

УДК (UDC) 62-752.2

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ
КРАНОВ-ШТАБЕЛЕРОВ

COMPARATIVE ASSESSMENT OF ENERGY COSTS OF STACKER CRANE MOVEMENTS

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. В рамках выдвинутой гипотезы о том, что энергетические затраты на рабочие движения звеньев стеллажных кранов-штабелеров неразрывно связаны с формой рабочей области склада, в котором работает кран, для снижения энергозатрат, в конструкции крана-штабелера было предложено использовать поворотную стрелу. С помощью программных реализаций математических моделей кранов-штабелеров традиционной велосипедной конструкции и предложенной конструкции с поворотной стрелой, открылась возможность определения средних затрат энергии на все возможные перемещения грузов одинаковой массы в пределах соответствующих рабочих областей этих конструкций. Для этого были разработаны системы дифференциальных уравнений в форме Коши, где учитывалась диссипация энергии. Определялось суммарное значение работ приводов крана при разгоне и торможении. Последние осуществлялись с постоянными ускорениями, а движение после разгона – с постоянными скоростями. Разработанные имитационные математические модели кранов традиционной конструкции и предложенной конструкции с поворотной стрелой позволяют определять затраты энергии в приводах при перемещении звеньев кранов по заданным траекториям. По критерию средних полных затрат энергии, принятому для всех возможных сочетаний перемещений в пределах областей одинаковой вместимости в сто квадратных метров, кран-штабелер предлагаемой конструкции имеет преимущество перед краном традиционной конструкции. Это позволяет существенно сократить затраты энергии при использовании таких кранов в складах и ангарах. Целесообразно рекомендовать использование крана-штабелера разработанной конструкции на складах круглой формы - это позволит значительно сократить расходы энергии при передвижении грузов во всех возможных сочетаниях координат целевых ячеек.

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

Abstract. Within the framework of the put forward hypothesis that energy costs of working movements of the links of racking stacker cranes are inextricably linked to the shape of the working area of the warehouse in which the crane operates, to reduce energy costs, it was proposed to use a rotating boom in the design of the stacker crane. With the help of program implementations of mathematical models of stacker cranes of traditional bicycle design and the proposed design with a rotating boom, it became possible to determine the average energy costs for all possible movements of loads of the same mass within the corresponding working areas of these designs. For this purpose, systems of differential equations in Cauchy form were developed, where dissipation of energy was taken into account. The total value of work of crane drives during acceleration and braking was determined. The latter were carried out with constant accelerations, and the movement after acceleration - with constant speeds. The developed simulation mathematical models of cranes of traditional design and the proposed design with a rotating boom allow to determine the energy costs in the drives when moving the crane links along the given trajectories. According to the criterion of average total energy costs, adopted for all possible combinations of movements within areas of the same capacity of one hundred square meters, the stacker crane of the proposed design has an advantage over the crane of traditional design. This makes it possible to significantly reduce energy costs when using such cranes in warehouses and hangars. It is reasonable to recommend the use of a stacker crane of the developed design in warehouses of round shape - it will allow to reduce significantly the energy costs when using such cranes in warehouses and hangars.

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

Дата получения статьи: 16.11.2023
Дата принятия к публикации: 20.12.2023
Дата публикации: 25.01.2024

Date of manuscript reception: 16.11.2023
Date of acceptance for publication: 20.12.2023
Date of publication: 25.01.2024

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: <https://orcid.org/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: <https://orcid.org/0000-0001-6362-8557>

Authors' information:

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5104-7568>

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6362-8557>

1. Введение

Стеллажные краны-штабелеры получили наиболее широкое распространение при перемещении грузов в складских помещениях [1, 2]. Востребованность стеллажных кранов-штабелеров у потребителей обуславливает масштабы их производства [3, 4].

Высокая производительность, универсальность при перемещении грузов разной формы, сравнительная простота использования, экономичность и надежность – те преимущества, которые привели к их повсеместному использованию на многоярусных складах [5].

В то же время, перечисленные преимущества определили тенденции дальнейшего развития и совершенствования стеллажных кра-

нов-штабелеров: повышение точности позиционирования, скоростей подвижных звеньев, уменьшение энергетических затрат на рабочие движения звеньев, расширение автоматизации элементов рабочего цикла [6, 7].

В рамках выдвинутой гипотезы о том, что энергетические затраты неразрывно связаны с формой рабочей области склада, в котором работает кран, для снижения затрат энергии была предложена новая конструкция стеллажного крана-штабелера с поворотной стрелой [8]. В сравнении с краном-штабелером традиционной конструкции (рис. 1, а), кран-штабелер с поворотной стрелой (рис. 1, б) предположительно будет расходовать меньше энергии при обслуживании складов одинаковой вместимости.

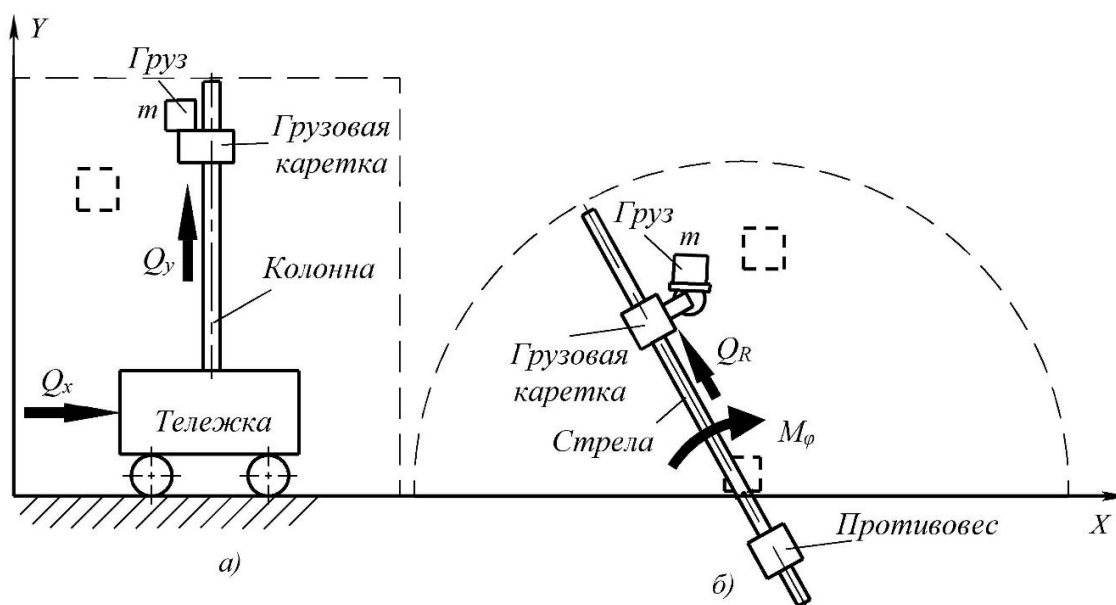


Рис. 1. Расчетные схемы стеллажных кранов-штабелеров: а) традиционной конструкции; б) с поворотной стрелой

Для подтверждения сделанного предположения необходимо провести сравнительный анализ энергозатрат, возникающих при перемещениях звеньев стеллажных кранов-штабелеров традиционной и предложенной конструкций.

2. Постановка задачи

С использованием метода математического моделирования [9, 10], необходимо разработать системы дифференциальных уравнений, описывающие динамику стеллажных кранов-штабелеров традиционной и предложенной конструкций.

С помощью программных реализаций указанных математических моделей, необходимо определить средние затраты энергии на все возможные перемещения грузов одинаковой массы в пределах соответствующих рабочих областей двух сравниваемых конструкций стеллажных кранов-штабелеров.

В дифференциальных уравнениях крана-штабелера традиционной конструкции (рис. 1, а) приняты следующие обозначения: x – перемещение тележки вдоль оси OX ; y – перемещение грузовой каретки вдоль оси OY ; M_x – масса тележки; M_y – масса грузовой каретки с грузозахватным приспособлением и грузом; Q_x – сила, действующая на тележку со стороны ее привода вдоль оси OX ; Q_y – сила, действующая на грузовую каретку со стороны ее привода вдоль оси OY ; b_x – коэффициент диссипации энергии при движении тележки x ; b_y – коэффициент диссипации энергии при движении каретки y .

В дифференциальных уравнениях крана-штабелера предложенной конструкции (рис. 1, б) с поворотной стрелой приняты следующие обозначения: R – радиальная координата центра масс каретки с грузом относительно оси вращения стрелы; φ – угол отклонения стрелы от вертикали; 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; M_φ – момент, действующий на стрелу со стороны ее привода; Q_R – сила, действующая на грузовую каретку вдоль оси стрелы со стороны привода каретки.

3. Математические модели

Краны-штабелеры как традиционной, так и предложенной конструкций имеют по степени свободы, которым соответствуют две управляемые координаты. Для них может быть использована общая форма уравнений Лагранжа динамической системы с учетом диссипативных сил [9, 11]:

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

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

Системы полученных в соответствии с (1) дифференциальных уравнений в форме Коши, описывающих динамику кранов-штабелеров традиционной и предложенной конструкций, будут иметь следующий вид. Для крана-штабелера традиционной конструкции:

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

Для крана-штабелера предложенной конструкции с поворотной стрелой:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} = - \frac{\left(b_w \cdot \dot{\varphi} - M_\varphi + 2 \cdot R \cdot m_{lp} \cdot \dot{R} \cdot \dot{\varphi} + \right. \\ \left. R \cdot g \cdot m_{lp} \cos(\varphi) + g \cdot l_{gs} \cdot m_s \cdot \cos(\varphi) \right)}{m_{lp} \cdot R^2 + I_s}; \\ \ddot{R} = \frac{R \cdot m_{lp} \cdot \dot{\varphi}^2 + Q_R - b_r \cdot \dot{R} - g \cdot m_{lp} \cdot \sin(\varphi)}{m_{lp}}. \end{cases} \quad (3)$$

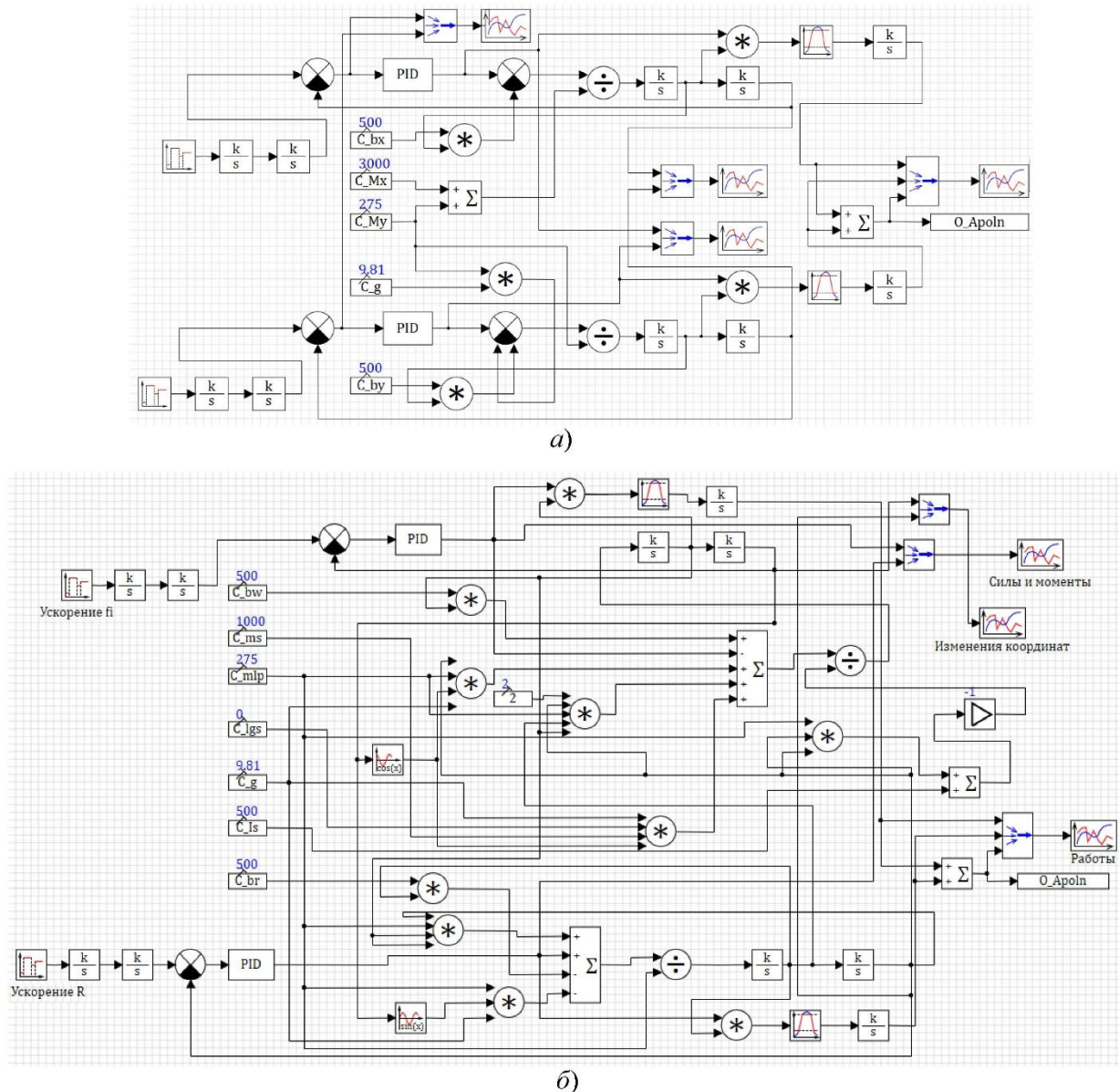


Рис. 2. Блочные диаграммы имитационных моделей кранов-штабелеров: а) традиционной конструкции; б) с поворотной стрелой

Вывод систем дифференциальных уравнений (2) и (3) не приводится ввиду ограниченного объема статьи. Для численного решения систем (2) и (3) в программной среде SimInTech [12] были разработаны две блочные диаграммы (рис. 2).

Разгон и торможение подвижных звеньев кранов осуществлялись с постоянными ускорениями, движения после разгона – с постоянными скоростями [13].

В процессе решения систем дифференциальных уравнений (2) и (3), которое выполняется численными методами интегрирования, умножение текущих значений моментов

и сил Q_x , Q_y , M_ϕ , Q_R на скорости изменения соответствующих им управляемых координат позволяет получить временные зависимости мощностей приводов. В свою очередь, численное интегрирование текущих значений мощностей позволяет получить накопленные затраты энергии приводов, т.е. работы, и определить суммарную работу на определенной траектории перемещения звеньев крана. Соответствующие блоки *Интегратор* присутствуют в представленных блочных диаграммах SimInTech.

4. Результаты вычислительного эксперимента

Постоянные параметры математических моделей в описываемом вычислительном эксперименте принимали максимально совпадающие для двух конструкций кранов значения: $M_x = 3000$ кг; $M_y = 275$ кг; $b_x = 500$ Н/(м/с); $b_y = 500$ Н/(м/с); $m_s = 1833,333$ кг; $m_{lp} = 275$ кг; $l_{gs} = 0$ м; $I_s = 23833,33$ кг м²; $b_w = 500$ Н м/(рад/с); $b_r = 500$ Н/(м/с). Масса m_s стрелы с противовесом крана предлагаемой конструкции принята несколько меньшей, чем масса M_x грузовой тележки крана традиционной конструкции, поскольку не включает в себя ходовое оборудование и привод для перемещения по рельсовым путям.

Предельные значения управляемых координат двух кранов также принимали значения, обеспечивающие одинаковую площадь обслуживаемых стеллажей (около 100 м²): x от 0 до 10 м; y от 0 до 10 м; φ от 0 до π ; R от 0 до 8 м.

Было принято допущение о равномерном характере распределения случайных величин координат целевой ячейки в каждом цикле перемещения кранов, в пределах соответствующих рабочих областей (см рис. 1). Это позволило заменить стохастические значения параметров

Начальная и конечная точка перемещения в каждом одиночном цикле для крана традиционной конструкции имела координаты $x=0$; $y=0$. Промежуточная точка (целевая ячейка склада) имела координаты $x=[1;2;\dots;10]$; $y=[1;2;\dots;10]$ во всех возможных сочетаниях. Для крана предложенной конструкции начальное и конечное значение радиальной координаты также принималось нулевое: $R=0$, поскольку точка загрузки находится максимально близко к оси вращения стрелы. Промежуточное значение радиальной координаты: $R=[1;2;\dots;8]$. Начальное и конечное значения угловой координаты принимались равными $\varphi_{nach}=[0; \pi/10; \pi/5;\dots;\pi]$; $\varphi_{kon}=[0; \pi/10; \pi/5;\dots;\pi]$, также во всех возможных сочетаниях. Поскольку конструктивной особенностью крана предложенной конструкции является допустимость произвольного угла поворота стрелы, при котором сохра-

няется возможность перемещения грузовой каретки с грузом к оси вращения стрелы, т.е. к точке выхода из склада.

Таким образом, для крана традиционной конструкции среднее значение работы приводов в одиночном цикле определялось для $10 \times 10 = 100$ перемещений. Для крана предложенной конструкции среднее значение работы приводов в одиночном цикле определялось для $11 \times 11 \times 8 = 968$ перемещений.

Варьируемыми параметрами в вычислительном эксперименте являлись скорости (в установившемся режиме движения) и ускорения (в периоды разгона и торможения) управляемых координат кранов. В качестве номинальных значений скоростей и ускорений приняты: для крана традиционной конструкции единичные значения $\dot{x}_{nom} = 1$ м/с; $\dot{y}_{nom} = 1$ м/с; $\ddot{x}_{nom} = 1$ м/с²; $\ddot{y}_{nom} = 1$ м/с². Для крана предложенной конструкции с поворотной стрелой $\dot{\varphi}_{nom} = 0,31415926$ рад/с; $\dot{R}_{nom} = 0,8$ м/с; $\ddot{\varphi}_{nom} = 0,31415926$ рад/с; $\ddot{R}_{nom} = 0,8$ м/с. Указанные номинальные значения обеспечивали одинаковое время перемещения кранов в пределах приведенных выше рабочих областей рассматриваемых размеров.

На рис. 3 приведены в качестве примера временные зависимости изменения управляемых координат крана предложенной конструкции (рис. 3, а) при перемещении с номинальными скоростями и ускорениями. Промежуточное значение радиальной координаты $R=8$ м. Начальное значение угловой координаты нулевое. Конечное значение угловой координаты $\varphi_{kon} = \pi/2$ рад.

На рис. 3, б приведены временные зависимости изменения накопленных значений работ приводов крана предложенной конструкции в рассматриваемом примере.

Конечное и одновременно наибольшее в рассматриваемом переходном процессе значение суммарной работы приводов, представляет собой отдельный элемент массива всех возможных сочетаний перемещений крана в рабочей области. Диапазоны и шаги равномерного разбиения всех управляемых координат кранов обеих конструкций приведены выше. Среднее значение всех элементов подобного массива представляет собой

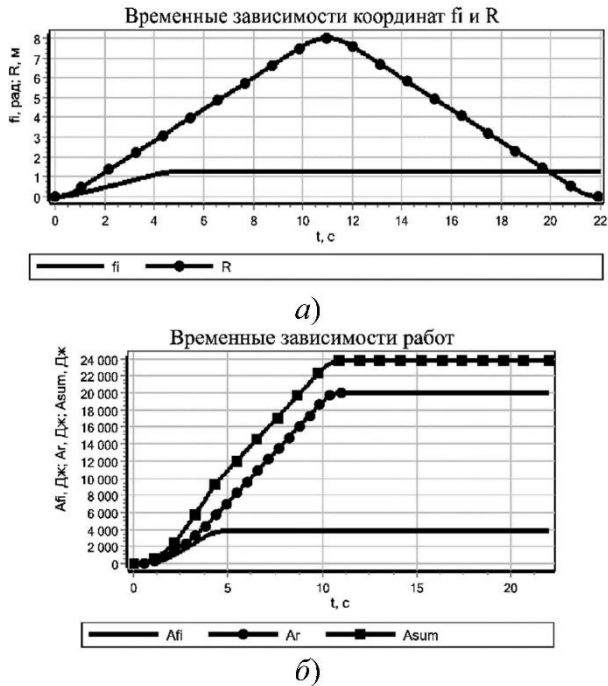


Рис. 3. Временные зависимости управляемых координат крана предложенной конструкции (а) и соответствующие им временные зависимости накопленных значений работ приводов (б)

отдельную точку на приведенных ниже функциональных зависимостях.

Варьирование осуществлялось путем умножения приведенных выше значений номинальных скоростей на коэффициент k , который принимал значения в интервале $[0,5; 2]$ с шагом 0,1. Значения номинальных ускорений умножались при варьировании на k^2 , с целью обеспечения постоянства пропорций между временными участками разгона с постоянным ускорением, и движения с постоянной скоростью.

В результате, все варьируемые одновременно параметры скоростей и ускорений принимали значения, приведенные на осях под рис. 4, а. На данном рис. приведены полученные зависимости средних полных затрат энергии $E_{\Sigma 1}, E_{\Sigma 2}$ крана-штабелера традиционной конструкции (№ 1) и предложенной конструкции с поворотной стрелой (№ 2) от коэффициента варьирования k и всех прочих связанных с ним параметров скоростей и ускорений звеньев кранов.

При увеличении коэффициента k , происходит возрастание скоростей и ускорений, и снижается время перемещения T обоих кранов.

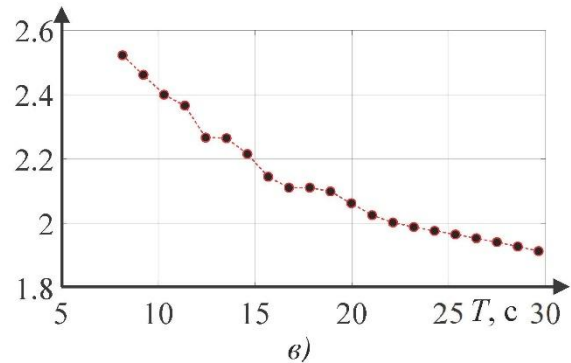
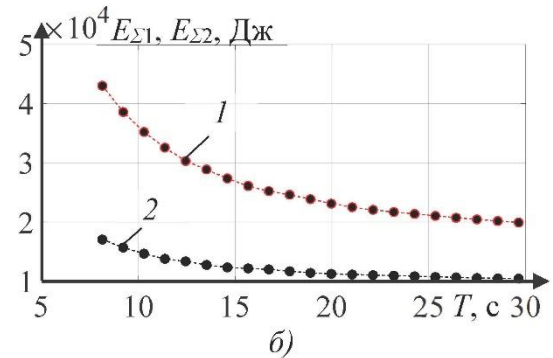
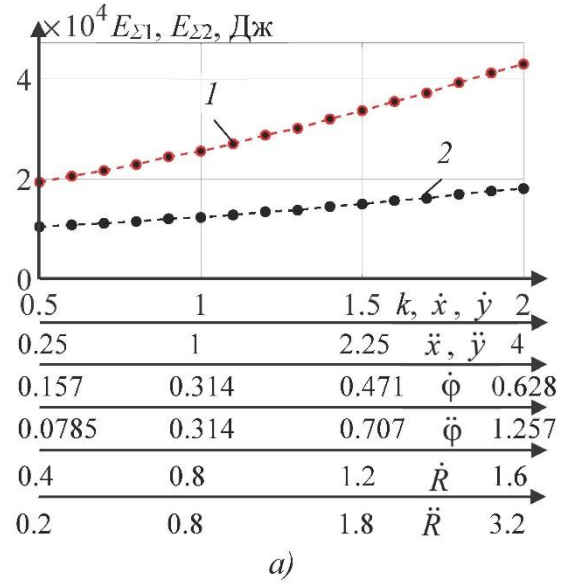


Рис. 4. Зависимости средних полных затрат энергии крана-штабелера традиционной (№ 1) и предложенной конструкции (№ 2): а - от коэффициента k варьирования скоростей и ускорений звеньев; б - от времени цикла; в - зависимость отношения средних полных затрат энергии двух кранов от времени цикла

Средние значения полных затрат энергии приводов кранов традиционной (№ 1) и предложенной (№ 2) конструкций определялись для совокупностей всех возможных сочетаний перемещений в пределах рабочих

областей указанных выше размеров: с шагами изменения координат 1 м для крана традиционной конструкции и с шагами $\pi/10$ для угловой и 1 м для линейной координат крана предложенной конструкции. На дополнительных горизонтальных шкалах рис. 4, а приведены значения всех связанных с варьируемым коэффициентом k значений скоростей и ускорений.

Учитывая, что изменение коэффициента k и связанных с ним скоростей и ускорений вызывает уменьшение времени цикла обоих кранов, на рис. 4, б приведены зависимости средних полных затрат энергии двух кранов от времени цикла перемещений, а на рис. 4, в – зависимость отношения средних полных затрат энергии двух кранов от времени цикла.

6. Обсуждение результатов

Анализ приведенных на рис. 4 функциональных зависимостей показывает, что средние полные затраты энергии $E_{\Sigma 1}$ крана-штабелера традиционной конструкции в 1.9...2.5 раза больше, чем средние полные затраты энергии $E_{\Sigma 2}$ крана-штабелера предложенной конструкции с поворотной стрелой. Наибольшие различия наблюдаются при малых значениях времени цикла, т.е. при движениях с наибольшими скоростями и ускорениями.

Список литературы

1. Srisurin P., Pimpanit P., Jarumaneeroj P. Evaluating the long-term operational performance of a large-scale inland terminal: A discrete event simulation-based modeling approach // PLOS ONE. 2022. Vol. 17. Pp. e0278649. DOI: 10.1371/journal.pone.0278649
2. Diwold J., Kolar B., Schöberl M. Flatness analysis for the sampled-data model of a single mast stacker crane // IFAC-Papers OnLine. 2023. Vol. 56. No. 1. Pp. 222-227. DOI: 10.1016/j.ifacol.2023.02.038
3. Zaerpour N., Gharehgozli A., De Koster R. Vertical expansion: a solution for future

7. Заключение

Разработанные имитационные математические модели двух кранов традиционной конструкции, и предложенной конструкции с поворотной стрелой, позволяют определять затраты энергии в приводах при перемещении звеньев кранов по заданным траекториям. Их использование позволило определять затраты энергии, возникающие при любом заданном перемещении кранов. При обслуживании складов одинаковой вместимости площадью в 100 м², принятие допущения о равномерном характере распределения случайных величин целевых ячеек перемещения грузов в складах, позволило заменить случайные перемещения совокупностью детерминированных перемещений для всех возможных сочетаний координат целевых ячеек с фиксированными шагами изменения их координат.

По критерию средних полных затрат энергии двух кранов, вычисленному для двух совокупностей детерминированных перемещений, кран-штабелер предложенной конструкции с поворотной стрелой имеет преимущество перед краном традиционной конструкции при обслуживании складов одинаковой вместимости.

Целесообразно рекомендовать использование крана-штабелера разработанной конструкции в складах и ангарах полукруглой формы. Его использование позволит существенно сократить затраты энергии при перемещении грузов.

References

1. Srisurin P., Pimpanit P., Jarumaneeroj P. Evaluating the long-term operational performance of a large-scale inland terminal: A discrete event simulation-based modeling approach. PLOS ONE. 2022, Vol. 17, pp. e0278649. DOI: 10.1371/journal.pone.0278649
2. Diwold J., Kolar B., Schöberl M. Flatness analysis for the sampled-data model of a single mast stacker crane. IFAC-Papers OnLine, 2023, Vol. 56, No. 1, pp. 222-227. DOI: 10.1016/j.ifacol.2023.02.038
3. Zaerpour N., Gharehgozli A., De Koster

container terminals // *Transportation Science*. 2019. Vol. 53. No. 5. Pp. 1235-1251. DOI: 10.1287/trsc.2018.0884

4. Geyer E., Arndt T., Mehling U. Construction of a new logistics center in Fliesen // *Beton- und Stahlbetonbau*. 2021. Vol. 116. Pp. 88-90. DOI: 10.1002/best.202100003

5. Huang Q., Ye Y., Zhu Z., Lu T. Route-optimization based storage allocation algorithm in intelligent high-bay warehouses // 2021 4th International conference on intelligent autonomous systems (ICOIAS 2021). 2021. pp. 240-245. DOI: 10.1109/ICOIAS53694.2021.00050

6. 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

7. 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

8. Коротков М.С., Безродина А.Е. 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

9. Беленький И.М. Введение в аналитическую механику. М.: Высш. школа, 1964. 324 с.

10. Лагереv И.А., Остроухов И.О., Химич А.В. Компьютерное моделирование процесса потери общей устойчивости мобильной машины, оснащенной стреловой манипуляционной системой // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2019. № 1. С. 83-94. doi: 10.22281/2413-9920-2019-05-01-83-94

11. Зотеев В.Е. Параметрическая идентификация диссипативных механических систем на основе разностных уравнений / Под ред. В.П. Радченко. М: Машиностроение, 2009. 344 с.

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:

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

4. Geyer E., Arndt T., Mehling U. Construction of a new logistics center in Fliesen. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2021, Vol. 116, pp. 88-90. DOI: 10.1002/best.202100003

5. Huang Q., Ye Y., Zhu Z., Lu T. Route-optimization based storage allocation algorithm in intelligent high-bay warehouses. In: *2021 4th International conference on intelligent autonomous systems (ICOIAS 2021)*, 2021, pp. 240-245. DOI: 10.1109/ICOIAS53694.2021.00050

6. 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

7. 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

8. Korytov M.S., Bezrodina A.E. *Stellazhniyy 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)

9. Belenjkij I.M. *Vvedenie v analiticheskuyu mekhaniku* [Introduction to Analytical Mechanics]. Moscow, High School, 1964. 324 p. (In Russian)

10. Lagerev I.A., Ostrouhov I.O., Himich A.V. *Kompyuternoe modelirovanie protsessy poteri obshhey ustoychivosti mobilnoy mashiny, osnashchennoy strelovoy manipulyatsionnoy sistemoy* [Computer modeling of the process of loss of general stability of a mobile machine equipped with a boom manipulation system]. *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No. 1, pp. 83-94. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-01-83-94 (In Russian)

11. Zoteev V.E. *Parametricheskaya identifikatsiya dissipativnykh mekhanicheskikh*

10.3390/act10080195

13. Кorytov M.C. Разработка математической модели стеллажного крана-штабелера с учетом диссипации энергии / М.С. Корытов, А.Е. Безродина // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2023. № 2. С. 134-144. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-02-134-144

si-stem na osnove raznostnykh uravneniy [Parametric identification of dissipative mechanical systems based on difference equations]. V.P. Radchenko (Ed.). Moscow, Mashinostroenie, 2009. 344 p. (In Russian)

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

13. Korytov M.S., Bezrodina A.E. *Razrabotka matematicheskoy modeli stellazhnogo krana-shtabelera s uchetom dissipatsii energii* [Development of mathematical model of the racking crane-stacker taking into account energy dissipation]. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2023, No. 2, pp. 134-144. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-02-134-144 (In Russian)