

На правах рукописи-----
*Подпись аспиранта*Янь Чуаньчао*ФИО аспиранта*Разработка и исследование пружинных аккумуляторов для мехатронных
приводов с рекуперацией энергии*наименование темы научно-квалификационной работы (заглавными буквами)*2.5.4 «Роботы, мехатроника и робототехнические системы»*отрасль науки (шифр и наименование научной специальности)*15.06.01 «Машиностроение»*наименование направленности (шифр и наименование направления)*

Академическая степень

Исследователь. Преподаватель-исследователь**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**Научный
руководитель:Жавнер В.Л. д.т.н профессор*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО
полностью*

Научный доклад выполнен в Высшей школе автоматизации и робототехники Института Машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный
руководитель:

Жавнер В.Л. д.т.н профессор

*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО
полностью*

Рецензент: Мацко О.Н. к.т.н., доцент, директор ВШАиР, ИММиТ

ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Снижение затрат энергии, повышение производительности и уменьшение габаритных размеров оборудования при использовании мехатронных рекуперативных приводов с пружинными аккумуляторами. Растущая нехватка энергии и земельные конфликты настоятельно требуют новых технологий или оборудования для достижения цели экономии энергии и земли при выполнении тех же функций. Развитие общества требует существенного повышения производительности и создания большей прибыли для предприятий. Показано, что затраты энергии могут быть снижены более 9 раз при использовании линейных или нелинейных пружинных приводов с рекуперацией энергии.

В процессе работы пружинного привода будут потери энергии из трения на направляющих, в пружинах и шарнирных соединениях, поэтому необходимо найти оптимальный двигатель для компенсации диссипативных потерь энергии. Пневматические цилиндры обеспечивают компенсацию диссипативных потерь для пружинных аккумуляторов и фиксируют выходные звена в крайних положениях при наличии паузы технологических нагрузок. Электронные двигатели и гидротехнические цилиндры только обеспечивают быстрое действие при определенном условии, например, большое передаточное число или большая нагрузка.

Многими учеными исследованы пружинные приводы, но из-за характеристик пружины до сих пор не широко применяется в качестве привода. И не созданы полное теоретическое основание и стандарта для применения в промышленности.

Результатами работы могут воспользоваться разработчики энергосберегающего технологического оборудования. В первую очередь это актуально для оборудования пищевых производств, в оборудовании для пакетирования оборудования во всех отраслях промышленности.

Цель и задачи

Разработка и исследование пружинных аккумуляторов с возможностью повышения быстродействия, снижения затрат энергии и уменьшения габарита приводов, предназначенных для применения в мехатронных приводах с рекуперацией энергии.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1) по обзору анализ и сравнение перспективных путей решения пружинных аккумуляторов с рекуперацией энергии для исполнения возвратно-поступающего движения, выявление достоинств и преимуществ известных пружинных приводов.

2) разработка новых схем линейных пружинных аккумуляторов с уменьшением габаритных размеров.

3) разработка математических моделей нелинейных и асимметричных пружинных аккумуляторов исследование параметров с учетом компенсации диссипативных потерь.

4) разработка устройства для определения потерь на внутреннее трение и другие силы сопротивления в пружинах и испытания пружины на прочность.

5) установка зависимости максимального значения массы, которая может быть перемещена за счет пружины в рассматриваемом цилиндре с серий «Европа» в определенный период времени.

6) разработка рекомендации по применению мехатронных нелинейных

пружинных аккумуляторов с рекуперацией энергии, которые устанавливаются в полости цилиндров.

7) разработка и анализ методик оптимизации конструкции пружинных аккумуляторов с растяжения или сжатия.

Предмет исследования

Геометрические, кинематические, динамические, энергетические и силовые параметры и характеристики пружинных аккумуляторов.

Методы исследования

Теоретические исследования и экспериментальные исследования для подтверждения результатов теоретических исследований.

Научная новизна:

1) предложены новые структуры пружинных аккумуляторов для мехатронных приводов с рекуперацией энергии, используемые пружины растяжения и сжатия.

2) обоснован асимметрический пружинный аккумулятор, изменение его параметров может увеличить быстродействие. Скорости ползуна по координату при использовании линейного и асимметрического пружинного привода одинаковы, когда $b = x_{max}$.

3) созданы устройства для определения потерь на внутреннее трение в пружинных аккумуляторах и прочие силы сопротивления при помощи линейного потенциометра с шарнирным креплением.

Теоретическая и практическая значимость

1) предложены новые структуры пружинных аккумуляторов с пружиной сжатия и растяжения по требованию уменьшению габаритных размеров.

2) разработано применение пневматических двигателей для компенсации диссипативных потерь и фиксации привода в крайних положениях для нелинейных пружинных аккумуляторов и асимметричных пружинных аккумуляторов.

3) определены параметры требуемых линейных и нелинейных пружинных аккумуляторов в разных рабочих давлениях, которые установлены в полости пневматических цилиндров.

4) разработаны устройства для определения внутреннего трения в пружинах при помощи линейного потенциометра и испытания для разнотипных пружины на прочность на базе пневматического цилиндра, который компенсирует энергию и фиксирует ползу в крайнем положении.

Апробация работы

Научная работа показана на международной конференции «Современное машиностроение», в 2019 году в СПбПУ.

Публикации

3 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ;

2 статьи в международных журналах, индексируемых в реферативной базе Scopus;

1 патент на изобретения;

1 учебное пособие;

Представление научного доклада: основные положения

- 1) методы расчёта и проектирования пружинных аккумуляторов на базе стандартных цилиндрических винтовых пружин.
- 2) для типовых рабочих операций с учётом различных ограничений разработаны рекомендации по выбору типа пружинного аккумулятора.
- 3) алгоритмы сравнения технических характеристик различных типов пружинных аккумуляторов позволяющие выбирать рациональные конструктивные решения.
- 4) предложены новые конструктивные решения для пружинных аккумуляторов.
- 5) даны рекомендации по построению пружинных аккумуляторов с использованием пневматических цилиндров с возвратными пружинами, что позволяет уменьшить стоимость и время проектирования.
- 6) разработаны устройства на базе пружинных аккумуляторов для определения потерь на внутреннее трение и испытания пружин и пружинных приводов на циклическую прочность.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, так же поставлены цель и задачи исследования, подтверждена теоретическая и практическая значимость, показаны научные новизны диссертационной работы, представлено представление инной диссертационной работы.

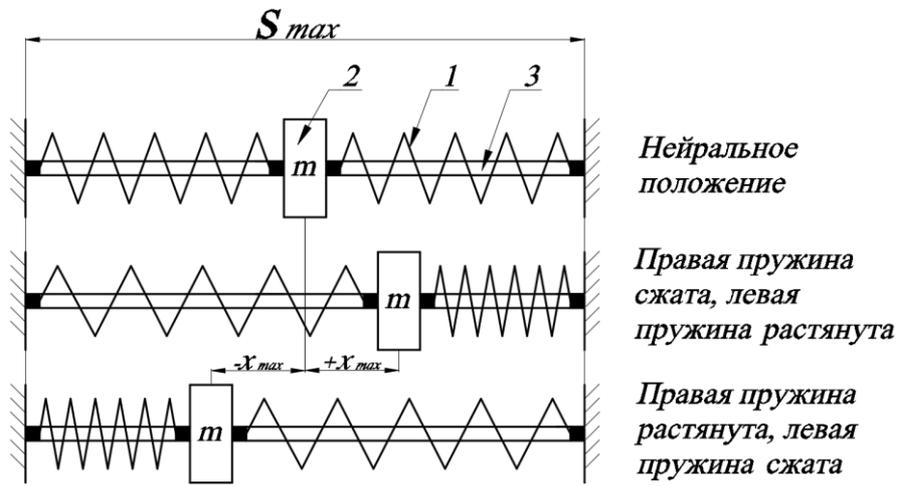
В первой главе показана история развития мехатронных приводов с рекуперацией энергии. Даны основной элемент мехатронных пружинных приводов, определяющим его характеристики, является пружинный аккумулятор. Посвящена характерная особенность пружинных аккумуляторов для мехатронных приводов с рекуперацией энергии.

Проведены анализирование и сравнение характеристик линейных и нелинейных мехатронных пружинных аккумуляторы с рекуперацией энергии и показана характеристика разных двигателей для компенсации диссипативных потерь.

После анализирования обнаружено в литературе отсутствуют рекомендации по выбору схем пружинных аккумуляторов, что не способствует расширению применения пружинных аккумуляторов с рекуперацией энергии, несмотря на их очевидное преимущество, связанное со снижением затрат энергии в несколько раз по сравнению с традиционными приводами. Отсутствуют данные по долговечности мехатронных пружинных аккумуляторов. Нет данных по расчёту диссипативных потерь, связанных с внутренним трением в пружинах. Не исследован пружинный аккумулятор с использованием двух пружин для мехатронных приводов, расположенных асимметрично относительно среднего положения каретки и зеркально относительно осевой линии, обеспечивающих возвратно-поступательные перемещения ползуна.

Во второй главе исследованы основные характеристики и проведен анализ пружинных аккумуляторов для возвратно-поступательных движений.

На рисунке 1 представлена схема линейного пружинного аккумулятора с использованием двух пружин сжатия или растяжения, ползун находится на разных положениях.

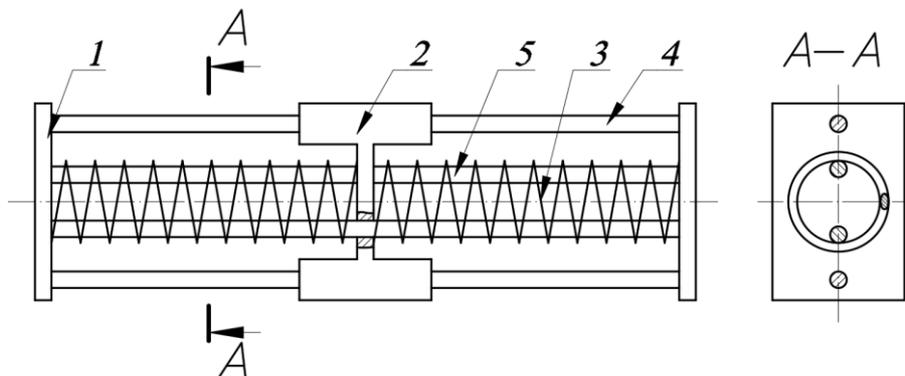


Риснок 1 - Схема линейного пружинного аккумулятора с двумя пружинами сжатия или растяжения: 1 – пружина растяжения или сжатия; 2 - ползун; 3 - направляющий элемент

На рисунке 2 показана схема пружинного аккумулятора с концентрическими пружинами с направляющими элементами. Без учёта диссипативных потерь период колебаний этих систем определяется из выражения:

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{m_p + 0,66 \cdot m_{np}}{2c}}$$

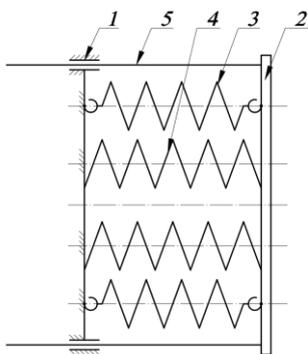
Где m_p - масса рабочего органа; m_{np} - масса пружины; 0,66 - коэффициент учёта массы двух пружин.



1 - корпус; 2 - каретка; 3 - пружина сжатия; 4 - направляющие; 5 - штанги

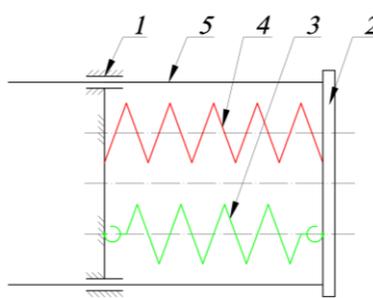
Рисунок 2 - Пружинный аккумулятор на базе двух пружины сжатия, если h больше $7D$

На рисунке 3 показана схема пружинного аккумулятора, в котором пружины сжатия и пружины растяжения расположены с одной стороны выходного звена. Для обеспечения центральной нагрузки на выходное звено используется, по крайней мере, четыре пружины - две пружины растяжения и две пружины сжатия. То есть для этого привода габарит в направлении движения рабочего органа будет меньше, чем у пружинного аккумулятора с двухсторонним расположением пружин. На рисунке 4 показана схема пружинного аккумулятора для возвратно-поступательных перемещений, в котором пружины растяжения и сжатия расположены симметрично.



1 - корпус; 2 - выходное звено; 3 - пружина растяжения; 4 - пружина сжатия; 5 - направляющий

Рисунок 3 - Схема пружинного аккумулятора с односторонним расположением пружин



1 - корпус; 2 - выходное звено; 3 - пружина растяжения; 4 - пружина сжатия; 5 - направляющие

Рисунок 4 - Схема пружинного аккумулятора, в котором пружины растяжения и сжатия расположены симметрично:

На рисунке 5 показана новая схема пружинного аккумулятора, состоящего из пружины сжатия и пружины растяжения, имеющих общую ось и расположенных концентрично. Жёсткости пружин должны быть одинаковы. Пружина сжатия должна быть снаружи, так как в этом случае её наружный диаметр больше и проще обеспечить поперечную устойчивость. На рисунке 7 представлено конструктивное оформление такого пружинного аккумулятора.

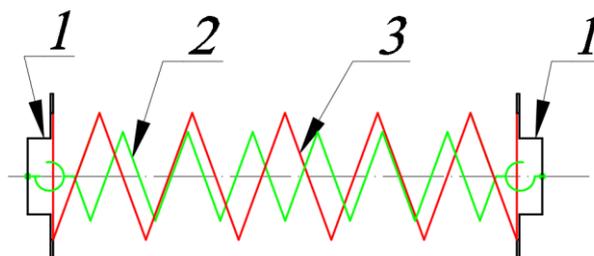
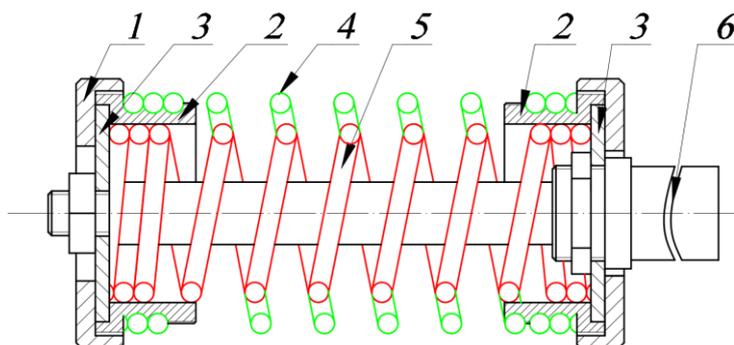


Рисунок 5 - Схема пружинного аккумулятора из концентричных расположенных 2 пружин сжатия, 3 пружин растяжения и 1 фланцы боковые

На рисунке 6 представлено конструктивное оформление пружинного аккумулятора из рисунка 5.

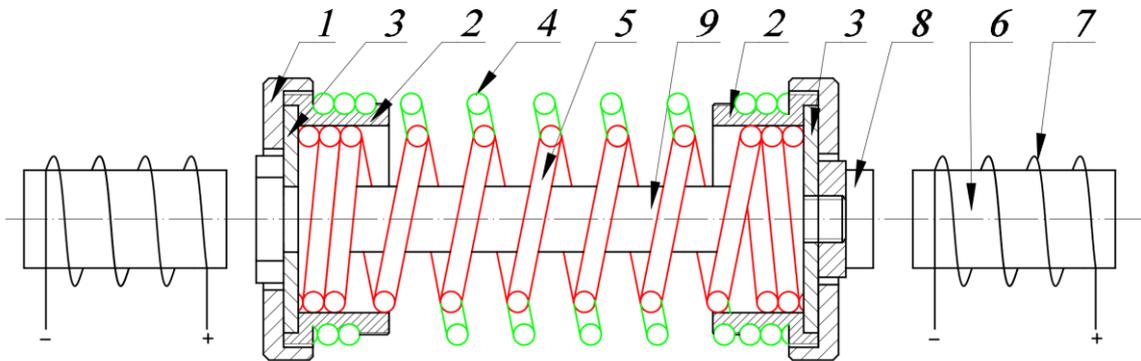


1- накидная гайка; 2 - втулка; 3 - диск; 4 - пружина сжатия; 5 - пружина растяжения; 6 - цилиндр пневматический с фиксатором

Рисунок 6 - Конструктивное оформление пружинного аккумулятора с пневматическим

цилиндром, когда пружины сжатия и растяжения расположены с одной стороны от выходного звена

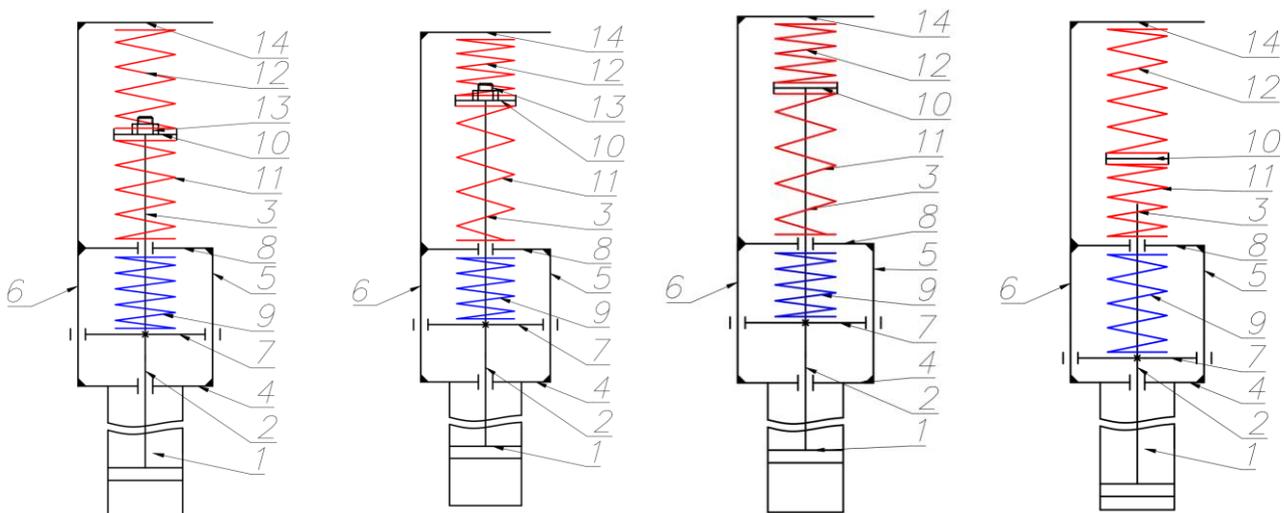
Рисунок 7 показано конструктивное оформление пружинного аккумулятора с электромагнитами с изменяемой полярностью.



1- накидная гайка; 2 - втулка; 3 - диск; 4 - пружина сжатия; 5 - пружина растяжения; 6 - сердечник; 7 - катушка; 8 - магнит; 6 - стержень

Рисунок 7 - Конструктивное оформление пружинного аккумулятора с электромагнитами с изменяемой полярностью

На рисунке 8 представлена рабочая схема устройства для определения внутреннего трения в пружинном аккумуляторе.



1 - пневматический цилиндр; 2 - толкатель; 3 - удлинитель; 4 - диск; 5 - стяжка; 6 - стяжка; 7 - подвижный диск; 8 - неподвижный диск; 9 - пружина сжатия; 10 - выходное звено; 11,12 - пружина сжатия; 13 - гайка; 14 - диск

Рисунок 8 - Конфигурация устройства при колебательном процессе

На рисунке 9 показан 3-д модель устройства для определения внутреннего трения.

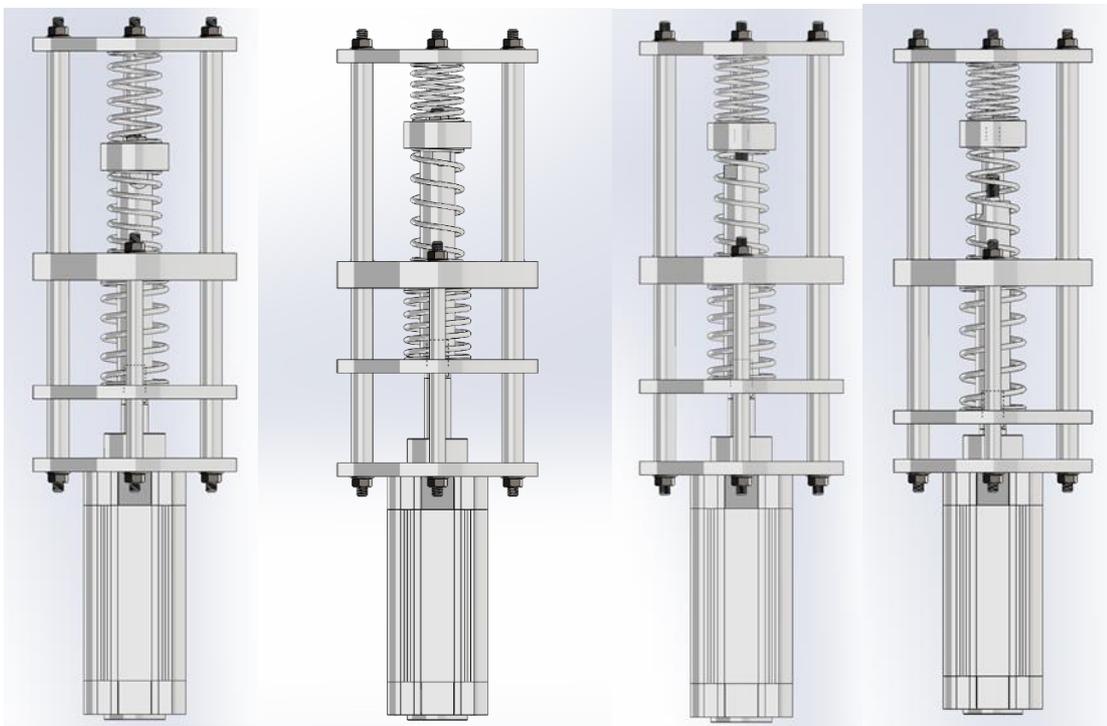


Рисунок 9 - 3-Д модель устройства для определения затухания пружины

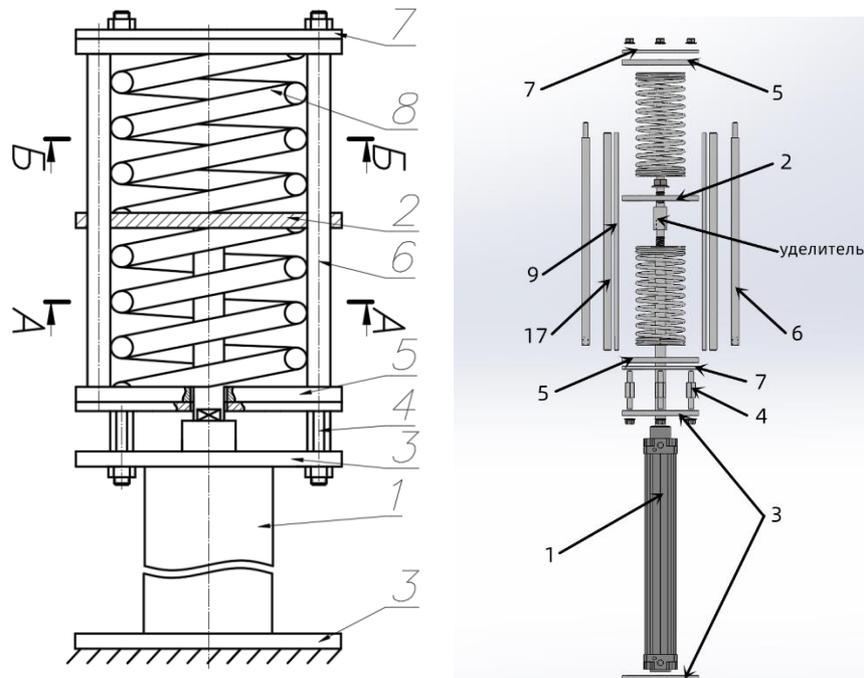
Силовые соотношения для этой конфигурации, соответствующие: неподвижность системы обеспечивается тем, что усилие P_u больше суммы усилий P_9 и P_{12} .

P_u - усилие действующее на поршень цилиндра от подачи сжатого воздуха в поршневую полость;

P_9 - усилие действующее на шток цилиндра от сжатой пружины 9;

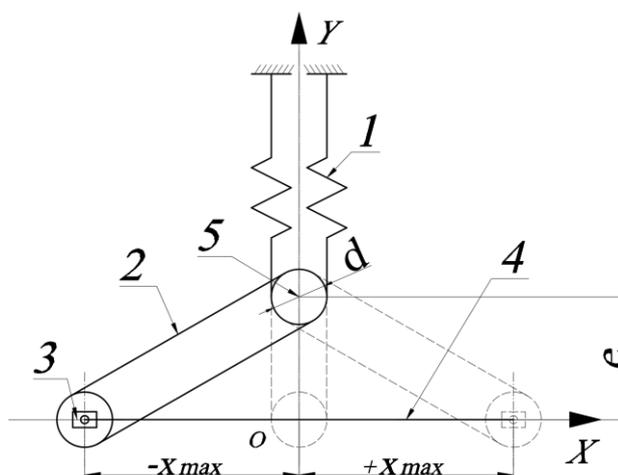
P_{12} - усилие действующее на шток цилиндра от сжатой пружины 12.

С целью расширения функциональных возможностей устройств для продолжительных испытания пружин на прочность предлагается использовать в них пружинный привод с использованием испытуемых пружин, а для компенсации диссипативных потерь и первичной максимальной деформации одной из пружин используется пневматический цилиндр с максимальным усилием больше или равным максимальному усилию пружины. На рисунке 10 представлена схема устройства для проведения испытаний пружин на циклическую прочность, разработанного при участии автора.



1 - пневматический цилиндр; 2 - диск; 3 - пластины; 4 - стойка; 5 - пластина с отверстием; 6 - направляющие; 7 - пластина; 8 - испытуемая пружина; 9 - стержень; 10 - датчик положения; 11 - датчик положения; 12 - система управления; 13, 14 - распределитель; 15 - подготовка воздуха; 16 - ручной распределитель
Рисунок 10 - Общий вид устройства с испытуемыми пружинами сжатия

В третьей главе разработаны и исследованы характеристики пружинных аккумуляторов на базе кулсного механизма. На рисунке 11 представлен вариант реализации пружинного аккумулятора, в котором функции кулисы выполняют гибкие элементы, соединённые с пружинами сжатия или растяжения.



1 – пружина растяжения; 2 - гибкие элементы; 3 - ползун; 4 - направляющий; 5 - круглый блок
Рисунок 11 - Пружинный аккумулятор с поступательным ползуном на базе гибких элементов

Если имеется пружинный аккумулятор, в котором $m = (c \cdot e) / g$, то период колебаний:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{e}{g}}$$

На рисунке 12 представлен график зависимости периода T от e .

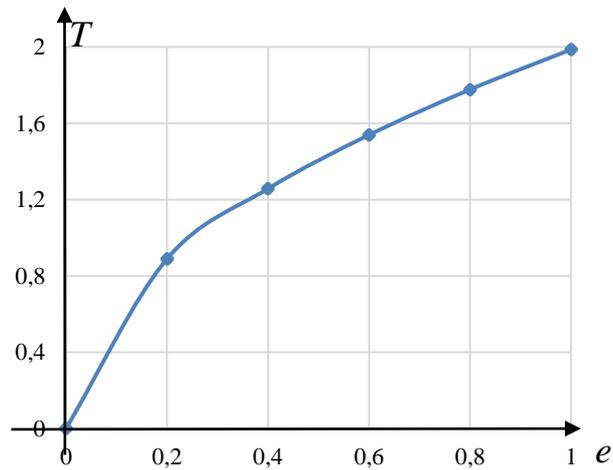


Рисунок 12 - График зависимости периода колебаний выходного звена от конструктивного размера e

Максимальный рабочий ход h пружины сжатия и пружины растяжения определяется из следующего уравнения.

$$e^2 + x_{max}^2 = h^2$$

Максимальная потенциальная энергия пружины.

$$U_{max} = 0.5c \cdot h^2$$

Максимальное значение определяем при максимальном фиксированном значении x_{max} .

На рисунке 13 показан график изменения U от x . На рисунке 14 представлен график изменения v ползуна от x .

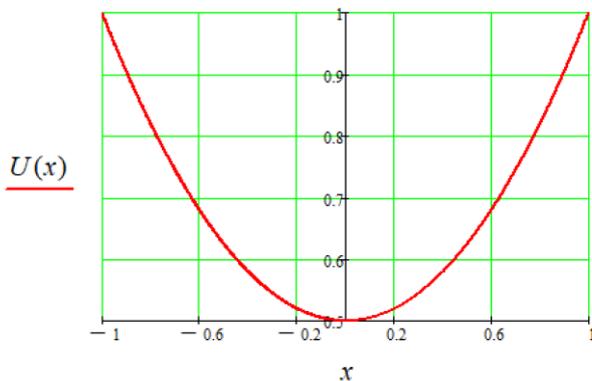


Рисунок 13 - График изменения потенциальной энергии пружинного аккумулятора в зависимости от координата

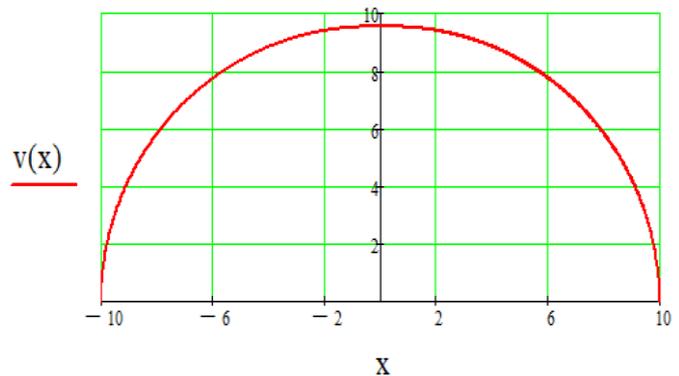


Рисунок 14 - График изменения скорости ползуна в зависимости от координата

Время перемещения на расстояние x определяется из выражения

$$t = \sqrt{2m} \int_{-s}^s \frac{dx}{\sqrt{U_{max} - U_{min}}}$$

Поставив преобразованное уравнение, получим:

$$t = K_{te} \sqrt{\frac{m}{c}}$$

При $e = s_l$ получаем свойства гармонического осциллятора, получим K_{te} :

$$K_{te} = \int_{-1}^1 \frac{d\bar{x}}{\sqrt{(\sqrt{1+\bar{e}^2})^2 - (\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{e}^2})^2}} = 3.142 = \pi$$

На Рисунке 15 представлен асимметричный пружинный аккумулятор с поступательным ползуном с использованием пружин сжатия. Такие пружинные аккумуляторы целесообразно применять при высоких максимальных значениях усилия пружин, так как при такой начальной конфигурации при применении пневматических цилиндров для компенсации диссипативных потерь удаётся выполнить первичную зарядку для пружинного аккумулятора.

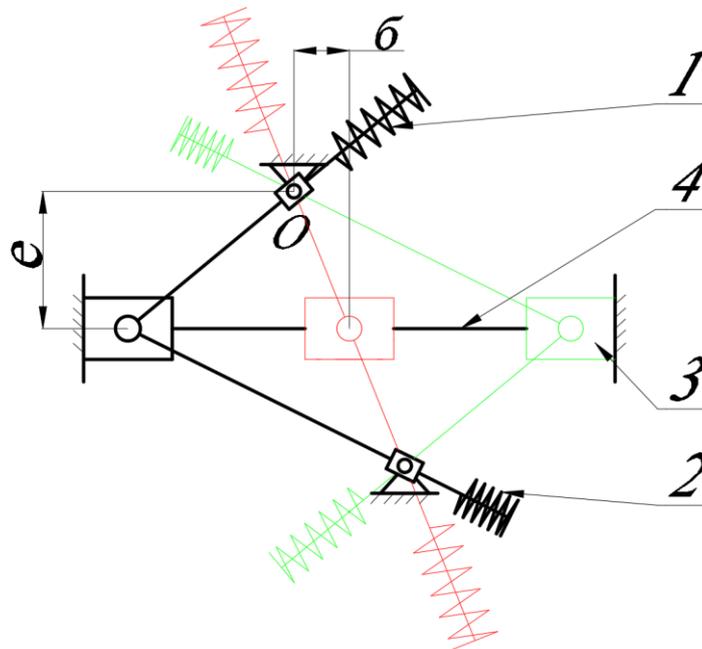


Рисунок 15 - Асимметричный пружинный аккумулятор с поступательным ползуном на основе пружин сжатия в горизонтальной плоскости

Усилие двух пружин действует на ползун:

$$F_x = c \cdot \left[\frac{(x-b) \cdot \left(\sqrt{(x-b)^2 + e^2} - e + s_1 \right)}{\sqrt{(x-b)^2 + e^2}} + \frac{(x+b) \left(\sqrt{(x+b)^2 + e^2} - e + s_1 \right)}{\sqrt{(x+b)^2 + e^2}} \right]$$

$$F_y = \frac{c \cdot e \cdot \left(\sqrt{(x-b)^2 + e^2} - e + s_1 \right)}{\sqrt{(x-b)^2 + e^2}} - \frac{c \cdot e \cdot \left(\sqrt{(x+b)^2 + e^2} - e + s_1 \right)}{\sqrt{(x+b)^2 + e^2}}$$

График зависимости суммарного поперечного усилия на ползун показан на рисунке 16 и 17.

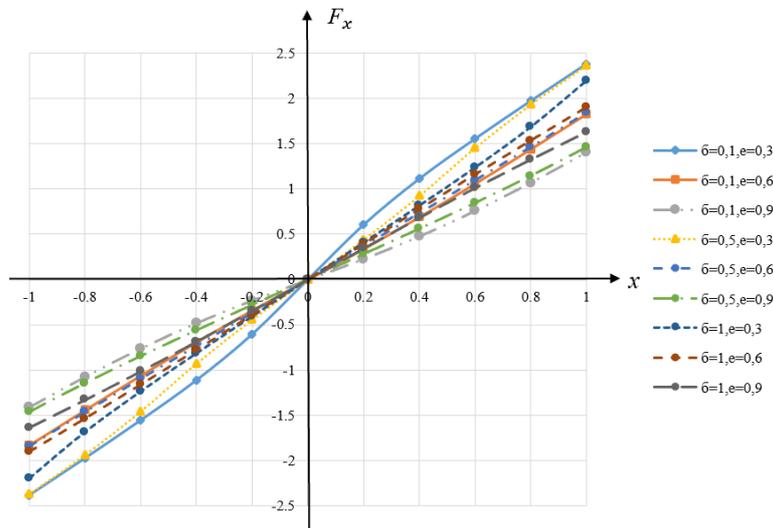


Рисунок 16 - График усилия F_x на ползун по направлению движения при $s_l=0,5$

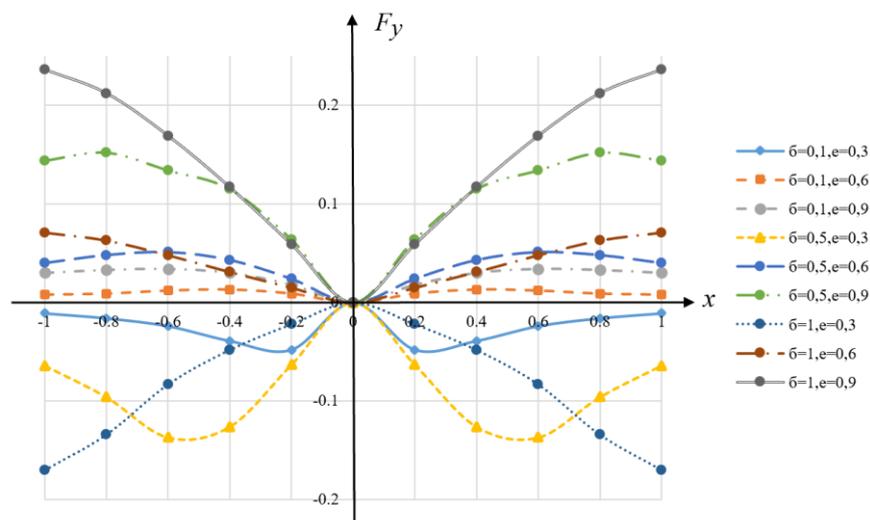


Рисунок 17 - График суммарного усилия F_y на направляющей при $s_l=0,5$

$$U_m = \frac{1}{2} c \cdot x_{max} \cdot [(\sqrt{(\bar{x} + \bar{\delta})^2 + \bar{e}^2} - \bar{e} + \bar{s}_l)^2 + (\sqrt{(\bar{x} - \bar{\delta})^2 + \bar{e}^2} - \bar{e} + \bar{s}_l)^2]$$

Время перемещения от одной крайнего положения до другого в зависимости от амплитуды.

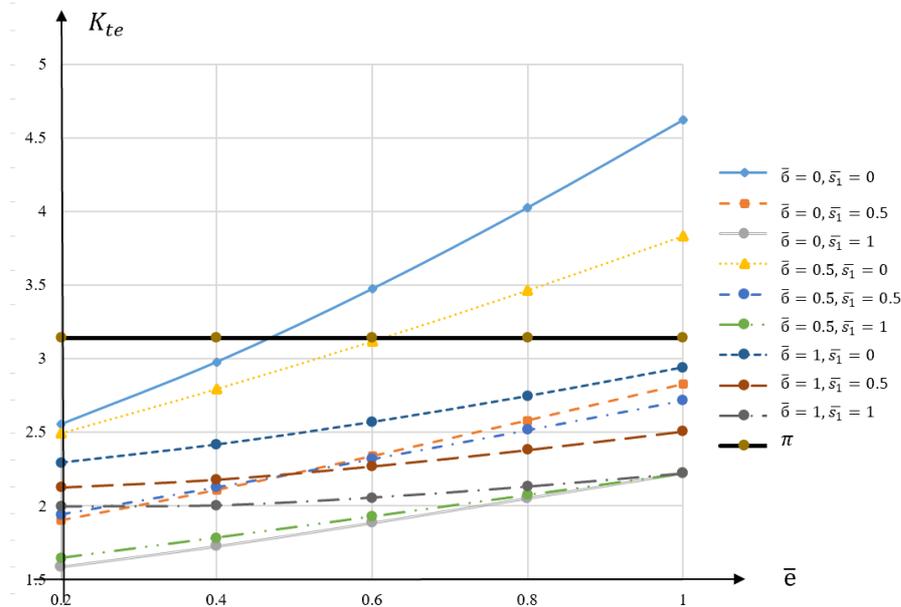
$$t = \sqrt{m/2} \int_{-x_{max}}^{x_{max}} \frac{dx}{\sqrt{U_{max} - U_m}}$$

Получим цикл перемещения.

$$t = \sqrt{\frac{m}{c}} \int_{-x_{max}}^{x_{max}} \frac{dx}{\sqrt{(\sqrt{(x_{max} + \bar{\delta})^2 + \bar{e}^2} - \bar{e} + \bar{s}_l)^2 + (\sqrt{(x_{max} - \bar{\delta})^2 + \bar{e}^2} - \bar{e} + \bar{s}_l)^2 - (\sqrt{(x + \bar{\delta})^2 + \bar{e}^2} - \bar{e} + \bar{s}_l)^2 + (\sqrt{(x - \bar{\delta})^2 + \bar{e}^2} - \bar{e} + \bar{s}_l)^2}}$$

Преобразовано управление на безразмерный вид. На рисунке 18 показано график зависимости K_{te} от \bar{e} .

$$K_{te} = \sqrt{\frac{m}{c}} \int_{-1}^1 \frac{d\bar{x}}{\sqrt{(\sqrt{(1 + \bar{\delta})^2 + \bar{e}^2} - \bar{e} + \bar{s}_l)^2 + (\sqrt{(1 - \bar{\delta})^2 + \bar{e}^2} - \bar{e} + \bar{s}_l)^2 - (\sqrt{(x + \bar{\delta})^2 + \bar{e}^2} - \bar{e} + \bar{s}_l)^2 - (\sqrt{(x - \bar{\delta})^2 + \bar{e}^2} - \bar{e} + \bar{s}_l)^2}}$$

Рисунок 18 - график зависимости K_{te} от \bar{e} .

Работа для преодоления силы сопротивления в пружинах равна:

$$A_I = \frac{1}{2} \varphi \cdot c \cdot x_{max} \left[\left(\sqrt{(x+\bar{b})^2 + \bar{e}^2} - \bar{e} + \bar{s}_I \right)^2 + \left(\sqrt{(x-\bar{b})^2 + \bar{e}^2} - \bar{e} + \bar{s}_I \right)^2 \right]$$

Где φ - коэффициент рассеивания, можно принимать равным 0,1;

Работа, потребляемая в шарнирных соединениях равна:

$$F_{mp}^{np} = c_{HA} \cdot f \cdot d \cdot x_{max} \cdot \bar{e} \cdot \left[\frac{\sqrt{(\bar{x}+\bar{b})^2 + \bar{e}^2} - \bar{e} + \bar{s}_I}{(\bar{x}+\bar{b})^2 + \bar{e}^2} + \frac{\sqrt{(\bar{x}-\bar{b})^2 + \bar{e}^2} - \bar{e} + \bar{s}_I}{(\bar{x}-\bar{b})^2 + \bar{e}^2} \right]$$

Получим:

$$F_{mp}^{np} = 2 \cdot c_{HA} \cdot f \cdot d \cdot x_{max} \cdot \bar{e} \cdot \left[\frac{(\bar{x}+0.1)}{(\bar{x}+0.1)^2 + \bar{e}^2} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{(\bar{x}+0.1)^2 + \bar{e}^2}} - \frac{\bar{e}}{(\bar{x}+0.1)^2 + \bar{e}^2} \right) + \frac{(\bar{x}-0.1)}{(\bar{x}-0.1)^2 + \bar{e}^2} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{(\bar{x}-0.1)^2 + \bar{e}^2}} - \frac{\bar{e}}{(\bar{x}-0.1)^2 + \bar{e}^2} \right) \right]$$

Максимальная сила трения зависит от параметров \bar{e} к ползуну при $\bar{b}=0,1, \bar{s}_I=0$, представлена на рисунке 19 а при $\bar{b}=0, \bar{s}_I=\bar{e}$ представлена на рисунке 20.

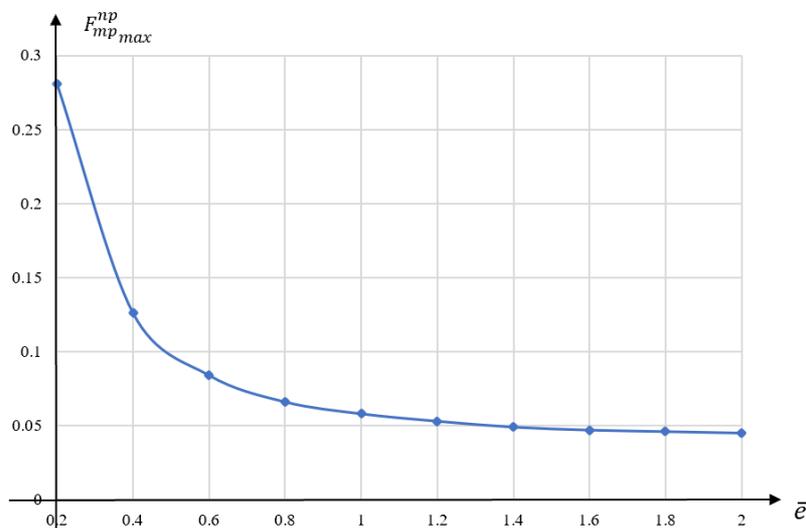


Рисунок 19 - Зависимость приведенной к ползуну силы трения $F_{mp_{max}}^{np}$ в шарнирных соединениях от \bar{e} при $\bar{b}=0,1, \bar{s}_I=0$

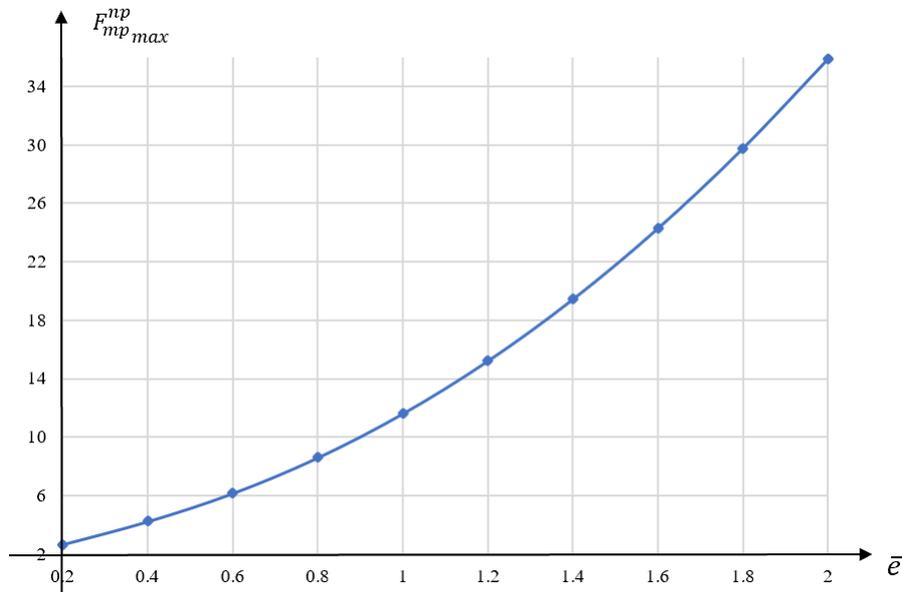


Рисунок 20 - Зависимость приведенной к ползуну силы трения $F_{mp_{max}}^{np}$ в шарнирных соединениях от \bar{e} при $\bar{b}=0,1, \bar{s}_1=\bar{e}$

Получи работу, требуемая на преодоление сил трения в шарнирных соединениях при разных параметрах, определяться следующими примерами:

При $\bar{b}=0,1, \bar{s}_1=0$, получим A_2 :

$$A_2 = \int_{-x_{max}}^{x_{max}} c \cdot f \cdot d \cdot x_{max} \cdot \bar{e} \cdot \left[\frac{\sqrt{(\bar{x}+0.1)^2 + \bar{e}^2} \cdot \bar{e}}{(\bar{x}+0.1)^2 + \bar{e}^2} + \frac{\sqrt{(\bar{x}-0.1)^2 + \bar{e}^2} \cdot \bar{e}}{(\bar{x}-0.1)^2 + \bar{e}^2} \right] dx$$

При $\bar{b}=0,1, \bar{s}_1=\bar{e}$, получим A_2 :

$$A_2 = \int_{-x_{max}}^{x_{max}} c \cdot f \cdot d \cdot x_{max} \cdot \bar{e} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{(\bar{x}+0.1)^2 + \bar{e}^2}} + \frac{1}{\sqrt{(\bar{x}-0.1)^2 + \bar{e}^2}} \right] dx$$

Кроме веса ползуна на направляющих, также подвергается тяговому усилию пружинного аккумулятора:

$$A_4 = \int_{-x_{max}}^{x_{max}} c \cdot f \cdot x_{max} \cdot \bar{e} \cdot \left[\frac{\sqrt{(\bar{x}+\bar{b})^2 + \bar{e}^2} \cdot \bar{e} + \bar{s}_1}{\sqrt{(\bar{x}+\bar{b})^2 + \bar{e}^2}} - \frac{\sqrt{(\bar{x}-\bar{b})^2 + \bar{e}^2} \cdot \bar{e} + \bar{s}_1}{\sqrt{(\bar{x}-\bar{b})^2 + \bar{e}^2}} \right] dx$$

Работа, затраченная на преодоление сил трения на направляющих, равна:

$$A_3 = U_m - A_4$$

$$U_m = 2m \cdot g \cdot f \cdot x_{max}$$

С учетом

$$A_4 = 0$$

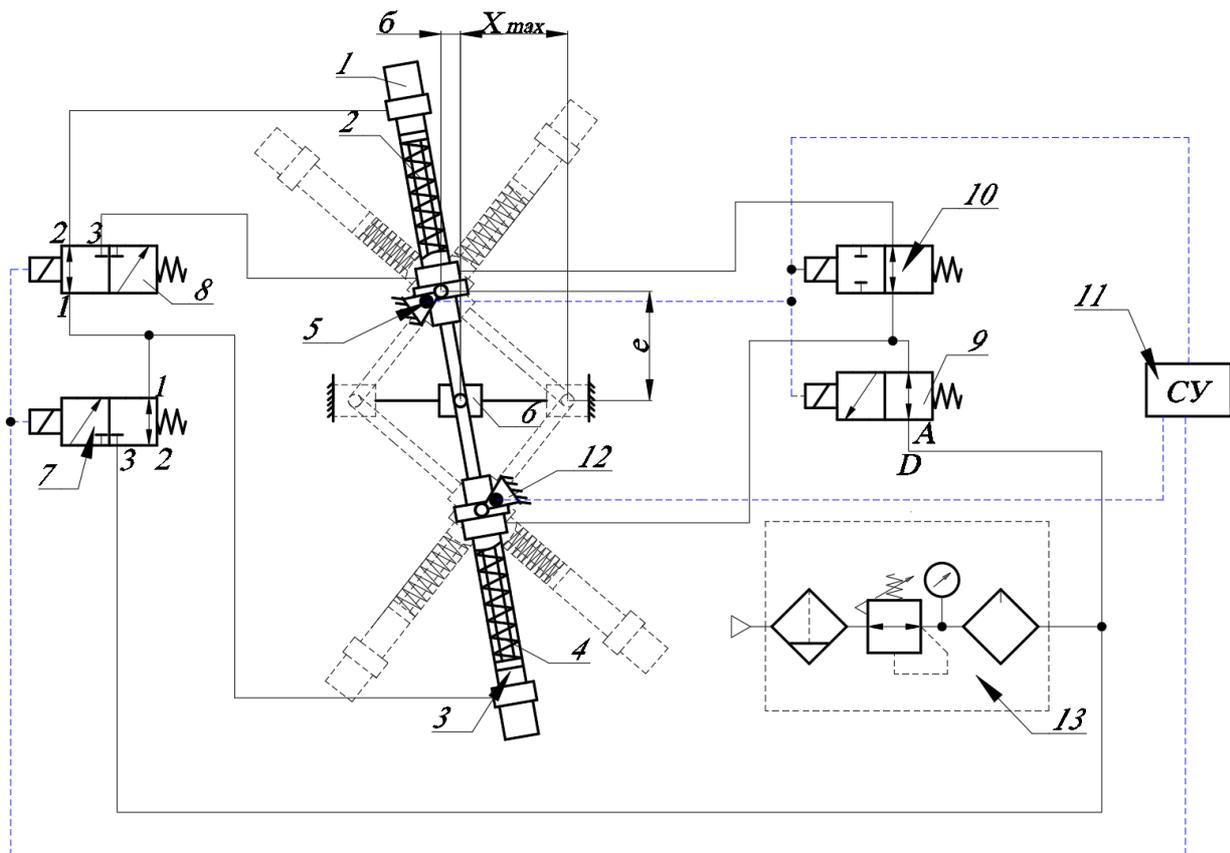
Получим управление работы силы трения:

$$A_3 = 2m \cdot g \cdot f \cdot x_{max}$$

В четвертой главе представлены схемы разработки технической идеологии создания мехатронных асимметричных пружинных приводов с рекуперацией энергии на базе пневмоцилиндра. Компенсация диссипативных потерь за счет подачи давления в полость, в которой расположена пружина. Фиксация в крайних положениях за счет подачи давления в противоположения.

На рисунке 21 представлена кинематическая схема асимметричного пружинного

аккумулятора с использованием пневматических цилиндров и четырьмя распределителями.



1,3 - пневматический цилиндр; 2,4 - пружина 1; 5 - датчик положения; 6 - ползун; 7,8 - распределитель 3/2; 9,10 - распределитель 2/2; 11 - система управления; 12 - основание; 13 - элементы подготовки воздуха

Рисунок 21 - Кинематическая схема асимметричного пружинного аккумулятора на базе пневматических цилиндров с пружинными аккумуляторами, установленными в штоковой полости

Получим сила на поршень от давления равно:

$$F_{ц} = p \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

По геометрическому графику можно найти усилия от цилиндра и пружин по направляющему в крайнем положении:

$$F_{цх} = F_{ц1} \cdot \cos \alpha + F_{ц3} \cdot \cos \beta$$

$$\text{где } \cos \alpha = \frac{x-b}{\sqrt{(x-b)^2 + e^2}} \text{ и } \cos \beta = \frac{x+b}{\sqrt{(x+b)^2 + e^2}}$$

Получим силу от цилиндра на направляющий:

$$F_{цх} = \frac{p\pi d^2}{4} \cdot \left(\frac{x-b}{\sqrt{(x-b)^2 + e^2}} - \frac{x+b}{\sqrt{(x+b)^2 + e^2}} \right)$$

Удлинение пружины сжатия равно:

$$h_{н1} = \sqrt{(x-b)^2 + e^2} - e + s_1 \text{ и } h_{н3} = \sqrt{(x+b)^2 + e^2} - e + s_1$$

Получим сила пружины по направляющий:

$$F_{nx} = c \cdot (h_{n1} \cdot \cos \alpha + h_{n3} \cdot \cos \beta)$$

После преобразования сила пружины сжатия по направляющему равно:

$$F_{nx} = c \cdot \left(\frac{(\sqrt{(x-\bar{b})^2 + e^2} - e + s_l) \cdot (x-\bar{b})}{\sqrt{(x-\bar{b})^2 + e^2}} + \frac{(\sqrt{(x+\bar{b})^2 + e^2} - e + s_l) \cdot (x+\bar{b})}{\sqrt{(x+\bar{b})^2 + e^2}} \right)$$

По геометрическому отношению получим:

$$e^2 + (x+\bar{b})^2 = (x+\bar{b}+e)^2$$

Где h - длина рабочей деформации пружины, которая установлена в цилиндре. Получим:

$$\bar{b} = \sqrt{2h_{max}e + h^2} - x_{max}$$

Задаем $x_{max} = 50\text{мм}$, $h_{max} = 40\text{мм}$.

Определим максимальное значение t_n тангенса угла давления в нейтральном положении каретки.

$$\tan \alpha_{max} = \frac{e}{|\bar{b}|}$$

На рисунке 22 показан график зависимости \bar{b} от e . На рисунок 23 показан график зависимости значения t_n от e .

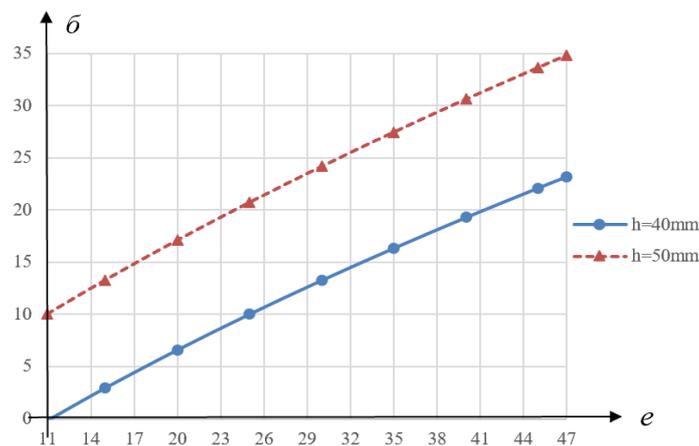


Рисунок 22 - График зависимости значения \bar{b} от e

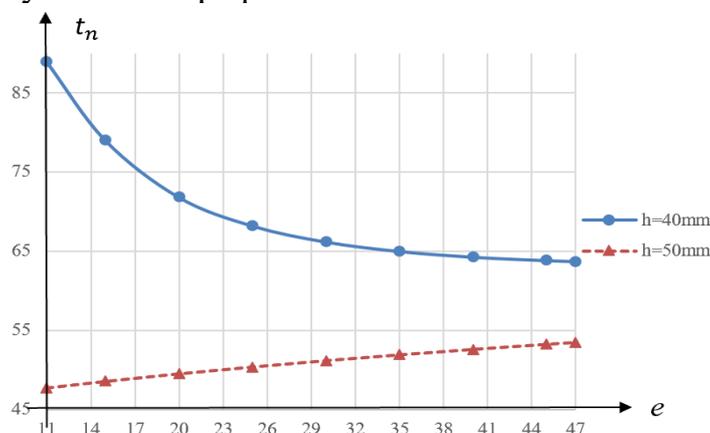


Рисунок 23 - График зависимости значения t_n от e

Найди производную от функции F .

$$F = \frac{e}{\bar{b}}$$

$$F = \frac{e}{(\sqrt{2he + h^2} - x_{max})}$$

На рисунок 24 показан график зависимости значения F от e при $11\text{мм} \leq e \leq 47\text{мм}$ $x_{max} = 50\text{мм}$, $h_{max} = 40\text{мм}$ и 50мм .

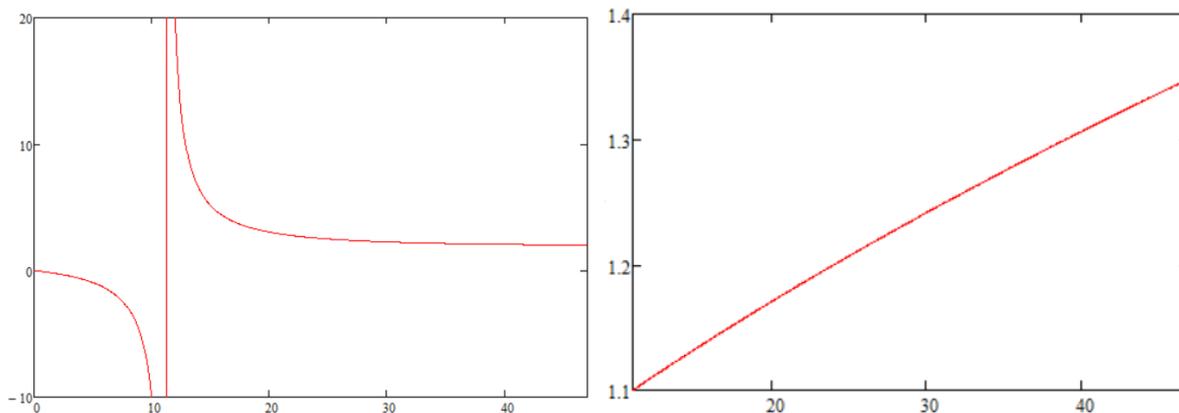


Рисунок 24 - График зависимости значения F от e при $11\text{мм} \leq e \leq 47\text{мм}$ $x_{\max} = 50\text{мм}$, $h_{\max} = 40\text{мм}$ и 50мм

На рисунке 25 представлена пневматическая схема, обеспечивающий первичную зарядку пружинного аккумулятора и работу в обычном режиме.

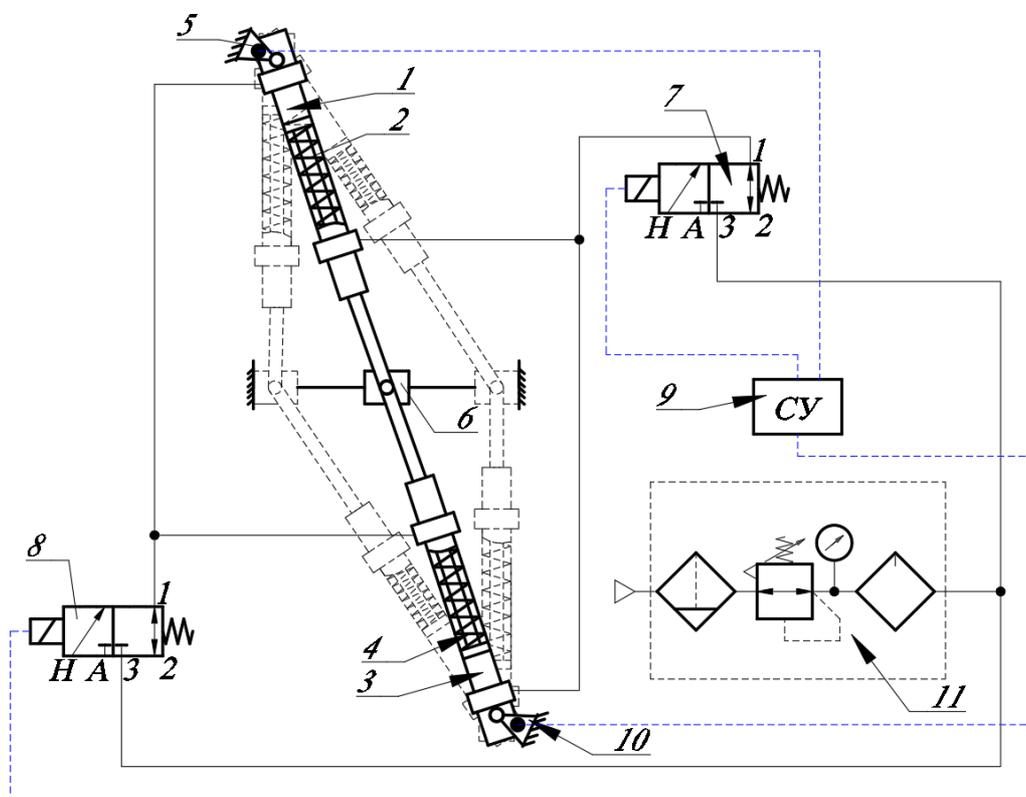


Рисунок 25 - Пневматическая схема асимметрического пружинного привода и предварительную зарядку пружинного аккумулятора при $b = x_{\max}$.

Конфигурация пружинного привода с $b = x_{\max}$ упрощает алгоритм управления. Значение e получаем из решения следующего уравнения:

$$(2x_{\max})^2 + e^2 = (h + e)^2$$

Для линейного пружинного привода скорость ползуна равно:

$$v_{ли} = \sqrt{\frac{2c(x_{\max}^2 - x^2)}{m}}$$

Для нелинейного пружинного привода скорость ползуна равно:

$$\dot{x}_{мек} = \sqrt{\frac{c}{m} \left(\sqrt{(x_{\max} + b)^2 + e^2 - e + s_1} \right)^2 + \left(\sqrt{(x_{\max} - b)^2 + e^2 - e + s_1} \right)^2 - \left(\sqrt{(x + b)^2 + e^2 - e + s_1} \right)^2 - \left(\sqrt{(x - b)^2 + e^2 - e + s_1} \right)^2}$$

На рисунке 26 показан график скорости ползуна по координату при использовании линейного и асимметрического пружинного привода.

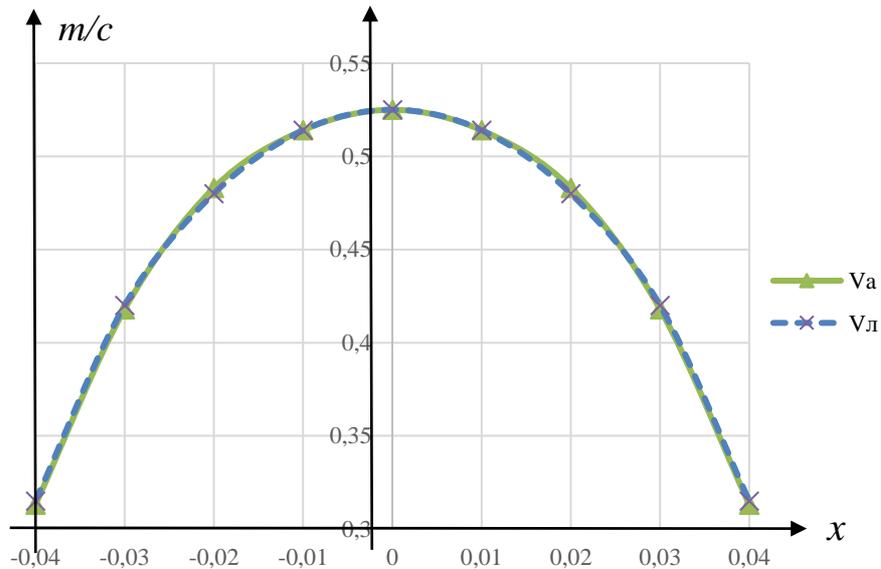


Рисунок 26 - График скорости ползуна по координату при использовании линейного и асимметрического пружинного привода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Анализирован обзор и патентов в области пружинных аккумуляторов. В результате получены рекомендации по выбору пружинных аккумуляторов для разных операций.

2) Предложены новые конструкции для линейных пружинных аккумуляторов с пружиной растяжения и сжатия. Показано, что уменьшения габаритных размеров в 2 раза при одинаковом ходе перемещения, чем обычные линейные пружины.

3) Предложены рекомендации пневмоцилиндров, требуемых для обеспечения компенсации диссипативных потерь для пружинных аккумуляторов и фиксирования выходного звена в крайних положениях.

4) исследован пружинный аккумулятор с использованием двух пружин для мехатронных приводов, расположенных асимметрично относительно среднего положения каретки и зеркально относительно осевой линии, обеспечивающих возвратно-поступательные перемещения ползуна, Его быстродействие мехатронного рекуперативного привода выше, чем линейные пружинные аккумуляторы с рекуперацией энергии. Показано, что скорости ползуна при использовании линейного и асимметрического пружинного привода одинаковы, когда $b = x_{max}$.

5) созданы устройства на базе пружинных аккумуляторов для определения потерь на внутреннее трение при помощи линейного потенциометра с шарнирным креплением и испытания пружин и пружинных приводов на циклическую прочность.

6) даны математические модели для динамических расчетов нелинейного пружинного аккумулятора с поступательным ползуном на базе гибких элементов и с пружиной растяжения и асимметричных пружинных аккумуляторов.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Чжао В., Жавнер В.Л., Смирнов А.Б., **Янь Ч.**, Применение пневматических цилиндров с возвратными пружинами в мехатронныхт рекуперативных приводах, Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 111 - 123.
2. Жавнер М.В., **Янь Чуаньчао.**, Чжао В., Мехатронные рекуперативные приводы для шаговых перемещений на базе невматических цилиндров с возвратными пружинами, Вестник Международной академии холода. 2019. № 2. С. 22 - 28.
3. Жавнер М.В., Янь Ч., Ли С., Исследование пружинных аккумуляторов для мехатронных приводов с рекуперацией энергии в оборудовании пищевых производств, Вестник международной академии холода. 2022. № 1. С. 68-75.

Публикации в международных журналах, индексируемых в реферативной базе Scopus:

1. Victor L. Zhavner, Zhao Wen, **Chuanchoo 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. Milana V. Zhavner, Sen Li and **Chuanchoo Yan**, Research of Spring Accumulators with Output Rotary Link Used in Technological Equipment to Reduce Energy Consumption // Advances in Mechanical Engineering Selected Contributions from the Conference “Modern Engineering: Science and Education”, Saint Petersburg, Russia, June 2019. p. 221-232.

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.

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.

В других изданиях

1. Yan Chuanchoo, 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.
2. 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.
3. Чжао В., Янь Ч., Жавнер В.Л., Разработка и исследование системы приводов для размотки и протягивания рулонных материалов в дискретном режиме, Современное машиностроение. Наука и образование. 2021. № 10. С. 432-446.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

**РЕЦЕНЗИЯ
НА НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

Аспиранта _____ Янь Чуаньчао _____
фамилия, имя, отчество

Направление подготовки (направленность) _____ 2.5.4 Роботы, мехатроника и
робототехнические системы _____

Группа _____ 3361501/80301 _____

Наименование темы: Разработка и исследование пружинных аккумуляторов
для мехатронных приводов с рекуперацией энергии

Рецензент _____ Мацко Ольга Николаевна _____
фамилия, имя, отчество
ВШАиР, СПбПУ, к.т.н., доцент
(место работы, должность, ученое звание, степень)

Научный доклад Янь Чуаньчао посвящён исследованию и разработке пружинных аккумуляторов используемых в мехатронных приводах с рекуперацией энергии. Целью данной работы является исследование различных типов пружинных аккумуляторов, что позволит расширить область применения мехатронных пружинных приводов с рекуперацией энергии, позволяющих снизить затраты энергии для некоторых типовых рабочих операций в 9 раз по отношению типовых электрических, гидравлических и пневматических приводов.

Содержание работы.

Выполнен обзор научной-технической и патентной литературы, показана история применения и развития пружинных аккумуляторов мехатронных приводов с рекуперацией энергии.

Разработаны методы расчёта и проектирования пружинных аккумуляторов на базе стандартных цилиндрических винтовых пружин.

Для типовых рабочих операций с учётом различных ограничений разработаны рекомендации по выбору схем пружинных аккумуляторов, построенных по схеме кулисного механизма;

Предложены новые конструктивные решения как для линейных пружинных аккумуляторов, так и для разных типов пружинных аккумуляторов, выполненных по схеме кулисного механизма

Даны рекомендации по построению пружинных аккумуляторов с использованием стандартных пневматических цилиндров с возвратными пружинами, что позволяет существенно уменьшить и стоимость и время проектирования;

Разработаны устройства на базе линейных пружинных аккумуляторов для определения потерь на внутреннее трение и испытания пружин и пружинных приводов на циклическую прочность.

Автором разработан и исследован пружинный аккумулятор с поступательным ползуном на базе гибких элементов. Представлен асимметричный пружинный аккумулятор с поступательным ползуном. Установлены математическая модель для динамических и механических характеристик и схема компенсации диссипативных потерь.

Разработаны кинематическая схема асимметричного пружинного привода с использованием пневматических цилиндров для компенсации диссипативных потерь и фиксация ползуна.

Научный доклад оформлен ЯньЧуаньчао в соответствии с требованиями рекомендаций по написанию научного доклада.

Отмеченные достоинства:

1) Предложены новые конструкции линейных пружинных аккумуляторов, в которых одновременно используются пружины сжатия и растяжения и расположены они с одной стороны между выходным звеном и корпусом, что позволяет уменьшить габариты линейного привода в направлении движения. также показано использование электромагнитов с изменяемой полярностью для компенсации диссипативных потерь.

2) Предложено создавать пружинные аккумуляторы на базе стандартных пневматических цилиндров с возвратными пружинами. Определены параметры рабочих операций, где могут использоваться пневматические цилиндры с возвратными пружинами.

3) Получен патент РФ № 2722446 «Мехатронный пружинный привод», в стадии рассмотрения по существу находится заявка на изобретение «Устройство для испытания пружин на циклическую прочность».

4) Разработанные при участии автора приводы дозатора сыпучих продуктов и протягивания упаковочного материала работают в ООО «Аквамир».

Отмеченные недостатки: не показана система управления устройством для определения внутреннего трения в пружинах.

Заключение: несмотря на отмеченные недостатки научная работа, выполненная аспирантом Янь Чуаньчао, является законченной, хорошо структурированной научно-исследовательской работой, которая может быть представлена к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук. Выполненная работа заслуживает оценки «отлично», а Янь Чуаньчао присвоения квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

Рецензент

_____ (подпись)



_____ Мацко О. Н.

_____ (расшифровка подписи)

« 15 » 09 2022г.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Высшая школа / кафедра Высшая школа автоматизации и робототехники
наименование кафедры/высшей школы

ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ НА НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Аспиранта Янь Чуаньчао

фамилия, имя, отчество

выполненной на тему: Разработка и исследование пружинных аккумуляторов для мехатронных приводов с рекуперацией энергии

1. Актуальность выпускной квалификационной работы

Снижение затрат энергии, повышение производительности и уменьшение габаритных размеров оборудования обеспечивается при использовании мехатронных рекуперативных приводов с пружинными аккумуляторами. Растущая нехватка энергии и земельные конфликты настоятельно требуют новых технологий или оборудования для достижения цели экономии энергии и земли при выполнении тех же функций. Развитие общества требует существенного повышения производительности и создания большей прибыли для предприятий. Показано, что затраты энергии могут быть снижены при использовании линейных или нелинейных пружинных приводов с рекуперацией энергии.

В процессе работы пружинного привода будут потери энергии из трения на направляющих, в пружинах и шарнирных соединениях, поэтому необходимо найти оптимальный двигатель для компенсации диссипативных потерь энергии. Пневматические цилиндры обеспечивают компенсацию диссипативных потерь для пружинных аккумуляторов и фиксирует выходные звена в крайних положениях при наличии технологических пауз. Электрические двигатели и гидравлические цилиндры только обеспечивают быстрое действие при определенном условии, например, большое передаточное число или большая нагрузка.

Многими учеными исследованы пружинные приводы, но из-за характеристик пружины до сих пор не широко применяется в качестве привода. И не созданы полное теоретическое основание и стандарта для применения в промышленности.

Результатами работы могут воспользоваться разработчики энергосберегающего технологического оборудования. В первую очередь это актуально для оборудования пищевых производств, в оборудовании для пакетирования оборудования во всех отраслях промышленности.

2. Научная новизна выпускной квалификационной работы

1) предложены новые схемы пружинных аккумуляторов для мехатронных приводов с рекуперацией энергии, использующие цилиндрические винтовые пружины растяжения и сжатия.

2) обосновано создание асимметричного пружинного аккумулятора, изменение его параметров может увеличить быстрое действие. Скорости ползуна по координату при использовании линейного и асимметричного пружинного привода одинаковы, когда $b = x_{max}$.

3) созданы устройства для определения потерь на внутреннее трение в пружинных

аккумуляторов с использованием линейного потенциометра с шарнирным креплением.

3. Оценка содержания выпускной квалификационной работы

Выпускная работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

4. Положительные стороны выпускной квалификационной работы

Разработаны и исследованы новые конструкции пружинных аккумуляторов для мехатронных приводов с рекуперацией энергии и разработаны два устройства: одно для испытания пружин на циклическую прочность и второе для определения померь на внутреннее трение в пружинах.

5. Замечаний к выпускной квалификационной работе

Нет.

6. Рекомендации по внедрению выпускной квалификационной работы

Результаты работы внедрены в системах приводов фасовочно-упаковочных автоматов в ООО «Аквामир».

7. Рекомендуемая оценка выпускной квалификационной работы -положительная.

Работа Янь Чуаньчао в целом заслуживает оценки «отлично».

8. Дополнительная информация для ГЭК

В течение учебы аспирантуры Янь Чуаньчао продемонстрировал большой энтузиазм в работе. И он имеет достаточные теоретические знания в качестве поддержки разработки и исследования научной работы. За время обучения аспирантуры он опубликовал в общей 6 статей, 1 учебное пособие и получено 2 патента на изобретение. В Роспатенте рассматривается по существу ещё одна заявка на изобретение. Три статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК. 2 статьи в международных журналах, индексируемых в реферативной базе Scopus. Участвовал в работе двух международных конференций.

ВШАиР, СПбПУ,

к.т.н., доцент

Подпись

« 15 » 09 2022г.

Мацко О.Н.

инициалы, фамилия



СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого (СПбПУ)

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Янь Чуаньчао
Самоцитирование
рассчитано для: Янь Чуаньчао
Название работы: Научный доклад_Янь Чуаньчао
Тип работы: Не указано
Подразделение: Высшая школа автоматизации и робототехники

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

ЗАИМСТВОВАНИЯ	16.81%	ЗАИМСТВОВАНИЯ	10.53%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	80.37%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	87.43%
ЦИТИРОВАНИЯ	1.14%	ЦИТИРОВАНИЯ	1.14%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	1.68%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0.9%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 14.09.2022

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 14.09.2022 16:12

Структура документа: Проверенные разделы: титульный лист с.1, основная часть с.2-20

Модули поиска: ИПС Адилет; Библиография; Сводная коллекция ЭБС; Интернет Плюс; Сводная коллекция РГБ; Цитирование; Переводные заимствования (RuEn); Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu); Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Переводные заимствования издательства Wiley (RuEn); eLIBRARY.RU; СПС ГАРАНТ; Медицина; Диссертации НББ; Коллекция Национальной Библиотеки Узбекистана; Перефразирования по eLIBRARY.RU; Перефразирования по Интернету; Перефразирования по коллекции издательства Wiley; Патенты СССР, РФ, СНГ; СМИ России и СНГ; Модуль поиска "СПбСТУ"; Шаблонные фразы; Кольцо вузов; Издательство Wiley; Переводные заимствования

Работу проверил: Кочнева Ольга Владимировна

ФИО проверяющего

Дата подписи:

14.09.2022

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.