

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-  
дорожный университет (СибАДИ)»  
Кафедра «Цифровые технологии»

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)  
«Система автоматизации моделирования кранов-штабелеров»

по направлению 09.06.01 «Информатика и вычислительная» техника»  
научная направленность «Системы автоматизации проектирования»

Аспирант

Безродина Анжела Евгеньевна

Допустить к защите научного доклада

И.о. заведующего кафедрой «ЦТ»

к.п.н. С.Ю. Пестова

Научный руководитель

д.т.н. проф. М.С. Коротов

Нормоконтроль

А.В. Козлова

Омск-2024

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Краны-штабелеры все больше применяются для обслуживания складских помещений. В цехах, на фабриках, в тех местах, в которых происходит хранение готовой продукции.

В последние годы наблюдается активное развитие и внедрение новых технологий в данную сферу. Одними из основных тенденций являются автоматизация работы кранов-штабелеров и разработка их новых конструкций при помощи систем автоматизированного проектирования. Это позволяет сократить время на обработку грузов и снизить затраты на персонал. Кроме того, автоматизированные краны-штабелеры могут работать в условиях ограниченного пространства и выполнять более сложные операции, чем ручные. В связи с этим остро стоит проблема создания и повышения эффективности функционирования систем автоматизированного проектирования (САПР) узлов, агрегатов, устройств управления, металлоконструкций, и в целом кранов-штабелеров. Вышеизложенным объясняется актуальность темы создание системы автоматизации моделирования крана-штабелера, без которой невозможно решение задач анализа и синтеза проектных решений образцов новой техники. Работа посвящена разработке и исследованию математической модели крана-штабелера новой конструкции, алгоритмов и методик для анализа и синтеза проектных решений.

Одним из важнейших направлений совершенствования кранов-штабелеров является повышение их эффективности за счет снижения энергетических затрат при перемещениях грузов. Повышение энергетической эффективности кранов-штабелеров может осуществляться за счет оптимизации траекторий перемещения грузов, с помощью систем автоматического управления на базе микропроцессорной техники, но не менее перспективным направлением может выступать изменение конструкции самого крана штабелера для снижения энергозатрат при перемещениях грузов.

*Целью* диссертационной работы является повышение эффективности процесса перемещения грузов стеллажным краном-штабелером путем совершенствования конструкции крана и уменьшения затрат энергии на перемещение грузов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать инженерные решения в виде новой конструкции стеллажного крана-штабелера с поворотной стрелой, позволяющие выполнять перемещение грузов внутри складского помещения в форме полукруглого арочного ангара.

2. Разработать математическую модель сложной динамической системы процесса перемещения грузов стреловым стеллажным краном-

штабелером, включающую подсистемы: стрелы, грузовой каретки и грузозахватного приспособления, приводов крана, устройства управления.

3. Обосновать критерий эффективности процесса перемещения груза стреловым стеллажным краном-штабелером.

4. Выявить зависимости времени и энергии перемещения от показателей процесса перемещения груза стреловым стеллажным краном-штабелером и формы складского помещения.

5. Разработать методику минимизации затрат энергии на перемещение грузов стреловым стеллажным краном-штабелером.

6. Представить технико-экономическое обоснование внедрения новой конструкции стеллажного крана-штабелера с поворотной стрелой.

**Методы исследования.** При выполнении работы использовались методы системного анализа, регрессионного анализа, теории алгоритмов, математического и имитационного моделирования. Теоретические исследования проводились в среде программного комплекса SimInTech.

#### **Научная новизна работы:**

1. Разработаны имитационные математические модели сложных динамических систем стеллажных кранов-штабелеров традиционной конструкции и предложенной конструкции с поворотной стрелой, позволяющие в автоматизированном режиме решать задачи анализа на этапах проектирования кранов-штабелеров;

2. Разработаны методики определения затрат энергии при перемещении подвижных звеньев с грузом крана-штабелера традиционной конструкции и предложенной конструкции с поворотной стрелой, позволяющие в автоматизированном режиме выполнять сравнительный анализ затрат энергии для кранов традиционной и предлагаемой конструкций, оптимизировать их конструктивные и технологические параметры;

3. Получены уравнения регрессии затрат энергии крана-штабелера предложенной конструкции от конструктивных и технологических параметров, позволяющие выполнять синтез оптимальных значений параметров.

**Практическая ценность работы.** Применение разработанных алгоритмов и программного обеспечения в качестве модуля САПР позволяет решать задачи анализа и синтеза оптимальных конструктивных параметров крана-штабелера новой предложенной конструкции. Разработанные методики и алгоритмы автоматизации моделирования рабочих процессов крана-штабелера позволяют анализировать различные конструкторские решения на этапах проектирования крана-штабелера, управлять качеством проектных работ. Полученные алгоритмические решения позволяют снизить энергетические затраты за счет оптимизации законов движения и положения

крана-штабелера и могут быть использованы при создании систем автоматического управления крана-штабелера.

**Степень достоверности исследований** обосновывается на основании корректных допущений, принятых при математическом моделировании; использовании апробированных методов математического моделирования и программных продуктов; подтверждении адекватности результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** Результаты исследований и основные положения диссертации докладывались на следующих конференциях:

V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ» «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» (Омск, 2020), IV Национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство» (Омск, 2021), VII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» (Омск, 2022), V Национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство» (Омск, 2022).

**Публикации по работе.** По материалам исследований опубликовано 11 печатных работ, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 3 патента РФ на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы 69 страниц, включая 1 таблицу, 19 рисунков и 1 приложение. Список литературы включает 50 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** диссертационной работы произведен анализ тенденций развития кранов-штабелеров и их систем автоматического управления, дается обзор и анализ конструкций кранов-штабелеров, обзор предшествующих работ по методам моделирования кранов-штабелеров, используемым математическим моделям. Рассмотрены современные САПР и системы автоматизации моделирования сложных динамических систем. Отдельным направлением в повышении эффективности работы кранов-

штабелеров, которое предполагает и снижение затрат энергии, выступает оптимизация формы рабочей области, т.е. формы стеллажей и самого склада.

Поскольку форма рабочего пространства неразрывно связана с особенностями конструкции самого крана-штабелера, их совершенствование должно выполняться совместно.

Сформулированы цель и задачи работы.

**Во второй главе** обоснована общая методика исследования, которая носит комплексный характер и предусматривает как теоретические, так и экспериментальные исследования. Проведен анализ кана-штабелера как сложной динамической системы, состоящей из механической подсистемы. Определены структурные элементы и связи, входящие в состав модели.

Системный подход предусматривает комплексный метод проведения исследований, который содержит теоретические и экспериментальные методы исследований. В результате теоретических исследований устанавливаются закономерности функционирования всей системы в целом. В диссертационной работе теоретические исследования проводились методами имитационного и математического моделирования. К задачам экспериментальных исследований относятся: подтверждение адекватности математических моделей; определение численных значений параметров, входящих в математические модели; подтверждение работоспособности и эффективности предложенных технических решений.

**В третьей главе** обоснован критерий эффективности рабочего процесса крана-штабелера, представлены математические модели подсистем сложной динамической системы крана-штабелера.

В качестве критерия энергоэффективности крана-штабелера как традиционной, так и разработанной конструкции, предложено использовать суммарные затраты энергии  $E_{\Sigma}$  при однократном перемещении груза краном-штабелером традиционной конструкции из произвольно заданной начальной ячейки в произвольно заданную целевую ячейку. Они равны полной работе приводов крана на рассматриваемой траектории  $E_{\Sigma} = A_{\Sigma}$ .

Кран-штабелер представляет собой сложную динамическую систему, на которую действуют управляющие и возмущающие воздействия. При математическом описании крана-штабелера применяется системный подход, согласно которому кран-штабелер рассматривается как сложная система, которая состоит из отдельных, взаимосвязанных друг с другом подсистем – например, механической подсистемы. Каждая из подсистем обладает своими свойствами и законами функционирования, которые описываются математическими моделями. Совокупность математических моделей подсистем образует сложную математическую модель.

*Реализация модели крана-штабелера традиционной конструкции в программной среде SimInTech*

Были разработаны уравнения движения крана-штабелера традиционной конструкции. На рисунке 1 изображена расчетная схема стеллажного крана-штабелера традиционной конструкции.

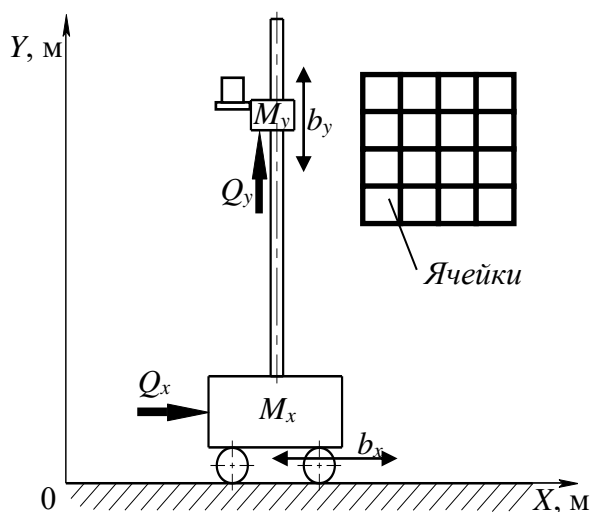


Рисунок 1 – Расчетная схема стеллажного крана-штабелера традиционной конструкции

С использованием расчетной схемы стеллажного крана-штабелера традиционной конструкции (рисунок 1) разработана описывающая динамику СКШ система дифференциальных уравнений второго порядка, имеющая вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} \cdot (M_x + M_y) + b_x \cdot \dot{x} = Q_x \\ \ddot{y} \cdot M_y + b_y \cdot \dot{y} + g \cdot M_y = Q_y \end{cases} \quad (1)$$

где  $M_x$  – масса тележки;  $M_y$  – масса грузовой каретки с грузозахватным приспособлением и грузом;  $x$  – перемещение тележки вдоль оси  $OX$ ;  $y$  – перемещение каретки вдоль оси  $OY$ ;  $b_x$  – коэффициент диссипации энергии при изменении горизонтальной координаты тележки  $x$ ;  $b_y$  – коэффициент диссипации энергии при изменении вертикальной координаты каретки  $y$ .

В форме Коши система (1) имеет вид:

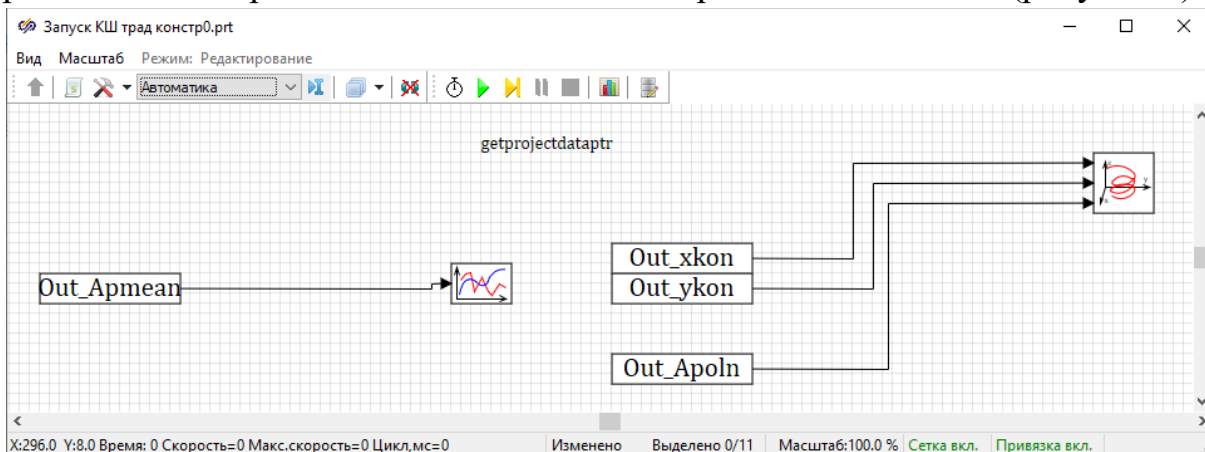
$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{Q_x - b_x \cdot \dot{x}}{M_x + M_y} \\ \ddot{y} = \frac{Q_y - b_y \cdot \dot{y} - g \cdot M_y}{M_y} \end{cases} \quad (2)$$

Была разработана имитационная математическая модель крана-штабелера традиционной конструкции.

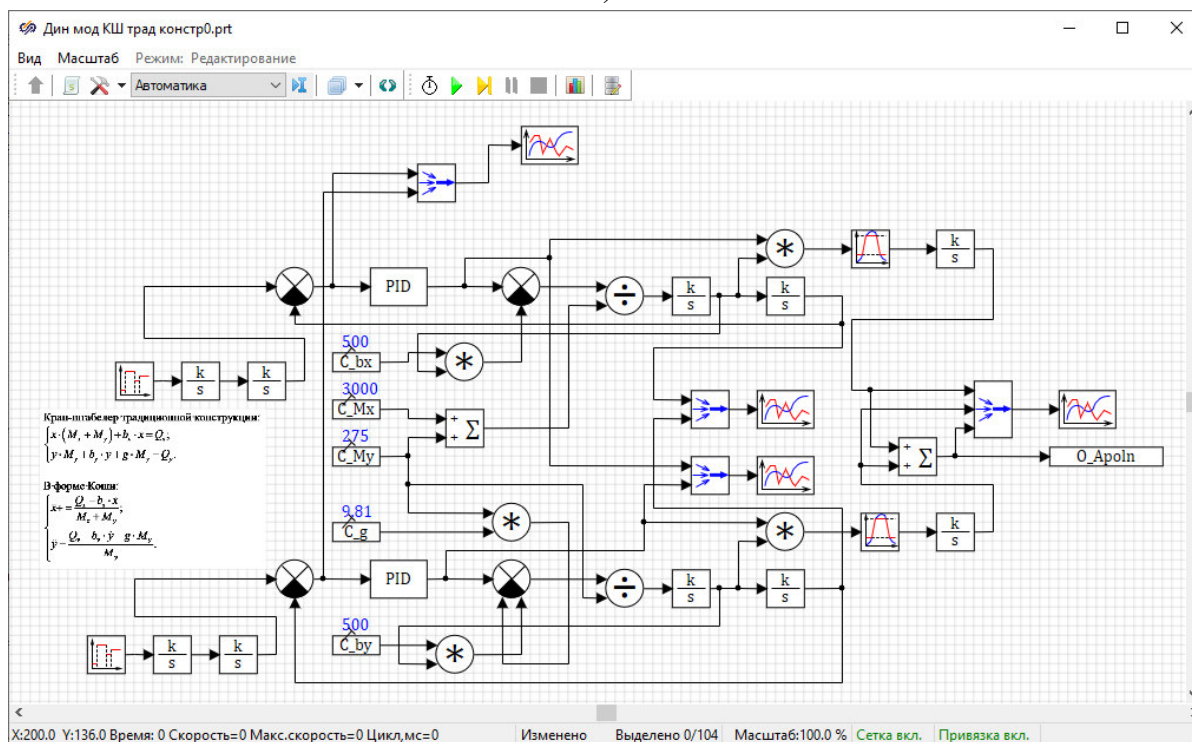
Данная система описывает динамику стеллажного крана-штабелера, перемещающего груз в плоскости вдоль стеллажа (двух стеллажей).

Система дифференциальных уравнений (2) может быть численно проинтегрирована известными методами.

Разработанная имитационная математическая модель СКШ (2) была реализована в среде динамического моделирования SimInTech (рисунок 2)



а)



б)

Рисунок 2 – Имитационная математическая модель стеллажного крана-штабелера в обозначениях SimInTech: а) проект, используемый для запуска модели; б) проект с имитационной моделью

В базе данных программы присутствовали следующие сигналы параметров модели (рисунок 3). В единой общей категории *Данные* были созданы три группы сигналов, разделенные по функциональному назначению: группа *C* (конструктивные параметры СКШ, константы, см.

рисунок 3, а), группа *P* (параметры для задания требуемых перемещений звеньев СКШ, см. рисунок 3, б), группа *O* (включает выходной параметр полной затраченной работы на перемещение СКШ, см. рисунок 3, в).

№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
1	Mx	Масса тележки	Веществен...		3000	Константа
2	My	Масса лифта с грузом и присп.	Веществен...		275	Константа
3	bx	Коэффициент сопротивления горизонтальному перемещению	Веществен...		500	Константа
4	by	Коэффициент сопротивления вертикальному перемещению	Веществен...		500	Константа
5	g	Ускорение св. п.	Веществен...		9.81	Константа

а)

№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
1	bx	Вектор временных интервалов ускорений по X	Массив		[1, 9, 1...	Переменная
2	ax	Вектор значений ускорений по X	Массив		[1, 0, -...	Переменная
3	ty	Вектор временных интервалов ускорений по Y	Массив		[1, 9, 1...	Переменная
4	ay	Вектор значений ускорений по Y	Массив		[1, 0, -...	Переменная

б)

№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
1	Arp1	Работа полная	Веществен...		42479.785	Переменная

в)

Рисунок 3 – Сигналы базы данных проекта имитационной модели крана-штабелера традиционной конструкции

Приведены временные зависимости параметров, полученных при заданных перемещениях на 5 м по горизонтальной координате  $x$  и на 10 м по вертикальной координате  $y$ .

На рисунке 4 приведены временные зависимости требуемых и фактических координат СКШ  $x$  и  $y$  (рисунок 4, а, требуемые и фактические координаты при выбранном масштабе визуально совпадают). На рисунок 4, б приведены соответствующие временные зависимости разностей требуемых и фактических значений координат, обеспечиваемые двумя блоками *ПИД-регулятор*. На рисунок 5, а приведены временные зависимости сил  $Q_x$  и  $Q_y$ , создаваемых приводами тележки и каретки соответственно, обеспечивающие перемещения звеньев, близкие к требуемым. На рисунок 5, б, приведены временные зависимости работ  $A_x$  и  $A_y$  каждого из приводов тележки и

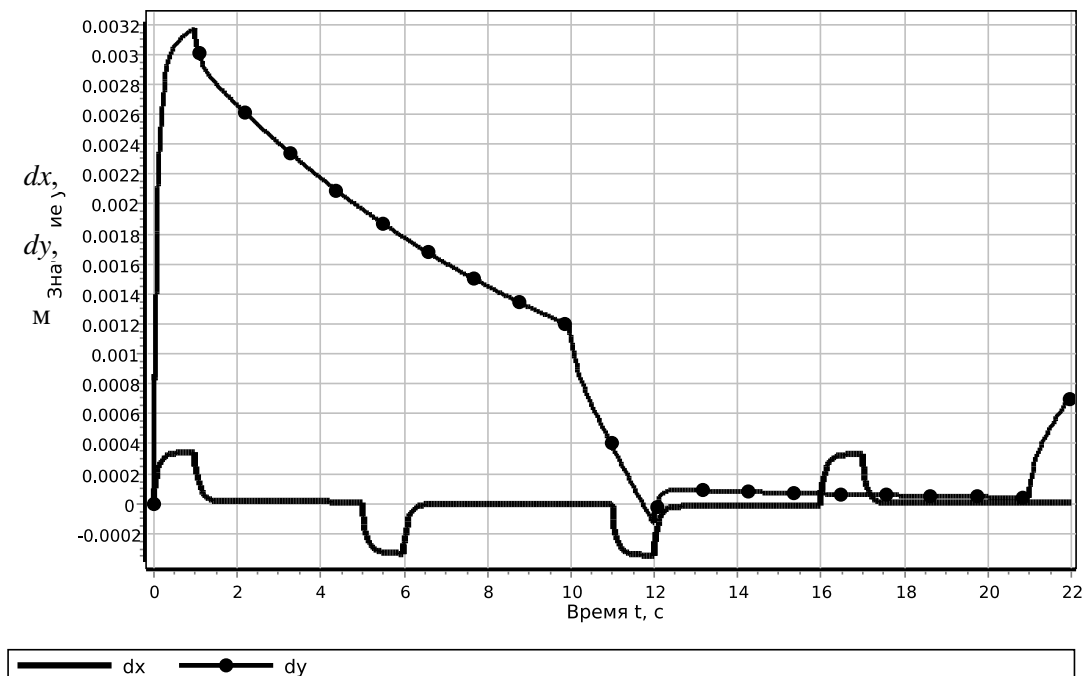


каретки соответственно, а также суммарной работы  $A_{\Sigma}$  двух приводов на рассматриваемом перемещении.

Приведенные временные зависимости получены при постоянных значениях ускорений разгонов и торможений тележки и каретки, равных  $1 \text{ м/с}^2$ . Максимальные скорости перемещения тележки и каретки были также равны  $1 \text{ м/с}$ .



a)



б)

Рисунок 4 – Временные зависимости координат тележки и каретки (а), и соответствующих им разностей требуемых и фактических значений координат крана (б) (примеры)

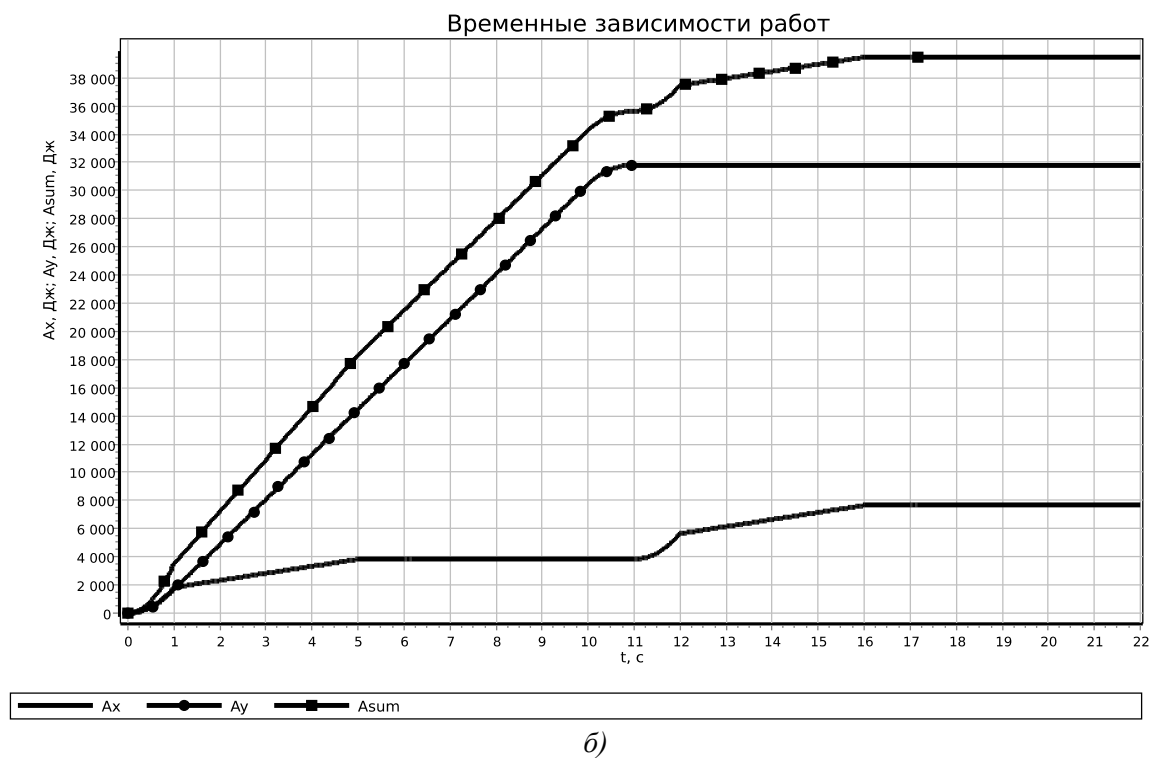
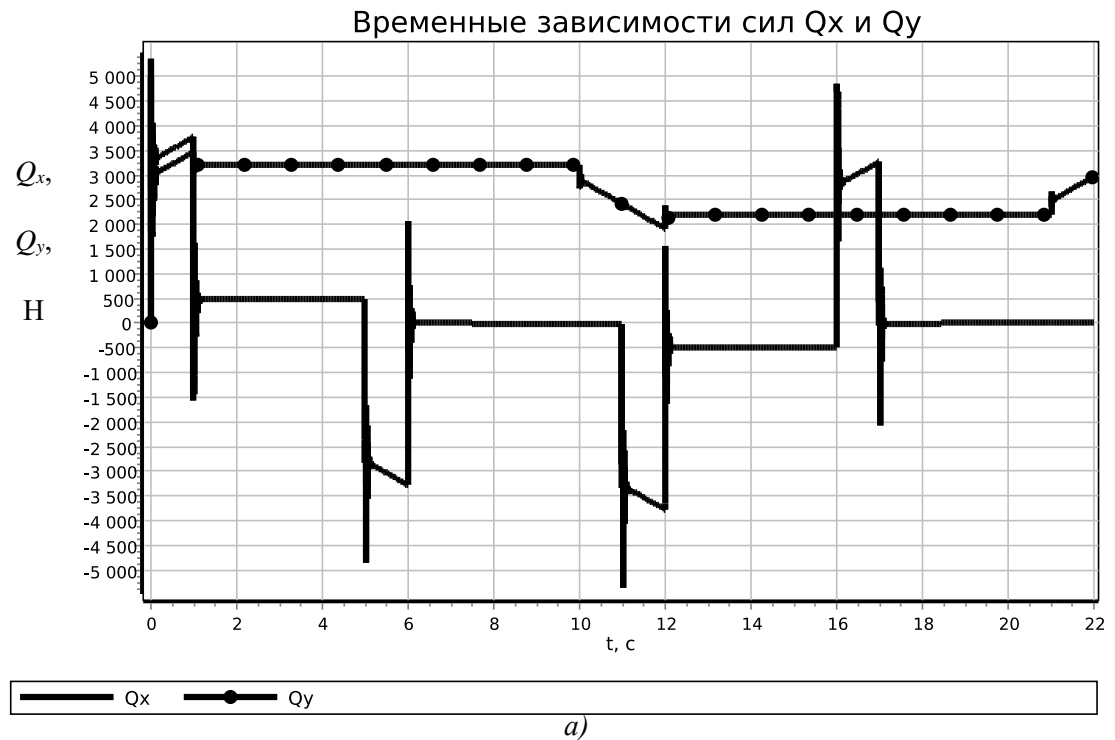


Рисунок 5 – Временные зависимости сил приводов (а) и соответствующих им работ приводов крана (б) (примеры)

Была разработана конструкция крана-штабелера с поворотной стрелой, целью использования которой является повышение эффективности кранов-штабелеров и расширение их технологических возможностей. Предложенная

конструкция предназначена для использования в складах с полукруглой формой стеллажей (таких, например, как арочные ангары, рисунок 6)

Были выведены обладающие научной новизной уравнения движения для предложенной конструкции крана-штабелера с поворотной стрелой.

На затраты энергии крана-штабелера с поворотной стрелой при перемещениях влияют не только начало и окончание движения звеньев крана с ускорением, но и потери на диссипацию энергии в приводах и шарнирах, которые также учитываются в математической модели и ее программной реализации.

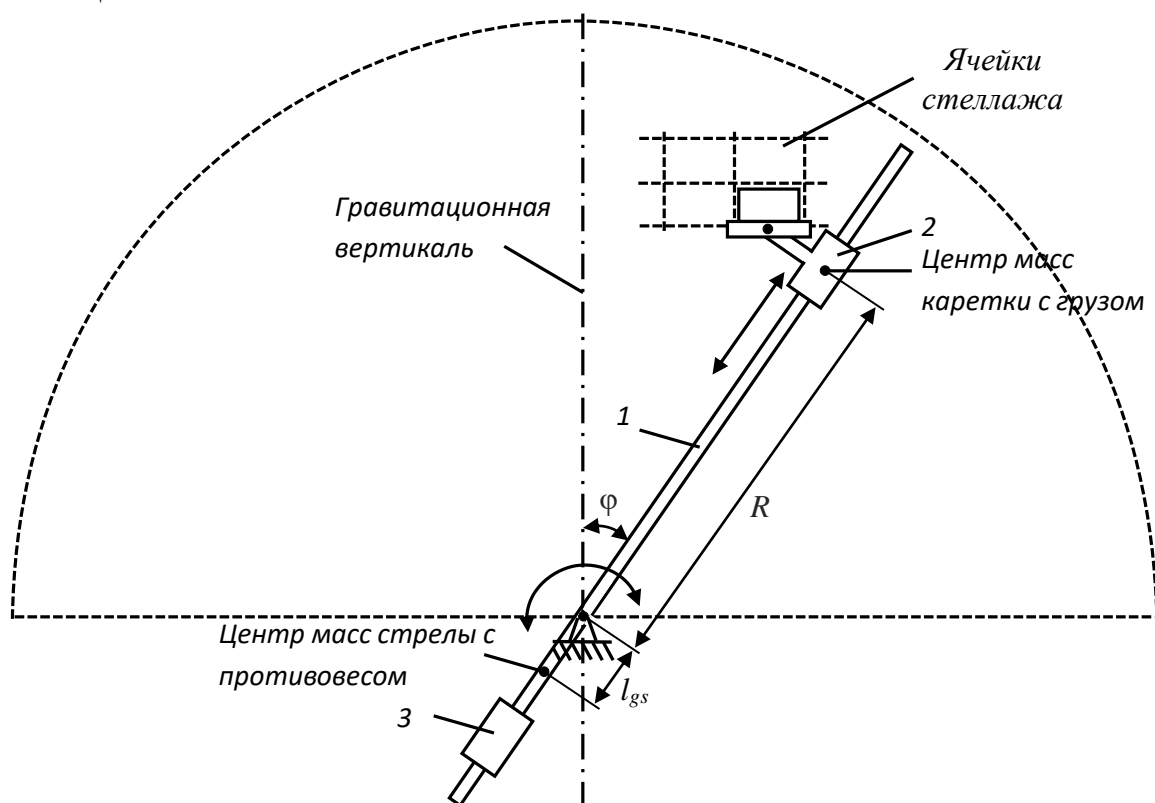


Рисунок 6 – Расчетная схема предложенной конструкции стеллажного крана-штабелера с поворотной стрелой.

Были рассчитаны уравнения движения крана-штабелера с поворотной стрелой. В расчетной схеме (см. рисунок 6) и модели приняты следующие обозначения:  $\varphi$  – угол отклонения стрелы от вертикали;  $R$  – радиальная координата центра масс каретки с грузом относительно оси вращения стрелы;  $m_s$  – масса стрелы с противовесом;  $m_{lp}$  – масса каретки с грузом;  $l_{gs}$  – длина от оси стрелы до ее центра масс, с учетом противовеса;  $I_s$  – момент инерции стелы с противовесом относительно оси вращения;  $b_w$  – коэффициент сопротивления повороту стрелы;  $b_r$  – коэффициент сопротивления радиальному перемещению каретки.

Уравнения Лагранжа динамической системы крана-штабелера с поворотной стрелой с учетом сил диссипации будут иметь вид:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial (T - U)}{\partial q_j} = Q_j, \quad (3)$$

где  $T(q_1, q_2)$  – кинетическая энергия динамической системы;  $U(q_1, q_2)$  – потенциальная энергия системы;  $F(q_1, q_2)$  – диссипативная функция Релея;  $Q_j(t)$  – обобщенные силы;  $t$  – время;  $j = 1, 2$ .

Механическая система крана-штабелера с поворотной стрелой (см. рис. 1) обладает двумя степени свободы. Во-первых, это поворот стрелы относительно своей оси вращения на угол  $\varphi$ . Во-вторых, это перемещение центра масс каретки с грузом в радиальном направлении вдоль стрелы на расстояние  $R$  от оси стрелы.

Кинетическая энергия динамической системы определялась выражением:

$$T = \frac{I_s \dot{\varphi}^2 + m_{lp} (R^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{R}^2)}{2}. \quad (4)$$

Потенциальная энергия определялась выражением:

$$U = R \cdot g \cdot m_{lp} \cdot \sin(\varphi) + g \cdot l_{gs} \cdot m_s \cdot \sin(\varphi). \quad (5)$$

Функция Релея учитывала диссипацию энергии при изменении одной угловой и одной линейной координат в приводах стрелы и грузовой каретки с грузом соответственно. Использовалась модель вязкого трения. Функция Релея для вывода системы дифференциальных уравнений имела вид:

$$F = \frac{b_r \cdot R^2}{2} + \frac{b_w \cdot \dot{\varphi}^2}{2}. \quad (6)$$

Выражения (4-6), после соответствующего дифференцирования согласно (3), образовывали следующую систему дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} \left( I_s \cdot \ddot{\varphi} + b_w \cdot \dot{\varphi} + R^2 \cdot \ddot{\varphi} \cdot m_{lp} + 2 \cdot R \cdot m_{lp} \cdot \dot{R} \cdot \dot{\varphi} + \right. \\ \left. + R \cdot g \cdot m_{lp} \cdot \cos(\varphi) + g \cdot l_{gs} \cdot m_s \cdot \cos(\varphi) = Q_\varphi \right) \\ \left( -R \cdot m_{lp} \cdot \dot{\varphi}^2 + \ddot{R} \cdot m_{lp} + b_r \cdot \dot{R} + g \cdot m_{lp} \cdot \sin \varphi = Q_R \right) \end{cases} \quad (7)$$

Система (5) при преобразовании в форму Коши будет иметь вид:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} = -\frac{\left( b_w \cdot \dot{\varphi} - Q_\varphi + 2 \cdot R \cdot m_{lp} \cdot \dot{R} \cdot \dot{\varphi} + \right. \\ \left. R \cdot g \cdot m_{lp} \cdot \cos(\varphi) + g \cdot l_{gs} \cdot m_s \cdot \cos(\varphi) \right)}{m_{lp} \cdot R^2 + I_s}; \\ \ddot{R} = \frac{R \cdot m_{lp} \cdot \dot{\varphi}^2 + Q_r - b_r \cdot \dot{R} - g \cdot m_{lp} \cdot \sin \varphi}{m_{lp}} \end{cases} \quad (8)$$

Она может быть решена известными численными методами решения систем дифференциальных уравнений. Система (8) описывает динамику предложенной конструкции крана-штабелера с поворотной стрелой, совершающего рабочие движения.

Была разработана имитационная математическая модель крана-штабелера с поворотной стрелой

В расчетной схеме (см. рисунок 6) и модели приняты следующие обозначения:  $\varphi$  – угол отклонения стрелы от вертикали;  $R$  – радиальная координата центра масс каретки с грузом относительно оси вращения стрелы;  $m_s$  – масса стрелы с противовесом;  $m_{lp}$  – масса каретки с грузом;  $l_{gs}$  – длина от оси стрелы до ее центра масс, с учетом противовеса;  $I_s$  – момент инерции стрелы с противовесом относительно оси вращения;  $b_w$  – коэффициент сопротивления повороту стрелы;  $b_r$  – коэффициент сопротивления радиальному перемещению каретки.

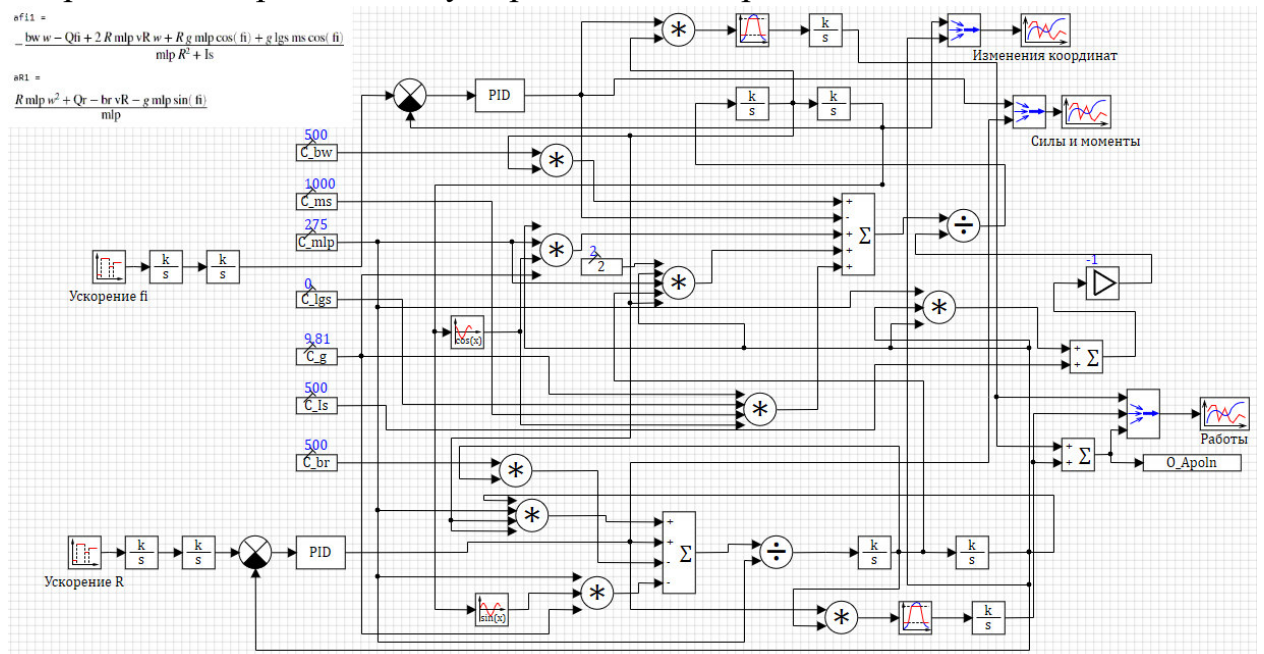


Рисунок 7 – Имитационная математическая модель крана-штабелера с поворотной стрелой в обозначениях SimInTech

№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
1	bw	Кэф-т сопрот. повороту стрелы	Вещественное		500	Переменная
2	ms	Масса стрелы	Вещественное		1000	Переменная
3	mlp	Масса каретки с грузом	Вещественное		275	Переменная
4	lgs	Длина от оси стрелы до ее ц.масс (с учетом противовеса)	Вещественное		0	Переменная
5	g	Ускорение свободного падения	Вещественное		9.81	Переменная
6	Is	Момент инерции стелы с противовесом относительно оси ...	Вещественное		500	Переменная
7	br	Кэф-т сопрот. передвижению каретки	Вещественное		500	Переменная

а)

№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
1	tfi	Вектор временных интервалов ускорений по fi	Массив	[0, 0, ...		Переменная
2	afi	Вектор значений ускорений по fi	Массив	[0, 0, ...		Переменная
3	tR	Вектор временных интервалов ускорений по R	Массив	[1, 9, ...		Переменная
4	aR	Вектор значений ускорений по R	Массив	[0.8, 0, ...		Переменная
5	fi0	Начальный угол поворота стрелы	Вещественное		3.1415...	Переменная

б)

№	Имя	Название	Тип данных	Формула	Значение	Способ расчёта
1	Apoln	Работа полная	Вещественное		6335.444	Переменная

в)

Рисунок 8 – Сигналы базы данных SimInTech имитационной модели крана-штабелера с поворотной стрелой: а) конструктивные параметры; б) параметры перемещений; в) работа полная

*Реализация модели крана-штабелера с поворотной стрелой в программной среде SimInTech*

Для практической реализации полученной системы дифференциальных уравнений (8) была использована Российская среда динамического моделирования и программирования SimInTech (рисунок 7) [15]. Она может рассматриваться как аналог зарубежных систем имитационного моделирования MATLAB/Simulink, SCILAB/Xcos и др.

В имитационной модели, представленной на рисунке 7, использованы основные алгебраические блоки SimInTech: *Константа*, *Сумматор*, *Перемножитель*, *Делитель*, *Сравнивающее устройство*. Для моделирования дифференциальных уравнений использовался блок *Интегратор*. Блок *Кусочно-постоянная* использовался для формирования заданных кусочно-постоянных значений ускорений двух управляемых координат крана: угла

поворота стрелы и радиального смещения центра масс каретки с грузом относительно оси вращения стрелы. Блок *Временной график* использовался для визуализации зависимостей выходных параметров модели: координат, сил, моментов и работ в приводах. В качестве вспомогательных использовались блок *Мультиплексор*, соединяющий несколько скалярных сигналов в один векторный, и блок *Запись в список сигналов*, передающий значения из имитационной модели в базу данных. Блок *ПИД-регулятор* использовался для преобразования рассогласования между заданным и фактическим значениями координат звеньев в текущее значение момента или силы привода управляемой координаты, минимизирующего рассогласование.

На рисунке 8 представлены окна базы данных разработанной имитационной модели в среде SimInTech. Все сигналы модели в единой общей категории *Данные*, были разделены на три группы по выполняемым функциям. Это группа конструктивных параметров *C*, группа параметров для задания требуемых перемещений подвижных звеньев *P*, и группа *O*, включающая выходной параметр – сумму работ приводов крана на рассматриваемом перемещении (см. рисунке 8).

Методика определения временных интервалов при равноускоренном движении использовалась для определения зависимостей заданных координат звеньев крана от времени. При этом ускорение подвижного звена крана (стрелы, каретки с грузом) принимало три дискретных значения  $[-a_{\max}; 0; a_{\max}]$ , а значение скорости изменялось непрерывно, но ограничивалось интервалом предельных значений  $[-v_{\max}; v_{\max}]$ . По заданным перемещениям в методике определялись временные интервалы движения с положительным, нулевым и отрицательным ускорениями. Реализация заданных перемещений звеньев с ограничениями по скоростям осуществлялась при помощи блоков *Кусочно-постоянная* (на выходе двух данных блоков формировались значения ускорений стрелы и каретки), и 4 блоков *Интегратор*, соединенных попарно последовательно, и преобразующих ускорения в скорости, а затем в требуемые перемещения  $\varphi_{treb}(t)$ ,  $R_{treb}(t)$  подвижных звеньев стрелы и каретки соответственно.

Для этого величины  $d\varphi = \varphi_{treb}(t) - \varphi(t)$ ,  $dR = R_{treb}(t) - R(t)$ , представляющие собой разности фактических и требуемых (заданных) в данный момент времени координат стрелы и каретки, подаются на входы блоков *ПИД-регулятор*. Указанные блоки формируют на выходе обобщенные момент  $M_\varphi$  и сила  $Q_R$ , которые и осуществляют движение подвижных звеньев по заданной траектории, минимизируя величины  $d\varphi$  и  $dR$ .

Умножение момента  $M_\varphi$  и силы  $Q_R$  на соответствующие скорости изменения обобщенных координат позволяет получить временные зависимости мощностей:

$$N_\varphi(t) = M_\varphi(t) \cdot \dot{\varphi}(t); N_R(t) = Q_R(t) \cdot \dot{R}(t). \quad (9)$$

Далее, численное интегрирование текущих значений мощностей приводов  $N_\phi$  и  $N_R$  при помощи блоков *Интегратор*, позволило определить затраты энергии приводов стрелы и каретки, т.е. работы приводов:

$$A_\phi(t) = \int N_\phi(t)dt; A_R(t) = \int N_R(t)dt \quad (10)$$

При суммировании накапливаемых значений двух работ  $A_\phi$  и  $A_R$ , в конечный момент времени переходного процесса выдается полная работа приводов крана  $A_\Sigma$ :

$$A_\Sigma = \int_{t=0}^{T_{kon}} N_\phi(t)dt + \int_{t=0}^{T_{kon}} N_R(t)dt. \quad (11)$$

Поскольку при составлении модели было принято допущение о том, что при торможении подвижных звеньев энергия не расходуется и не накапливается, минимальные текущие значения мощностей приводов  $N_\phi$  и  $N_R$  ограничивались нулевыми значениями. Для этого в модели использовались блоки *Ограничитель*.

Поскольку основу математической модели крана составляют дифференциальные уравнения второго порядка (8), наиболее важными в модели являются блоки *Интегратор*, в количестве 4-х штук, соединенные попарно последовательно, и находящиеся в центре модели.

Они интегрируют ускорения  $\ddot{\phi}$  и  $\ddot{R}$  стрелы и каретки соответственно. Данные ускорения формировались в модели с использованием переменных и их первых производных по уравнениям (8).

На рисунках 9, 10 приведены временные зависимости параметров координат стрелы и каретки, погрешностей их реализации (разностей), обобщенных моментов и сил приводов, а также работ, полученных при заданных перемещениях на 1.25 рад стрелы и на 7 м каретки. Перемещение каретки с грузом в целевую точку с координатами, указанными выше, плавная остановка и последующий возврат выполнялись из начальной точки с нулевыми координатами.

Требуемые и фактические координаты крана  $\phi$  и  $R$  (см. рис. 9, а) визуально совпадают. При помощи двух блоков *ПИД-регулятор* формируются временные зависимости разностей требуемых и фактических координат  $d\phi$  и  $dR$  (см. рисунке 9, б). Минимизацию  $d\phi$  и  $dR$  обеспечивают момент  $M_\phi$  и сила  $Q_R$ . Последние реализуются приводами стрелы и каретки соответственно (см. рисунке 10, а). На рисунке 10, б, приведены временные зависимости работ приводов стрелы и каретки  $A_\phi$  и  $A_R$ , и суммарной работы  $A_\Sigma$  на рассматриваемой в качестве примера траектории перемещений.

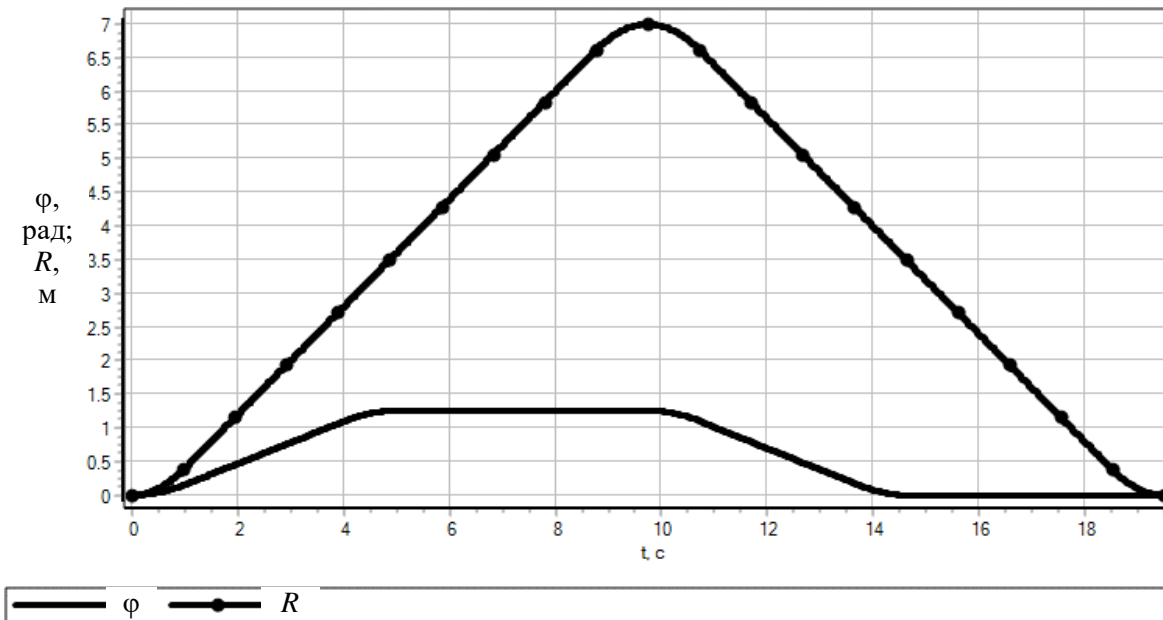
На графиках, на которых приведены временные зависимости работ  $A_\phi$ ,  $A_R$  и  $A_\Sigma$ , горизонтальность некоторых участков соответствует перемещениям



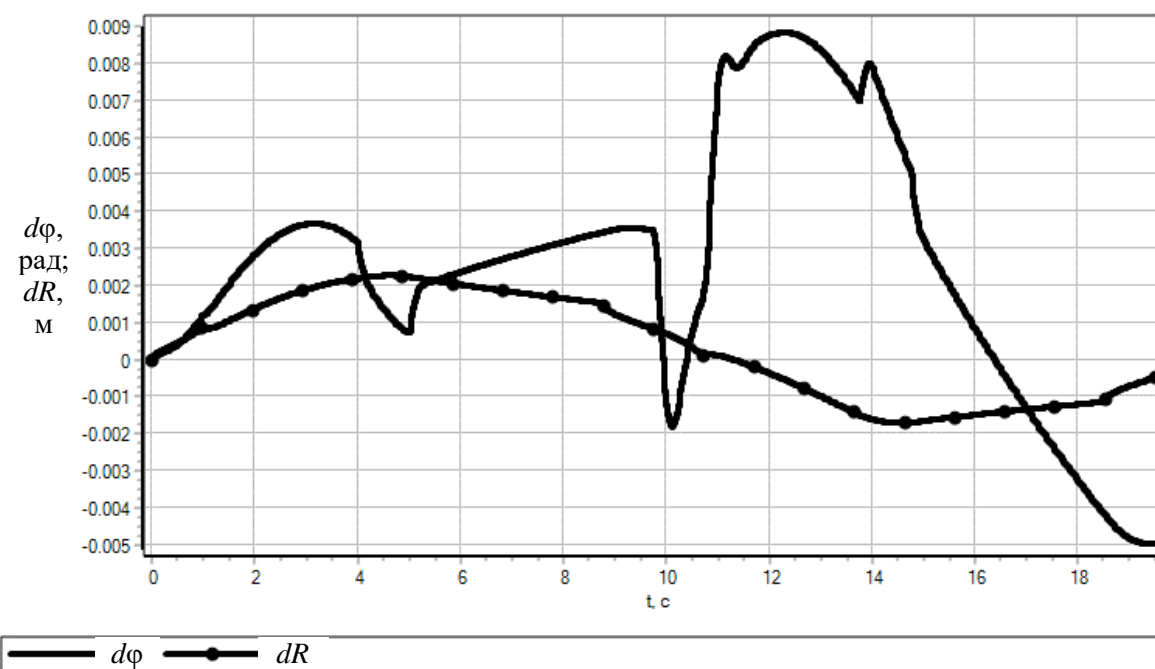
подвижных звеньев в режиме управляемого торможения, когда, согласно сделанным допущениям, энергия приводами не расходуется.

Сумма работ приводов  $A_{\Sigma}$  соответствует полным затратам энергии при перемещении. В конечный момент времени рассматриваемого в качестве примера процесса суммарная работа составила 22156 Дж.

Временные зависимости координат  $\varphi$  и  $R$



а)



б)

Рисунок 9 – Временные зависимости координат стрелы и каретки (а), и соответствующих им разностей требуемых и фактических значений координат крана (б) (примеры)

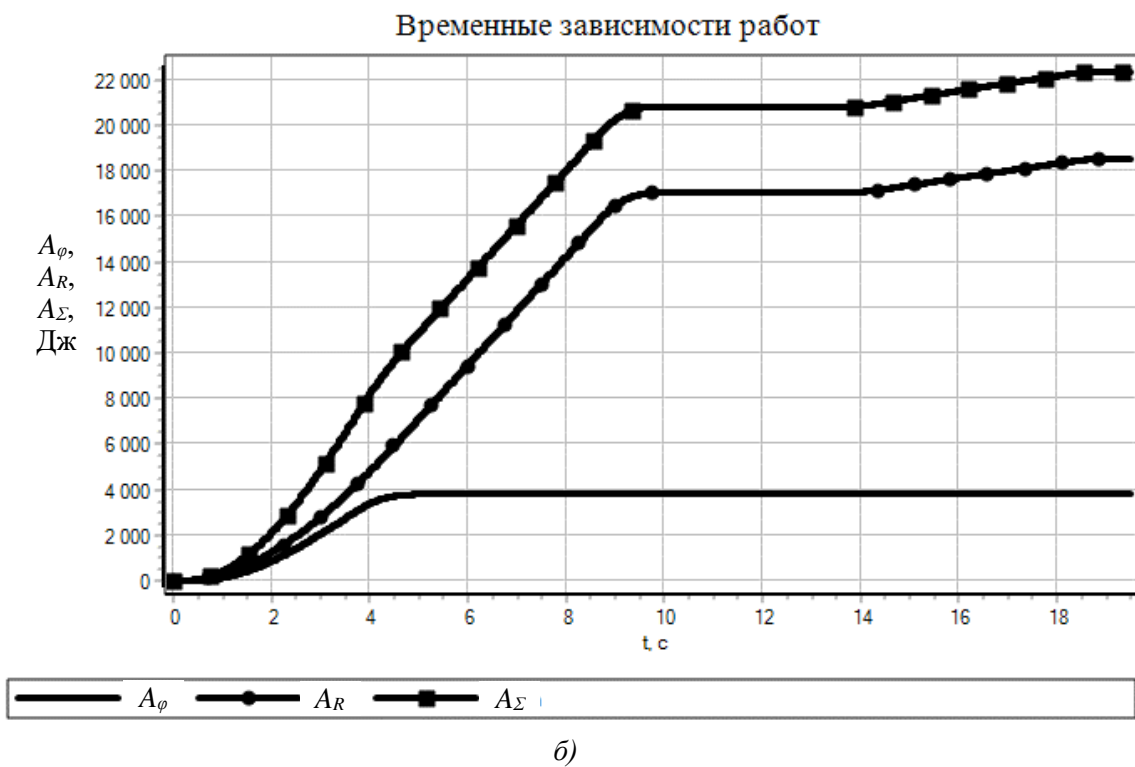
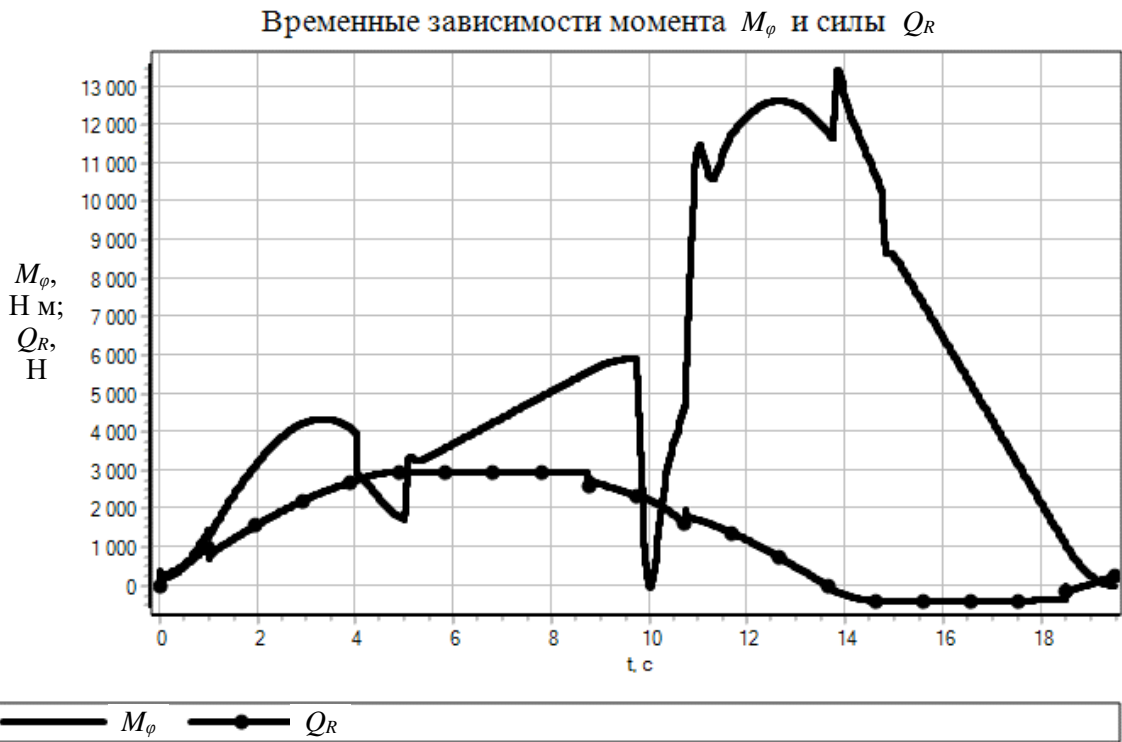


Рисунок 10 – Временные зависимости сил приводов (а) и соответствующих им работ приводов крана (б) (примеры)

Таким образом, в 3 главе работы представлена имитационная математическая модель стеллажного крана-штабелера с поворотной стрелой, которая позволяет исследовать большие пространственные перемещения звеньев крана, повороты стрелы на 180 градусов. В модели, которая

составлена из типовых блоков системы математического моделирования SimInTech, учитываются потери энергии в приводах подвижных звеньев по модели вязкого трения.

В основу модели положена система из двух дифференциальных уравнений Лагранжа второго порядка. Для вывода дифференциальных уравнений модели использовались аналитические выражения диссипативной функции Релея и частных производных потенциальной и кинетической энергий динамической системы крана.

Разработанная математическая модель предназначена для определения затрат энергии, а также, при необходимости, мощностей, моментов и сил в приводах крана, соответствующих заданным перемещениям подвижных звеньев.

Модель вязкого трения использовалась для описания диссипации энергии, возникающей при вращении стрелы крана и поступательном движении каретки по стреле. Силовые воздействия на подвижные звенья, обеспечивающие движение по траекториям, близким к заданным, формировались при помощи двух ПИД-регуляторов. Для этого использовались соответствующие блоки системы SimInTech.

Модель позволяет определять энергетические затраты, зависящие от перемещений, при выполнении рабочих циклов крана предложенной конструкции с поворотной стрелой. А также проводить сравнение различных заданных траекторий перемещения грузов по критериям энергетических и временных затрат.

Перспективным направлением использования разработанной математической модели может выступать вычислительная верификация численных и аналитических алгоритмов управления краном новой конструкции.

**В четвертой главе** представлены методики определения затрат энергии при перемещении груза краном-штабелером традиционной и разработанной конструкций.

*Методика определения затрат энергии при перемещении крана-штабелера традиционной конструкции*

В качестве исходных данных выступают: декартовы координаты начальной  $(x_{pred}, z_{pred})$  и целевой  $(x_{tek}, z_{tek})$  ячеек в складе прямоугольной формы, массы тележки  $(m_b)$ , каретки с грузозахватным приспособлением  $(m_l)$  и груза  $(m_p)$  соответственно, максимальные скорости движения тележки  $(v_{xmax})$  и каретки  $(v_{zmax})$  соответственно, условные коэффициенты сопротивления среды при движениях тележки  $(b_x)$  и каретки  $(b_z)$  соответственно.

Для заданного перемещения определяются последовательно:

1. Сумма масс всех подвижных звеньев крана с грузом:

$$m_{\Sigma} = m_b + m_l + m_p. \quad (12)$$

2. Сумма масс каретки с грузозахватным приспособлением и груза:

$$m_{lp} = m_l + m_p. \quad (13)$$

3. Изменение координаты  $X$  тележки:

$$dx = x_{tek} - x_{pred}. \quad (14)$$

4. Изменение координаты  $Z$  каретки с грузозахватным приспособлением и грузом:

$$dz = z_{tek} - z_{pred}. \quad (15)$$

5. Время перемещения тележки на заданное расстояние вдоль горизонтальной оси  $X$  при максимальной заданной скорости тележки:

$$T_x = \left| \frac{dx}{v_{x \max}} \right| = \left| \frac{x_{tek} - x_{pred}}{v_{x \max}} \right| \quad (16)$$

6. Время перемещения каретки с грузозахватным приспособлением и грузом на заданное расстояние вдоль вертикальной оси  $Z$  при максимальной заданной скорости каретки:

$$T_z = \left| \frac{dz}{v_{z \max}} \right| = \left| \frac{z_{tek} - z_{pred}}{v_{z \max}} \right| \quad (17)$$

7. Полное время перемещения определяется как максимальный элемент двухкомпонентного вектора:

$$T = \max [T_x + T_z] \quad (18)$$

8. Уточняется фактическая абсолютная скорость тележки:

$$v_x = \frac{|dx|}{T} = \frac{|x_{tek} - x_{pred}|}{T} \quad (19)$$

9. Уточняется фактическая абсолютная скорость каретки:

$$v_x = \frac{|dz|}{T} = \frac{|z_{tek} - z_{pred}|}{T} \quad (20)$$

10. Кинетическая энергия всех звеньев с грузом при движении тележки вдоль оси X:

$$E_{kx} = \frac{m_{\Sigma} \cdot v_x^2}{2} \quad (21)$$

11. Энергия, затраченная на преодоление всех сил сопротивления, приведенных к оси X:

$$E_{bx} = |dx \cdot v_x \cdot b_x| \quad (22)$$

12. Сумма энергий, затраченных при перемещении всех масс крана традиционной конструкции и груза вдоль горизонтальной оси X:

$$E_{bx} = E_{kx} + E_{bx} \quad (23)$$

13. Кинетическая энергия масс каретки с грузозахватным приспособлением и груза при движении вдоль вертикальной оси Z:

$$E_{kz} = \frac{m_{lp} \cdot v_z^2}{2} \quad (24)$$

14. Энергия, затраченная на преодоление всех сил сопротивления, приведенных к оси Z:

$$E_{bz} = dz \cdot v_z \cdot b_z \quad (25)$$

15. Потенциальная энергия масс каретки с грузозахватным приспособлением и груза:

$$E_{pz} = m_{lp} \cdot g \cdot dz \quad (26)$$

16. Сумма энергий, затраченных при перемещении масс каретки с грузозахватным приспособлением и груза вдоль вертикальной оси Z:

$$E_{sz} = \begin{cases} E_{kz} + E_{bz} + E_{pz} & \text{при } dz > 0; \\ 0 & \text{при } dz \leq 0. \end{cases} \quad (27)$$

При опускании груза вниз по колонне крана традиционной конструкции, было принято, что энергия не расходуется вообще, т.к. опускание происходит «управляемым торможением».

17. Суммарные затраты энергии при однократном перемещении груза краном-штабелером традиционной конструкции из произвольно заданной начальной ячейки в произвольно заданную целевую ячейку:

$$E_{\Sigma} = E_{sx} + E_{sz} \quad (28)$$

*Методика определения затрат энергии при перемещении крана-штабелера разработанной конструкции*

Рассматривался режим работы крана, при котором радиальная координата (радиус выдвижения) противовеса на стреле принимает фиксированное значение.

В качестве исходных данных выступают: радиус от оси вращения до наиболее удаленной точки стрелы ( $R_k$ ), обобщенные координаты угла поворота стрелы и радиуса выдвижения каретки для начальной ячейки в складе полукруглой формы ( $\varphi_{pred}$  и  $R_{pred}$  соответственно), декартовы координаты целевой ячейки в складе полукруглой формы ( $x_{tek}$ ,  $z_{tek}$ ), угловая частота вращения стрелы ( $w$ ), скорость изменения радиальной координаты каретки ( $v_R$ ), массы стрелы ( $m_k$ ), каретки с грузозахватным приспособлением ( $m_l$ ) и груза ( $m_p$ ) соответственно, радиус выдвижения противовеса ( $R_{cw}$ ), условные коэффициенты сопротивления среды при повороте стрелы ( $b_{\varphi}$ ) и выдвижении каретки ( $b_R$ ) соответственно.

Для заданного перемещения определяются последовательно:

1. Сумма масс каретки с грузозахватным приспособлением и груза:

$$m_{lp} = m_l + m_p. \quad (29)$$

2. Масса противовеса, соответствующая его заданной радиальной координате, определяется из условия равенства моментов, создаваемых стрелой и противовесом относительно оси вращения стрелы:

$$m_{cw} = \frac{m_k \cdot (R_k - R_{cw})}{2 \cdot R_{cw}} \quad (30)$$

3. Момент инерции всей стрелы относительно оси вращения, определяется по зависимостям для прямого тонкого стержня, с учетом долевого соотношения двух частей общей массы стрелы  $m_k$ , приходящихся на два плеча стрелы длинами  $R_k$  и  $R_{cw}$  соответственно:

$$J_k = \frac{m_k \cdot (R_k^2 \cdot R_k + R_{cw})}{3 \cdot (R_k + R_{cw})} = \frac{m_k \cdot (R_k^3 + R_{cw}^3)}{3 \cdot (R_k + R_{cw})} \quad (31)$$

4. Момент инерции противовеса как сосредоточенной массы относительно оси вращения стрелы:

$$J_{cw} = m_{cw} + R_{cw}^2 \quad (32)$$

5. Момент инерции стрелы с противовесом относительно оси вращения:

$$J = J_k + J_{cw} \quad (33)$$

6. Кинетическая энергия стрелы с противовесом при заданной установившейся угловой скорости поворота стрелы:

$$E_{kw} = \begin{cases} \frac{(J \cdot \omega^2)}{2} & \text{при } x_{tek} \neq 0 \vee z_{tek} \neq 0; \\ 0 & \text{при } x_{tek} = 0 \wedge z_{tek} = 0 \end{cases} \quad (34)$$

В случае, если целевой ячейкой выступает точка загрузки склада ( $x_{tek}=0$ ,  $z_{tek}=0$ ), вращение стрелы не производится (в нем нет необходимости, т.к. при простом одиночном цикле стрела при предыдущем перемещении уже была повернута в положение напротив ячейки хранения), кинетическая энергия стрелы с противовесом равна нулю.

7. Максимальный радиус поворота каретки с грузозахватным приспособлением и грузом при перемещении:

$$R_{p \max} = \sqrt{x_{tek}^2 + z_{tek}^2} \quad (35)$$

В случае, если целевой ячейкой выступает точка загрузки ( $x_{tek}=0$ ,  $z_{tek}=0$ ), максимальный радиус поворота согласно приведенной формуле будет равным нулю, поскольку вращение стрелы не производится. В случае, если целевой ячейкой выступает любая ячейка хранения, груз (при простом одиночном цикле) перемещается из точки загрузки склада с нулевыми координатами и радиусом в ячейку хранения, в которой радиус поворота достигает максимума.

8. Угол поворота стрелы в целевой ячейке:

$$\varphi_{tek} = \begin{cases} \arctg\left(\frac{z_{tek}}{x_{tek}}\right) & \text{при } x_{tek} \neq 0 \vee z_{tek} \neq 0; \\ \varphi_{pred} & \text{при } x_{tek} = 0 \wedge z_{tek} \neq 0 \end{cases} \quad (36)$$

9. Время поворота стрелы на требуемый угол при максимальной (заданной) скорости ее углового поворота:

$$T_{\varphi} = \left| \frac{\varphi_{tek} - \varphi_{pred}}{w} \right| \quad (37)$$

10. Время радиального перемещения каретки с грузозахватным приспособлением и грузом на требуемое расстояние вдоль стрелы при максимальной (заданной) скорости радиального перемещения:

$$T_R = \left| \frac{R_{tek} - R_{pred}}{v_R} \right| \quad (38)$$

11. Полное время перемещения определяется как максимальный элемент двухкомпонентного вектора:

$$T = \max[T_{\varphi} \ T_R] \quad (39)$$

12. Уточняется фактическая абсолютная скорость вращения стрелы:

$$w_{fakt} = \frac{|\varphi_{tek} - \varphi_{pred}|}{T} \quad (40)$$

13. Уточняется фактическая абсолютная скорость перемещения каретки вдоль стрелы:

$$v_{Rfakt} = \frac{|R_{tek} - R_{pred}|}{T} \quad (41)$$

14. Максимальная линейная скорость каретки с грузозахватным приспособлением и грузом (достигаемая при максимальном радиусе каретки относительно оси вращения стрелы):

$$v_{p \max} = \sqrt{R_{pmax}^2 \cdot w_{fakt}^2 + v_{Rakt}^2} \quad (42)$$

15. Максимальная кинетическая энергия каретки с грузозахватным приспособлением и грузом:

$$E_{klp} = \begin{cases} \frac{m_{lp} \cdot v_{p \max}^2}{2} & \text{при } x_{tex} \neq 0 \vee z_{tek} \neq 0 \\ \left( \frac{m_{lp} \cdot v_{pmax}^2}{2} \right) \sin(\varphi_{pred}) & \text{при } x_{tex} = 0 \wedge z_{tek} \neq 0 \end{cases} \quad (43)$$



При перемещении из ячейки хранения в точку загрузки склада, в зависимости от угла наклона стрелы, энергия  $E_{kp}$  меняется от полного номинального значения при горизонтальной стреле, до нуля (при вертикально расположенной стреле опускание каретки происходит полностью в режиме «управляемого торможения», энергия на разгон масс не расходуется).

16. Вертикальная декартова координата каретки в начальном положении:

$$z_{pred} = R_{pred} \cdot \sin(\varphi_{pred}) \quad (44)$$

17. Вектор вертикальных координат каретки на всей рассматриваемой траектории:

$$z_i = R_i \cdot \sin(\varphi_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (45)$$

18. Максимальное значение вертикальной координаты каретки на всей рассматриваемой траектории:

$$z_{max} = \max(z_i) \quad (46)$$

19. Изменение декартовой координаты  $Z$  каретки с грузозахватным приспособлением и грузом:

$$dz = z_{max} - z_{pred} \quad (47)$$

20. Потенциальная энергия каретки с грузозахватным приспособлением и грузом:

$$E_{pz} = \begin{cases} m_{lp} \cdot g \cdot dz & \text{при } dz > 0 \\ 0 & \text{при } dz \leq 0 \end{cases} \quad (48)$$

21. Энергия, затраченная на преодоление всех сил сопротивления, приведенных к обобщенной координате поворота стрелы:

$$E_{b\varphi} = |\varphi_{tek} - \varphi_{pred}| \cdot w_{fakt} \cdot b_{\varphi} \quad (49)$$

22. Энергия, затраченная на преодоление всех сил сопротивления, приведенных к обобщенной координате перемещения каретки по стреле:

$$E_{bR} = \begin{cases} |R_{tek} - R_{pred}| \cdot v_{Rfakt} \cdot b_R & \text{при } x_{tex} \neq 0 \vee z_{tek} \neq 0 \\ (|R_{tek} - R_{pred}| \cdot v_{Rfakt} \cdot b_R) \cdot \cos(\varphi_{pred}) & \text{при } x_{tex} \neq 0 \vee z_{tek} \neq 0 \end{cases} \quad (50)$$

При перемещении из ячейки хранения в точку загрузки склада, в зависимости от угла наклона стрелы энергия  $E_{bR}$  меняется от полного номинального значения при горизонтальной стреле, до нуля (при вертикально расположенной стреле опускание каретки происходит

полностью в режиме «управляемого торможения», энергия на преодоление сил трения не расходуется).

23. Суммарные затраты энергии при однократном перемещении груза краном-штабелером разработанной конструкции:

$$E_{\Sigma} = E_{kw} + E_{klp} + E_{pz} + E_{b\varphi} + E_{bR} \quad (51)$$

Все слагаемые выражений суммарных затрат энергии для кранов-штабелеров двух видов имеют достаточно простой и ясный физический смысл, а применяемые при их вычислении коэффициенты и параметры могут быть привязаны к конкретной конструкции каждого крана, а также, при необходимости, проварьированы в широких пределах.

С использованием двух разработанных методик были проведены теоретические исследования рабочих процессов перемещения кранов-штабелеров и выполнен сравнительный анализ затрат энергии для кранов традиционной и предлагаемой конструкций.

Теоретические исследования перемещений крана-штабелера традиционной конструкции показали, что снизить затраты энергии, не меняя конструкцию крана-штабелера, помогает оптимизация маршрутов его перемещения, но лишь в тех случаях, когда допустима вариативность в размещении грузов (например, при неполной загрузке склада, существенных различиях в массе перемещаемых грузов и т.п.).

Повышение эффективности работы кранов-штабелеров и, соответственно, снижение затрат энергии возможно и на основе оптимизации рабочей области, т.е. формы стеллажей склада. В то же время, форма рабочего пространства связана с формой и конструктивными особенностями самого крана-штабелера, что требует проведения их совместной модификации.

В результате проведенного анализа перемещения крана-штабелера с поворотной стрелой было сделано вывод, что в складах данной формы невозможно использовать краны-штабелеры традиционной конструкции с постоянной высотой колонны. Кроме того, для горизонтальных перемещений крана-штабелера традиционной конструкции необходимо периодически осуществлять разгон тележки, обладающей сравнительно большой массой.

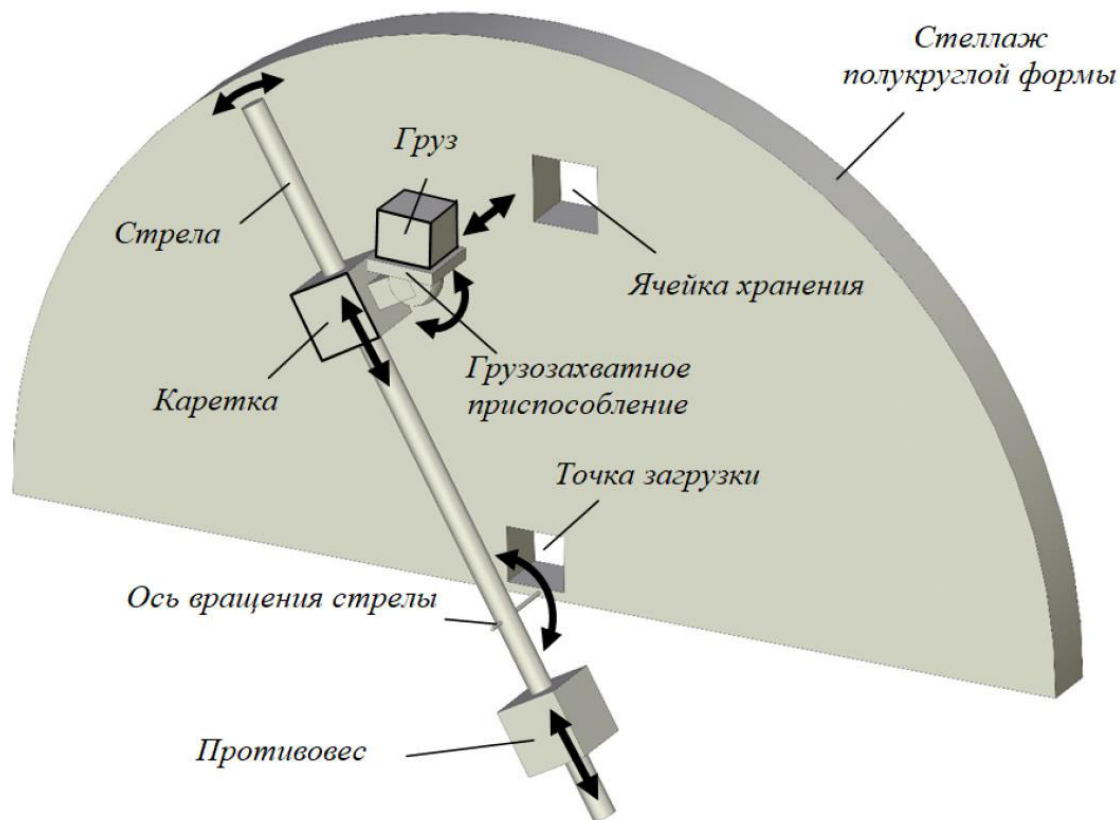


Рисунок 11 – Разработанная конструкция крана-штабелера с поворотной стрелой и противовесом (также может обслуживать два ряда стеллажей, показан один из них)

В предложенной конструкции сравнительно легкая стрела, масса которой сопоставима с массой колонны у прототипа, поворачивается вокруг горизонтально ориентированной оси, расположенной в центре окружности стеллажа. Вдоль стрелы перемещаются каретка и противовес, на каретке расположено грузозахватное приспособление с возможностью углового поворота относительно горизонтали и выдвижения груза в обе стороны относительно плоскости поворота стрелы.

Точку загрузки в складе, обслуживаемом разработанным краном, предлагается разместить максимально близко к оси вращения стрелы, т.е. в центре окружности стеллажа. Разработанный кран, также как и кран-штабелер традиционной конструкции, способен обслуживать сразу два ряда стеллажей, расположенных параллельно друг другу и плоскости поворотов стрелы.

Для кранов традиционной и разработанной конструкций, обслуживающих склады одинаковой вместимости, был проведен сравнительный анализ возникающих при работе затрат энергии.

Анализ полученных в результате вычислительного эксперимента данных (см. рисунок 12) показал, что для крана разработанной конструкции

происходит снижение средних полных затрат энергии на один цикл перемещения более чем в 2 раза, с 64511 до 29734 Дж.

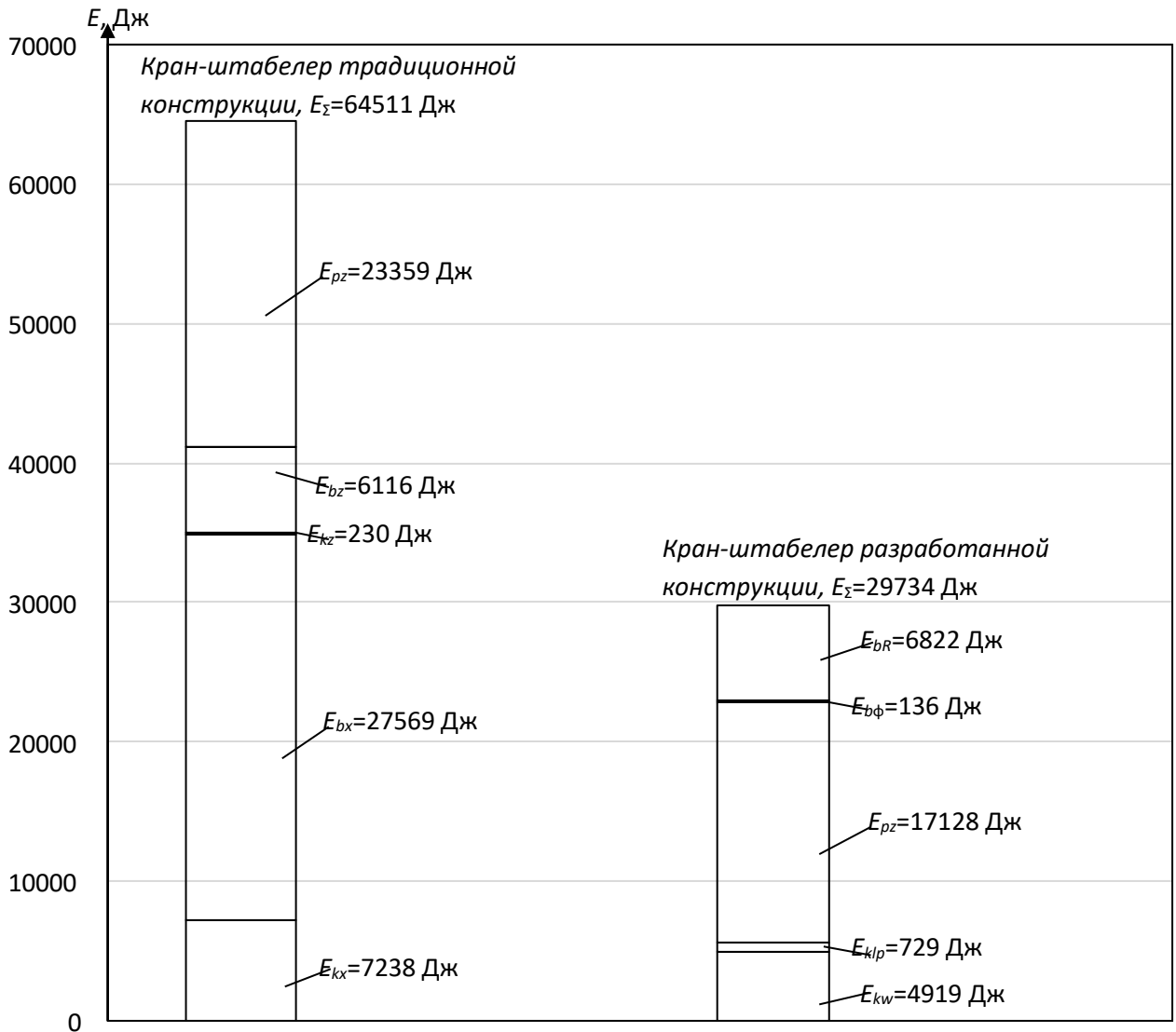


Рисунок 12 – Средние затраты энергии перемещений с разбивкой по компонентам для кранов-штабелеров традиционной и разработанной конструкций, обслуживающих склад одинаковой вместимости (пример)

В структуре затрат энергии крана-штабелера традиционной конструкции преобладающими являются затраты на преодоление сил сопротивления движению тележки вдоль горизонтальной оси  $E_{bx}$  (27569 Дж) и затраты на повышение уровня потенциальной энергии при подъеме каретки, грузозахватного приспособления и груза  $E_{pz}$  (23359 Дж).

В структуре затрат энергии крана-штабелера разработанной конструкции преобладающими являются затраты на повышение уровня потенциальной энергии при подъеме каретки, грузозахватного приспособления и груза  $E_{pz}$  (17128 Дж).

Может быть сделан вывод о существенном преимуществе крана-штабелера разработанной конструкции перед краном-штабелером традиционной конструкции, обслуживающим склад той же вместимости при одинаковой производительности, заключающийся в двухкратном снижении общих затрат энергии при работе на простом одиночном цикле перемещений и условии равномерного равновероятного использования всех ячеек обоих складов.

Это обуславливает целесообразность использования крана-штабелера разработанной конструкции в складах, имеющих форму полукруглых ангаров. Полученные результаты могут представлять интерес для проектировщиков, разработчиков и исследователей стеллажных кранов-штабелеров.

**В пятой главе** представлены результаты экспериментальных исследований. При проведении экспериментальных исследований ставились следующие задачи: 1. Определить численные значения параметров крана-штабелера традиционной конструкции, входящих в его математическую модель. 2. Определить значения перемещений, скоростей и ускорений подвижных звеньев крана-штабелера традиционной конструкции. 3. Подтвердить адекватность математической модели крана-штабелера традиционной конструкции путем сравнения результатов экспериментальных исследований с теоретическими в динамическом режиме. Исследования проводились на базе ООО «Интер-Терминал» на кране-штабелере БТ КРАН, выпущенном ООО «БТ КРАН».

В динамическом режиме эксперимент состоял из нескольких частей: 1. Определение перемещений, скоростей и ускорений тележки при ее горизонтальном перемещении. 2. Определение перемещений, скоростей и ускорений грузовой каретки с грузозахватным приспособлением и грузом при ее вертикальном перемещении.

Параметры крана-штабелера БТ КРАН традиционной конструкции представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики крана-штабелера БТ КРАН

Параметр	Значение
Грузоподъемность	до 800 кг
Скорость передвижения	до 30 м/мин
Скорость подъема	до 8 м/мин
Ширина прохода, мм	1250×1450×1650×2000

В качестве основного средства измерения была использована цифровая фотовидеокамера Canon PowerShot SX500 IS с последующей покадровой

разверткой процесса передвижения тележки при ее горизонтальном перемещении и процесса перемещения грузовой каретки с грузозахватным приспособлением и грузом при ее вертикальном перемещении.

Регистрировались перемещения точек тележки при ее горизонтальном перемещении, а также перемещения точек грузовой каретки с грузозахватным приспособлением и грузом при ее вертикальном перемещении крана-штабелера БТ КРАН (рисунок 13).



Рисунок 13 – Кран-штабелер БТ КРАН производства ООО «БТ КРАН»

Обработка экспериментальных данных осуществлялась после окончания эксперимента.

Для преобразования информации, записанной фотовидеокамерой, в декартовы координаты точек подвеса и груза в пространстве, использовался ПК с установленным на нем следующим программным обеспечением:

- 1) редактором видеофайлов Virtual Dub 1.10.4,
- 2) программой экранная виртуальная пиксельная линейка SPRuler v.3.5.0.2022.0,
- 3) программой Ghost Automizer 2.8 для записи пиксельных координат щелчков указателем мыши на экране ПК в текстовый файл.

Все указанное программное обеспечение является свободным (распространяется бесплатно).

Частота кадров при скоростной фотовидеосъемке составляла 50 кадров/с (50 Гц).

Интервал дискретизации времени  $\Delta t$  принимался при обработке видеозаписи равным 0,2 с (200 мс). Для этого производился отсчет по 10 кадров в программе Virtual Dub 1.10.4. После каждого перехода к кадру с временем, большим чем у обработанного кадра на 200 мс, в окне программы Virtual Dub 1.10.4 с помощью предварительно запущенной программы Ghost Automizer 2.8 сохранялись пиксельные координаты указателя мыши на экране ПК в текстовый файл путем щелчка левой кнопкой мыши на одной и той же характерной точке движущегося рабочего оборудования кранштабелера.

Результаты значений скоростей и ускорений тележки при ее горизонтальном перемещении после обработки экспериментальных данных полученных при проведении эксперимента представлены в таблице 2 и на рисунке 14.

Таблица 2 – Значения скоростей и ускорений тележки при ее горизонтальном перемещении

Параметр	Опыт № 1	Опыт № 2	Опыт № 3	Опыт № 4	Опыт № 5	Среднее значение
Скорость тележки, м/с	1,01	0,98	0,97	0,99	1,02	0,994
Ускорение тележки, м/с <sup>2</sup>	1,02	0,96	0,97	0,96	1,01	0,984

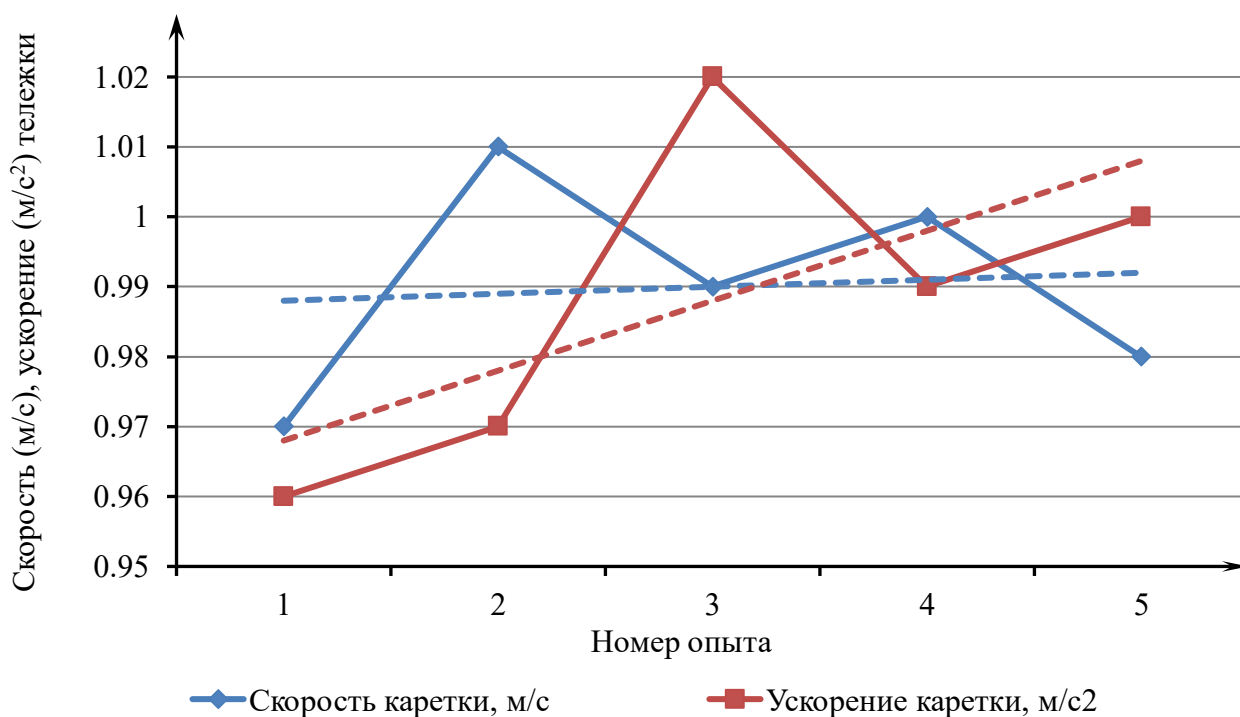


Рисунок 14 – Значения скоростей и ускорений тележки при ее горизонтальном перемещении

Результаты значений скоростей и ускорений грузовой каретки с грузозахватным приспособлением и грузом при ее вертикальном перемещении после обработки экспериментальных данных полученных при проведении эксперимента представлены в таблице 3 и на рисунке 15.

Таблица 3 – Значения скоростей и ускорений грузовой каретки с грузозахватным приспособлением и грузом при ее вертикальном перемещении

Параметр	Опыт № 1	Опыт № 2	Опыт № 3	Опыт № 4	Опыт № 5	Среднее значение
Скорость каретки, м/с	0,97	1,01	0,99	1,00	0,98	0,99
Ускорение каретки, м/с <sup>2</sup>	0,96	0,97	1,02	0,99	1,00	0,988

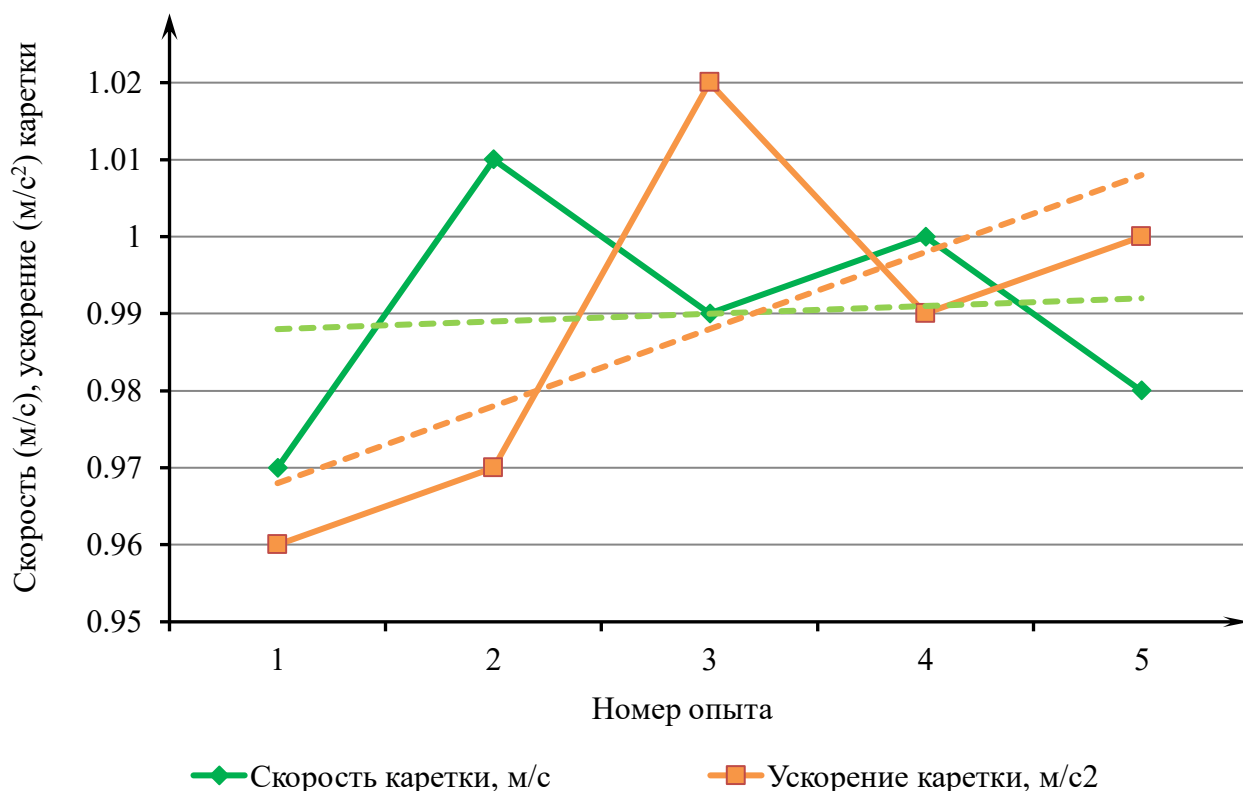


Рисунок 15 – Значения скоростей и ускорений грузовой каретки с грузозахватным приспособлением и грузом при ее вертикальном перемещении

В результате обработки экспериментальных данных полученных при проведении эксперимента на кране-штабелере БТ КРАН производства ООО «БТ КРАН» получены следующие средние значения:

- скорость тележки при ее горизонтальном перемещении 0,994 м/с;



- ускорение тележки при ее горизонтальном перемещении  $0,984 \text{ м/с}^2$ ;
- скорость грузовой каретки с грузозахватным приспособлением и грузом при ее вертикальном перемещении  $0,99 \text{ м/с}$ ;
- ускорение грузовой каретки с грузозахватным приспособлением и грузом при ее вертикальном перемещении  $0,988 \text{ м/с}^2$ .

Сравнение результатов экспериментальных исследований, проведенных на кране-штабелере БТ КРАН, с теоретическими в динамическом режиме подтверждают адекватность математической модели крана-штабелера традиционной конструкции.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Конструкция крана-штабелера связана с формой его рабочего пространства. В целях совершенствования крана-штабелера была разработана обладающая новизной конструкция на основе поворотной стрелы с противовесом, при работе которой не требуются рельсовые крановые пути. Кран предложенной конструкции способен обслуживать склады в ангарах полукруглой формы.

2. Для стеллажных кранов-штабелеров традиционной конструкции и предложенной конструкции с поворотной стрелой, разработаны математические модели в больших пространственных перемещениях с учетом диссипации энергии в приводах и элементах поступательного и вращательного перемещения. Модели имеют вид систем из двух дифференциальных уравнений Лагранжа второго порядка. Для вывода дифференциальных уравнений моделей использованы частные производные аналитических выражений кинетической и потенциальной энергий динамической системы, а также диссипативной функции Релея.

3. По выведенным дифференциальным уравнениям, с использованием Российского программного продукта SimInTech, в виде блочных диаграмм разработаны имитационные математические модели кранов-штабелеров традиционной конструкции и предложенной конструкции с поворотной стрелой. Разработанные модели предназначены для моделирования динамических процессов перемещения подвижных элементов кранов на заданные расстояния, и определения соответствующих затрат энергии перемещений.

4. Проведен сравнительный анализ средних суммарных затрат энергии для простого одиночного цикла перемещения кранами традиционной и разработанной конструкций для складов одинаковой вместимости, который позволяет сделать вывод о существенном преимуществе разработанной конструкции крана-штабелера перед традиционной. Анализ полученных в

результате вычислительного эксперимента данных показал, что для крана разработанной конструкции происходит снижение средних полных затрат энергии на один цикл перемещения более чем в 2 раза, с 64511 до 29734 Дж.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**

### **В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:**

1. Корятов, М. С. Сравнительный анализ затрат энергии при работе кранов-штабелеров / М. С. Корятов, А. Е. Безродина // Подъемно-транспортное дело. – 2021. – № 4-6(104). – С. 5-10.

2. Корятов, М. С. Стеллажный кран-штабелер с поворотной стрелой / М. С. Корятов, А. Е. Безродина // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19, № 4(86). – С. 474-483. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-4-474-483.

3. Корятов, М. С. Разработка математической модели стеллажного крана- штабелера с учетом диссипации энергии / М. С. Корятов, А. Е. Безродина // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2023. – № 2. – С. 134-144.

### **Патенты и свидетельства:**

4. Патент на полезную модель № 215478 U1 Российская Федерация, МПК В66С 23/00, В65G 1/04. Стреловой стеллажный кран-штабелер с тросовым механизмом и упругим элементом : № 2022128552 : заявл. 03.11.2022 : опубл. 14.12.2022 / М. С. Корятов, А. Е. Безродина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет».

5. Патент на полезную модель № 211093 U1 Российская Федерация, МПК В66С 23/00, В65G 1/04. Стреловой стеллажный кран-штабелер с упругим элементом : № 2022102854 : заявл. 07.02.2022 : опубл. 20.05.2022 / М. С. Корятов, А. Е. Безродина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет».

6. Патент на полезную модель № 209045 U1 Российская Федерация, МПК В66С 23/00, В65G 1/04. Стреловой стеллажный кран-штабелер : № 2021110085 : заявл. 13.04.2021 : опубл. 31.01.2022 / М. С. Корятов, А. Е. Безродина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет».

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660887 Российская Федерация. Математическая модель стеллажного крана-штабелера с учетом диссипации энергии : № 2023660231 : заявл. 11.05.2023 : опубл. 25.05.2023 / М. С. Корытов, А. Е. Безродина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет».

**Статьи в сборниках материалов конференций и других изданиях:**

8. Безродина, А. Е. Краны-штабелеры: классификация, назначение, тенденции развития / А. Е. Безродина, М. С. Корытов // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство : Сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции, Омск, 22–23 апреля 2021 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. – С. 78-82.

9. Безродина, А. Е. Способы и устройства повышения точности позиционирования и ограничения колебаний груза, перемещаемого грузоподъемным краном / А. Е. Безродина, М. С. Корытов // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ», Омск, 03–04 декабря 2020 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. – С. 66-69.

10. Корытов, М. С. Кран-штабелер с поворотной стрелой и упругим элементом / М. С. Корытов, А. Е. Безродина // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Омск, 24–25 ноября 2022 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. – С. 92-95.

11. Безродина, А. Е. Особенности применения складских кранов-штабелеров и направления их совершенствования / А. Е. Безродина, М. С. Корытов // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство : Сборник материалов V Национальной научно-практической конференции, Омск, 28 апреля – 29 2022 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. – С. 40-43.

