

УДК 621.875

Паламарчук Д. А., к.т.н., доцент (Киевский национальный университет строительства и архитектуры), **Голотюк Н. В., к.т.н., старший преподаватель** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ СТРЕЛОВОЙ СИСТЕМЫ КРАНА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ МЕХАНИЗМОМ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫЛЕТА

Представлены результаты экспериментального исследования динамики движения шарнирно-сочлененной уравновешенной стреловой системы крана при автоматическом управлении электродвигателем механизма изменения вылета.

Ключевые слова: стреловая система, физическая модель, оттяжка, зубчатая рейка, усилия, датчик.

В работах отечественных и зарубежных ученых глубоко исследована проблема раскачивания груза, подвешенного на канате при его перемещении [1, 2, 3]. Значительное внимание уделено влиянию раскачивания груза на общее снижение эффективности различных типов кранов при проведении грузоподъемных и перегрузочных работ. Установлено влияние раскачивания на увеличение продолжительности рабочего цикла крана, снижение маневренности крана, ухудшение условий труда крановщика и обслуживающего персонала, а также существенное увеличение динамических нагрузок на звенья, механизмы и кран в целом [2, 4]. Увеличение динамических нагрузок отрицательно сказывается на звеньях и кинематических парах в кранах с подъемной стрелой, в частности, в кранах с шарнирно-сочлененной стреловой системой [5, 6, 7]. Для предотвращения раскачивания груза и для уменьшения амплитуды раскачиваний применяются приспособления различных конструкций [8], а также различные системы управления электродвигателями и тормозами механизмов крана [5, 9]. Однако, использование приспособлений уменьшения раскачивания груза не всегда позволяет достичь желаемого результата, а в большинстве случаев еще и увеличивает вес грузозахватного устройства и полиспастной системы, что также увеличивает нагрузки на конструкцию крана. Большинство современных систем управления электродвигателями не позволяют обеспечить плавную работу механизмов при пуске и тор-

можении двигателя, что также приводит к раскачиванию груза. Особенно это сказывается при перемещении груза на небольшие расстояния, когда рабочий цикл крана состоит только с процессов разгона и торможения [5]. К тому же, большинство указанных способов невозможно применить в кранах с шарнирно-сочлененной стреловой системой из-за ее кинематических особенностей [9].

Предложено конструкцию новой системы управления электродвигателем механизма изменения вылета стреловой системы, которая состоит из бортового компьютера с программой управления частотным преобразователем, частотного преобразователя и электродвигателя привода. В программу управления частотным преобразователем вводится оптимальный закон изменения вылета стреловой системы, который обеспечивает перемещение груза с наименьшими колебаниями, которые не влияют на увеличение нагрузок в звеньях стреловой системы. В соответствии с полученными данными частотный преобразователь постоянно изменяет частоту электрического тока, который подается на электродвигатель указанного механизма. Таким образом, изменение частоты тока дает возможность постоянно менять частоту вращения ротора электродвигателя, а соответственно, и скорость движения всей стреловой системы. Определение и анализ оптимальных законов, которые позволяют производить перемещение груза с наименьшими колебаниями, приведено в трудах [10, 11].

Целью данной работы есть экспериментальное подтверждение теоретических исследований, а именно – уменьшение раскачивания груза и улучшение динамических характеристик стреловой системы при движении за оптимальными законами.

Исследования динамики движения стреловой системы при перемещении груза проведены на физической модели порталного крана. Эта модель спроектирована и изготовлена в соответствии с определенными коэффициентами подобия, и позволяет в некотором масштабе воспроизвести динамические процессы движения стреловой системы порталного крана МАРК-40 [12]. Управление электродвигателем механизма изменения вылета осуществлено в автоматическом режиме с помощью частотного преобразователя FR-S540-E-2.2K-EC фирмы Mitsubishi Electric и программы «Оптимальные режимы 1.2», при горизонтальном перемещении груза с массой 16 кг, которая соответствует средней грузоподъемности 19200 кг для крана МАРК-40. Управление электродвигателем осуществляется в соответствии с оптимальным законом движения стреловой системы, который обеспечивает минимальное отклонение между горизонтальным ускорением центра масс груза и ускорением крайней точки хобота [10]. Для отображения кар-

тины динамики движения стреловой системы (рис. 1), были исследованы такие параметры: угол наклона стрелы к горизонту α , угол отклонения грузового каната от вертикали ψ , внутренние продольные усилия в оттяжке и зубчатой рейке, частота вращения электродвигателя.

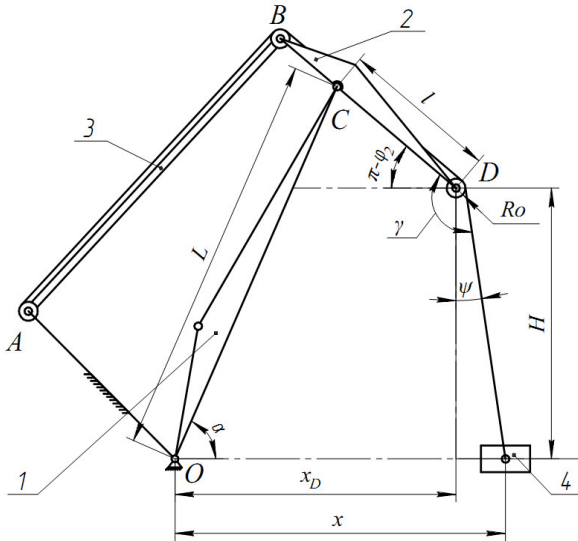


Рис. 1. Схема шарнирно-сочлененной стреловой системы:
1 – стрела; 2 – прямой хобот; 3 – оттяжка; 4 – груз

Измерение указанных параметров проведено с помощью измерительного комплекса, который состоит из: потенциметрического датчика угла наклона стрелы, индуктивного датчика угла отклонения грузового каната ДСД-523, тензометрического датчика оттяжки, тензометрического датчика зубчатой рейки и датчика частоты вращения ротора электродвигателя ДЧВ-1; аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) Spider-8; персонального компьютера с программой регистрации данных Catman Express 4.5 [13]. Аналоговые данные с датчиков передаются на АЦП, который преобразует их в пакеты цифровой информации, и передает на компьютер для дальнейшей обработки.

Угол α является угловой координатой стрелы, и показывает ее наклон к горизонту. Исследование этого угла нужно для фиксирования положения стрелы, а соответственно и всех звеньев стреловой системы в каждый момент времени. На рис. 2 приведен график изменения угла наклона стрелы к горизонту α относительно реального времени, при

изменении вылета от минимального значения до максимального.

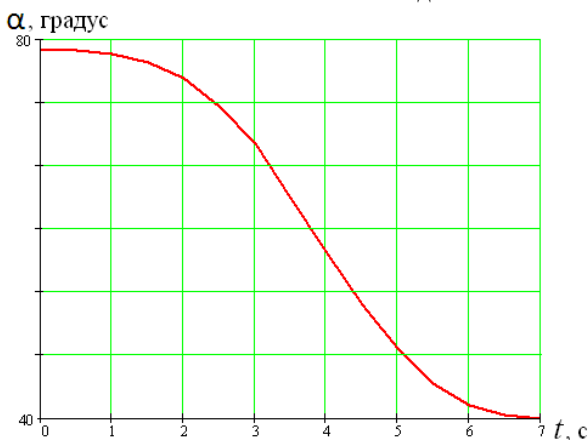


Рис. 2. График изменения угловой координаты стрелы

Построено график изменения угла отклонения грузового каната от вертикали ψ . Поскольку, в ходе экспериментальных исследований был определен угол отклонения каната от хобота γ (рис. 1), то угол отклонения грузового каната от вертикали ψ определяется аналитически, с учетом геометрических особенностей стреловой системы [4].

Угол наклона хобота к горизонту определяется выражением

$$\pi - \varphi_2 = \arcsin\left(\frac{L \sin \alpha - H}{l}\right), \quad (1)$$

где L – длина стрелы; l – длина хобота; H – длина свисающей части грузового каната.

С учетом зависимости (1) выражение для определения угла отклонения грузового каната от вертикали будет выглядеть как

$$\psi = \gamma - (\pi - \varphi_2) - 90^\circ = \gamma - \arcsin\left(\frac{L \sin \alpha - H}{l}\right) - 90^\circ. \quad (2)$$

На основании выражения (2) и массива измеренных данных угла γ , построено график изменения угла ψ в зависимости от времени (рис. 3).

Проанализировав полученный график видно, что наибольшее отклонение каната от вертикали возникает вначале движения стреловой системы, однако максимальный угол отклонения при этом не превышает $6,8^\circ$, что почти в два раза меньше от угла отклонения, который возникает при ручном управлении механизмом изменения вылета [4, 9]. Кроме этого, при остановке электродвигателя, а соответственно и

всей стреловой системы, происходит точная остановка груза без остаточных колебаний.

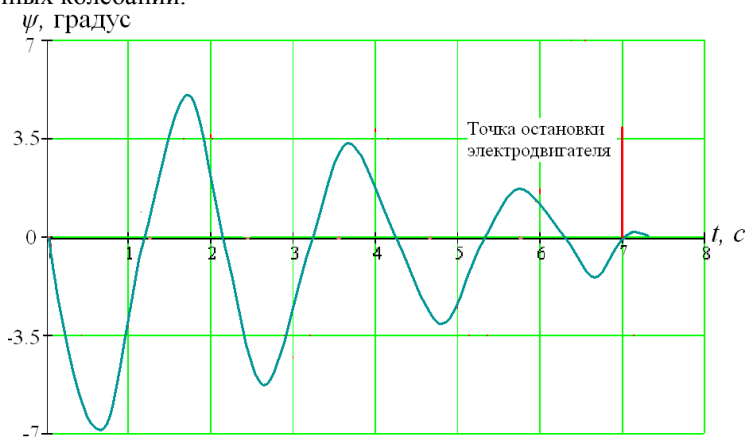


Рис. 3. График изменения угла отклонения грузового каната от вертикали

Для исследования горизонтальной координаты центра масс груза записано выражение, которое объединяет угловую координату стрелы и угол отклонения грузового каната от вертикали с помощью кинематических соотношений звеньев стреловой системы крана (рис. 2)

$$x_5 = L \cos \alpha - l \cos \varphi_2 + H \sin \psi + R_0, \quad (3)$$

где φ_2 – угловая координата хобота, $R_0=0,05\text{ м}$ – радиус концевой обводной блоки хобота модели.

На основании полученной зависимости, построено график изменения горизонтальной координаты центра масс груза x_5 (рис. 4), при автоматическом управлении электродвигателем механизма изменения вылета модели.

Для исследования степени влияния раскачивания груза на привод механизма изменения вылета, в частности, на электродвигатель, построен график изменения частоты вращения ротора электродвигателя n в процессе изменения вылета стреловой системы. Для этого использован массив данных, полученный с помощью датчика частоты вращения ДЧВ-1, и зависимость, которая позволяет определить частоту вращения ротора электродвигателя в любой момент времени с учетом особенностей АЦП и самого датчика

$$n = \frac{60\nu}{Kz}, \quad (4)$$

где ν – частота прохождения зубьев звездочки ротора мимо датчика

(c^{-1}), значення взяті з масива даних датчика ДЧВ-1; $z=28$ – кількість зубців зірочки ротора; $K=50c^{-1}$ – частота опросів датчика.

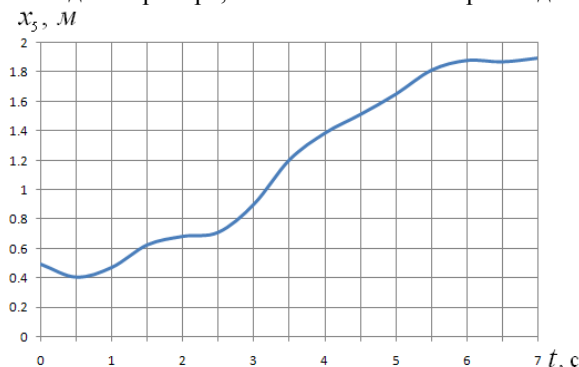


Рис. 4. График изменения горизонтальной координаты центра масс груза

На основании зависимости (4), построен график изменения частоты вращения ротора электродвигателя механизма изменения вылета, при движении стреловой системы от минимального вылета до максимального (рис. 5).

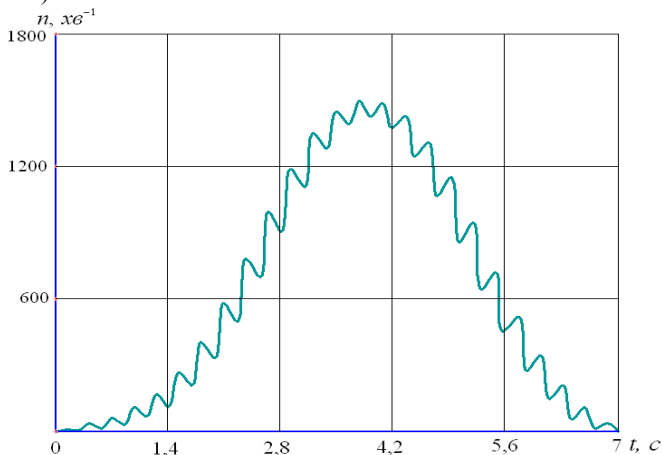


Рис. 5. График изменения частоты вращения ротора электродвигателя

Анализируя график видно, что при автоматическом управлении, частотный преобразователь плавно изменяет частоту вращения ротора электродвигателя, и при приближении к точке торможения также плавно уменьшает ее.

Для анализа влияния раскачивания груза на звенья стреловой си-

стемы, построены графики изменения внутренних усилий в оттяжке и зубчатой рейке. Выбор именно этих звеньев обусловлен тем, что они поддаются усталостному разрушению вследствие знакопеременных нагрузок и их узлы наиболее часто выходят со строя.

При построении графика изменения внутренних усилий в зубчатой рейке воспользуемся массивом данных полученных с помощью тензометрических датчиков зубчатой рейки. Поскольку, тензометрические датчики изменяют только значение напряжения в электрической цепи измерительного канала АЦП, то для преобразования полученных данных в значение усилия использованы тарировочные данные [7]. При обработке массива полученных данных следует учитывать то, что тарирование проводилось в системе «напряжение – масса».

На основании полученных данных построен график изменения усилия в зубчатой рейке, при изменении вылета стреловой системы от минимального значения до максимального в течении всего времени работы механизма (рис. 6).

Из графика видно, что в начале движения стреловой системы зубчатая рейка работает на сжатие, при этом усилие в ней изменяется плавно от $-75,09 \text{ Н}$ до 0. При изменении направления усилия в рейке наблюдаются скачки, которые можно объяснить неточностью изготовления шарнира «стрела – зубчатая рейка» и отсутствием демпфирующих устройств в этом соединении. При максимальном вылете стреловой системы внутреннее усилие в зубчатой рейке составляет $148,41 \text{ Н}$.

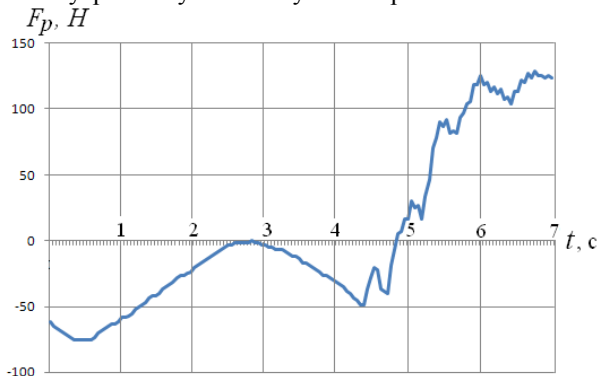


Рис. 6. График изменения внутреннего усилия в зубчатой рейке

Для построения графика изменения внутренних усилий в оттяжке, воспользуемся массивом данных, полученных с помощью тензорезисторов, установленных на оттяжке. Чтобы преобразовать массив дан-

ных, полученных с АЦП в значение усилия, используют тарифовочные данные [7]. На основании полученных данных, построен график изменения продольного усилия в оттяжке при изменении вылета стреловой системы от минимального значения до максимального в течение всего времени работы механизма (рис. 7). При этом, как и в случае с зубчатой рейкой, учтено то, что тарифирование тензорезисторов проводилось в системе «напряжение – масса».

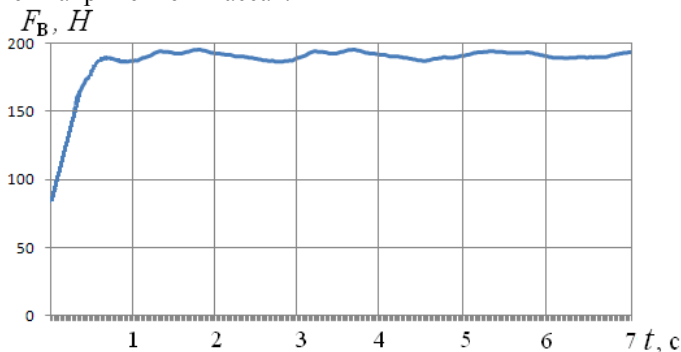


Рис. 7. График изменения внутреннего усилия в оттяжке

Рассматривая полученный график (рис. 7) видно, что вначале движения стреловой системы усилие в оттяжке составляет $71,3 \text{ Н}$. После окончания разгона, усилие в оттяжке остается практически неизменным и колеблется от $182,07 \text{ Н}$ до $196,22 \text{ Н}$. При этом видно, что незначительное увеличение усилия происходит в момент, когда груз раскачивается. Это подтверждается тем, что периоды колебаний на рис. 3 и на рис. 7 совпадают. Усилие $196,22 \text{ Н}$ в оттяжке модели, соответствует усилию $230,7 \text{ кН}$ (которое было определено с учетом коэффициентов подобия [12]) в реальной стреловой системе крана МАРК-40.

Сравнивая полученный результат с результатами исследований [4, 6, 7] видно, что применение частотного преобразователя в системе позволило уменьшить усилие в зубчатой рейке на $46,17\%$, а в оттяжке на $22,47\%$.

Для подтверждения теоретических исследований направленных на оптимизацию режимов движения стреловой системы, с целью повышения эффективности кранов с шарнирно-сочлененной стреловой системой, были произведены экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях, на специально изготовленной физической модели стреловой системы, при автоматическом управлении механизмом изменения вылета.

В ходе экспериментальных исследований, получено подтверждение

того, что движение стреловой системы за оптимальным законом, позволяет повысить эффективность кранов с шарнирно-сочлененной стреловой системой. А именно:

- обеспечивается точность позиционирования груза при его перемещении, что позволяет уменьшить рабочий цикл крана и улучшить условия работы стропальщиков;
- существенно уменьшаются нагрузки на электродвигатель механизма изменения вылета, и достигается плавность его работы;
- уменьшаются нагрузки на весь приводной механизм, а также звенья и кинематические пары всей стреловой системы.

1. Kalweit C. Mehr als ein Ersatz für den Neckar hafen / Christian Kalweit // Hebezeuge Fördermittel. – 2007. – № 5. – Ss. 254–255. **2.** Григорьев Н. И. Отклонение груза при работе порталных кранов / Н. И. Григорьев, С. И. Медведин // Речной транспорт. – 1961. – № 5. – С. 16–17. **3.** Зосимов Е. А. Об особенностях эксплуатации порталных кранов / Е. А. Зосимов // Безопасность труда в промышленности. – 2009. – № 1. – С. 31–32. **4.** Ловейкин В. С. Динамический анализ стреловых систем кранов с горизонтальным перемещением груза при изменении вылета: дис. кандидата тех. наук : 05.05.05 / Ловейкин Вячеслав Сергеевич. – К., 1982. – 268 с. **5.** Берлин Н. П. Погрузочно-разгрузочные, транспортирующие и вспомогательные машины и устройства / Н. П. Берлин. – Гомель : БелГУТ, 2005. – 326 с. **6.** Ким Ен Чер Те Гынович Динамические нагрузки порталных кранов при работе механизма изменения вылета и сейсмических воздействиях : автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины» / Ким Ен Чер Те Гынович. – Санкт-Петербург, 2004. – 18 с. **7.** Бортяков Д. Е. Моделирование эксплуатационной нагруженности элементов порталных кранов / Д. Е. Бортяков, А. В. Некрасова, С. А. Соколов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2008. – № 60. – С. 203–211. **8.** Терехов А. М. Устройство для успокоения раскачивания груза на портовых порталных кранах: дис. кандидата тех. наук : 05.22.19 / Терехов Андрей Михайлович. – М., 2003. – 155 с. **9.** Смехов А. А. Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами / А. А. Смехов, Н. И. Ерофеев. – М. : Машиностроение, 1975. – 239 с. **10.** Ловейкин В. С. Минимизация колебаний груза при горизонтальном перемещении шарнирно-сочлененной стреловой системой крана / В. С. Ловейкин, Д. А. Паламарчук // Техника строительства. – 2010. – № 24. – С. 9–17. **11.** Паламарчук Д. А. Способ минимизации колебаний груза во время изменения вылета шарнирно-сочлененной стреловой системы крана / Д. А. Паламарчук, В. В. Ищук // Горные, строительные, дорожные и мелиоративные машины. – 2011. – № 78. – С. 20–27. **12.** Ловейкин В. С. Создание физической модели шарнирно-сочлененной стреловой системы крана / В. С. Ловейкин, Д. А. Паламарчук, И. А. Паламарчук // Горные, строительные, дорожные и

мелиоративные машины. – 2010. – № 75. – С. 25–32. 13. Ловейкин В. С. Экспериментальное исследование движения шарнирно-сочлененной стреловой системы крана при изменении вылета груза / В. С. Ловейкин, Д. А. Паламарчук, В. В. Ищук // Горные, строительные, дорожные и мелиоративные машины. – 2011. – № 77. – С. 38–43.

Рецензент: д.т.н., професор Кравець С. В. НУВГП)

Palamarchuk D. A., Candidate of Engineering, Associate Professor, (Kyiv National University of Construction and Architecture),
Holotyiuk M. V., Candidate of Engineering, Senior Lecturer (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

RESEARCH OF DYNAMICS OF MOVEMENT JIB CRANE SYSTEM WITH AUTOMATIC CONTROL MECHANISM FOR LUFFING

Experimental results on the dynamics of movement articulated balanced jib crane system with automatic motor control mechanism to change the flight.

Keywords: boom system, the physical model, guy, rack, efforts, sensor.

Паламарчук Д. А., к.т.н., доцент (Київський національний університет будівництва і архітектури), **Голотюк М. В., к.т.н., старший викладач** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ РУХУ СТРЕЛОВОЇ СИСТЕМИ КРАНА ПРИ АВТОМАТИЧНОМУ КЕРУВАННІ МЕХАНІЗМОМ ЗМІНИ ВІЛЬОТУ

Представлено результати експериментального дослідження динаміки руху шарнірно-зчленованої врівноваженої стрілової системи крана при автоматичному керуванні електродвигуном механізму зміни вильоту.

Ключові слова: стрілова система, фізична модель, відтяжка, зубчаста рейка, зусилля, датчик.
