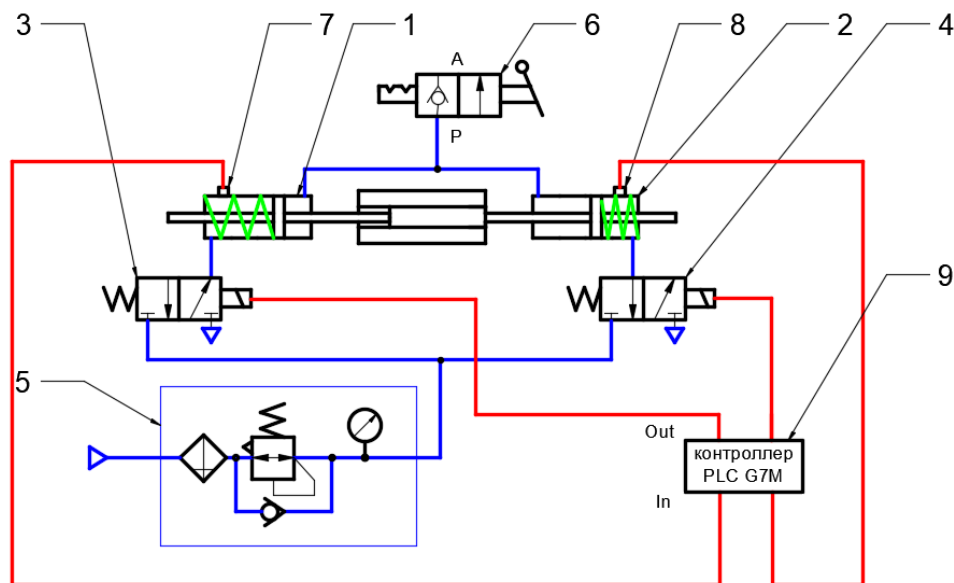


Рисунок 11 – Пневматическая схема мехатронного привода дозатора:

- 1, 2 – пневматические цилиндры с двухсторонним штоком;
- 3, 4 – пневматические распределители; 5 – регулятор с обратным клапаном и манометром; 6 – ручной запорный распределитель; 7, 8 – датчики положения;
- 9 – система управления

Привод представляет собой колебательную систему с регулируемым выстоем, период колебания  $T$  определяется из выражения

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{2c}},$$

где  $m$  – масса шибера или плунжера плюс масса перемещаемых доз;  $c$  – жесткость пружины; время перемещения  $t$  из одного крайнего положения в другое равно  $t=0,5T$ .

Работа, затрачиваемая на преодоление диссипативных потерь в пневматическом цилиндре, определяется из выражения

$$A=0,2 \cdot F_{np.} \cdot 2 \cdot x_{max}.$$

Эффективная потенциальная энергия  $U_{эф}$  определяется из выражения

$$U_{эф}=U_{max} - U_{min} = \frac{1}{2}(F_{np.}^2 - F_{yn.}^2)/c.$$

где  $x_{max}$  – максимальное смещение каретки от среднего положения;  $F_{np.}$  – максимальное усилие пружины;  $F_{yn.}$  – сила упругости пружины;  $U_{max}=2cx_{max}^2$  – максимальная потенциальная энергия каждой пружины.

Определена зависимость движения плунжера при подаче компенсационного воздействия на всем участке движения от одного крайнего положения до другого, без учета диссипативных потерь

$$U_{max} - U_t + F_{пор.} \cdot (x_{max} - x_t) = E_t$$

где  $F_{пор.}$  – усилие поршня цилиндра.

$$\text{То есть } cx_{max}^2 - cx_t^2 + 2cx_{max}(x_{max} - x_t) = \frac{1}{2}mx^2.$$

Скорости движения плунжера в зависимости от его координаты

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{2c}{m}} \cdot \sqrt{3x_{max}^2 - x_t^2 - 2x_{max}x_t}.$$

Что позволяет определить время движения из одного крайнего положения в другое  $t=2 \cdot \sqrt{\frac{m}{2c}} \cdot \int_{x_{max}}^0 \frac{dx}{\sqrt{a^2-x^2-bx}}$ .

Максимальная скорость плунжера при прохождении среднего положения определяется из выражения  $\dot{x}_{max} = \sqrt{\frac{6c}{m}}x_{max}$ .

Для оценки перемещения, скорости и ускорения плунжера, устанавливаются следующие уравнения

$T :=$	$\Delta t \leftarrow 0.0001$		
	$x0 \leftarrow 0.005$		
	$i \leftarrow 0$		
	$d \leftarrow 0.002$		
	$z1 \leftarrow 0$		
	$L \leftarrow 0.05$		
	$S \leftarrow \frac{\pi \cdot D^2}{4}$		$f \leftarrow \frac{\pi \cdot d^2}{4}$
			$z \leftarrow 0$
			$z' \leftarrow 0$
			$z'' \leftarrow 0$
			$p1 \leftarrow pa$
			$p2 \leftarrow pn2$
			$t \leftarrow 0$
	$S1 \leftarrow S - \frac{\pi \cdot D1^2}{4}$		

```

while L ≥ z
  m ← 0.8
  z'' ←  $\frac{p1 \cdot S1 - p2 \cdot S1 - 3 - 2z \cdot c}{m}$ 
  z'' ← 0 if z'' < 0
  z' ← z' + z'' · Δt
  z ← z + z' · Δt +  $\frac{z'' \cdot \Delta t^2}{2}$ 
  t ← t + Δt

```

```

Mi,0 ← t
Mi,5 ← z
Mi,6 ← z'
Mi,7 ← z''
i ← i + 1
M

```

Для оценки зависимости скорости плунжера от его перемещения, устанавливаются следующие уравнения

$$x(t) := 4 \cdot \sin(3t)$$

$$x'(t) := 12 \cos(3t)$$

$$m := 1 \quad c := 10 \quad x := \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$F(x, x') := \begin{cases} 23.6 & \text{if } (3 < x) \wedge (x' > 0) \\ -23.6 & \text{if } (-3 > x) \wedge (x' < 0) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$D(t, x) := \begin{bmatrix} x_1 \\ \frac{1}{m} \cdot (F(x_0, x_1) - c \cdot x_0 - 3 \cdot \text{sign}(x_1)) \end{bmatrix}$$

$$Z := \text{rkfixed}(x, 0, 2.41, 1000, D)$$

Найдены графики перемещения, скорости, ускорения, а также зависимость скорости плунжера от его перемещения (Рисунок 12). Показало, что использование эллиптической зависимости движения шибера, увеличивает быстрдействие на 10% процентов по сравнению с традиционным режимом.

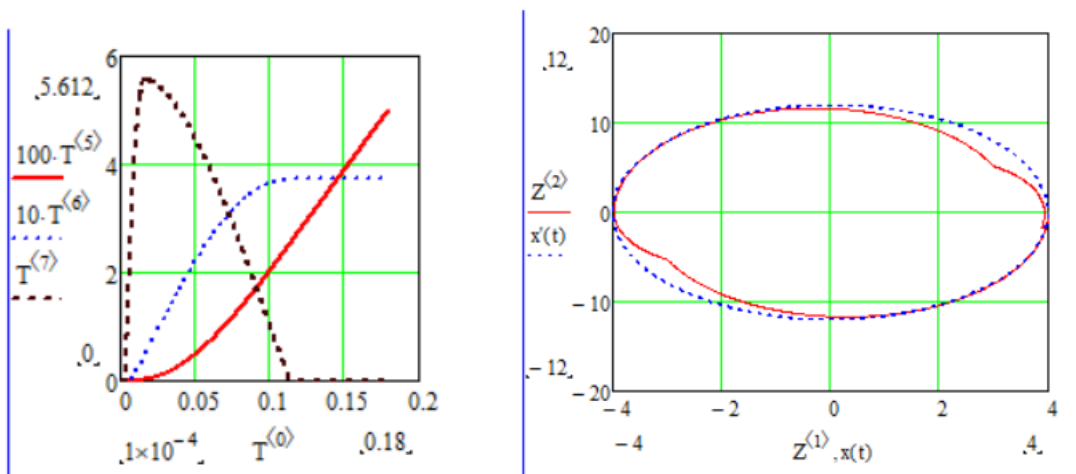


Рисунок 12 – Графики движения:  $T^{<5>}$  – перемещение;  $T^{<6>}$  – скорость;  $T^{<7>}$  – ускорение;  $Z^{<2>}$ - $Z^{<1>}$  – зависимость скорости плунжера от его перемещения при использовании мехатронных пружинных приводов

Разработан и исследован пружинный аккумулятор на базе кулисных механизмов, для мехатронного привода протягивания упаковочных материалов, представленный на рисунке 13.

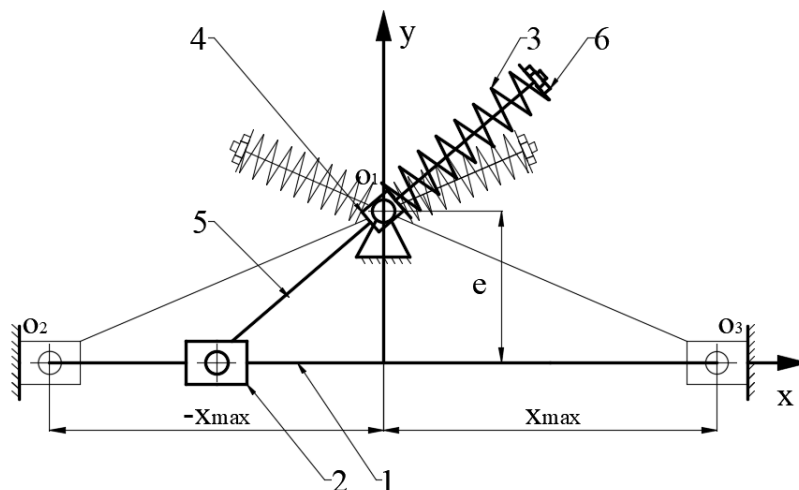


Рисунок 13 – Нелинейный пружинный аккумулятор с поступательной парой:  
 1 – направляющий; 2 – ползун; 3 – пружина; 4 – кулисный камень; 5 – кулиса;  
 6 – регулировочная гайка

Изучено текущее значение кинетической энергии системы без учета диссипативных потерь

$$E_t = U_{max} - U_t = \frac{m \cdot \dot{x}^2}{2},$$

где  $U_{max} = 0.5c(h + s_1)^2$  – максимальная потенциальная энергия пружины;

$h = \sqrt{x_{max}^2 + e^2} - e$  – максимальное рабочее удлинение пружины;

$s_1$  – предварительное сжатие пружины.

$U_t = 0.5c(\sqrt{x^2 + e^2} - e + s_1)^2$  – текущее значение потенциальной энергии.

Минимальное значение потенциальной энергии равно  $U_{min} = 0.5cs_1^2$ .

При наличии предварительного усилия пружины изменение потенциальной энергии происходит в пределах:  $U_{max} - U_{min} - U_{max}$ , и характеристики пружинного аккумулятора зависят от эффективной потенциальной энергии:  $U_э = U_{max} - U_{min}$ .

Определено время перемещения выходного звена на расстояние  $2x_{max}$

$$t = \sqrt{2m} \int_0^s \frac{dx}{\sqrt{U_{max} - U_{min}}} = \sqrt{\frac{m}{c}} \cdot K_{te},$$

где  $K_{te}$  – безразмерный коэффициент, получаемый из выражения:

$$K_{te} = \int_{-1}^1 \frac{d\bar{x}}{\sqrt{(\sqrt{1 + \dot{e}^2} - \dot{e} + \dot{s}_1)^2 - (\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{e}^2} - \dot{e} + \dot{s}_1)^2}},$$

где  $\dot{e} = e/x_{max}$ ,  $\dot{x} = x/x_{max}$ ,  $\dot{s}_1 = s_1/x_{max}$ .

Максимальное усилие пружины равно  $F_{max} = c \cdot (\sqrt{1 + \dot{e}^2} - \dot{e} + \dot{s}_1) \cdot x_{max}$ .

Усилие пружины вдоль направления движения каретки имеет вид



$$F_x = c \cdot \left( \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{e}^2} - \dot{e} + \dot{s}_1 \right) \cdot x_{max} \cdot \cos q,$$

при  $\dot{e} = \dot{s}_1$  и с учетом что,  $F_x = cx$ , и нелинейный пружинный аккумулятор приобретает свойства линейного гармонического осциллятора.

Усилие пружины, действующее по нормали к направлению движения, определяется из выражения

$$F_y = c \cdot \left( \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{e}^2} - \dot{e} + \dot{s}_1 \right) x_{max} \cdot \sin q,$$

где  $\sin q = \frac{e}{x^2 + e^2}$ ,  $\cos q = \frac{x}{x^2 + e^2}$ .

На рисунке 14 показаны графики изменения коэффициента  $K_{te}$  в зависимости от параметров  $\dot{e}$  и  $\dot{s}_1$ . На рисунке 15 показаны эллиптическая зависимость изменения скорости выходного звена без учета диссипативных потерь и линейная зависимость изменения ускорения.

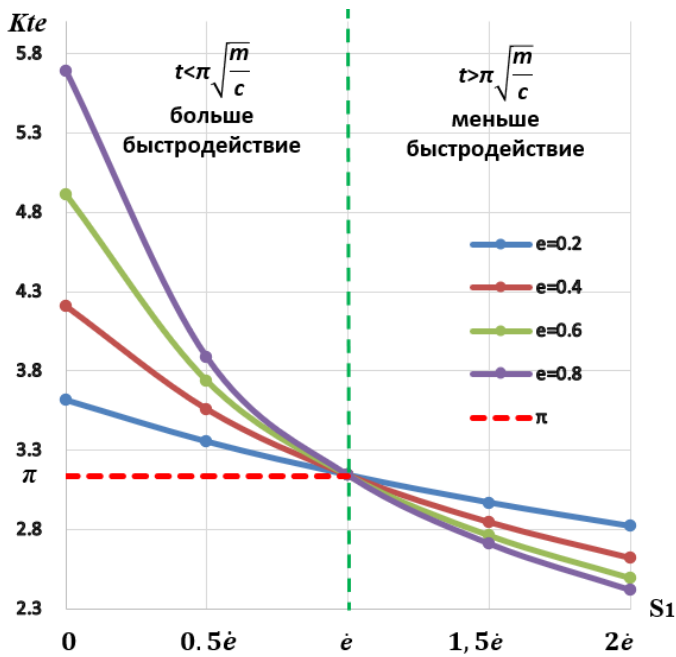


Рисунок 14 – Графики изменения коэффициентов  $K_{te}$

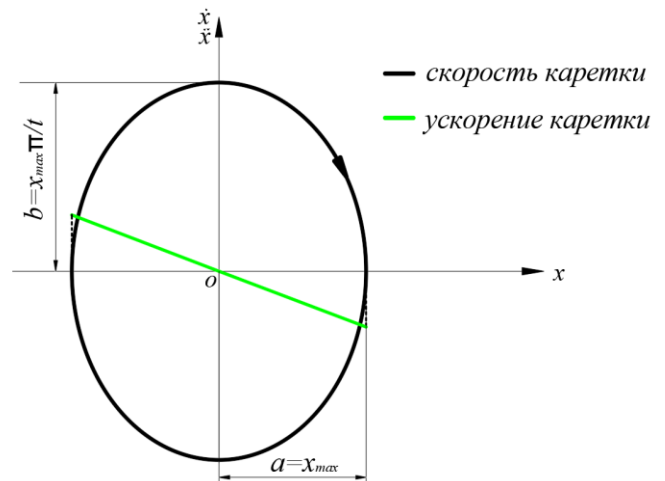


Рисунок 15 – Графики скорости и ускорения выходного звена мехатронного пружинного привода с рекуперацией энергии

Из графиков видно, что все кривые пересекаются в одной точке  $\dot{e} = \dot{s}_1$ , где коэффициент  $K_{te}$  равен  $\pi$  и нелинейный пружинный аккумулятор превращается в линейный. При  $\dot{s}_1$  больше  $\dot{e}$  коэффициент  $K_{te}$  меньше  $\pi$  и наоборот при  $\dot{s}_1$  меньше  $\dot{e}$  коэффициент  $K_{te}$  больше. Следовательно, можно изменять быстродействие привода, изменяя предварительное натяжение пружины  $\dot{s}_1$ .

Очевидно, что при увеличении предварительного усилия пружины, получим еще меньшее значение коэффициента  $K_{te}$ , а также сократит время перемещения каретки.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТЫ

1) Основным результатом диссертационной работы является повышение производительности мехатронного фасовочно-упаковочного оборудования на 10% при погрешности не более предусмотренной ГОСТ 8. 575-2002.

2) Разработано устройство, позволяющее изменять массу дозы в автоматическом режиме. В приводах этого дозатора применяются пневматические цилиндры с двухсторонними штоками.

3) Обосновано применение многократного последовательного дозирования для получения заданных номинальных масс с одновременным не превышает допусковых отклонений.

4) Разработана методика определения производительности в зависимости от геометрических характеристики плунжера и мерных объемов дозатора, предложен эллиптический закон движения шиберов дозаторов в дискретном режиме при использовании мехатронных пружинных приводов, применение которых увеличивает быстродействие на 10% по сравнению с традиционным трапецеидальным законом с использованием типовых пневматических цилиндров.

5) Разработано новое устройство для разматывания, складывания и протягивания упаковочного материала (Патент РФ. № 2753622), что позволяет уменьшить затраты энергии при одновременном снижении динамических нагрузок, уменьшить линейные размеры устройства в горизонтальной плоскости и упростить конструкцию устройства.

6) Показано, что при использовании двухщелевого устройства для складывания упаковочного материала (Патент РФ. № 2741139), в котором щели расположены ортогонально друг к другу, удастся упростить его конструкцию, а также уменьшить осевой габарит и обеспечить равномерное натяжение упаковочного материала, если складывающая щель выполнена по эллипсу.

7) Разработан мехатронный пружинный привод для протягивания упаковочных материалов на базе кулисного механизма (Патент РФ. № 2742446), показана возможность менять характеристики этого привода, за счет изменения предварительной деформации пружины.

8) Разработаны и исследованы мехатронные пружинные приводы с рекуперацией энергии для систем дозирования и протягивания упаковочных материалов, в которых компенсация диссипативных потерь обеспечивается подачей сжатого воздуха низкого давления в рабочие полости пневматических цилиндров. Такие мехатронные пружинные приводы позволяют снизить стоимость проектирования, а затраты энергии дозатора на этих операциях в 5 раз.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Жавнер В.Л., Чжао В., Дозирование сыпучих продуктов малыми дозами массой 0,2–5 грамм, Вестник Международной академии холода. 2018. № 2. С. 34–41.

2. Жавнер М.В., Янь Чуаньчао., **Чжао В.**, Мехатронные рекуперативные приводы для шаговых перемещений на базе пневматических цилиндров с возвратными пружинами, Вестник Международной академии холода. 2019. № 2. С. 22–28.
3. **Чжао В.**, Жавнер М.В., Жавнер В.Л., Универсальные дозаторы для малых предприятий пищевой промышленности. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2019. № 2 (40). С. 19–26.
4. **Чжао В.**, Жавнер В.Л., Смирнов А.Б., Янь Ч., Применение пневматических цилиндров с возвратными пружинами в мехатронных рекуперативных приводах, Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 111–123.
5. В. Л. Жавнер, **Вэнь Чжао**, Лун У, Исследования мехатронного устройства для размотки и протягивания рулонных материалов в дискретном режиме, Технологии мехатроники и робототехники, Приборостроение, 2020. № 4, С. 322–329.

#### **Публикации в международных журналах, индексируемых в реферативной базе Scopus:**

1. Victor L. Zhavner, **Zhao Wen**, Chuanchao Yan and Long Wu, Research and Development of a Spring Drive with Recovery Energy in the Presence of a Variable Inertial Load // Advances in Mechanical Engineering Selected Contributions from the Conference “Modern Engineering: Science and Education”, Saint Petersburg, Russia, June 2020. p. 209–220.
2. V. L. Zhavner, **Zhao Wen**, Research of the Mechatron System of Dosing of Loose Products in Small Doses, Special Issue on "Explorations in Mechanical Engineering and Education" (EMEE 2020), Vol 14, No 2 (2020), p133–138.
3. Valentina P. Belogur, Victor L. Zhavner, Milana V. Zhavner, and **Wen Zhao**, Development and Research of Mechatronic Spring Drives with Energy Recovery for Rod Depth Pumps // Advances in Mechanical Engineering Selected Contributions from the Conference “Modern Engineering: Science and Education”, Saint Petersburg, Russia, June 2021. p. 38–51.

#### **Полученные патенты на изобретения:**

1. Патент РФ. № 2742446 от 06.07.2020, Мехатронный пружинный привод, Жавнер Виктор Леонидович, RU, **Чжао Вэнь**, CN, Янь Чуаньчао, CN.
2. Патент РФ. № 2741139 от 07.09.2020, Способ формования упаковочного материала, Жавнер Виктор Леонидович, RU, **Чжао Вэнь**, CN.
3. Патент РФ. № 2753622 от 26.03.2021, Способ и устройство для разматывания и протягивания рулонного материала, **Чжао Вэнь**, CN, Жавнер Виктор Леонидович, RU.

#### **Учебные пособия:**

1. В. Л. Жавнер, **Чжао Вэнь**, М. В. Жавнер, Янь Чуаньчао, Мехатронные системы в фасовочно-упаковочном оборудовании: учеб. Пособие – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019.–80с.
2. В. Л. Жавнер, О. Н. Мацко, М. В. Жавнер, **Чжао Вэнь**, Мехатронные пружинные приводы с рекуперацией энергии в технологическом оборудовании: учеб. Пособие – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019.–77с.

### **В других изданиях:**

1. Жавнер В.Л., **Чжао В.**, Применение пневматических двигателей для компенсации диссипативных потерь в пружинных приводах с рекуперацией энергии, в сборнике: Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития. Сборник научных трудов международной научно-технической конференции. 2018. С. 307–316.
2. Жавнер В.Л., **Чжао В.**, Мехатронные принципы проектирования систем дозирования сыпучих продуктов малыми дозами, в сборнике: Проблемы механики современных машин материалы 7-ой международной научной конференции. Улан-Удэ, 2018. С. 52–56.
3. Жавнер В.Л., **Чжао В.**, Исследование мехатронной системы дозирования сыпучих продуктов малыми дозами, Современное машиностроение. Наука и образование. 2018. № 7. С. 410–419.
4. Жавнер В.Л., **Чжао В.**, Мехатронная система дозирования сыпучих продуктов малыми дозами, Современное машиностроение. Наука и образование. 2017. № 6. С. 462–470.
5. Жавнер В.Л., **Чжао В.**, Янь Чуаньчао, У Лун, Мехатронные рекуперативные приводы для возвратно-поступательных перемещений на базе пневматических цилиндров с возвратными пружинами, Современное машиностроение. Наука и образование. 2019. № 4. С. 476–486.
6. **Чжао Вэнь.** Жавнер В.Л., Обеспечение требований стандартов к количеству фасованной продукции в потребительской таре М.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017. – часть 2, С. 17–20.
7. **Zhao Wen**, Zhavner Victor Leonidovich, The use of pneumatic cylinders with a return spring to compensate for balance losses in mechanical regenerative drives for reciprocating movements, 6-th international BAPT conference “POWER TRANSMISSIONS 2019” 2019 VARNA, vol. 1, p 107–112.
8. Yan Chuanchao, **Zhao Wen**, The use of pneumatic cylinders with return springs when creating mechanical drives with recuperative energy, 6-th international BAPT conference “POWER TRANSMISSIONS 2019” 2019 VARNA, vol. 1, p 163–167.