

На правах рукописи

ПУХОВА Ольга Владимировна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОГО
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ
ПАКЕТИРОВАНИЯ ГРУЗОВ**

Специальность 05.02.05– Роботы,
мехатроника и робототехнические системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Жавнер Виктор Леонидович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Балюбаш Виктор Александрович,
кандидат технических наук Смирнов Карим
Асенович

Ведущая организация: ООО «Рекупер», Москва

Защита состоится «7» декабря 2010 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.12 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, 1-й учебный корпус, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан «03» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
кандидат технических наук



Евграфов А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка энергосберегающих технологий является одним из приоритетных направлений развития промышленного комплекса на ближайшие десятилетия. Известно, что предприятия этого комплекса являются одними из основных потребителей энергии. Если их продукция представляет собой штучные грузы, то ее перевозка, как правило, производится в пакетах, установленных на стандартные поддоны. Учитывая существующие стандарты ГОСТ 11320-65, ISO 3676 и другие, все пакеты с грузами имеют ограниченный ряд размеров, определяемый стандартизованным размерным рядом тары. Поэтому операция формирования пакетов на стандартном поддоне – пакетирование, является массовой и типовой для большинства видов грузов.

На современных промышленных предприятиях до 80% погрузочно-разгрузочных операций осуществляется с применением ручного труда. Применение средств автоматизации при пакетировании сдерживается их высокой стоимостью и существенным энергопотреблением. Анализ применения промышленных роботов для осуществления операций по пакетированию грузов показывает, что в общей доле областей использования она составляет не более 5 %

В настоящее время на рынке представлено большое количество универсальных роботов, которые могут быть использованы, в частности, для осуществления операции пакетирования. Однако универсальность этих роботов предъявляет к ним завышенные требования по точности и жесткости конструкции, увеличивая при этом массу подвижных частей, усложняя систему управления и значительно увеличивая их стоимость. Увеличение массы подвижных частей робота приводит к излишнему энергопотреблению, которое в масштабах всего комплекса промышленных предприятий приводит к существенным экономическим потерям. Все это является причиной того,

что промышленные роботы (ПР) редко используются для осуществления такой массовой технологической операции как пакетирование.

Перечисленные выше соображения показывают, что для операции пакетирования целесообразна разработка специализированных робототехнических комплексов (РТК) с одновременным решением задачи снижения энергопотребления. Однако их развитие и внедрение сдерживается недостатком исследований в этой области, позволяющим перейти к их разработке.

Материал данной диссертации объединен задачей снижения энергопотребления в РТК, предназначенных для пакетирования грузов, посредством системного подхода при их проектировании. В силу всего сказанного выше тема данной диссертации представляется актуальной.

Цель работы. Целью диссертации является разработка методик проектирования, исследования и расчета энергетически эффективных РТК для пакетирования грузов, а также вспомогательного оборудования к ним.

Для достижения указанной цели в диссертации были поставлены и решены следующие **основные задачи исследования:**

1. Анализ типовых технологических процессов пакетирования грузов и оценка их параметров, в том числе энергетических; разработка критериев энергетической эффективности процесса пакетирования; исследование путей минимизации энергозатрат при пакетировании.
2. Анализ распределения энергетических затрат в технологическом оборудовании для пакетирования грузов; разработка основных рекомендаций по повышению энергетической эффективности РТК для пакетирования; разработка новых принципов построения и работы РТК с использованием предложенных рекомендаций.
3. Разработка системы управления региональными перемещениями ПР, отвечающей требованиям к технологическому процессу пакетирования, а также рекомендациям по снижению энергозатрат в РТК.

4. Разработка методики построения грузовых платформ на базе пневматического и пружинно-пневматического аккумуляторов путем построения и исследования их математических моделей.
5. Экспериментальное исследование макета манипулятора для осуществления предложенного технологического процесса пакетирования и сопоставление результатов исследования с теоретическими результатами.

Методы исследований: при разработке математических моделей и проведении расчетов использовались методы теоретической механики, теории механизмов и машин, а также вычислительной математики.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- показано, что существенное снижение энергозатрат при пакетировании грузов может быть достигнуто путем рационального построения технологического процесса пакетирования;
- предложены новые принципы построения и схемные решения энергетически эффективных РТК для пакетирования грузов;
- предложены новые принципы рекуперации энергии в грузовых платформах, являющихся частью РТК;
- разработана методика проектирования грузовых платформ оснащенных рекуператорами энергии на базе пружинно-пневматического и пневматического аккумуляторов;

Основные положения, выносимые на защиту:

- снижение энергопотребления в РТК для пакетирования грузов достигается за счет оптимального построения технологического процесса, определяющего выбор, как структурной схемы робота, так и вспомогательного оборудования;
- специализация робототехнических комплексов на процессе пакетирования грузов с учетом конкретных особенностей операции пакетирования позволяет существенным образом снизить

энергозатраты по сравнению с энергозатратами универсального оборудования.

Практическая ценность работы. Разработан новый технологический процесс пакетирования грузов, позволяющий существенно снизить затраты энергии в технологическом оборудовании. Предложен новый инженерный подход к построению РТК для пакетирования. Разработаны новые схемы РТК для пакетирования, позволяющие минимизировать затраты энергии. Предложены новые схемы грузовых платформ с рекуператорами энергии, пригодные к применению в РТК для пакетирования грузов, а также в пакетформирующих машинах. Разработана методика проектирования этих платформ. Разработана система управления промышленным роботом осуществляющим пакетирование грузов, которая решает задачу плотной укладки грузов, а также задачу энергосбережения.

Публикации. По материалу диссертации опубликованы 4 печатные работы. Из них одна в издании, входящем в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук»

Апробация работы. Результаты работы докладывались в Санкт-Петербургском государственном Политехническом университете на XXXVII международной научно-практической конференции «Неделя науки СПбГПУ».

Структура и объем работы. Материалы диссертации изложены на 144 страницах, включая 54 рисунка, 7 таблиц и состоят из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего 93 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, приведен перечень научных задач, требующих решения

для достижения поставленных целей, дан краткий обзор диссертации по главам.

В первой главе проводится анализ применения средств автоматизации для осуществления операции пакетирования грузов. Проводится обзор научно-технической и патентной литературы, посвященной промышленным роботам. Отмечено, что оборудование для пакетирования грузов разделяется на три класса: шарнирно балансирующие манипуляторы, пакетоформирующие машины, и промышленные роботы в составе робототехнических комплексов.

Отмечено, что применение промышленных роботов ограничено их высокой стоимостью и существенным потреблением энергии. Манипуляторы ведущих мировых производителей, входящие в состав промышленных роботов для пакетирования грузов, имеют очень высокое соотношение между массой подвижной части исполнительного устройства и грузоподъемностью.

Число публикаций, посвященных исследованию энергетических свойств промышленных роботов, невелико. Особого внимания заслуживают работы А.Е. Кобринского, Ю.А. Степаненко. В этих работах было показано, что затраты энергии приводами исполнительных устройств промышленных роботов зависят от выполняемой рабочей операции, программы ее реализации и кинематической схемы исполнительного устройства робота, было впервые введено понятие о диссипативных свойствах системы приводов исполнительных устройств, под которыми следует понимать неспособность системы приводов накапливать потенциальную энергию.

Во второй главе исследованы различные технологические процессы укладки грузов с точки зрения их энергетической эффективности. На рис.1.а представлен технологический процесс, наиболее часто встречающийся в технологическом оборудовании, характеризующийся тем, что поддон установлен неподвижно во время всего цикла формирования пакета

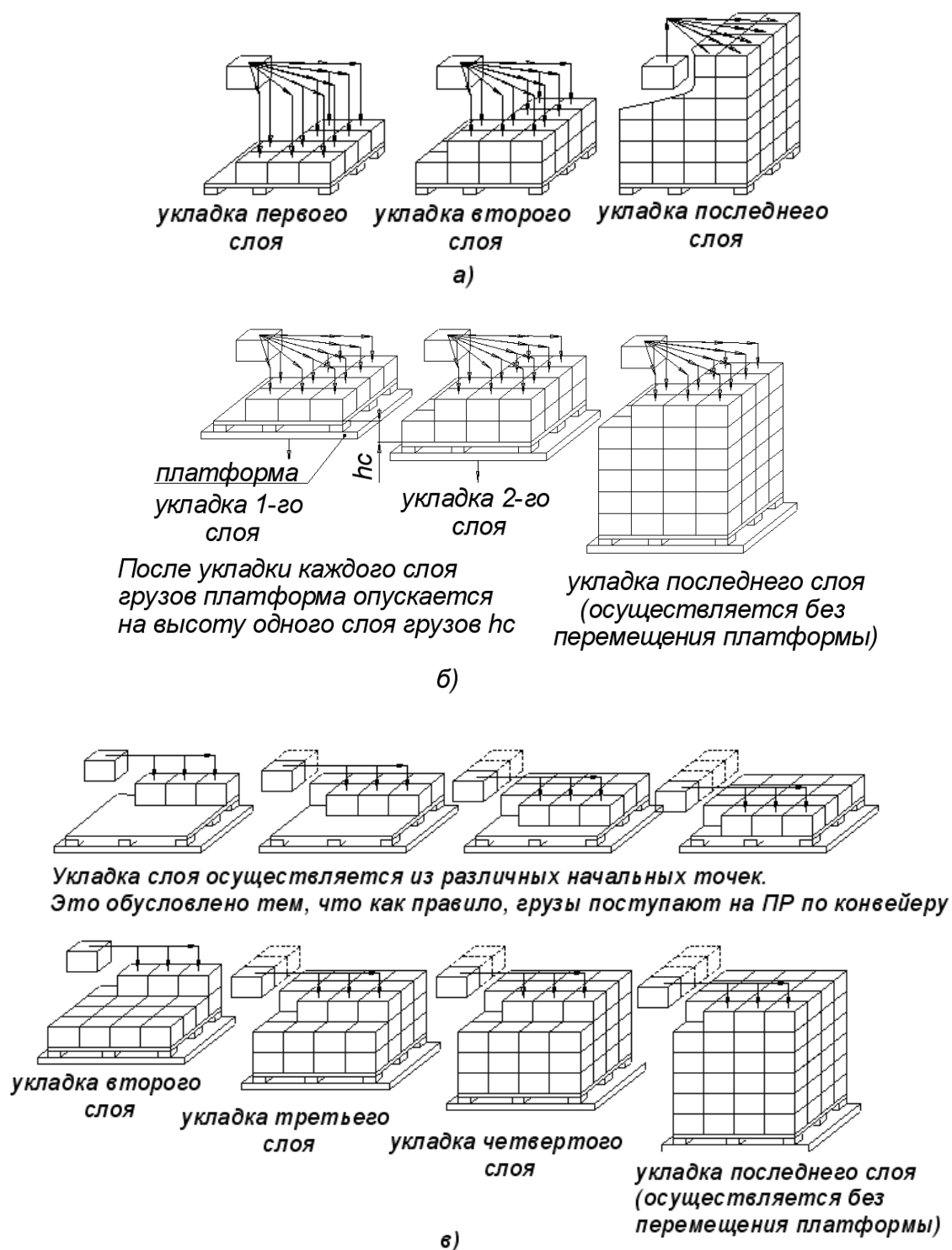


Рисунок 1. Схемы технологических процессов пакетирования грузов.

а) – типовой технологический процесс; б) – технологический процесс, предложенный фирмой Retab; в) – технологический процесс, предложенный в диссертации

На рис.1.б представлен технологический процесс укладки грузов, предложенный в 70-х годах XX века шведской фирмой Retab, характеризующийся тем, что для осуществления вертикальных перемещений использовалась грузовая платформа, оснащенная приводами. Использование грузовой платформы позволяет производить укладку каждого слоя грузов на одной и той же высоте, а соответственно сократить обслуживаемый объем ПР. На рис.1.в представлен предложенный в диссертации технологический процесс укладки грузов, характеризующийся применением грузовой платформы, а также последовательной укладкой рядов груза при формировании каждого слоя. Укладка каждого ряда грузов осуществляется из различных начальных положений. Были введены критерии энергетической эффективности технологического процесса, а именно:

- минимизация расстояния, проходимого захватом с грузом в вертикальной плоскости;
- минимизация расстояния, проходимого захватом без груза в вертикальной плоскости;
- минимизация расстояния, проходимого захватом с грузом в горизонтальной плоскости;
- минимизация расстояния, проходимого захватом без груза в горизонтальной плоскости;
- ориентация технологического процесса на использование исполнительного устройства промышленного робота, построенного по схеме с использованием поступательных пар, поскольку известно, что такие устройства обладают наилучшими диссипативными свойствами.

Показано, что предложенный технологический процесс укладки грузов наиболее хорошо соответствует введенным критериям и позволяет в значительной степени сократить затраты энергии в технологическом оборудовании.

В третьей главе проведено исследование распределения энергии в РТК для пакетирования грузов на примере комплекса, включающего промышленный робот и грузовую платформу, которое показало, что лишь незначительная часть потребляемой РТК энергии расходуется на осуществление полезной работы. Под полезной работой понимается работа по преодолению сил полезных сопротивлений, а именно, сил тяжести грузов. На основании этого исследования были выработаны следующие общие рекомендации по снижению энергетических затрат в РТК:

- использовать исполнительное устройство робота, построенное по схеме с использованием трех поступательных пар (ППП), поскольку в нем отсутствуют так называемые зоны диссипации энергии, обусловленные работой приводов в тормозном режиме при подъеме грузов;
- построить схему технологического процесса используя критерии энергетической эффективности, предложенные в главе 2;
- минимизировать массу звеньев исполнительного устройства робота;
- разработать и использовать грузовые платформы, оснащенные рекуператорами энергии;
- эффективно использовать кинетическую энергию захвата с грузом, полученную им в процессе разгона.

Схемы РТК, построенные с использованием приведенных выше рекомендаций, представлены на рис.2. На рис.2.а представлена схема, в состав которой входит манипулятор 1, со структурной схемой PPP. Схват манипулятора захватывает грузы из четырех различных положений на конвейере 3 и устанавливает их на поддон 4 согласно схеме, предложенной в главе 2. Поддон установлен на платформу 5, которая перемещается вдоль направляющих 6. Платформа соединена с пневматическим или пружинно-пневматическим аккумулятором. В состав РТК, схема которого представлена на рис.2.б, входит манипулятор с модифицированной схемой PPP, в которой

прямолинейное движение параллельно оси Y , заменено движением рамы 7 по дуге окружности.

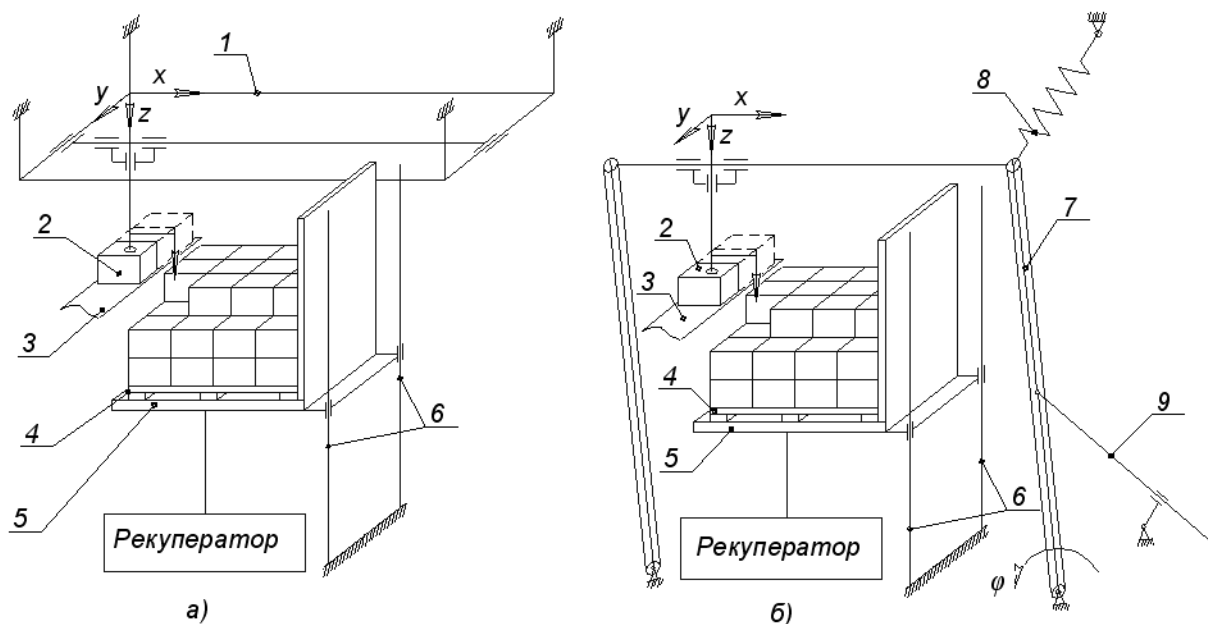


Рисунок 2. Схемные решения РТК.

В этом случае для привода качающейся рамы может быть использован двигатель, обеспечивающий небольшой ход звена 9, который вписывается в проекцию сформированного пакета на плоскости ZY .

Отметим, что изменение углового положения рамы осуществляется при отсутствии груза в захвате, что позволяет снизить затраты энергии в пневмоцилиндре 1. Также в схеме б) снижение энергетических затрат осуществляется посредством частичного уравнивания рамы пружиной 8.

Технологический процесс, предложенный в главе 2, позволяет для обеих схем построить работу комплекса таким образом, чтобы в каждый момент времени в системе работал только один привод. Это приводит к отсутствию требований по синхронизации приводов и существенно упрощает систему управления. Для управления перемещением захвата вдоль оси X предложена схема системы управления, основанная на информационно-измерительной системе представленной на рис.3. Для предложенных схем может быть использован двигатель любого типа, но здесь, для конкретного

примера, выбран пневматический цилиндр, управляемый пятилинейным трехпозиционным распределителем, открытым в нейтральном положении. На захвате ПР установлен индуктивный датчик, который перемещается вместе с ним вдоль оси X . На неподвижном основании с шагом $S_{ш}$ установлены головки из магнитного материала.

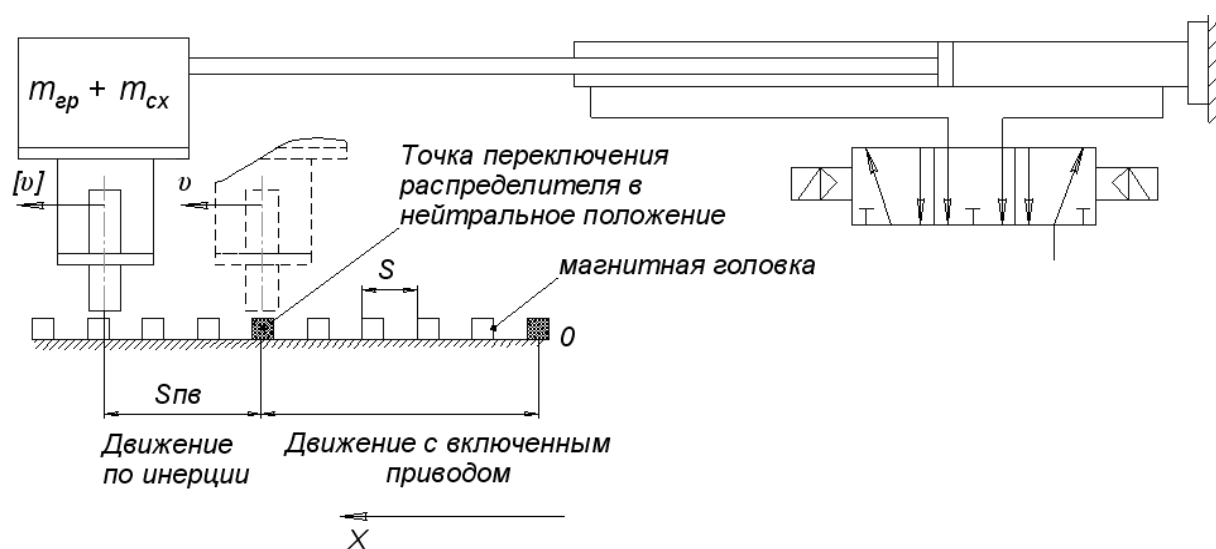


Рисунок 3. Система управления горизонтальными перемещениями звеньев робота.

При перемещении захвата вдоль оси X , с датчика на контроллер поступает импульсный сигнал. При достижении расчетного значения числа импульсов система управления переводит распределитель в нейтральное положение. Поскольку в нейтральном положении распределитель открыт, то захват с грузом продолжает свое движение вдоль оси X по инерции до столкновения с соседним грузом или упором. Соответственно, система управления может рассчитать расстояние переключения, так чтобы сила соударения оставалась в пределах допустимой для данного вида грузов. Таким образом обеспечивается плотная укладка грузов при сохранении производительности. Длина выбега определяется из зависимости (1)

$$S_{не} = \frac{v^2}{2g \left(\frac{F_{трц}}{(m_{зп} + m_{сх})g} + f \right)}, \quad (1)$$

где v – скорость захвата в момент переключения распределителя в нейтральное положение; $F_{трц}$ – сила трения в цилиндре, f – коэффициент трения в направляющих. Вдоль оси Y плотная укладка обеспечивается коротким импульсным перемещением захвата, поэтому для пневмоцилиндра обеспечивающего перемещение вдоль оси Y выбирается закрытый в нормальном положении распределитель.

Четвертая глава диссертации посвящена разработке грузовых платформ с рекуператорами энергии. В процессе производства или упаковки грузам, как правило, сообщена определенная потенциальная энергия. Предложено использовать эту энергию для осуществления вертикальных перемещений платформы, а также, преобразуя ее в энергию сжатого воздуха, направлять в РТК. В диссертации разработаны схемы грузовых платформ с пружинно-пневматическим и пневматическим аккумуляторами.

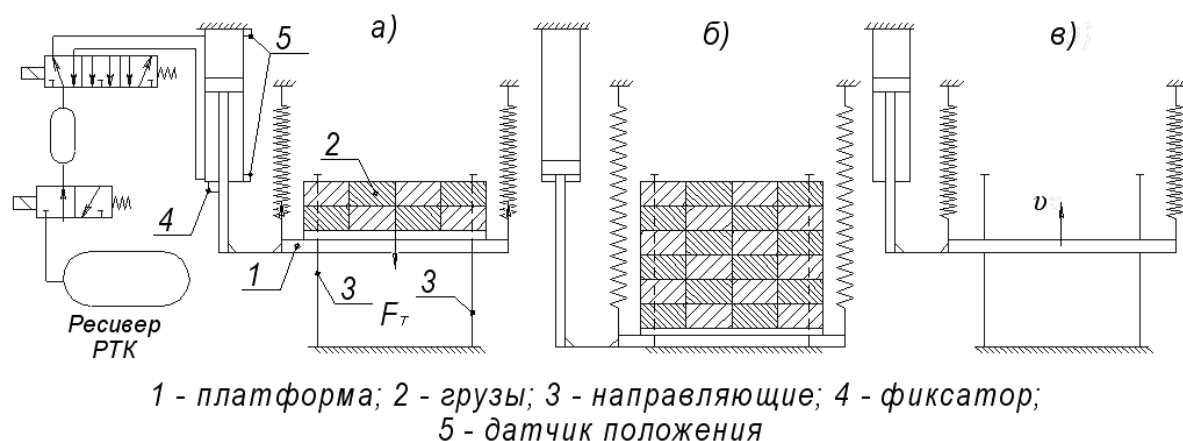


Рисунок 5. Схема грузовой платформы с пружинным аккумулятором.

На рис.5 представлена схема грузовой платформы с рекуператором энергии на базе пружинно-пневматического аккумулятора. Основным преимуществом пружинно-пневматического аккумулятора является обеспечение линейной зависимости текущего положения платформы от массы грузов на ней. Это позволяет сохранять постоянное положение

рабочей плоскости и, соответственно, использовать для укладки грузов манипулятор с меньшим обслуживаемым объемом.

Показано, что математическая модель процесса опускания платформы под действием силы тяжести слоя грузов (без учета трения в цилиндре) описывается выражением:

$$m_c g h_c = \frac{m_c v_{on}^2}{2} + m_c g (h_c - z) + \frac{c z^2}{2}, \quad (2)$$

где m_c – масса одного слоя грузов; h_c – высота одного слоя грузов; v_{on} – скорость опускания платформы, z – текущая координата платформы; c – суммарная жесткость пружин.

Математическая модель возврата платформы в исходное положение без учета сил трения описывается выражением

$$\frac{c z_{\max}^2}{2} = \frac{m_{nl} v^2}{2} + P_0 V_0 \ln \left(\frac{V_0}{V_0 - S z} \right) + m_{nl} g z + \frac{c (z_{\max} - z)^2}{2}, \quad (3)$$

где $z_{\max}$ – максимальная высота платформы, P_0 – начальное давление в системе; V_0 – начальный объем системы; z – текущая высота платформы; v – текущая скорость платформы; m_{nl} – масса пустой платформы; S – площадь поршня пневмоцилиндра;

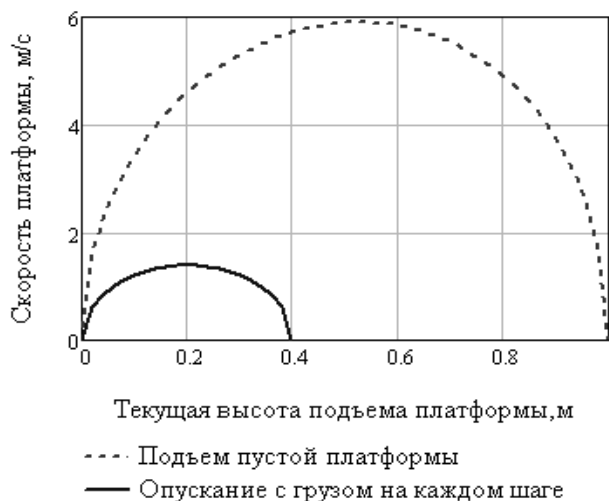


Рисунок 6. График изменения скорости платформы на фазовой плоскости

Исследование построенной математической модели позволило определить пути рационального выбора параметров платформы, обусловленные максимальной эффективностью использования потенциальной энергии грузов. Получены законы движения платформы, а также зависимости необходимые для расчета компонентов пневмосистемы. На

рис.6 представлен график изменения скорости платформы на фазовой плоскости при ее опускании и подъеме. В диссертации решена задача устранения колебательного процесса при опускании платформы.

Основными преимуществами разработанной грузовой платформы с рекуператором энергии на базе пневматического аккумулятора является отсутствие колебаний в системе и более высокий КПД. Схема такой платформы представлена на рис.7. Основной особенностью схемы является наличие в ней баллонов, которые поочередно подключаются к системе на различных шагах опускания платформы. С помощью подключения данных баллонов решена задача сохранения постоянного положения рабочей плоскости. На рис.8 представлены кривые, одна из которых соответствует перемещению платформы при последовательно подключаемых баллонах при опускании четвертого и пятого слоев грузов, а вторая, соответствует ее перемещению в случае, если баллон постоянно подключен к пневмоцилиндру.

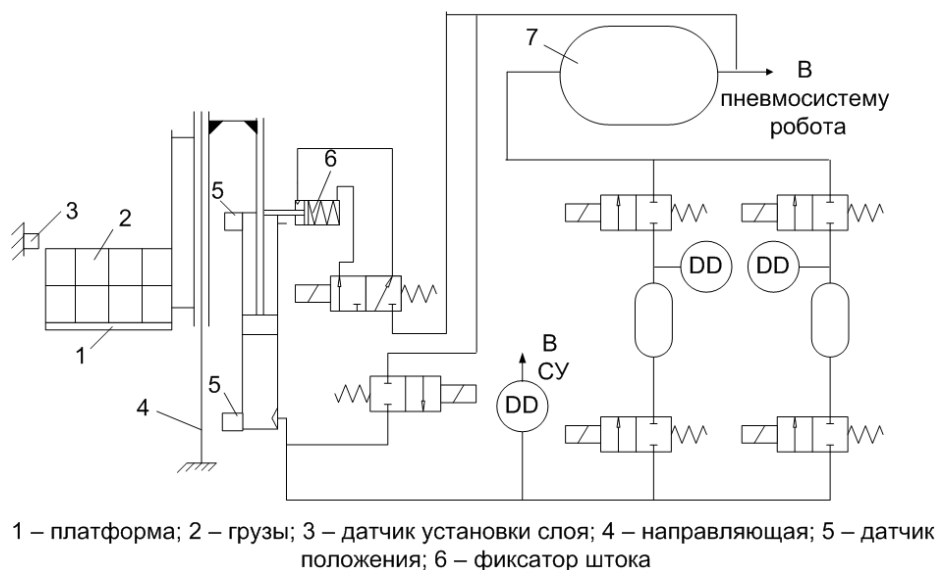


Рисунок 7. Схема платформы с пневматическим аккумулятором

В данной системе имеют место два процесса: сжатие воздуха под действием веса грузов и выравнивание давлений при соединении баллонов с пневмоцилиндром, а также с ресивером РТК. Составленная математическая модель системы описывает оба этих процесса и выражена в виде системы

уравнений (4). Исходя из ее решения, можно определить требуемые для проектирования параметры системы.

$$\begin{cases} mgh_c = (P_3 V_3 + V_{b1} P_{b0}) \cdot \ln \frac{V_3 + V_{b1}}{V_3 + V_{b1} - Sh_c} \\ mgh_c = (P_4 (V_4 + V_{b1}) + V_{b2} P_{b0}) \cdot \ln \frac{V_4 + V_{b1} + V_{b2}}{V_{b1} + V_{b2}} \\ P_k (V_{b1} + V_{b2}) + P_{pec} V_{pec} = P_{bo} (V_{b1} + V_{b2} + V_{pec}) \end{cases} \quad (4)$$

где V_{b1}, V_{b2} – объемы баллонов; V_{pec} – объем ресивера P_3, P_4 – давление в бесштоковой полости пневмоцилиндра после укладки третьего и четвертого слоев, соответственно, P_{b0} – начальное давление в баллонах; V_4 – объем бесштоковой полости пневмоцилиндра после укладки четвертого слоя грузов без подключения баллонов, V_5 – объем бесштоковой полости пневмоцилиндра после укладки пятого слоя; P_k – максимальное давление в цилиндре и баллонах.

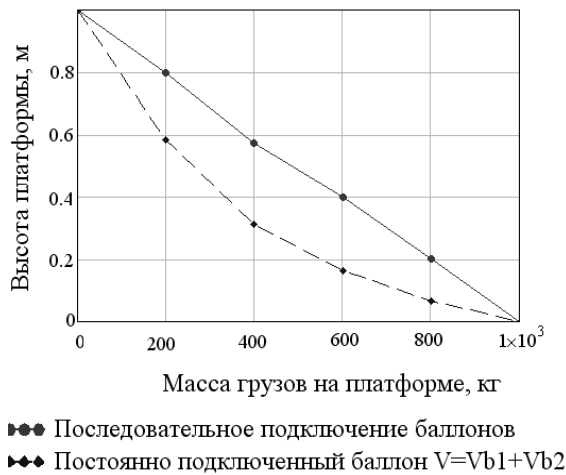


Рисунок 8. График перемещения платформы

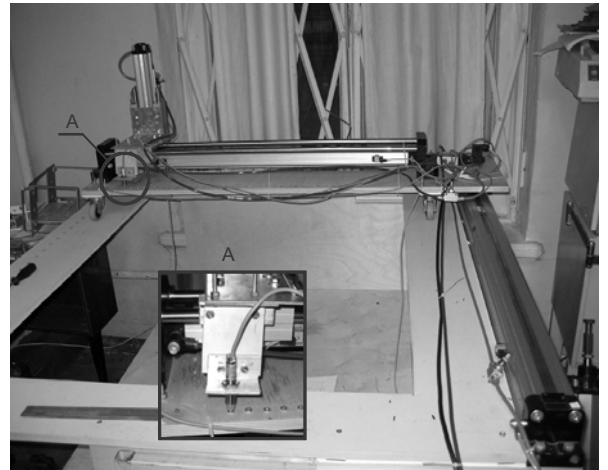


Рисунок 9. Макет робота

Пятая глава посвящена экспериментальным исследованиям выбега захвата, при построении системы управления ПР, разработанной в главе 3. Для экспериментальных исследований был изготовлен макет робота, фотография которого представлена на рис.9. Целью экспериментальных исследований

было определение правильности допущений, заложенных при математическом моделировании системы управления в главе 3 данной работы. Было проведено измерение выбега каретки для различных скоростей от 0,4 до 0,8 м/с и при различных массах нагрузки от 2 до 26 кг.

Результаты измерений хорошо согласуются с расчетными данными, полученными на основе зависимости (1).

Рассогласование составляет не более 5%. При шаге магнитных головок $S_{и}=20\text{мм}$, для всех проведенных измерений длина выбега значительно превышает шаг магнитных головок. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что при построении модели системы управления региональными перемещениями ПР были заложены корректные допущения, и предложенная система управления является пригодной для использования в ПР в составе РТК для пакетирования грузов.

Основные результаты работы и выводы

1. Исследованы различные технологические процессы пакетирования грузов; предложен метод их анализа на основе разработанных в диссертации критериев энергетической эффективности; разработан наиболее рациональный технологический процесс пакетирования грузов, отвечающий введенным критериям.
2. Исследовано распределение энергетических затрат в технологическом оборудовании для пакетирования грузов; на основе этого исследования разработаны основные рекомендации по повышению энергетической эффективности робототехнических комплексов для пакетирования грузов; предложены новые схемы РТК для пакетирования грузов характеризующиеся пониженными затратами энергии.
3. Предложена система управления региональными перемещениями ПР обеспечивающая плотную укладку грузов, а также снижающая энергозатраты в РТК за счет эффективного использования

кинетической энергии схвата с грузом, сообщенной ему в процессе разгона.

4. Обосновано применение грузовых платформ с рекуператорами энергии в РТК для пакетирования грузов; построены математические модели грузовых платформ с рекуператорами на базе пружинного и пружинно-пневматического аккумуляторов; проведено исследование этих моделей и анализ их характеристик; разработана методика проектирования и расчета предложенных грузовых платформ.
5. Проведено экспериментальное исследование макета манипулятора для осуществления предложенного технологического процесса пакетирования, которое доказало работоспособность предложенной в диссертации системы управления горизонтальными перемещениями ПР, а также корректность допущений заложенных при построении математической модели системы управления.

ПУБЛИКАЦИИ

1. Пухова О.В. Грузовые платформы с рекуператорами энергии // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – №3(47). – 2010. – С.67-73.

2. Пухова О.В., Жавнер В.Л. Особенности технологического процесса пакетирования грузов // XXXVII международная научно-практическая конференция «Неделя науки СПбГПУ»: материалы. – СПб, 2010. – С.28 – 30.

3. Пухова О.В. Энергетически эффективный робототехнический комплекс для пакетирования грузов // Вестник Московского Государственного Университета Печати. – №2. – 2010. – С.161 – 164.

4. Жавнер В.Л., Пухова О.В., Мацко О.Н. Мехатронные устройства в упаковочных линиях автоматизированных производств: учебное пособие. – СПб: Издательство СПбГПУ, 2008г. – 130 с.