

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

УДК 621.867.2

В. В. СУГЛОБОВ^{1*}, С. В. РАКША², Е. В. ТКАЧУК³

^{1*}Каф. «Подъемно-транспортные машины и детали машин», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (067) 623 12 69, эл. почта suglobov_v_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894

²Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 634 17 46, эл. почта raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341

³Каф. «Подъемно-транспортные машины и детали машин», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (066) 149 23 49, эл. почта ev13tk@gmail.com, ORCID 0000-0002-0309-1644

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВАРЬИРУЕМЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УРАВНОВЕШИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ

Цель. Исследование выполнено с целью совершенствования процесса проектирования уравновешивающего устройства порталного крана. Для ее достижения необходимо: 1) составить динамическую и математическую модели, позволяющие описать движение уравновешивающего устройства и стреловой системы порталного крана при изменении вылета; 2) разработать методику определения массива варьируемых конструктивных параметров уравновешивающих устройств; 3) рассчитать оптимальное соотношение координат крепления коромысла уравновешивающих устройств и изучить их влияние на неуравновешенность стреловой системы порталного крана. **Методика.** Для определения кинематических характеристик звеньев уравновешивающих устройств разработаны динамическая и математическая модели, которые позволяют описать движение противовеса с коромыслом при изменении вылета стрелы. Задача уравновешивания стреловых систем порталных кранов сводится к определению конструктивных параметров устройства, которое обеспечивало бы уравновешивание стреловой системы на всём диапазоне вылетов. Также разработана методика определения приемлемых варьируемых конструктивных параметров уравновешивающих устройств с учётом условий подвижности, собираемости и требований к значениям неуравновешенного стрелового момента. **Результаты.** С помощью математического моделирования научно обоснована целесообразность использования предложенной методики определения конструктивных параметров уравновешивающих устройств. Разработанный массив варьируемых данных позволяет учитывать характер уравновешивания и оптимизировать конструкцию уравновешивающих устройств и стреловых систем порталных кранов. Авторами выполнен анализ влияния варьируемых параметров на общепринятые критерии оценки качества шарнирно-сочленённой стреловой системы: неуравновешенность системы, вес противовеса, показатели грузового и стрелового неуравновешенных моментов. **Научная новизна.** Впервые предложена методика определения массива варьируемых данных, которая позволяет получить рациональные конструктивные параметры уравновешивающих устройств порталных кранов. Разработана локальная программа для комплексного оптимизационного синтеза, позволяющая определять оптимальные соотношения координат коромысла, при которых выполняются условия уравновешенности и качества порталного крана. **Практическая значимость.** Предложенная методика определения массива варьируемых конструктивных параметров может быть использована при проектировании новых и модернизации существующих уравновешивающих устройств порталных кранов с шарнирно-сочленёнными стреловыми системами, что позволит снизить материалоемкость стреловой системы и энергопотребление кранов. С помощью компьютерного моделирования выполнена апробация предложенной методики применительно к кранам, компоновка которых обеспечивает собираемость и подвижность звеньев всех систем.

Ключевые слова: порталный кран; уравновешивающее устройство; шарнирно-сочленённая стреловая система; синтез; конструктивные параметры; коромысло; неуравновешенный момент

Введение

Обеспечение уравнивания шарнирно-сочленённой стреловой системы является важным требованием при проектировании порталного крана.

Существуют различные способы и подходы, позволяющие соблюдать условие уравнивания [1, 5, 6, 8–13, 17–22], однако ни один из них не даёт возможности корректировать и улучшать параметры шарнирно-сочленённой стреловой системы на реальных, введённых в эксплуатацию, порталных кранах.

В реальной конструкции крана возможности варьирования очень ограничены. Изменение некоторых параметров вообще невозможно, так как это потребует дорогостоящей реконструкции крана.

На структурной схеме уравнивающего устройства порталного крана (рис. 1) указаны звенья, значения которых существенно влияют на общую компоновку и материалоемкость крана. К ним относятся: $O_1A = b$ – расстояние от оси качания стрелы до места крепления тяги противовеса, $AB = c$ – длина тяги противовеса, $O_2B = d$ – длина переднего плеча коромысла, $BC = r$ – расстояние от оси качания стрелы до точки крепления противовеса, m – расстояние по горизонтали от оси качания стрелы до оси качания коромысла, l – расстояние по вертикали от оси качания стрелы до оси качания коромысла, $G_{\text{П}}$ – вес противовеса.

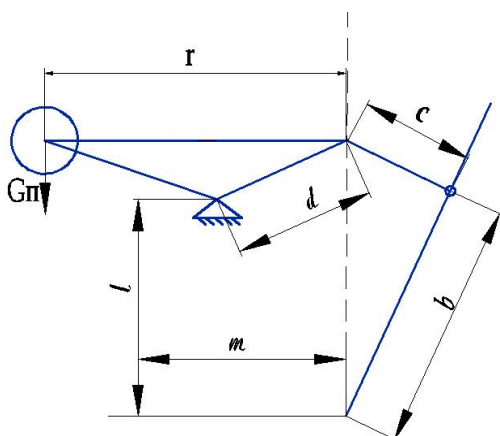


Рис. 1. Структурная схема уравнивающего устройства порталного крана

Fig. 1. Structural diagram of balancing unit of the portal crane

Цель

Основной целью данного исследования является расчёт варьируемых параметров уравнивающих устройств порталных кранов и определение массива конструктивных данных для автоматизированного синтеза. Для достижения цели в исследовании предусмотрено: 1) разработать динамическую и математическую модели, которые описывают движение уравнивающего устройства и стреловой системы при изменении вылета; 2) разработать методику расчёта и определения массива варьируемых конструктивных параметров уравнивающего устройства; 3) рассчитать оптимальное соотношение координат крепления коромысла уравнивающего устройства и изучить их влияние на неуравновешенность стреловой системы порталного крана.

Методика

Для определения кинематических характеристик звеньев уравнивающих устройств разработаны динамическая и математическая модели, которые позволяют описать движение противовеса с коромыслом при изменении вылета стрелы. Задача уравнивания стреловых систем порталных кранов сводится к определению конструктивных параметров устройства, которое обеспечивало бы уравнивание стреловой системы на всём диапазоне вылетов. Также разработана методика определения приемлемых варьируемых конструктивных параметров уравнивающих устройств с учётом условий подвижности, собираемости и требований к значениям неуравновешенного стрелового момента.

Результаты

При теоретических исследованиях уравнивающего устройства и синтеза шарнирно-сочленённой стреловой системы авторами представлены соответствующие динамические модели [15].

1. Разработка динамических моделей шарнирно-сочленённой стреловой системы и уравнивающего устройства порталного крана. Динамическая модель шарнирно-сочленённой стреловой системы (рис. 2) харак-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

теризується геометричними і інерційними параметрами [15].

За основу взята стреловая система, грузовой канат в которой проходит параллельно жёсткой оттяжке.

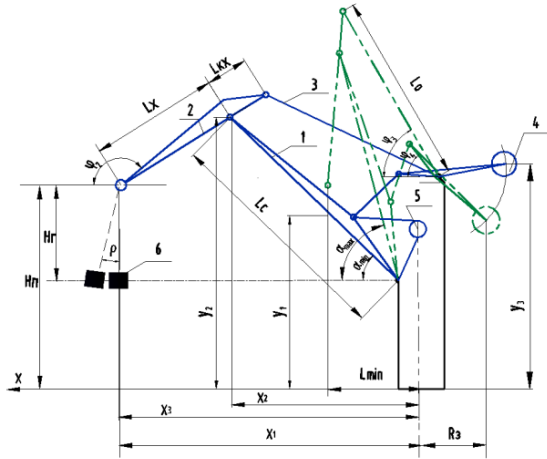


Рис. 2. Динамическая модель шарнирно-сочленённой стреловой системы портального крана:

1 – стрела; 2 – хобот; 3 – оттяжка;
4 – коромысло с противовесом; 5 – привод механизма изменения вылета; 6 – груз

Fig. 2. The dynamic model of articulated boom system of the portal crane:

1 – boom; 2 – horse-head jib; 3 – guy;
4 – counterweighted balance beam; 5 – derricking mechanism drive; 6 – load

Геометрические параметры следующие: L_x – длина хобота, L_{cx} – длина контрхобота, L_c – длина стрелы, L_0 – длина оттяжки, H_{Π} – высота подъёма груза, H_{Γ} – высота подвеса груза, R_3 – величина заднего габарита, α – угловая координата стрелы, ρ – угол отклонения грузового каната от вертикали, y_1 , y_2 , y_3 – вертикальные координаты центров тяжести стрелы, хобота, противовеса, x_1 , x_2 – горизонтальные координаты центров тяжести груза и хобота, x_3 – горизонтальная координата оси блока хобота, φ_1 , φ_2 , φ_3 , φ_4 – угловые координаты ротора электродвигателя механизма изменения вылета стрелы, хобота, оттяжки и противовеса, L_{\min} – минимальный вылет стрелы, L_{\max} – максимальный вылет стрелы. К инерционным параметрам относят: m_1 , m_2 ,

m_3 , m_4 , m – масса стрелы, хобота в сборе с контрхоботом, оттяжки, противовеса и груза, J , J_1 , J_2 , J_3 , J_4 – моменты инерции относительно собственных осей вращения ротора электродвигателя механизма изменения вылета, стрелы, хобота, оттяжки, противовеса [15].

К параметрам динамической модели уравновешивающего устройства (рис. 3) относят: L_1 – расстояние между противоположными точками противовеса и тяги, L_2 – рабочая часть зубчатой рейки механизма изменения вылета стрелы, a_2 – длина опорной стойки противовеса, a_3 – длина опорной стойки приводного механизма, d – длина тягового плеча противовеса, e – длина кронштейна противовеса, c – длина тяги уравновешивающего устройства, b_1 – длина стрелового плеча механизма уравновешивания, b_2 – длина стрелового плеча приводного механизма, ψ – угол наклона к горизонту опорной стойки противовеса, ξ – угол наклона к горизонту опорной стойки механизма изменения вылета, φ_4 – угловая координата противовеса, ω – угол раскрытия коромысла.

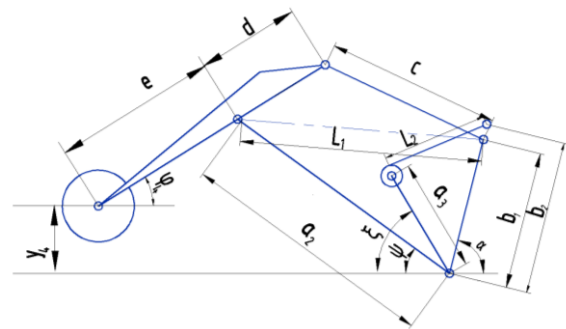


Рис. 3. Динамическая модель уравновешивающего устройства портального крана

Fig. 3. Dynamic model of the balancing unit of the portal crane

2. Разработка математической модели уравновешивающего устройства и стреловой системы портального крана. Исходные данные математической модели, исходя из рекомендаций [2, 6, 7], могут состоять из её кинематической схемы, геометрии масс и характеристик цикла движения.

Изменение положения стрелы приводит к изменению положения других звеньев, кото-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

рые определяются координатами хобота – φ_2 , y_2 ; оттяжки – φ_3 ; противовеса – φ_4 ; груза – x_1 .

Противовес с коромыслом выполняет вращательное движение вокруг своей оси. Это движение можно записать при помощи двух координат:

$$\begin{aligned} \varphi_4 &= \arccos \frac{a_2^2 - b_1^2 + L_1^2}{2a_2 \cdot L_1} + \arccos \frac{d^2 - c^2 + L_1^2}{2d \cdot L_1} - \psi, \\ \dot{\varphi}_4 &= -2 \frac{\dot{L}_1 \frac{(a_2^2 - b_1^2 + L_1^2) \dot{L}_1}{2a_2 \cdot L_1^2}}{\sqrt{4 - \left(\frac{a_2^2 - b_1^2 + L_1^2}{a_2 \cdot L_1} \right)^2}} - 2 \frac{\dot{L}_1 \frac{(d^2 - c^2 + L_1^2) \dot{L}_1}{2d \cdot L_1}}{\sqrt{4 - \left(\frac{d^2 - c^2 + L_1^2}{d \cdot L_1} \right)^2}}, \end{aligned} \quad (2)$$

Момент противовеса должен полностью уравновесить момент стреловой системы и часть грузового неуравновешенного момента: $M_{II} = M_{HC} + M_Q$.

Достичь полного уравновешивания на всем диапазоне вылетов невозможно, потому что момент стреловой системы и момент противо-

– вертикальной:

$$\begin{aligned} y_4 &= a_2 \cdot \sin \psi - e \cdot \sin(\mu + \varphi_4), \\ \dot{y}_4 &= e \cdot \cos(\mu + \varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\ddot{y}_4 = -e \cdot \sin(\mu + \varphi_4) \cdot \dot{\varphi}_4^2 + e \cdot \cos(\mu + \varphi_4) \cdot \ddot{\varphi}_4,$$

– угловой:

веса изменяются в зависимости от угла наклона стрелы при изменении вылета – α .

Наиболее приемлемой показала себя усовершенствованная математическая модель уравновешенной шарнирно-сочлененной стреловой системы (3), которая учитывает невозможность полного уравновешивания и наличие неуравновешенного стрелового момента:

$$\begin{cases} J_{cc} \ddot{\alpha} + \frac{1}{2} \frac{\partial J_{cc}}{\partial \alpha} \dot{\alpha}^2 = M \frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha} + mg \frac{x_1 - x_3}{H_\Gamma} \frac{\partial x_3}{\partial \alpha} + G_{II} e \cos(\mu + \varphi_4) \\ -G_C (L_c \cos \alpha - L_x \cos \varphi_2) \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha}; \\ m \ddot{x}_1 = -mg \frac{x_1 - x_3}{H_\Gamma}. \end{cases} \quad (3)$$

3. Методика определения массива варьируемых конструктивных параметров уравновешивающего устройства. Задача уравновешивания стреловых систем порталных кранов сводится к определению конструктивных параметров уравновешивающего устройства, которое обеспечивало бы уравновешивание стреловой системы на всём диапазоне вылетов.

Неуравновешенный момент на максимальном вылете должен действовать в сторону уменьшения, на минимальном вылете – в сторону увеличения грузового момента, а на промежуточных вылетах иметь одну или несколько точек устойчивого равновесия стреловой си-

стемы, к которым она будет стремиться в случае отказа механизма (рис. 4) [5, 8, 14–16].

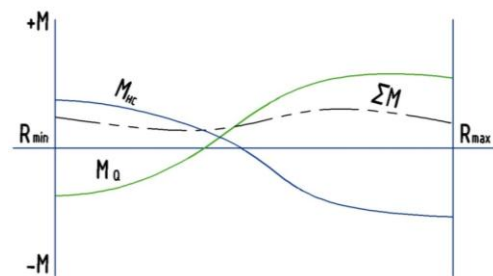


Рис. 4. Графики моментов $M_{HC}, M_Q, \Sigma M$

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

Для обеспечения условий уравновешенности стреловой системы порталного крана необходимо определить конструктивные параметры уравновешивающего устройства, значения которых существенно влияют на общую компоновку и материалоемкость крана. Выделенные на рис. 1 параметры звеньев (l, m, d, c) позволяют выполнить рациональный автоматизированный синтез за счёт варьирования их значений.

$$M_{\Pi} = G_{\Pi} \left(\frac{r}{m} + \cos(\lambda + \omega) \right) + y_c + r \cdot \frac{l}{m} \cdot \frac{x_B y_A - x_A y_B}{c(m+l) + x_B y_A - x_A y_B}, \quad (4)$$

где r – расстояние от оси качания стрелы до точки крепления противовеса, ω – угол раскрытия коромысла, y_c – расстояние по вертикали от оси качания стрелы до точки крепления противовеса.

$$y_c = l + d \cdot \sin(\omega + \theta),$$

$$\theta = \arcsin \frac{y_B - l}{d}, \quad (5)$$

В результате экспериментальных исследований порталных кранов установлено, что оптимальные значения веса противовеса, грузового и неуравновешенного моментов достигаются с использованием автоматизированного синтеза при варьировании параметров уравновешивающего устройства из определенного массива: $d = 3,1 \dots 3,6$ м; $c = 8,1 \dots 9,0$ м; $l = 11,85 \dots 13$ м; $m = 4,54 \dots 5,83$ м.

На основе обработанных статистических данных изученных порталных кранов получены значения координат крепления коромысла уравновешивающего устройства и рассмотрена их взаимосвязь с неуравновешенным моментом: $M_{HC} = f(l)$; $M_{HC} = f(m)$.

Экспериментально установленные значения параметров l и m в зависимости от неуравновешенного момента описываются разными аналитическими зависимостями, определение которых выполнено методом аппроксимации. Поиск аппроксимирующих функций, максимально приближенных к экспериментальным данным, осуществлён посредством программы MS Excel методом наименьших квадратов. Используя данный метод, функции $M_{HC} = f(l)$; $M_{HC} = f(m)$ были аппроксимиро-

В процессе исследования установлено, что наибольшее влияние на качество уравновешивания оказывают координаты крепления коромысла уравновешивающего устройства: вертикальная l и горизонтальная m .

Момент противовеса M_{Π} зависит от соотношения $\frac{l}{m}$, веса противовеса G_{Π} , координат переднего плеча коромысла ($x_B; y_B$), ($x_A; y_A$):

ваны следующими зависимостями: многочленом первой степени – $M_{HC} = a_1 + a_2 \cdot l$; $M_{HC} = a_1 + a_2 \cdot m$, многочленом второй степени – $M_{HC} = a_1 + a_2 \cdot l + a_3 \cdot l^2$; $M_{HC} = a_1 + a_2 \cdot m + a_3 \cdot m^2$, экспоненциальной зависимостью – $M_{HC} = a_1 \cdot e^{a_2 \cdot l}$; $M_{HC} = a_1 \cdot e^{a_2 \cdot m}$.

Результаты расчётов представлены в табл. 1. Для определения функции, которая наилучшим образом описывает зависимость между параметрами M_{HC} и l , M_{HC} и m , для каждого вида аппроксимации вычислены коэффициенты детерминации и коэффициент корреляции (табл. 2).

Таблица 1

Результаты аппроксимации функций

$$M_{HC} = f(l); M_{HC} = f(m).$$

Table 1

Results of functions approximation

$$M_{HC} = f(l); M_{HC} = f(m).$$

Вид аппроксимации	Координаты крепления	
	l	m
Линейная	$M_{HC} = -2645,5 + 224,1 \cdot l$	$M_{HC} = -803,58 + 206,88 \cdot m$
Квадратичная	$M_{HC} = 3412 - 741,4 \cdot l + 39,26 \cdot l^2$	$M_{HC} = -3628,5 + 1309,9 \cdot m + 106,8 \cdot m^2$
Экспоненциальная	$M_{HC} = 1,98 \cdot e^{0,93 \cdot l}$	$M_{HC} = 1,53 \cdot e^{0,92 \cdot m}$

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции и детерминации

Table 2

Values of correlation and determination coefficients

Коэффициент корреляции	<i>l</i>	<i>m</i>
		0,96
Коэффициент детерминации для линейной аппроксимации	0,92	0,86
Коэффициент детерминации для квадратичной аппроксимации	0,89	0,89
Коэффициент детерминации для экспоненциальной аппроксимации	0,8	0,76

Согласно рекомендациям, содержащимся в работах [2–4], эмпирическая функция наиболее точно отражает экспериментальные данные, если коэффициент детерминации приближенно равен коэффициенту корреляции.

В результате исследований установлено, что зависимость $M_{HC} = f(l)$ наилучшим образом описывается линейной функцией $M_{HC} = -2645,5 + 234l$; а зависимость $M_{HC} = f(m)$ – квадратичной функцией $M_{HC} = -3628,5 + 1309,9 \cdot m + 106,8 \cdot m^2$. Построены графики (рис. 5–7), которые отражают характер изменения неуравновешенного момента при варьировании значений координат (*m*, *l*).

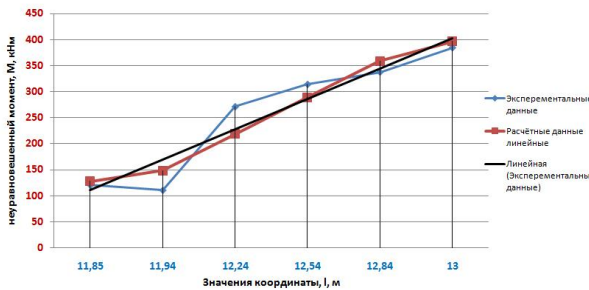


Рис. 5. График линейной зависимости $M_{HC} = f(l)$

Fig. 5. Graph of linear dependence $M_{HC} = f(l)$

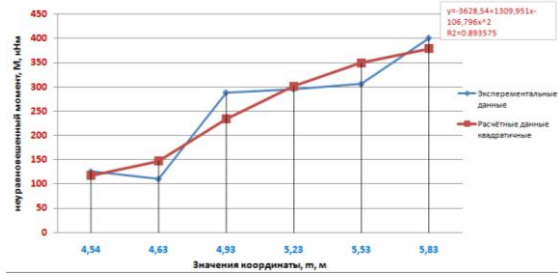


Рис. 6. График квадратичной зависимости $M_{HC} = f(m)$

Fig. 6. Graph of quadratic dependence $M_{HC} = f(m)$



Рис. 7. График зависимости неуравновешенного момента от координат крепления коромысла уравновешивающего устройства $M_{HC} = f(m, l)$

Fig. 7. The graph of the dependence of the unbalanced moment on the coordinates of the mounting of the beam of the balancing device $M_{HC} = f(m, l)$

Результаты исследования отражены в работе [15]:

1. Оптимальные значения названных критериев качества достигаются при $m = 4,63...5,425$ м, $l = 11,94...12,72$ м.

2. Значения параметров изменить относительно оптимальных значений *m* и *l* возможно не более, чем на 0,1 м. Дальнейшее изменение недопустимо по ограничениям угла захода противовеса и обеспечения компоновки стреловой системы и системы уравновешивания.

3. На качество уравновешивания системы в наибольшей степени влияет параметр *l*.

4. Характер изменения неуравновешенного момента в оптимизированном варианте ($\frac{l}{m} = 2,35...2,58$ м) полностью отвечает всем требованиям к системе уравновешивания.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

5. При уменьшении или увеличении параметров m и l процент неуравновешенности увеличивается, а неуравновешенный момент принимает нежелательную направленность.

4. *Экспериментальное исследование адекватности предложенной методики на компьютерных моделях порталных кранов.* Автора-

ми апробирован представленный метод определения массива варьируемых конструктивных параметров уравновешивающих устройств применительно к кранам, компоновка которых обеспечивает собираемость и подвижность звеньев стреловой системы и уравновешивающего устройства (табл. 3).

Таблица 3

Анализ варьируемых параметров уравновешивающего устройства

Table 3

Analysis of variable parameters of the balancing unit

Результаты исследования	Модели порталных кранов		
	КПП 16-36-10,5	КПП 32-32-10,5	КПП 40-34-10,5
$d = 3,1...3,6$ м; $c = 8,1...9,0$ м; $l = 11,94...12,72$ м; $m = 4,63...5,42$ м.	$d = 3,18$ м; $c = 8,2$ м; $l = 11,94$ м; $m = 4,63$ м.	$d = 3,5$ м; $c = 8$ м; $l = 12,1$ м; $m = 4,72$ м.	$d = 3,27$ м; $c = 8,42$ м; $l = 12,6$ м; $m = 5,2$ м.

Таблица 4

С помощью метода определения массива варьируемых параметров уравновешивающих устройств порталных кранов проанализировано качество уравновешенности до и после использования представленной методики и автоматизированного синтеза (табл. 4).

Анализ показал целесообразность использования представленной методики и рекомендаций в комплексном оптимизационном синтезе [16] шарнирно-сочленённых стреловых систем порталных кранов.

На основании математических расчётов и компьютерного моделирования научно обоснована целесообразность использования предложенной методики определения конструктивных параметров уравновешивающих устройств. Разработанный массив варьируемых данных позволяет учитывать характер уравновешивания и оптимизировать конструкцию уравновешивающих устройств и стреловых систем порталных кранов.

Анализ показателей уравновешенности стреловой системы порталных кранов

Table 4

Indicator analysis of the boom system balance for portal cranes

Показатели уравновешенности	КПП 16-36-10,5	
	До оптимизации	После оптимизации
Масса противовеса	15,7 т	11,09 т
Неуравновешенность	14,5 %	2 %
Неуравновешенный момент	776,24 кН·м	110,64 кН·м
Показатели уравновешенности	КПП 32-32-10,5	
	До оптимизации	После оптимизации
Масса противовеса	23,5 т	20,1 т

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

Продолжение таблицы 4
Continuation of a table 4

Показатели уравновешенности	КПП 16-36-10,5	
	До оптимизации	После оптимизации
Неуравновешенность	7 %	2 %
Неуравновешенный момент	637,29 кН·м	446,1 кН·м
Показатели уравновешенности	КПП 40-34-10,5	
	До оптимизации	После оптимизации
Масса противовеса	26,7 т	23,5 т
Неуравновешенность	26 %	5 %
Неуравновешенный момент	133,02 кН·м	105,65 кН·м

Научная новизна и практическая значимость

Впервые представлена методика определения массива варьируемых данных, которая позволяет сформировать массив рациональных параметров уравнивающих устройств. Разработана локальная программа для ком-

плексного оптимизационного синтеза, позволяющая определять оптимальные соотношения координат коромысла, при котором выполняются условия уравниваемости и качества порталного крана.

Представленная методика расчёта и определения массива варьируемых конструктивных параметров может быть внедрена в практику проектно-конструкторских организаций для разработок, проектирования новых и модернизации существующих уравнивающих устройств порталных кранов с шарнирно-сочленёнными стреловыми системами.

Выводы

В статье рассмотрен метод определения варьируемых данных для комплексного оптимизационного синтеза уравнивающих устройств. Разработки выполнены на базе программы MS Excel.

Авторами выполнен анализ влияния варьируемых параметров на общепринятые критерии оценки качества шарнирно-сочленённой стреловой системы: неуравновешенность системы, вес противовеса, показатели грузового и стрелового неуравновешенных моментов.

Предложенная методика апробирована при запуске комплексного оптимизационного синтеза применительно к кранам, компоновка которых обеспечивает собираемость и подвижность звеньев всех систем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев, Ф. П. Методы оптимизации : в 2 кн. / Ф. П. Васильев. – Москва : МЦНМО, 2011.
2. Верховод, В. П. Использование программы MathCAD при синтезе передаточных рычажных механизмов [Электронный ресурс] / В. П. Верховод // Теория механизмов и машин. – 2011. – № 1 (17), т. 9. – С. 69–76. – Режим доступа: http://tmm.spbstu.ru/17/verkhovod_17.pdf – Загл. с экрана. – Проверено : 21.06.2018.
3. Воевода, А. А. Реализация итерационного метода наименьших квадратов для оценивания параметров статических объектов в среде MathLab / А. А. Воевода, Г. В. Трошина // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2017. – № 1. – С. 28–36. doi: 10.24143/2072-9502-2017-1-28-36
4. Лепшени, И. Оптимальный синтез устройства для уравнивания стреловых систем порталных кранов / И. Лепшени, Л. Г. Серлин // Тр. Ленингр. политехн. ин-та. – Ленинград, 1975. – № 347 : Металлические конструкции кранов. Исследование конвейеров. – С. 77–84.
5. Ловейкин, В. С. Исследование движущих сил в механизме изменения вылета стреловой системы крана / В. С. Ловейкин, Д. А. Паламарчук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини : зб. наук. пр. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ, 2014. – № 84. – С. 39–45.
6. Ловейкін, В. С. Режимно-параметрична оптимізація технічних систем / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2017. – № 19. – С. 90–95.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

7. Мисюра, В. П. Исследование и оптимальное проектирование уравновешивающих устройств стреловых систем порталных кранов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05 / Мисюра Василий Петрович ; Укр. заочн. политехн. ин-т. – Харьков, 1980. – 24 с.
8. Мисюра, В. П. Оптимальное проектирование уравновешивающих устройств стреловых систем порталных кранов / В. П. Мисюра, Б. И. Жермунский // Вестник машиностроения. – 1980. – № 7. – С. 41–43.
9. Моделирование динамического нагружения датчика ограничителя грузового момента в шарнирно-сочленённых стреловых системах порталных кранов с прямолинейным хоботом / И. В. Бурданов, Д. В. Попов, А. Н. Кривонос, В. П. Самусько // Современные пути развития науки и образования : материалы науч.-практ. конф. (Смоленск, 31 июля 2015 г.). – Смоленск, 2015. – С. 126–129.
10. Нестеров, А. А. Технология локальной разгрузки корневых шарниров стреловых систем порталных кранов / А. А. Нестеров // Підйомно-транспортна техніка. – 2016. – № 4 (52). – С. 64–71.
11. Паламарчук, Д. А. Оптимізація режимів руху шарнірно-зчленованої стрілової системи крана з горизонтальним переміщенням вантажу : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05 / Паламарчук Дмитро Анатолійович ; Київ. нац. ун-т будівництва і архітектури. – Київ, 2013. – 25 с.
12. Петухов, П. З. Специальные краны / П. З. Петухов, Г. П. Ксюнин, Л. Г. Серлин. – Москва : Машиностроение, 1985. – 248 с.
13. Справочник по кранам : в 2 т. / под общ. ред. М. М. Гохберга. – Ленинград : Машиностроение, 1988. – Т. 2. – 559 с.
14. Суглобов, В. В. Определение конструктивных параметров шарнирно-сочленённых стреловых систем порталных кранов / В. В. Суглобов, Е. В. Ткачук // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 1 (67). – С. 156–166. doi: 10.15802/stp2017/92618
15. Суглобов, В. В. Оптимізація конструкції стрілових систем і пристроїв врівноваження порталних кранів / В. В. Суглобов, В. А. Міхеєв, К. В. Ткачук // Университетская наука – 2014 : в 5 т. : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Мариуполь, 20–21 мая 2014 г.). – Мариуполь, 2014. – Т. 3. – С. 67–68.
16. Ткачук, К. В. Обґрунтування раціональних конструктивних параметрів шарнірно-зчленованих стрілових систем порталних кранів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05 / Ткачук Катерина Володимирівна ; Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2017. – 23 с.
17. Clarke, F. Functional Analysis, Calculus of Variations and Optimal Control / F. Clarke. – London : Springer, 2013. – 591 p. doi: 10.1007/978-1-4471-4820-3
18. Keqin, L. Inverse Design of a New Double-link Luffing Mechanism and Realization on MATLAB / L. Keqin, J. Cuxiang // Proc. of the 3rd ICMEM Intern. Conf. on Mechanical Engineering and Mechanics (21.10–23.10.2009). – Beijing, China, 2009. – P. 301–304.
19. Kolonic, F. Tensor Product Model Transformation-based Controller Design for Gantry Crane Control System – An Application Approach / F. Kolonic, A. Poljungan, I. Petrovic // Acta Polytechnica Hungarica. – 2006. – Vol. 3, No. 4. – P. 95–112.
20. Mauri, K. Intelligent container positioning helps [Электронный ресурс] / K. Mauri // Konecranes Magazine. – 2012. – № 1. – P. 22–27. – Режим доступа: <http://www.konecranes.com/sites/default/files/download/sagt.pdf> – Загл. с экрана. – Проверено : 21.06.2018.
21. Seeler, K. A. System dynamics: an introduction for mechanical engineers / K. A. Seeler. – New York : Springer, 2014. – 667 p. doi: 10.1007/978-1-4614-9152-1
22. Vulfson, I. Dynamics of cyclic machines / I. Vulfson. – Cham : Springer Publ., 2015. – 390 p. doi: 10.1007/978-3-319-12634-0

В. В. СУГЛОБОВ^{1*}, С. В. РАКША², К. В. ТКАЧУК³

^{1*}Каф. «Підйомно-транспортні машини і деталі машин», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (067) 623 12 69, ел. пошта suglobov_v_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894

²Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 634 17 46, ел. пошта raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341

³Каф. «Підйомно-транспортні машини і деталі машин», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, тел. +38 (066) 149 23 49, ел. пошта ev13tk@gmail.com, ORCID 0000-0002-0309-1644

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

ВИЗНАЧЕННЯ ВАРІЙОВНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗРІВНОВАЖУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ

Мета. Дослідження виконане з метою вдосконалення процесу проектування зрівноважувального пристрою порталного крана. Для її досягнення необхідно: 1) скласти динамічну й математичну моделі, які дозволяють описати рух зрівноважувального пристрою та стрілової системи порталного крана в разі зміни вильоту; 2) запропонувати засіб визначення та методика розрахунку масиву варійовних параметрів конструкції зрівноважувальних пристроїв; 3) розрахувати оптимальне співвідношення координат кріплення коромисла зрівноважувального пристрою та вивчити їх вплив на неврівноваженість стрілової системи порталного крана. **Методика.** Для визначення кінематичних характеристик ланок зрівноважувального пристрою розроблені динамічна й математична моделі, які дозволяють описати рух противаги з коромислом за умови зміни вильоту стріли. Задача врівноваження стрілових систем порталних кранів зводиться до визначення конструктивних параметрів зрівноважувального пристрою, який забезпечував би врівноваження стрілової системи на всьому діапазоні вильотів. Також розроблена методика визначення прийнятних варійовних конструктивних параметрів зрівноважувальних пристроїв із урахуванням умов рухомості, збираності та вимог до значень неврівноваженого стрілового моменту. **Результати.** За допомогою математичного моделювання науково обґрунтована доцільність використання запропонованої методики визначення конструктивних параметрів зрівноважувальних пристроїв. Розроблений масив варійовних даних дозволяє враховувати характер врівноваження й оптимізувати конструкцію зрівноважувальних пристроїв стрілових систем порталних кранів. Авторами проведений аналіз впливу варійовних параметрів на загальноприйняті критерії оцінки якості шарнірно-зчленованої стрілової системи: неврівноваженість системи, вага противаги, показники вантажного й стрілового неврівноважених моментів. **Наукова новизна.** Уперше запропонована методика визначення масиву варійовних даних, яка дозволяє отримати раціональні конструктивні параметри зрівноважувальних пристроїв порталних кранів. Розроблена локальна програма для комплексного оптимізаційного синтезу, що дозволяє визначати оптимальні співвідношення координат коромисла, за яких виконуються умови врівноваженості та якості порталного крана. **Практична значимість.** Запропонована методика визначення масиву варійовних конструктивних параметрів може бути використана під час проектування нових і модернізації наявних зрівноважувальних пристроїв порталних кранів із шарнірно-зчленованими стріловими системами, що дозволить знизити матеріалоемність стрілової системи й енергоспоживання кранів. За допомогою комп'ютерного моделювання виконана апробація запропонованої методики стосовно кранів, компонування яких забезпечує збираність і рухомість ланок усіх систем.

Ключові слова: порталний кран; зрівноважувальний пристрій; шарнірно-зчленована стрілова система; синтез; конструктивні параметри; коромисло; неврівноважений момент

V. V. SUGLOBOV^{1*}, S. V. RAKSHA², K. V. TKACHUK³

^{1*}Dep. «Handling Equipment and Details of Machines», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (067) 623 12 69, e-mail suglobov_v_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894

²Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 634 17 46, e-mail raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341

³«Handling Equipment and Details of Machines», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (066) 149 23 49, e-mail ev13tk@gmail.com, ORCID 0000-0002-0309-1644

DETERMINATION OF THE VARIED CONSTRUCTIVE PARAMETERS FOR BALANCING UNITS OF PORTAL CRANES

Purpose. The research was carried out to improve the design process of the balancing unit for portal crane. In order to achieve the purpose one should: 1) to develop a dynamic and mathematical model that allows describing the movement of balancing unit and the boom system of portal crane, when derricking; 2) to propose the way for determining and the methodology for calculating the array of variable design parameters of balancing units; 3) to calculate the optimal ratio of the beam mounting coordinates for balancing units and to study their influence on the imbalance of the portal crane boom system. **Methodology.** To determine the kinematic characteristics of the balancing unit links, dynamic and mathematical models, describing the movement of balance beam with counterweight when

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

derricking, have been developed. The task of balancing boom systems of portal cranes is reduced to determining the design parameters of the device, which would provide balancing of the boom system on the entire range of derricking. It was also developed a methodology for calculating the acceptable varying design parameters of balancing units, taking into account the conditions of mobility, assemblability and the requirements for the values of unbalanced boom torque. **Findings.** Based on mathematical calculations and computer simulation the expediency of using the proposed methodology for determining the design parameters of balancing units has been scientifically substantiated. The developed array of variable data makes it possible to take into account the nature of balancing and optimize the design of counterbalancing devices and boom systems for portal cranes. The authors analyzed the influence of variable parameters on the generally accepted criteria for assessing the quality of the articulated boom system: the system's unbalance, the weight of counterweight, the indices of load and boom unbalanced moments. **Originality.** For the first time, a methodology for determining an array of variable data has been proposed. It makes it possible to form the array of rational design parameters of balancing units. It was developed a local program for complex optimization synthesis, which makes it possible to determine the optimum ratios of the balance beam coordinates, under which the conditions of balance and quality of the portal crane are satisfied. **Practical value.** The proposed methodology for determining the array of varying design parameters can be used in the development organizations for designing new and retrofitting the existing balancing units for portal cranes with articulated boom systems. The proposed methodology was tested at the launch of complex optimization synthesis with respect to cranes, the configuration of which ensures assemblability and mobility of the links of all systems.

Keywords: portal crane; balancing units; articulated boom system; synthesis; design parameters; balance beam; unbalanced moment

REFERENCES

1. Vasilev, F. P. (2011). *Metody optimizatsii* (Vol. 1-2). Moscow: MCNMO. (in Russian)
2. Verkhovod, V. P. (2011). Ispolzovanie programmy MathCAD pri sinteze peredatochnykh rychazhnykh mekhanizmov. *Teoriya mekhanizmov i mashin*, 1(9), 69-76. Retrieved from http://tmm.spbstu.ru/17/verkhovod_17.pdf (in Russian)
3. Voevoda, A. A., & Troshina, G. V. (2017). The realization of the iterative method of the least squares for the estimation of static object parameters in Matlab environment. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Sciences and Informatics*, 1, 28-36. doi: 10.24143/2072-9502-2017-1-28-36 (in Russian)
4. Lepsheni, I., & Serlin, L. G. (1975). Optimalnyy sintez ustroystva dlya uravnoveshivaniya strelovykh sistem portalnykh kranov. *Trudy Leningradskogo politekhnicheskogo instituta: Metallicheskie konstruksii kranov. Issledovanie konveyerov*, 347, 77-84. (in Russian)
5. Loveykin, V. S., & Palamarchuk, D. A. (2014). The driving forces research in mechanism luffing of boom system. *Mining, Construction, Road and Reclamation Machines*, 84, 39-45. (in Russian)
6. Loveikin, V. S., & Romasevych, Y. O. (2017). Rezhymno-parametrychna optymizatsiia tekhnichnykh system. *Mashynobuduvannia*, 19, 90-95. (in Ukrainian)
7. Misyura, V. P. (1980). *Issledovanie i optimalnoe proektirovanie uravnoveshivayushchikh ustroystv strelovykh sistem portalnykh kranov*. (Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk). Ukrainskiy zaochnyy politekhnicheskyy institut, Kharkov. (in Russian)
8. Misyura, V. P., & Zhermunskiy, B. I. (1980). Optimalnoe proektirovanie uravnoveshivayushchikh ustroystv strelovykh sistem por-talnykh kranov. *Vestnik mashinostroeniya*, 7, 41-43. (in Russian)
9. Burdanov, I. V., Popov, D. V., Krivonos, A. N., & Samusko, V. P. (2015). Modelirovanie dinamicheskogo nagruzheniya datchika ogranichitelya gruzovogo momenta v sharnirno-sochlenennykh strelovykh sistemakh portalnykh kranov s pryamolineynym khobotom. *Sovremennye puti razvitiya nauki i obrazovaniya: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Smolensk, July 31, 2015)* Smolensk, 126-129. (in Russian)
10. Nesterov, A. A. (2016). Tekhnologiya lokalnoy razgruzki kornevykh sharnirov strelovykh sistem portalnykh kranov. *Hebezeuge und Fördermittel*, 4(52), 64-71. Retrieved from <http://ptt-journals.net/wp-content/uploads/2016/12/Pidtt-2016-4-9.pdf> (in Russian)
11. Palamarchuk, D. A. (2013). *Optymizatsiia rezhymiv rukhu sharnirno-zhchenovanoi strilovoi systemy krana z horyzon-talnym peremishchenniam vantazhu*. (Avtoreferat dysertatsii kandydata tekhnichnykh nauk). Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury, Kyiv. (in Ukrainian)
12. Petukhov, P. Z., Ksyunin, G. P., & Serlin, L. G. (1985). *Spetsialnye krany*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
13. Gokhberg, M. M. (Ed). (1988). *Spravochnik po kranam* (Vol. 1-2). Leningrad: Mashinostroenie. (in Russian)

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДУ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИТА МЕХАНІЗМИ

14. Suglobov, V. V., & Tkachuk, K. V. (2017). Determination of design parameters determination of design parameters of articulated jib systems of portal crane. *Science and Transport Progress*, 1(67), 156-166. doi: 10.15802/stp2017/92618 (in Russian)
15. Suhlobov, V. V., Mikhieiev, V. A., & Tkachuk, K. V. (2014). Optymizatsiia konstruksii strilovykh system i prystroiv vrvnovazhennia portalnykh kraniv. *Universitetskaya nauka (Vol. 1-5): tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Mariupol, 20–21 May 2014) Mariupol*, 67-68. (in Ukrainian)
16. Tkachuk, K. V. (2017). *Obruntuvannia ratsionalnykh konstruktivnykh parametriv sharnirno-zchlenovanykh strilovykh system portalnykh kraniv*. (Avtoreferat dysertatsii kandydata tekhnichnykh nauk). Ukrainian engineering pedagogics academy, Kharkiv. (in Ukrainian)
17. Clarke, F. (2013). *Functional Analysis, Calculus of Variations and Optimal Control*. New York: Springer Publisher. doi: 10.1007/978-1-4471-4820-3 (in English)
18. Keqin, L., & Cuxiang J. (2009). Inverse Design of a New Double-link Luffing Mechanism and Realization on MATLAB. *Proceedings of the 3rd ICMEM International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics (October 21-23, 2009) Beijing, P. R. China*, 301-304. (in English)
19. Kolonic, F., Poljugan, A., & Petrovic, I. (2006). Tensor Product Model Transformation-based Controller Design for Gantry Crane Control System – An Application Approach. *Acta Polytechnica Hungarica*, 3, 4, 95-112. (in English)
20. Mauri, K., (2012). Intelligent container posirioning helps. *Konecranes Magazine*, 1, 22-27. Retrieved from <http://www.konecranes.com/sites/default/files/download/sagt.pdf> (in English)
21. Seeler, K. A. (2014). *System dynamics: an introduction for mechanical engineers*. New York: Springer Publisher. doi: 10.1007/978-1-4614-9152-1 (in English)
22. Vulfson, I. (2015). *Dynamics of cyclic machines*. Cham: Springer Publisher. doi: 10.1007/978-3-319-12634-0 (in English)

Поступила в редколлегию: 10.04.2018

Принята к печати: 20.07.2018