

УДК 621.875.5:004.942

В. В. СУГЛОБОВ^{1*}, Е. В. ТКАЧУК²

^{1*}Каф. «Подъемно-транспортные машины и детали машин», ГВУЗ «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. «Подъемно-транспортные машины и детали машин», ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (066) 149 23 49, эл. почта t-katya@inbox.ru, ORCID 0000-0002-0309-1644

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЕННЫХ СТРЕЛОВЫХ СИСТЕМ ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ

Цель. В исследовании необходимо: 1) сформировать массив геометрических, весовых и варьируемых данных для автоматизированного синтеза шарнирно-сочлененных стреловых систем; 2) разработать методику расчета и определения рациональных конструктивных параметров шарнирно-сочлененных стреловых систем в зависимости от основных технических параметров порталного крана (максимальный и минимальный рабочие вылеты стрелы, высота подъема груза, значение заднего габарита, грузоподъемность крана); 3) провести изучение адекватности методики на компьютерных моделях порталных кранов. **Методика.** Для определения кинематических характеристик каждого звена шарнирно-сочлененной стреловой системы (стрелы, хобота, оттяжки, противовеса, груза) разработана динамическая и математическая модели, которые позволяют описать движение шарнирно-сочлененной стреловой системы при изменении вылета стрелы. Впервые предложена методика расчета и определения рациональных конструктивных параметров шарнирно-сочлененных стреловых систем в зависимости от технических параметров порталного крана. **Результаты.** С помощью математического моделирования научно обоснована целесообразность использования предложенной методики определения конструктивных параметров шарнирно-сочлененных стреловых систем. Разработанный пакет геометрических, весовых и варьируемых данных позволяет упростить процесс подготовительных расчетов перед автоматизированным синтезом и оптимизировать конструкцию шарнирно-сочлененной стреловой системы порталных кранов. **Научная новизна.** Впервые предложена методика расчета параметрических данных, которые позволяют определить рациональные конструктивные параметры шарнирно-сочлененной стреловой системы. Разработаны локальные программы для комплексного оптимизационного синтеза, позволяющие выполнить отбор наилучшего варианта конструкции одновременно по нескольким критериям качества и функциональным ограничениям. **Практическая значимость.** Предложенная методика расчета конструктивных параметров может быть использована при проектировании новых и модернизации существующих порталных кранов с шарнирно-сочлененными стреловыми системами, что, в свою очередь, снизит материалоемкость и энергопотребление кранов.

Ключевые слова: порталный кран; шарнирно-сочлененная стреловая система; синтез; метод расчета; конструктивные параметры; динамическая модель; математическая модель

Введение

Задача определения размеров шарнирно-сочлененной стреловой системы является важным этапом проектирования порталного крана.

Для решения этой задачи предложены различные подходы [1, 9, 2–4, 14–18], однако ни один из них не дает рекомендаций по выбору геометрических, весовых и варьируемых параметров уравновешенной шарнирно-сочлененной стреловой системы на начальных стадиях расчета.

На структурной схеме шарнирно-сочлененной стреловой системы порталного крана (рис. 1) указаны звенья, геометрические, весовые и варьируемые параметры которых необходимы для начала автоматизированного синтеза стреловой системы и уравновешивающего устройства. К ним относятся: L_x – длина хобота; $L_{кx}$ – длина контрхобота; L_c – длина стрелы; L_o – длина оттяжки; t_x – высота хобота; l_c – расстояние от оси стрелы до оси шарнира крепления тяги; X_{o2} – горизонтальная

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

координата крепления оттяжки от оси шарнира стрелы O_1 ; Y_{o2} – вертикальная координата крепления оттяжки от оси шарнира стрелы O_1 ; L_{\min} – минимальный вылет стрелы; L_{\max} – максимальный вылет стрелы; R_3 – предельное значение величины заднего габарита; α – угол наклона стрелы; ρ – угол отклонения грузового каната; G_c – вес стрелы; G_x – вес хобота; $0.5G_o$ – половина веса оттяжки; G_{Π} – вес противовеса; Q_{Γ} – вес груза; l_k – длина переднего плеча коромысла; l_T – длина тяги противовеса; l – расстояние по вертикали от оси качания стрелы до оси качания коромысла; h – высота коромысла.

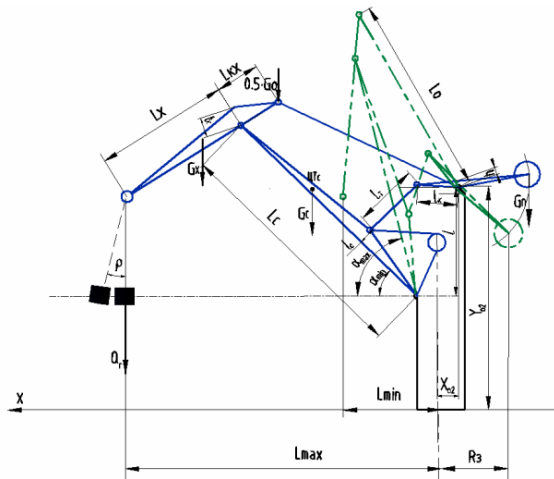


Рис. 1. Шарнирно-сочлененная стреловая система портального крана КПП 16(20)-36-10,5

Fig. 1. Articulated jib system of portal crane KPP 16(20)-36-10,5

Цель

Целью данных исследований является определение рациональных конструктивных параметров шарнирно-сочлененной стреловой системы портального крана и формирование массива геометрических, весовых и варьируемых данных для автоматизированного синтеза. Для достижения цели в исследовании предусмотрено: 1) разработать динамическую и математическую модели, позволяющие описать движение шарнирно-сочлененной стреловой системы при изменении вылета; 2) разработать методику расчета и определения рациональных конструктивных параметров шарнирно-сочлененной

стреловой системы в зависимости от технических параметров портального крана (максимальный и минимальный рабочие вылеты стрелы, высота подъема груза, значение заднего габарита, грузоподъемность крана); 3) изучить адекватность методики на компьютерных моделях портальных кранов.

Методика

Для проведения теоретических исследований, направленных на совершенствование процесса проектирования и синтеза шарнирно-сочлененной стреловой системы, разработана динамическая модель (рис. 2).

1. Разработка динамической модели шарнирно-сочлененной стреловой системы портального крана. Динамическая модель характеризуется геометрическими и инерционными параметрами.

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

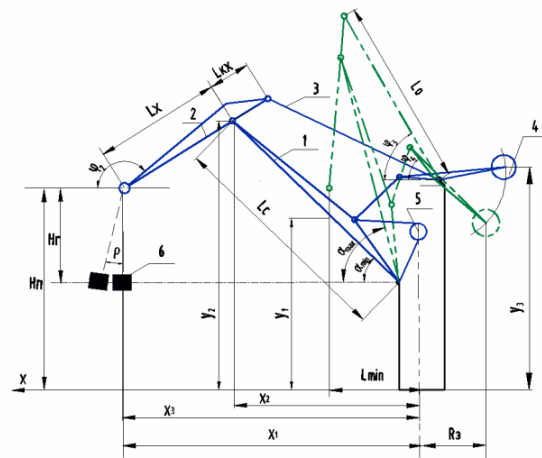


Рис. 2. Динамическая модель шарнирно-сочлененной стреловой системы портального крана:

1 – стрела; 2 – хобот; 3 – оттяжка;

4 – коромысло с противовесом;

5 – привод механизма изменения вылета; 6 – груз

Fig. 2. Dynamic model of articulated jib system of portal crane:

1 – jib, 2 – arm, 3 – jib tie,

4 – rocker with a counterweight,

5 – drive of luffing mechanism 6 – load

К первой группе относят: L_x – длина хобота; L_{cx} – длина контрхобота; L_c – длина стрелы;

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

L_0 – длина оттяжки; H_{Π} – высота подъема груза; H_{Γ} – высота подвеса груза; R_s – 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; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – 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 – массы 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.

2. *Разработка математической модели шарнирно-сочлененной стреловой системы порталного крана.* Входные данные математической модели, исходя из рекомендаций [5, 6], могут состоять из ее кинематической схемы, геометрии масс и характеристик цикла движения. Входными данными являются параметры шарнирно-сочлененной стреловой системы и позиционные критерии; максимальные значения скоростей и ускорений звеньев, главных векторов и главных моментов сил инерции.

Изменение положения стрелы приводит к изменению положений других звеньев, которые определяются координатами хобота – φ_2, y_2 ; оттяжки – φ_3 ; противовеса – φ_4 ; груза – x_1 . За счет сил инерции и собственного веса груз не только изменяет свое положение, которое определяется горизонтальной координатой и высотой подвеса груза, но и совершает колебания в вертикальной плоскости, определяемое координатой ρ .

Для составления обобщенных дифференциальных уравнений движения динамической модели шарнирно-сочлененной стреловой системы используем уравнения Лагранжа второго рода.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_{\alpha}, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\rho}} - \frac{\partial T}{\partial \rho} = Q_{\rho}, \end{cases}$$

где t – время; α, ρ – обобщенные координаты системы; Q_{α}, Q_{ρ} – обобщенные силы, соответствующие координатам α, ρ ; T – кинетическая энергия системы.

Кинетическая энергия шарнирно-сочлененной стреловой системы складывается из кинетической энергии привода механизма изменения вылета $T_{эд}$, стрелы T_c , хобота T_x , оттяжки T_0 , противовеса T_{Π} , груза T_{Γ} .

Угловые и линейные скорости звеньев шарнирно-сочлененной стреловой системы связаны с обобщенными координатами и скоростями зависимостями:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_1 &= \alpha \frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha}; \quad \dot{\varphi}_2 = \alpha \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha}; \quad \dot{\varphi}_3 = \alpha \frac{\partial \varphi_3}{\partial \alpha}; \\ \dot{\varphi}_4 &= \alpha \frac{\partial \varphi_4}{\partial \alpha}; \quad \dot{x}_2 = \alpha \frac{\partial x_2}{\partial \alpha}; \quad \dot{y}_2 = \alpha \frac{\partial y_2}{\partial \alpha}, \end{aligned}$$

где $\frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha}, \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha}, \frac{\partial \varphi_3}{\partial \alpha}, \frac{\partial \varphi_4}{\partial \alpha}, \frac{\partial x_2}{\partial \alpha}, \frac{\partial y_2}{\partial \alpha}$ – операторы передачи движения первого порядка.

Общий момент инерции шарнирно-сочлененной стреловой системы без учета груза:

$$\begin{aligned} J_{cc} &= J \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha} \right)^2 + J_1 + J_2 \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha} \right)^2 + \\ &+ m_2 \left(\frac{\partial x_2}{\partial \alpha} + \frac{\partial y_2}{\partial \alpha} \right)^2 + \\ &+ J_3 \left(\frac{\partial \varphi_3}{\partial \alpha} \right)^2 + J_4 \left(\frac{\partial \varphi_4}{\partial \alpha} \right)^2. \end{aligned}$$

Для вычисления обобщенных сил придадим системе возможное перемещение $\delta \alpha > 0$, в результате получим:

$$\begin{cases} Q_{\alpha} = M \frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha} + mg \frac{x_1 - x_2}{H} \frac{\partial x_3}{\partial \alpha}, \\ Q_{\rho} = -mg \frac{x_1 - x_3}{H}, \end{cases}$$

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

где M – момент на валу электродвигателя привода механизма изменения вылета; g – ускорение свободного падения.

В результате преобразований получено дифференциальное уравнение движения шарнирно-сочлененной стреловой системы при изменении вылета [6–8, 10]

$$\begin{cases} J_{cc} \ddot{\alpha} + \frac{1}{2} \frac{\partial J_{cc}}{\partial \alpha} \dot{\alpha}^2 = M \frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha} + mg \frac{x_1 - x_2}{H} \frac{\partial x_3}{\partial \alpha}, \\ m \ddot{x}_1 = -mg \frac{x_1 - x_3}{H}. \end{cases}$$

3. Методика расчета и определение рациональных конструктивных параметров шарнирно-сочлененной стреловой системы. Определяющими исходными параметрами, имеющими конечные значения при проектировании портального крана, являются: L_{\min} – минимальный вылет стрелы; L_{\max} – максимальный вылет стрелы; R_3 – предельное значение величины заднего габарита; H_{Π} – высота подъема груза. Эти параметры задаются заказчиком либо назначаются исходя из требований к технической характеристике конкретного крана.

Значениями всех остальных параметров обычно необходимо задаваться в качестве входных данных для выполнения расчета, синтеза и оптимизации шарнирно-сочлененной стреловой системы. Количество этих неопределенных параметров и диапазон их возможных геометрических значений достаточно велики, что затрудняет работу и приводит к большому числу вариантов вычислений.

Ранее [11–13] авторами выведены математические зависимости между заданными основными характеристиками портальных кранов и значениями неопределенных параметров, которые позволяют значительно сократить число таких параметров.

Расчет выполняется автоматически в программе MathCAD, в результате которого получаем массив геометрических параметров шарнирно-сочлененной стреловой системы (рис. 3).

Исследование показало, что при одинаковом значении грузоподъемности и максимального вылета длины звеньев шарнирно-сочлененной стреловой системы значительно отличаются [12].

Экспериментально установлено, что у кранов одинаковой грузоподъемности усредненные веса одного погонного метра стрелы, хобота, оттяжки примерно одинаковы. Это дает возможность принять длины стрелы, хобота и оттяжки в качестве основных характеристик для определения весовых параметров других звеньев стреловой системы.

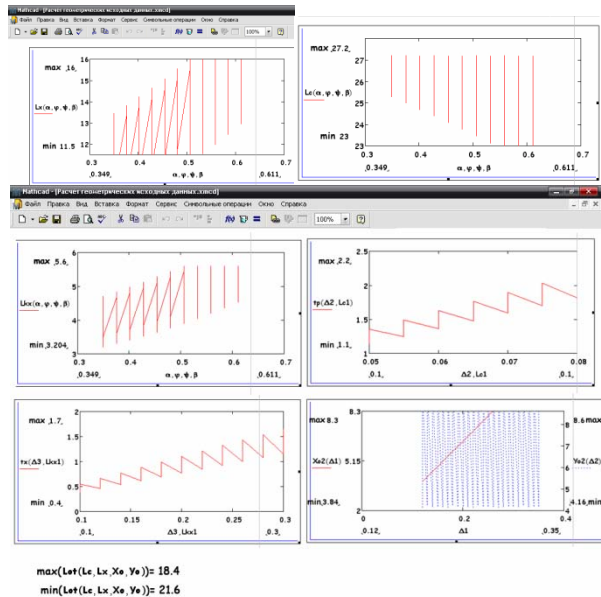


Рис. 3. Определение геометрических параметров шарнирно-сочлененной стреловой системы в программе MathCAD

Fig. 3. Determination of geometrical parameters of the articulated jib system in MathCAD program

На основе обработанных статистических данных изученных портальных кранов получены значения веса q одного погонного метра звеньев шарнирно-сочлененной стреловой системы (табл. 1) и рассмотрена его взаимосвязь с номинальной грузоподъемностью крана $q = f(Q)$.

Экспериментально установленные значения усредненного веса 1 погонного метра каждого элемента в зависимости от грузоподъемности крана описываются разными аналитическими зависимостями, определение которых выполнено методом аппроксимации. Поиск аппроксимирующих функций, максимально приближенных к экспериментальным данным, осуществлен посредством программы MS Excel методом наименьших квадратов.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

В результате установлено, что зависимость $q = f(Q)$ для стрелы наилучшим образом описывается линейной функцией $q = 316,99 + 9,92Q$; для хобота – квадратичной функцией $q = -113,21 + 27,35Q - 0,2Q^2$; для оттяжки – квадратичной функцией $q = 41,03 + 5,453Q - 0,049Q^2$.

Таблица 1

Вес 1 погонного метра элементов шарнирно-сочлененной стреловой системы

Table 1

Weight of 1 long meter of the articulated jib system elements				
Тип крана	Q, m	Вес 1 п.м. элементов ШСС		
		Стрела	Хобот	Оттяжка
Альбат-рос	20	388	287	130
		404	291	117
Марк-25	25	689	505	163
Сокол	32	479	393	147
Азовец		713	725	160
Марк-36	36	689	515	168
Кондор	40	834	618	183
Марк-40		789	710	198
Марк-45		735	740	191

Определение усредненного веса 1 погонного метра стрелы, хобота и оттяжки возможно при использовании построенных графиков (рис. 4), что позволяет рассчитать прогнозируемый вес каждого звена шарнирно-сочлененной стреловой системы, кг:

$$m_c = \mu \cdot S \cdot L \cdot q,$$

где μ – коэффициент, учитывающий отклонение от теоретической оптимальной формы; S – коэффициент, учитывающий прочность материала; L – длина звена стреловой системы; q – вес 1 погонного метра звена стреловой системы.

В реальной конструкции крана возможности варьирования параметрами очень ограничены. Изменение некоторых параметров вообще невозможно, так как это вызовет значительные конструктивные изменения крана.

В качестве варьируемых параметров приняты длины звеньев, значения которых существенно влияют на общую компоновку и материалоёмкость шарнирно-сочлененной стреловой системы (рис. 5).

В результате определен массив варьируемых параметров (табл. 2) и исследовано влияние координаты k и координаты l на общепринятые критерии оценки качества шарнирно-сочлененной стреловой системы: неуравновешенность системы, вес противовеса, показатели грузового и стрелового неуравновешенных моментов.

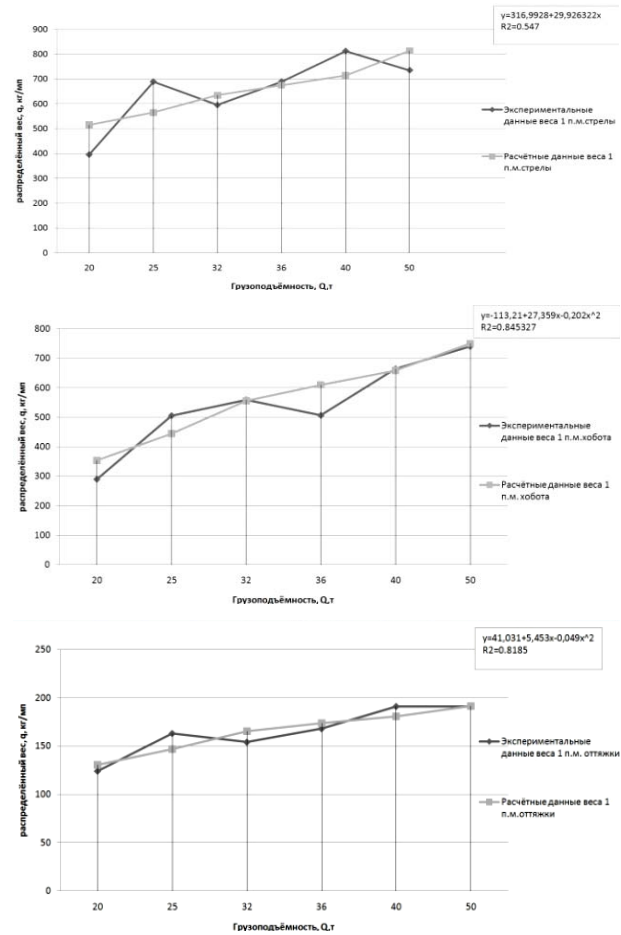


Рис. 4. Графики зависимости $q=f(Q)$ для стрелы, хобота и оттяжки

Fig. 4. Dependency graphs of $q=f(Q)$ for jib, arm and jib tie

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

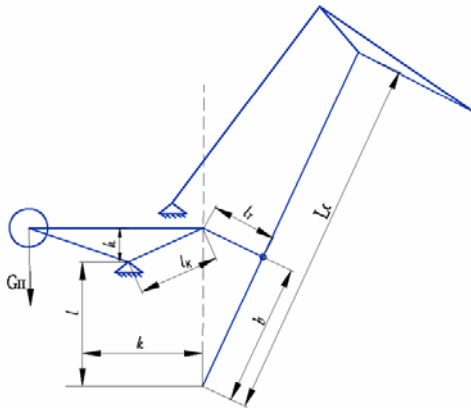


Рис. 5. Схема шарнирно-сочлененной стреловой системы с указанием варьируемых параметров: b – расстояние от оси качания стрелы до места крепления тяги противовеса; l_k – длина переднего плеча коромысла;

l_T – длина тяги противовеса; k – расстояние по горизонтали от оси качания стрелы до оси качания коромысла; l – расстояние по вертикали от оси качания стрелы до оси качания коромысла; h – высота коромысла

Fig. 5. Diagram of the articulated jib system with indication of variable parameters:

b – distance from jib trunnion to counter-jib tie mounting place; l_k – length of front rocker arm; l_T – length of counter-jib tie; k – horizontal distance from jib trunnion to rocker trunnion; l – vertical distance from jib trunnion to rocker trunnion; h – rocker height

Таблица 2

Массив варьируемых параметров

Table 2

Array of variable parameters

Параметр	Значение	
	Минимум	Максимум
l_k , м	3,1	3,6
l_T , м	8,1	9,0
h , м	0,5	0,8
k , м	4,54	5,53
l , м	11,854	12,84
G_{II} , кг	21 500	27 000

Данные исследования показали:

1. Оптимальные значения названных критериев качества достигаются при $k = 4,63$ м, $l = 11,94$ м.

2. Уменьшать значения параметров возможно относительно оптимальных значений k и l не более, чем на 0,1 м. Дальнейшее уменьшение недопустимо по ограничениям угла захода противовеса и обеспечения собираемости и подвижности звеньев стреловой системы и системы уравнивания.

3. Изменение параметра l в наибольшей степени влияет на качество уравнивания системы (неуравновешенность системы, вес противовеса, показатели грузового и стрелового неуравновешенных моментов).

4. Характер изменения неуравновешенного момента в оптимизированном варианте ($k = 4,63$ м, $l = 11,94$ м) полностью отвечает всем требованиям к системе уравнивания.

5. При уменьшении параметров k и l неуравновешенный момент по знаку (направлению) соответствует нормативным значениям, но процент неуравновешенности увеличивается. При увеличении параметров k и l неуравновешенный момент в зоне минимального вылета принимает нежелательную направленность, вызывающую опасность запрокидывания стрелы, а неуравновешенность достигает 23 %.

4. Экспериментальное исследование адекватности предложенной методики на компьютерных моделях порталных кранов. Выполнена апробация предложенного метода формирования массива геометрических параметров шарнирно-сочлененной стреловой системы применительно к кранам, компоновка которых обеспечивает собираемость и подвижность звеньев стреловой системы и уравнивающего устройства (табл. 3).

Метод формирования значений весовых параметров для программы синтеза шарнирно-сочлененной стреловой системы проверен путем сравнительного анализа с весовыми параметрами кранов, характеризующихся относительно небольшой материалоемкостью (табл. 4).

Сравнительный анализ подтверждает правильность принятого метода определения основных геометрических и весовых параметров для синтеза шарнирно-сочлененной стреловой системы и показывает, что вес звеньев изученных кранов завышен.

Таблица 3

Анализ геометрических параметров шарнирно-сочлененной стреловой системы

Table 3

Analysis of geometrical parameters of the articulated jib system

Тип крана	Показатели
Марк-25	$L_c = 27,44$ м $L_x = 16,3$ м $L_{кх} = 5,7$ м $L_o = 21,8$ м
Азовец	$L_c = 27,35$ м $L_x = 15$ м $L_{кх} = 4,8$ м $L_o = 21,3$ м
Марк-40	$L_c = 26,04$ м $L_x = 11,93$ м $L_{кх} = 4,32$ м $L_o = 20,6$ м

Примечание: результаты расчета: $L_c = 23...27,2$ м, $L_x = 11.5...16$ м, $L_{кх} = 3.2...5,6$ м, $L_o = 18.4...21,6$ м; отклонения от расчета: 0,88 %, 1,87 %, 1,78 %, 0,92 %.

Таблица 4

Анализ весовых параметров шарнирно-сочлененной стреловой системы

Table 4

Analysis of weight parameters of the articulated jib system

Результаты расчета	Модели порталных кранов	Отклонение от расчета, %
	Альбатрос	
$G_c = 21\,415$ кг	$G_c = 20\,000$ кг	7 %
$G_x = 11\,557$ кг	$G_x = 14\,425$ кг	20 %
$G_o = 4\,303$ кг	$G_o = 4\,340$ кг	1 %

Окончание табл. 4

End of Table 4

Результаты расчета	Модели порталных кранов	Отклонение от расчета, %
	Марк-25	
$G_c = 21\,415$ кг	$G_c = 26\,985$ кг	7 %
$G_x = 11\,557$ кг	$G_x = 19\,190$ кг	20 %
$G_o = 4\,303$ кг	$G_o = 5\,910$ кг	1 %

Результаты

С помощью компьютерного моделирования научно обоснована эффективность методики определения рациональных конструктивных параметров шарнирно-сочлененных стреловых систем. Разработанный пакет геометрических, весовых и варьируемых параметров позволяет упростить процесс подготовки исходных данных перед автоматизированным синтезом и, в конечном счете, оптимизировать конструкцию шарнирно-сочлененной стреловой системы порталных кранов.

Научная новизна и практическая значимость

Впервые предложена методика расчета параметрических данных, которая дает возможность определять рациональные конструктивные параметры шарнирно-сочлененных стреловых систем порталных кранов. Разработаны локальные программы для комплексного оптимизационного синтеза, позволяющие выполнить отбор наилучшего варианта конструкции одновременно по нескольким критериям качества и функциональным ограничениям.

Предложенная методика определения рациональных конструктивных параметров может использоваться при проектировании новых и модернизации существующих шарнирно-сочлененных стреловых систем, что, в свою очередь, будет способствовать снижению материалоемкости и энергопотребления порталных кранов.

Выводы

В работе представлен упрощенный метод определения исходных данных для автоматизированного расчета, синтеза и оптимизации

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

шарнирно-сочлененной стреловой системы. Метод не требует специального программного обеспечения, так как разработки выполнены на базе простых, распространенных программ MS Excel та MathCAD.

Авторами выполнен анализ влияния варьируемых параметров на общепринятые критерии оценки качества шарнирно-сочлененной стреловой системы: неуравновешенность системы,

вес противовеса, показатели грузового и стрелового неуравновешенных моментов.

С помощью компьютерного моделирования выполнена апробация предложенной методики расчета конструктивных параметров шарнирно-сочлененных стреловых систем применительно к кранам, компоновка которых обеспечивает собираемость и подвижность звеньев всех систем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андрианов, Е. Н. Актуальные вопросы конструирования и расчета механизма изменения вылета стрелы порталных кранов / Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов // Журн. ун-та водных коммуникаций. – 2010. – Вып. 2. – С. 81–92.
2. Гильдеев, Д. Южмонтаж смонтировал порталный кран в Измаильском порту / Д. Гильдеев // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2010. – № 8. – С. 11–12.
3. Горский, Б. Е. Шарнирно-сочлененные укосины порталных кранов / Б. Е. Горский. – Москва : Машгиз, 1965. – 185 с.
4. Душанин, Я. С. Оптимізація сталого руху зміни вильоту врівноваженої шарнірно-зчленованої стрілової системи крана : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05 / Душанин Ян Станіславович ; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ, 2001. – 20 с.
5. Ловейкін, В. С. Метод мінімізації коливань вантажу в шарнірно-зчленованій стріловій системі крана під час зміни вильоту / В. С. Ловейкін, Д. А. Паламарчук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2010. – № 76. – С. 35–40.
6. Ловейкін, В. С. Теорія технічних систем : навч. посіб. / В. С. Ловейкін, І. І. Назаренко, О. Г. Онищенко. – Київ ; Полтава : ІЗМН : ПДТУ, 1998. – 176 с.
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. заоч. политех. ин-т. – Харьков, 1980. – 24 с.
8. Михеев, В. А. Автоматизированное проектирование уравновешивающих устройств стреловых систем порталных кранов / В. А. Михеев, В. П. Мисюра // Підйомно-транспортна техніка : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2005. – Вип. 3 (15). – С. 15–28.
9. Моделирование динамического нагружения датчика ограничителя грузового момента в шарнирно-сочлененных стреловых системах порталных кранов с прямолинейным хоботом / И. В. Бурданов, Д. В. Попов, А. Н. Кривонос, В. П. Самусько // Современ. пути развития науки и образования : материалы науч.-практ. конф., г. Смоленск (31 июля 2015 г.) / ООО «Новаленсо». – Смоленск, 2015. – С. 126–129.
10. 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 буд-ва і архітектури. – Київ, 2013. – 25 с.
11. Суглобов, В. В. Методика определения входных геометрических данных для совместного автоматизированного расчета, синтеза и оптимизации стреловой системы и системы уравновешивания порталного крана / В. В. Суглобов, В. А. Михеев, Е. В. Ткачук // Підйомно-транспортна техніка. – 2013. – № 1 (37). – С. 86–96.
12. Суглобов, В. В. Методика определения исходных весовых данных для проектирования стреловой системы порталного крана / В. В. Суглобов, В. А. Михеев, Е. В. Ткачук // Вестн. Харьк. нац. автомоб.-дорож. ун-та : сб. науч. тр. – Харьков, 2014. – Вып. № 65-66. – С. 198–204.
13. Суглобов, В. В. Метод расчета определения входных данных для автоматизированного проектирования шарнирно-сочлененной стреловой системы порталного крана / В. В. Суглобов, В. А. Михеев, Е. В. Ткачук // Вестн. Харьк. нац. автомоб.-дорож. ун-та : сб. науч. тр. – Харьков, 2012. – Вып. № 57. – С. 264–269.
14. 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. – P. 301–304.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

15. 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.
16. 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 : 25.01.2017.
17. Palis, S. Anti-Sway System for Slewing Cranes / S. Palis, F. Palis, M. Lehnert // 22nd Intern. Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC. – Ferrara, 2005. – P. 9–18.
18. Salleh, S. B. Modeling and Control of a Boom Crane [Электронный ресурс] / S. B. Salleh / Faculty of Electrical Engineering Universiti Teknologi Malaysia. – 2010. – 60 p. – Режим доступа: http://portal.fke.utm.my/libraryfke/files/541_SAZILAHBINTISALLEH2010.pdf. – Загл. с экрана. – Проверено : 25.01.2017.

В. В. СУГЛОБОВ^{1*}, К. В. ТКАЧУК²

^{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. «Підйомно-транспортні машини і деталі машин», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (066) 149 23 49, ел. пошта t-katya@inbox.ru, ORCID 0000-0002-0309-1644

ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНИХ СТІЛОВИХ СИСТЕМ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ

Мета. У дослідженні необхідно: 1) сформулювати масив геометричних, вагових та варійованих даних для автоматизованого синтезу шарнірно-зчленованих стрілових систем; 2) розробити методику розрахунку й визначення раціональних конструктивних параметрів шарнірно-зчленованих стрілових систем в залежності від основних технічних параметрів порталного крана (максимальний і мінімальний робочі вильоти стріли, висота підйому вантажу, значення заднього габариту, вантажопідйомність крана); 3) провести вивчення адекватності методики на комп'ютерних моделях порталних кранів. **Методика.** Для визначення кінематичних характеристик кожної ланки шарнірно-зчленованої стрілової системи (стріли, хобота, відтягнення, противаги, вантажу) розроблені динамічна та математична моделі, які дозволяють описати рух шарнірно-зчленованої стрілової системи при зміні вильоту стріли. Вперше запропоновано методику розрахунку і визначення раціональних конструктивних параметрів шарнірно-зчленованих стрілових систем в залежності від технічних параметрів порталного крана. **Результати.** За допомогою математичного моделювання науково обґрунтовано доцільність використання запропонованої методики визначення конструктивних параметрів шарнірно-зчленованих стрілових систем. Розроблений пакет геометричних, вагових і варійованих даних дозволяє спростити процес підготовчих розрахунків перед автоматизованим синтезом та оптимізувати конструкцію шарнірно-зчленованої стрілової системи порталних кранів. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано методику розрахунку параметричних даних, які дозволяють визначити раціональні конструктивні параметри шарнірно-зчленованої стрілової системи. Розроблено локальні програми для комплексного оптимізаційного синтезу, які дозволяють виконати відбір найкращого варіанту конструкції одночасно за кількома критеріями якості та функціональними обмеженнями. **Практична значимість.** Запропонована методика розрахунку конструктивних параметрів може бути використана при проектуванні нових та модернізації існуючих порталних кранів із шарнірно-зчленованими стріловими системами, що, в свою чергу, знизить матеріалоемність та енергоспоживання кранів.

Ключові слова: порталний кран; шарнірно-зчленована стрілова система; синтез; метод розрахунку; конструктивні параметри; динамічна модель; математична модель

V. V. SUGLOBOV^{1*}, K. V. TKACHUK²

^{1*}Dep. «Lifting-Transport Machines 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. «Lifting-Transport Machines and Details of Machines», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (066) 149 23 49, e-mail t-katya@inbox.ru, ORCID 0000-0002-0309-1644

DETERMINATION OF DESIGN PARAMETERS OF ARTICULATED JIB SYSTEMS OF PORTAL CRANE

Purpose. The study involves: 1) formation of an array of geometry, weight and variable data for the automated synthesis of articulated jib systems; 2) development of methodology of calculation and determination of rational design parameters of the articulated jib systems, depending on the main technical parameters of the portal crane (maximum and minimum working radius, cargo lift height, tail radius value, carrying capacity of crane); 3) conducting of the study of the methodology adequacy on computer portal crane models. **Methodology.** To determine the kinematic characteristics of each link of the articulated jib system (boom, arm, jib tie, counterweight, load) we developed a dynamic and mathematical models that allow us to describe the movement of the articulated jib system when luffing. For the first time the technique of calculation and determination of rational design parameters of the articulated jib systems depending on the technical parameters of the portal crane. **Findings.** The conducted mathematical modeling allowed scientifically proving the usefulness of the proposed methodology for determining the design parameters of the articulated jib systems. The designed package of geometry, weight and variable data helps to simplify the process of preparatory calculations before the automated synthesis and to optimize the design of the articulated jib systems of portal cranes. **Originality.** For the first time the work proposes the technique for calculation of the parametric data that allow us to determine the rational design parameters of the articulated jib system. There are developed local programs for the integrated optimization synthesis that make it possible to select the best design option simultaneously by several quality criteria and functional constraints. **Practical value.** The proposed method of calculating the design parameters can be used in the design of new and modernization of existing portal cranes with the articulated jib systems, which, in turn, will reduce the material and energy consumption of the cranes.

Keywords: portal crane; articulated jib system; synthesis; calculation method; design parameters; dynamic model; mathematical model

REFERENCES

1. Andrianov, E. N., & Ivanov, A. N. (2012). Topical problems of construction and design of the gantry crane boom outreach control mechanisms. *Zhurnal univyersityeta vodnykh kommunikatsiy*, 2(14), 81-92.
2. Gildeev, D. (2010). Yuzhmormontazh smontiroval portalnyy kran v Izmailskom portu. *Podemnyye sooruzheniya. Spetsialnaya tekhnika*, 8, 11-12.
3. Gorskiy, B. Y. (1965). *Sharnirno-sochlenennyye ukosiny portalnykh kranov*. Moscow: Mashgiz.
4. Dushanin, Y. S. (2001). *Optimisation of the established mode of change in radius counterbalanced articulated boom system of the crane*. (Author's PhD thesis). Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv.
5. Loveikin, V. S., & Palamarchuk, D. A. (2010). Metod minimizatsii kolyvan vantazhu v sharnirno-zchlenovanii strilovii systemi krana pid chas zminy vyhotu. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*, 76, 35-40.
6. Loveikin, V. S., Nazarenko, I. I., & Onishenko, O. G. (1998). *Teoriia tekhnichnykh system*. Kyiv, Poltava: Poltava State Technical University.
7. Misyra, V. P. (1980). *Issledovaniye i optimalnoye proektirovaniye uravnoveshivayushchikh ustroystv strelovykh sistem portalnykh kranov*. (Author's PhD thesis). Ukrainskiy zaochnyy politekhnicheskyy institute, Kharkov.
8. Mikheev, V. A., & Misyra, V. P. (2005). Avtomatizirovannoye proyektirovaniye uravnoveshivayushchikh ustroystv strelovykh sistem portalnykh kranov. *Pidiomno-transportna tekhnika*, 3(15), 15-28.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

9. Byrdanov, I. V., Popov, D. V., Krivonos, A. N., & Samusko, V. P. (2015). Modelirovaniye dinamicheskogo nagruzheniya datchika ogranichatelya gruzovogo momenta v sharnirno-sochlenennykh strelovyykh sistemakh portalnykh kranov s pryamolineynym khobotom. *Proceedings of the Modern Ways of Development of Science and Education. July 31, 2015, Smolensk*, 126-129.
10. Palamarchuk, D. A. (2013). *Optimizatsiia rezhymiv rukhu sharnirno-zchlenovanoi strilovoi systemy krana z horizontalnym peremishchenniam vantazhu.* (Author's PhD thesis). Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv.
11. Suglobov, V. V., Mikheev, V. A., & Tkachuk, K. V. (2013). Metodika opredeleniya vkhodnykh geometricheskikh dannykh dlya sovместnogo avtomatizirovannogo rascheta, sinteza i optimizatsii strelovoy systemy i systemy uravnoveshivaniya portalnogo krana. *Pidiomno-transportna tekhnika, 1(37)*, 86-96.
12. Suglobov, V. V., Tkachuk, K. V., & Mikheev, V. A. (2014). A calculating technique for determining weight input data to design boom systems of overhead gantry cranes. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University, 65-66*, 198-204.
13. Suglobov, V. V., Mikheev, V. A., & Tkachuk, K. V. (2012). A method of input data calculation for automated design of gantry crane articulated systems. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University, 57*, 264-269.
14. 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.
15. Kolonic, F., Poljungan, 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.
16. Kaarre, M. (2012). Intelligent Container Positioning Helps. *Way Up, 1*, 22-27. Retrieved from <http://wayup.konecranes.com/sites/wayup/files/wu0112-www-hq.pdf>
17. Palis, S., Palis, F., & Lehnert, M. (2005). Anti-Sway System for Slewing Cranes. *Proceedings of the 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC 2005, September, 11-14, 2005, Ferrara, Italy*, 9-18.
18. Salleh, S. B. (2010). Modeling and Control of a Boom Crane. *Faculty of Electrical Engineering Universiti Teknologi Malaysia*. Retrieved from http://portal.fke.utm.my/libraryfke/files/541_SAZILAHBINTISALLEH2010.pdf.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. С. С. Самотугиным (Украина); д.т.н., проф. А. А. Андилахаем (Украина); д.т.н., проф. А. А. Иценко (Украина)

Поступила в редколлегию: 19.10.2016

Принята к печати: 12.01.2017