

УДК (UDC) 62-752.2

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТЕЛЛАЖНОГО КРАНА-ШТАБЕЛЕРА С УЧЕТОМ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A STACKER CRANE WITH REGARD TO ENERGY DISSIPATION

Корытов М.С., Безродина А.Е.
Korytov M.S., Bezrodina A.E.Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (Омск, Россия)
Siberian State Automobile and Highway University (Omsk, Russia)

Аннотация. Стеллажные краны-штабелеры широко используются в автоматизированных складах. Актуальной задачей является повышение их энергоэффективности и производительности. На этапе научно-исследовательских работ для решения этой задачи используются имитационные математические модели. Разработана математическая модель стеллажного крана-штабелера в больших пространственных перемещениях с учетом диссипации энергии линейных координат перемещению тележки и грузовой каретки. Модель имеет вид системы из двух дифференциальных уравнений Лагранжа второго порядка. Для вывода дифференциальных уравнений использованы частные производные аналитических выражений кинетической и потенциальной энергий динамической системы крана-штабелера, а также диссипативной функции Релея. Могут быть использованы различные значения коэффициентов диссипации по двум линейным координатам крана-штабелера. На основе предложенной системы дифференциальных уравнений с использованием SimInTech разработана имитационная математическая модель стеллажного крана-штабелера традиционной конструкции, представленная в виде блочной диаграммы. Дается описание разработанной имитационной модели, приводится пример ее использования. Комплексная модель стеллажного крана-штабелера включает в себя в качестве составного элемента методику определения временных интервалов равноускоренного движения звеньев. Приводятся примеры полученных при помощи разработанной модели временных зависимостей координат тележки и грузовой каретки крана, сил приводов, обеспечивающих заданных зависимости координат, работ приводов и суммарной работы. Разработанная математическая модель крана-штабелера может быть использована как для моделирования процессов перемещения груза вдоль стеллажа, поднятия его на заданную высоту, соответствующую целевой ячейке стеллажа, опускания, а также для оценки затрат энергии краном-штабелером при заданном перемещении грузов.

Ключевые слова: кран-штабелер, стеллажный, математическая модель, энергия, диссипация.

Abstract. Stacker cranes are widely used in automated warehouses. The actual task is to increase their energy efficiency and productivity. Simulation mathematical models are used for the solution of this problem at the stage of research and development works. We have developed a mathematical model of a rack stacker crane in long spatial displacements taking into account energy dissipation of linear coordinates of the cart and the cargo carriage. The model is a system of two second-order Lagrange differential equations. Partial derivatives of analytical expressions of kinetic and potential energies of the dynamic stacker crane system as well as dissipative Rayleigh function are used for derivation of the differential equations. Different values of dissipation coefficients for two linear coordinates of the stacker crane can be used. Using SimInTech we develop a simulation model of a conventional stacker crane based on the suggested system of differential equations and represented in the form of a block diagram. The developed simulation model is described and an example of its use is given. A complex model of a shelf stacker crane includes as a constituent part a procedure of determining time intervals of equivalent-accelerated motion of the links. Examples of time dependences of the crane bogie and cargo carriage coordinates, drive forces providing the set coordinate dependences, drives work and total work are given. The developed mathematical model of the stacker-crane can be used for the modelling of the processes of the cargo moving along the rack, its raising to the given height corresponding to the rack target cell, its lowering as well as for the estimation of the energy input of the crane.

Keywords: stacker crane, racking, mathematical model, energy, dissipation.

Дата принятия к публикации: 22.05.2000 †
 Дата публикации: 25.06.2023 †

Date of acceptance for publication: 22.05.2000 †
 Date of publication: 25.06.2023 †

Сведения об авторах:

Корытов Михаил Сергеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобильный транспорт», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»,
 e-mail: kms142@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-5104-7568

Безродина Анжела Евгеньевна – аспирант кафедры «Автомобильный транспорт», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»,
 e-mail: likasedova@list.ru.

ORCID: 0000-0001-6362-8557

Authors' information:

Mikhail S. Korytov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Automobile transport at Siberian State-Impact Automobile and Road University (SibADI),
 e-mail: kms142@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-5104-7568

Angela E. Bezrodina – postgraduate student, Department of Automobile Transport at Siberian State-Impact Automobile and Road University (SibADI),
 e-mail: likasedova@list.ru.

ORCID: 0000-0001-6362-8557

1. Введение

Такой вид наземных транспортно-технологических средств, как стеллажные краны-штабелеры (рис. 1), относится к подъемно-транспортным машинам [1]. В последнее время стеллажные краны-штабелеры получили наиболее широкое распространение в автоматизированных складских системах, в том числе многоярусных и многоуровневых [2, 3]. Применение подобных машин, особенно при их автоматизации, позволяет качественно повысить эффективность складских работ [4]. Одним из ключевых направлений совершенствования стеллажных кранов-штабелеров является повышение их энергоэффективности [5, 6].

Этап проведения научно-исследовательских работ по исследованию динамических систем наземных транспортно-технологических машин предполагает разработку и использование их математических моделей [7]. Целесообразно, чтобы разрабатываемая математическая модель была достаточно универсальной, позволяла исследовать перемещения стеллажного крана-штабелера с грузом и определять возникающие при этом затраты энергии.

Это актуально при исследовании рабочих процессов быстроходных высокопроизводительных стеллажных кранов-штабелеров.

Развитие и совершенствование последних подразумевает не только снижение энергозатрат, но и повышение производительности выполняемых работ [8].

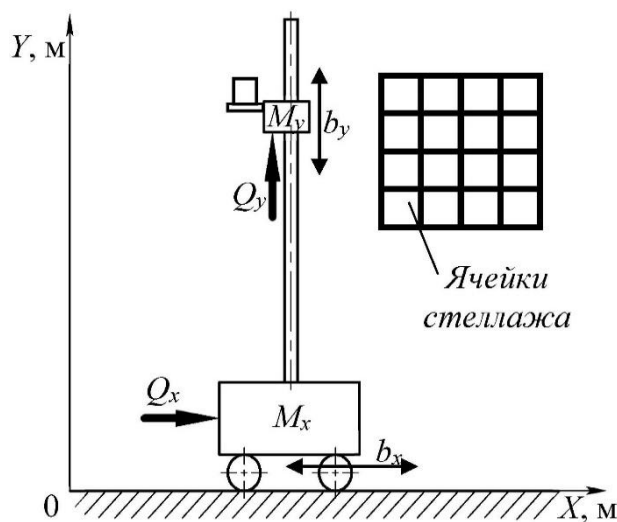


Рис. 1. Расчетная схема стеллажного крана-штабелера традиционной конструкции

2. Постановка задачи

Необходимо разработать систему дифференциальных уравнений, описывающих движение механической системы стеллажного крана-штабелера, приведенной на рис. 1. Целесообразно учесть при этом диссипацию энергии при движении подвижных звеньев стеллажного крана-штабелера.

Далее необходимо разработать имитационную математическую модель, реализующую решение полученной системы дифференциальных уравнений и позволяющую определять затраты энергии при перемещениях звеньев стеллажного крана-штабелера.

Приняты следующие обозначения: M_x – масса тележки; M_y – масса грузовой каретки с грузозахватным приспособлением и гру-

зом; F_x – сила, действующая на тележку со стороны привода тележки (вдоль оси OX); F_y – сила, действующая на грузовую каретку со стороны привода каретки (вдоль оси OY); 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 .

3. Вывод системы дифференциальных уравнений

С учетом сил диссипации, уравнения Лагранжа системы стеллажного крана-штабелера можно представить в виде [9, 10]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial (T - U)}{\partial q_j} = Q_j, j=1, 2, \quad (1)$$

где $T(\dot{q}_1, \dot{q}_2)$ – кинетическая энергия системы; $U(q_1, q_2)$ – потенциальная энергия системы; $F(\dot{q}_1, \dot{q}_2)$ – диссипативная функция Релея; $Q_j(t)$ – обобщенные силы; t – время.

Механическая система стеллажного крана-штабелера (рис. 1) имеет две степени свободы: перемещение тележки вдоль оси OX и перемещение каретки вдоль оси OY .

Выражение для кинетической энергии системы стеллажного крана-штабелера имеет вид [11]

$$T = \frac{((M_x + M_y) \dot{x}^2 + M_y \dot{y}^2)}{2}. \quad (2)$$

Потенциальная энергия определялась выражением [11]

$$U = M_y \cdot g \cdot y. \quad (3)$$

В функции Релея учитывалась диссипация энергии при изменении двух линейных координат системы, возникающая в приводах тележки и грузовой каретки. Потери энергии учитывались при помощи модели вязкого трения. Использовалась следующая форма записи функция Релея:

$$F = \frac{b_x \cdot \dot{x}^2}{2} + \frac{b_y \cdot \dot{y}^2}{2} \quad (4)$$

Дифференцирование выражений (2) - (4) выполнялось согласно (1).

При дифференцировании производной кинетической энергии по времени, учитывалось, что обобщенные координаты x и y изменяются во времени.

В результате была получена система из двух линейных дифференциальных уравнений второго порядка, имеющая вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} \cdot (M_x + M_y) + b_x \cdot \dot{x} = Q_x; \\ \ddot{y} \cdot M_y + b_y \cdot \dot{y} + g \cdot M_y = Q_y. \end{cases} \quad (5)$$

В форме Коши система (5) имеет вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{Q_x - b_x \cdot \dot{x}}{M_x + M_y}; \\ \ddot{y} = \frac{Q_y - b_y \cdot \dot{y} - g \cdot M_y}{M_y}. \end{cases} \quad (6)$$

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

Система дифференциальных уравнений (6) может быть численно проинтегрирована известными методами.

4. Реализация модели в программном продукте SimInTech

Разработанная имитационная математическая модель стеллажного крана-штабелера (6) была реализована в среде динамического моделирования SimInTech (рис. 2) [12].

Среда SimInTech – Российский программный продукт. Она в известной мере выступает аналогом зарубежных математических сред имитационного моделирования, таких, как Simulink/Matlab, и позволяет создавать имитационные динамические модели различных технических систем [12].

В разработанной имитационной математической модели использованы следующие виды блоков SimInTech:

Интегратор (из библиотеки «Динамические», обозначение внутри данных блоков на схеме k/s, блок выполняет численное интегрирование входного сигнала);

Сумматор (поэлементно суммирует несколько входных сигналов);

Перемножитель (поэлементно перемножает несколько входных сигналов);

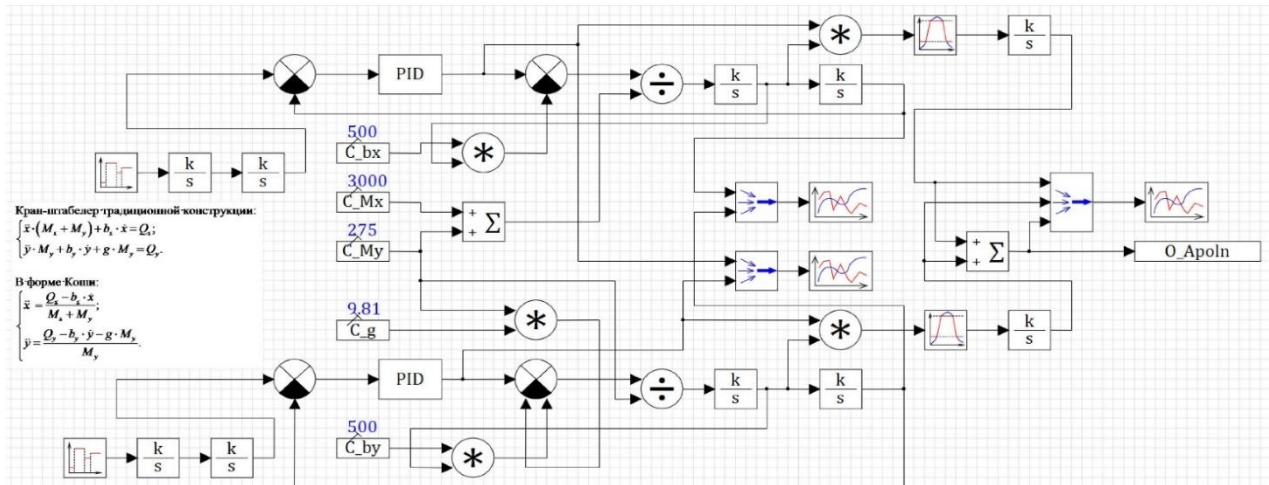


Рис. 2. Имитационная математическая модель стеллажного крана-штабелера в обозначениях SimInTech

Редактор базы данных сигналов: O:\work\SimInTech\dimmodkrshtrrad.db

№	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)

Редактор базы данных сигналов: O:\work\SimInTech\dimmodkrshtrrad.db

№	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)

Редактор базы данных сигналов: O:\work\SimInTech\dimmodkrshtrrad.db

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

в)

Рис. 3. Сигналы базы данных имитационной модели крана-штабелера традиционной конструкции

Сравнивающее устройство (реализует поэлементное вычитание второго или второго и третьего входных сигналов из первого);
Делитель (поэлементно делит первый сигнал на второй);

Мультиплексор (объединяет несколько входных сигналов в один векторный сигнал);
Временной график;
Кусочно-постоянная (формирует на выходе заданный кусочно-постоянный, много-

ступенчатый выходной сигнал, являющийся суперпозицией ступенчатых воздействий); *Константа* (выдает заданную постоянную величину);

Пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор (из библиотеки «Регуляторы», используется для формирования управляющего сигнала);

Запись в список сигналов (выполняет запись сигнала из модели в список сигналов базы данных).

В базе данных представленной модели присутствовали следующие сигналы параметров модели (рис. 3). В единой общей категории *Данные* были созданы три группы сигналов, разделенные по функциональному назначению: группа *C* (конструктивные параметры крана-штабелера, константы) (рис. 3, а), группа *P* (параметры для задания требуемых перемещений звеньев крана-штабелера) (рис. 3, б), группа *O* (включает выходной параметр полной затраченной работы на перемещение крана-штабелера) (рис. 3, в).

Для задания требуемых перемещений двух подвижных звеньев стеллажного крана-штабелера: тележки и каретки, использовалась методика определения временных интервалов при равноускоренном движении, приведенная ниже. Было принято в качестве допущения, что приводы тележки и каретки стеллажного крана-штабелера обеспечивают постоянные значения ускорений при разгоне и торможении.

5. Методика определения временных интервалов при равноускоренном движении

В методике описано однократное элементарное перемещение на заданное расстояние, при котором разгон и торможение отдельного подвижного звена выполняются с постоянным ускорением. Ограничение наложено также на максимальную скорость перемещения в установившемся режиме движения. Любая траектория перемещения тележки и каретки стеллажного крана-штабелера может быть задана как последовательность описанных элементарных перемещений.

Исходные данные: a – постоянное ускорение разгона и торможения; v_{\max} – максималь-

ная скорость перемещения объекта; l_s – длина полного заданного перемещения объекта.

Для любого полного заданного расстояния необходимо найти временные интервалы, а также расстояния, пройденные объектом на этапах разгона, движения с максимальной скоростью и торможения.

Описание методики. Обозначим символами t_1 , t_2 , t_3 временные интервалы разгона, движения с максимальной скоростью и торможения соответственно. А символами l_1 , l_2 , l_3 – перемещения на соответствующих участках.

1. Учитывая соотношения между временем, перемещением, скоростью и ускорением при равноускоренном движении

$$t = \frac{v}{a}; l = v_0 + \frac{a \cdot t^2}{2}, \quad (7)$$

Была получена формула длины участка разгона с постоянным ускорением с нулевой скорости до v_{\max} :

$$l_{v_{\max}} = \frac{v_{\max}^2}{2 \cdot a}. \quad (8)$$

2. Если условие $2 \cdot l_{v_{\max}} > l_s$ выполняется (т.е. разгон до максимальной скорости при заданной длине перемещения невозможен), то выполняются пункты с текущего по 7, иначе осуществляется переход к пункту 8 методики.

Определяется фактическая длина участка разгона:

$$l_1 = \frac{l_s}{2}. \quad (9)$$

3. Определяется фактическая величина достигаемой максимальной скорости:

$$v_{\max 1} = \sqrt{2 \cdot l_1 \cdot a}. \quad (10)$$

4. Определяется время разгона:

$$t_1 = \frac{v_{\max 1}}{a}. \quad (11)$$

5. Определяются время движения с максимальной скоростью и время торможения:

$$t_2 = 0; t_3 = t_1. \quad (12)$$

6. Определяются длина участка движения с постоянной максимальной скоростью и длина участка торможения:

$$l_2 = 0; l_3 = l_1. \quad (13)$$

7. Определяется полное время перемещения:

$$t_s = 2 \cdot t_1. \quad (14)$$

При выполнении условия из п. 2, определение параметров на этом заканчивается, т.е. выполнение методики для текущих значений исходных данных завершается.

8. Если условие $2 \cdot l_{v_{\max}} > l_s$ не выполняется (т.е. разгон до максимальной скорости при заданной длине перемещения возможен), то выполняются текущий и все последующие пункты методики.

Определяется время разгона:

$$t_1 = \frac{v_{\max}}{a}. \quad (15)$$

9. Определяется длина участка разгона:

$$l_1 = l_{v_{\max}}. \quad (16)$$

10. Определяются длина время и длина участка торможения:

$$t_3 = t_1; l_3 = l_1. \quad (17)$$

11. Определяется длина участка движения с постоянной максимальной скоростью:

$$l_2 = l_s - 2 \cdot l_1. \quad (18)$$

12. Определяется время движения с постоянной максимальной скоростью:

$$t_2 = \frac{l_2}{v_{\max}}. \quad (19)$$

13. Определяется полное время перемещения:

$$t_s = 2 \cdot t_1 + t_2. \quad (20)$$

Методика может быть использована для определения временных интервалов при равноускоренном движении любого вида, на любое заданное расстояние, в том числе сколь угодно малое, когда скорость перемещения не достигает максимального значения, т.е. при неполном разгоне и отсутствии участка движения с постоянной максимальной скоростью.

Для использования описанной методики в имитационной модели стеллажного крана-штабелера в двух блоках *Кусочно-постоянная* согласно формулам (11), (12), или (15), (17), (19) задаются векторы временных интервалов, и значений выходного сигнала ускорения. На выходе указанных блоков формируются переменные значения сигналов ускорений тележки или каретки. Для тележки сигнал принимает одно из трех значений $[-a_x; 0; a_x]$, а для каретки – одно из

трех значений $[-a_y; 0; a_y]$, причем a_x и a_y – постоянные значения ускорений тележки и каретки соответственно. Применение данной методики определения временных интервалов при равноускоренном движении позволяет смоделировать перемещения тележки и каретки стеллажного крана-штабелера на заданные расстояния при постоянных ускорениях, не превышая при этом максимальных скоростей тележки и каретки $v_{x_{\max}}$ и $v_{y_{\max}}$.

Двойное интегрирование ускорений на выходе каждого из двух блоков *Кусочно-постоянная*, позволяет получить временные зависимости требуемых перемещений тележки и каретки $x_{ireb}(t)$ и $y_{ireb}(t)$. Далее разности требуемых и фактических значений координат тележки и каретки

$$dx = x_{ireb}(t) - x(t), \quad dy = y_{ireb}(t) - y(t),$$

подаются на входы двух блоков *Пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор*. На выходе блоков *Пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор* формируются значения сил Q_x и Q_y , действующих на тележку и каретку со стороны их приводов, и обеспечивающих минимальное расхождение их фактических и требуемых координат.

Для определения затрат энергии приводов в виде работ A_x и A_y , производилось определение, а затем интегрирование, при помощи двух блоков *Интегратор*, расположенных в правой части модели, мощностей приводов N_x и N_y :

$$A_x(t) = \int N_x(t) dt; A_y(t) = \int N_y(t) dt. \quad (21)$$

Сумма двух значений полных интегралов мощностей на всем временном промежутке моделирования, составляла полную затраченную приводами работу A_Σ :

$$A_\Sigma = \int_{t=0}^{T_{kon}} N_x(t) dt + \int_{t=0}^{T_{kon}} N_y(t) dt. \quad (22)$$

Текущие значения мощностей определялись как произведения соответствующих сил привода на скорости перемещения соответствующих звеньев стеллажного крана-штабелера:

$$N_x(t) = Q_x(t) \cdot \dot{x}(t); N_y(t) = Q_y(t) \cdot \dot{y}(t). \quad (23)$$

Минимальные текущие значения мощностей ограничивались нулевыми значениями, что в соответствии с принятыми допуще-

ниями, означало отсутствие затрат энергии при любом торможении звеньев (когда направления силы со стороны привода и скорости противоположны друг другу). Для этого в модели использовались два блока *Ограничитель*.

Основу модели составляют 4 блока *Интегратор*, находящиеся в центре модели, и

дважды выполняющие численное интегрирование каждой из старших производных, т.е. ускорений координат x и y тележки и каретки. Ускорения \ddot{x} и \ddot{y} , в свою очередь, формируются в модели по формулам (6) с использованием обратных связей из некоторых блоков.

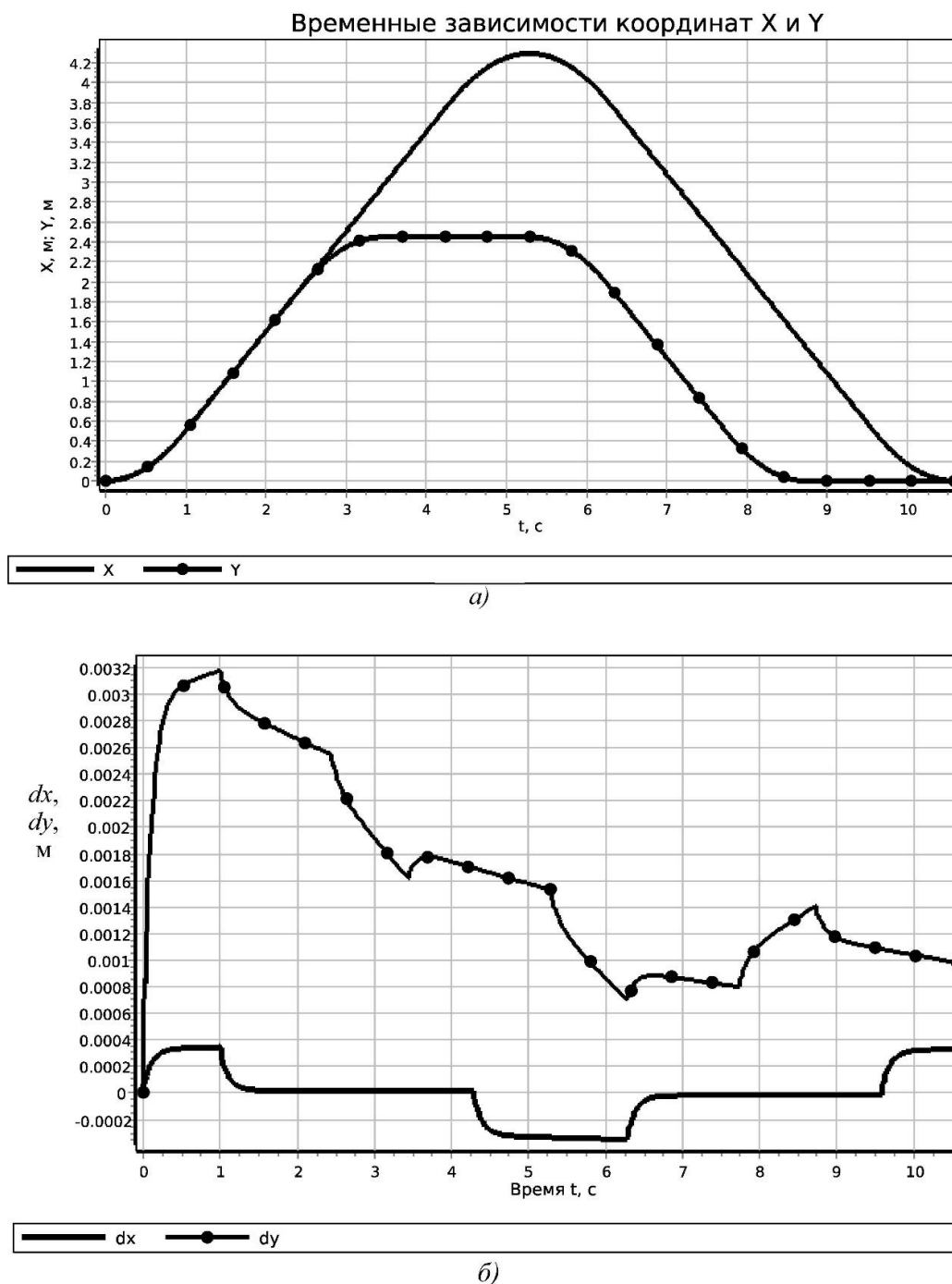


Рис. 4. Временные зависимости: а - координат тележки и каретки; б - разностей требуемых и фактических значений координат крана

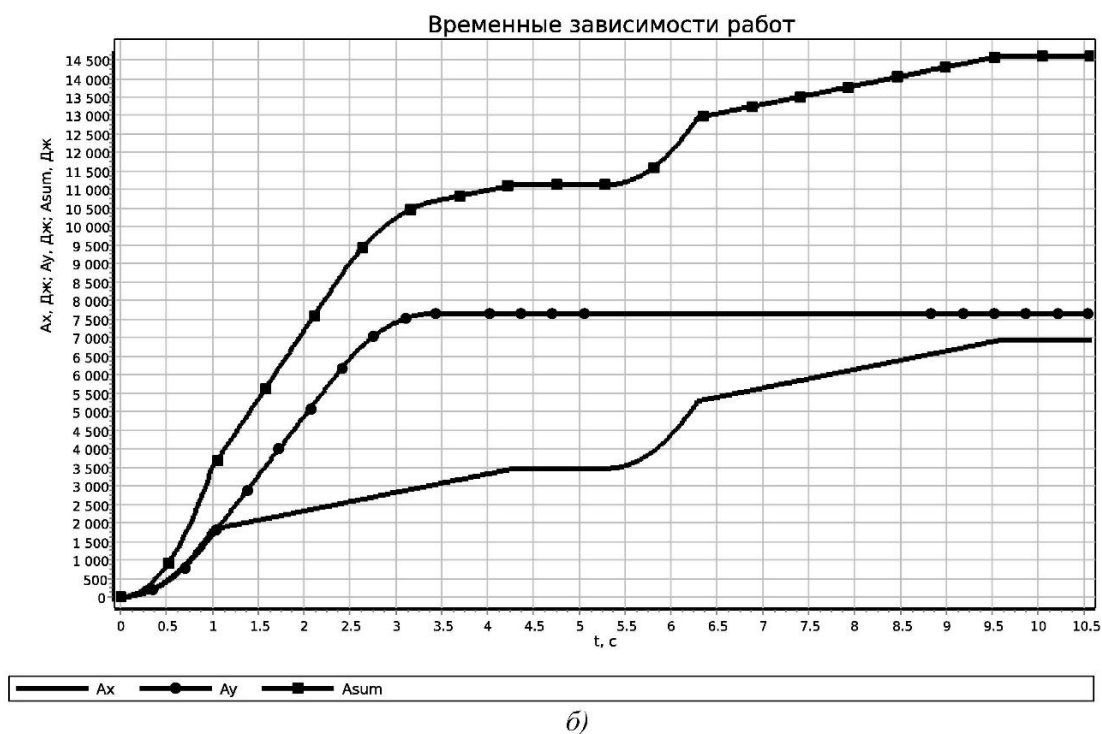
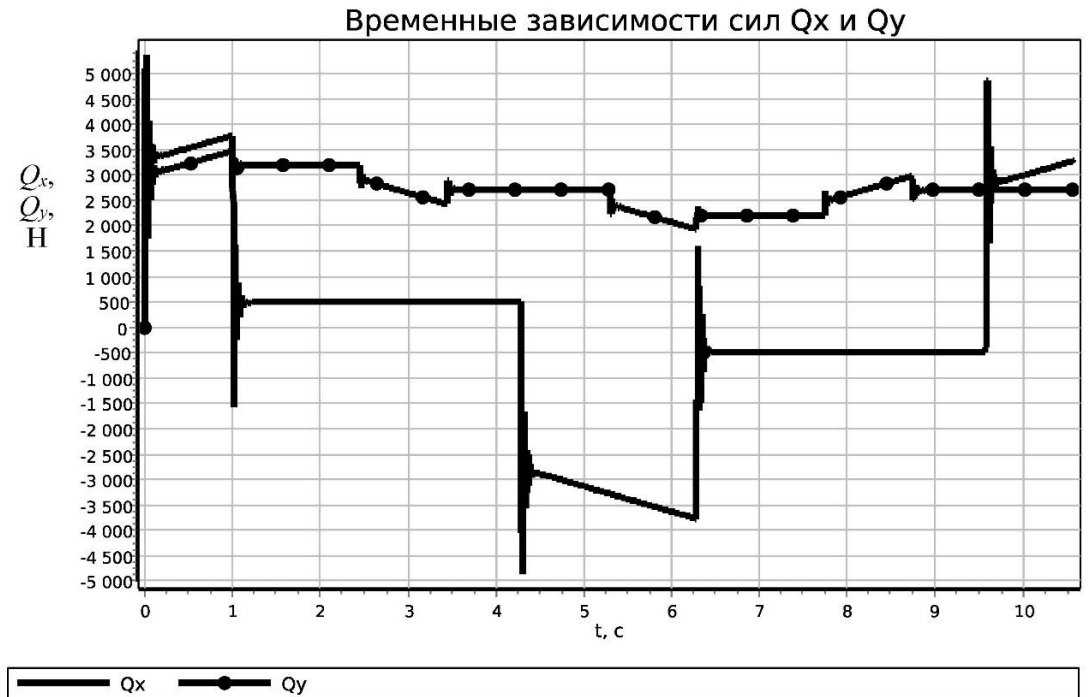


Рис. 5. Временные зависимости: а - сил приводов; б - работ приводов крана

6. Результаты экспериментов

На рис. 4 и 5 в качестве примера использования разработанной модели приведены временные зависимости параметров, полученных при заданных перемещениях на 4.28 м по горизонтальной координате x и на 2.46

м по вертикальной координате y . Перемещение в целевую точку с указанными координатами, полная остановка и последующий возврат выполняются из начальной точки с нулевыми координатами.

На рис. 4 приведены временные зависимости требуемых и фактических координат

стеллажного крана-штабелера x и y (рис. 4, а, требуемые и фактические координаты при выбранном масштабе визуально совпадают). На рис. 4, б приведены соответствующие временные зависимости разностей требуемых и фактических значений координат, обеспечиваемые двумя блоками *Пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор*. На рис. 5, а приведены временные зависимости сил Q_x и Q_y , создаваемых приводами тележки и каретки соответственно, обеспечивающие перемещения звеньев, близкие к требуемым. На рис. 5, б, приведены временные зависимости работ A_x и A_y каждого из приводов тележки и каретки соответственно, а также суммарной работы A_{Σ} двух приводов на рассматриваемом перемещении.

Горизонтальные участки на графиках работ A_x и A_y соответствуют перемещениям в режиме торможения (в том числе управляемого торможения при опускании каретки), при которых, согласно принятым допущениям, расход энергии не учитывается.

Значение суммарной работы A_{Σ} в конечный момент времени процесса будет соответствовать полным затратам энергии при перемещении. В рассматриваемом процессе это 14550 Дж.

7. Заключение

Разработана математическая модель стеллажного крана-штабелера в больших пространственных перемещениях с учетом диссипации энергии в приводах и элементах поступательного перемещения тележки и каретки стеллажного крана-штабелера. Модель имеет вид системы из двух дифференциальных уравнений Лагранжа второго порядка. Для вывода дифференциальных уравнений использованы частные производные аналитических выражений кинетической и потенциальной энергий динамической системы стеллажного крана-штабелера, а также диссипативной функции Релея.

По выведенным дифференциальным уравнениям, с использованием Российского программного продукта SimInTech, являющегося в настоящий момент доступным бес-

платным аналогом распространенных зарубежных программных продуктов, таких, как Simulink/Matlab, в виде блочной диаграммы была разработана имитационная математическая модель стеллажного крана-штабелера.

Разработанная модель может быть использована для моделирования динамических процессов перемещения тележки и каретки стеллажного крана-штабелера на заданные расстояния, и определения соответствующих затрат энергии перемещений. То есть, для моделирования элементов рабочего цикла стеллажного крана-штабелера. Особенности разработанной модели являются: возможность учета затрат энергии в приводах; учет диссипации энергии при поступательном движении звеньев тележки и каретки по модели вязкого трения; использование пропорционально-интегрально-дифференцирующих регуляторов для определения управляющих силовых воздействий, обеспечивающих отработку приводами требуемых перемещений, заданных в виде временных зависимостей.

В качестве составной части комплексной математической модели стеллажного крана-штабелера, используется разработанная методика определения временных интервалов при равноускоренном движении, представленная в виде аналитических выражений скоростей и перемещений. Методика позволяет рассчитать временные интервалы разгонов, торможений и движения с постоянной скоростью, обеспечивающие перемещения звеньев стеллажного крана-штабелера на заданные расстояния.

При принятии допущения о том, что на погрузку и выгрузку груза номинальной массы в целевую ячейку склада расходуется постоянное количество энергии, разработанная комплексная модель позволяет определять переменные слагаемые энергетических затрат в рабочем цикле, и выполнять сравнительный анализ различных режимов работы стеллажного крана-штабелера по критериям энергетических и временных затрат.

Также разработанную модель в перспективе можно использовать для проверки работоспособности разрабатываемых аналитических и численных алгоритмов управления.

Список литературы

1. Кorytov M.C., Bezrodina A.E. Стеллажный кран-штабелер с поворотной стрелой // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19. № 4(86). С. 474-483. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-3-474-483
2. Geyer E., Arndt T., Mehling U. Construction of a new logistics center in Flieden // Beton- und Stahlbetonbau. 2021. Vol. 116. P. 88-90. DOI: 10.1002/best.202100003
3. Huang Q., Ye Y., Zhu Z., Lu T. Route-optimization based storage allocation algorithm in intelligent high-bay warehouses // 4th International conference on intelligent autonomous systems (ICOIAS 2021). 2021. P. 240-245. DOI: 10.1109/ICoIAS53694.2021.00050
4. Zaerpour N., Gharehgozli A., De Koster R. Vertical expansion: a solution for future container terminals // Transportation Science. 2019. Vol. 53. № 5. P. 1235-1251. DOI: 10.1287/trsc.2018.0884
5. Rucker A., Rief J., Fottner J. An investigation of mean energy demand, performance and reference cycles for stacker cranes // FME Transactions. 2020. Vol. 48. № 2. P. 307-312. DOI: 10.5937/fme2002307R
6. Rucker A., Rief J., Fottner J. Development of a method for the energy efficiency determination of stacker cranes in automated high-bay warehouses // FME Transactions. 2020. Vol. 48. № 4. P. 753-760. DOI: 10.5937/fme2004753R
7. Лагереv A.B., Лагереv И.А. Общий подход к созданию цифровых двойников мобильных канатных дорог на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 1. С. 38-60. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-38-60
8. Sun B., Zhang X., Qiao H., Li G., Chen Y. Multi-type resources collaborative scheduling in automated warehouse with fuzzy processing time // Journal of intelligent & fuzzy systems. 2020. Vol. 39. № 1. P. 899-910. DOI: 10.3233/JIFS-191827
9. Беленький И.М. Введение в аналитическую механику. М.: Высшая школа, 1964. 324 с.
10. Зотев В.Е. Параметрическая иден-

References

1. Korytov M.S., Bezrodina A.E. Stellazhnyh kran-shtabeler s povorotnoy streloy [Stacker crane with slewing boom]. *Vestnik SibADI*, 2022, Vol. 19, No. 4(86), pp. 474-483. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-3-474-483 (In Russian)
2. Geyer E., Arndt T., Mehling U. Construction of a new logistics center in Flieden. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2021, Vol. 116, pp. 88-90. DOI: 10.1002/best.202100003
3. Huang Q., Ye Y., Zhu Z., Lu T. Route-optimization based storage allocation algorithm in intelligent high-bay warehouses. In: *4th International conference on intelligent autonomous systems (ICOIAS 2021)*, 2021, pp. 240-245. DOI: 10.1109/ICoIAS53694.2021.00050
4. Zaerpour N., Gharehgozli A., De Koster R. Vertical expansion: a solution for future container terminals. *Transportation Science*, 2019, Vol. 53, No. 5, pp. 1235-1251. DOI: 10.1287/trsc.2018.0884
5. Rucker A., Rief J., Fottner J. An investigation of mean energy demand, performance and reference cycles for stacker cranes. *FME Transactions*, 2020, Vol. 48, No. 2, pp. 307-312. DOI: 10.5937/fme2002307R
6. Rucker A., Rief J., Fottner J. Development of a method for the energy efficiency determination of stacker cranes in automated high-bay warehouses. *FME Transactions*, 2020, Vol. 48, No. 4, pp. 753-760. DOI: 10.5937/fme2004753R
7. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Obshchiy podkhod k sozdaniyu tsifrovyykh dvoynikov mobilnykh kanatnykh dorog na osnove mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov [A general approach to the creation of digital twins of mobile ropeways on the basis of mobile ropeway transport and transfer complexes]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No. 1, pp. 38-60. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-38-60 (In Russian)
8. Sun B., Zhang X., Qiao H., Li G., Chen Y. Multi-type resources collaborative scheduling in automated warehouse with fuzzy processing time. *Journal of intelligent & fuzzy systems*, 2020, Vol. 39, No. 1, pp. 899-910. DOI:

тификация диссипативных механических систем на основе разностных уравнений / Под ред. В.П. Радченко. М: Машиностроение, 2009. 344 с.

11. Omar F., Karray F., Basir O., Yu L. Autonomous overhead crane system using a fuzzy logic controller // *Journal of vibration and control*. 2004. Vol. 10, № 9. P. 22-28.

12. Božek P., Nikitin Y. The Development of an Optimally-Tuned PID Control for the Actuator of a Transport Robot // *Actuators*. 2021. Vol. 10 № 8. P. 195. DOI: 10.3390/act10080195

† 10.3233/JIFS-191827

† 9. Belenkiy I.M. *Vvedenie v analiticheskuyu mekhaniku* [Introduction to Analytical Mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola, 1964. 324 p. (In Russian)

† 10. Zoteev V.E. *Parametricheskaya identifikatsiya dissipativnykh mekhanicheskikh sistem na osnove raznostnykh uravneniy* [Parametric identification of dissipative mechanical systems based on difference equations]. Radchenko (Ed.). Moscow, Mashinostroenie, 2009. 344 p. (In Russian)

† 11. Omar F., Karray F., Basir O., Yu L. Autonomous overhead crane system using a fuzzy logic controller. *Journal of vibration and control*, 2004, Vol. 10, No. 9, pp. 22-28.

† 12. Božek P., Nikitin Y. The Development of an Optimally-Tuned PID Control for the Actuator of a Transport Robot. *Actuators*, 2021, Vol.10, No.8, pp. 195.

† DOI: 10.3390/act10080195