

УДК 531.396, 534.014.4, 534.015.1

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ГРЕЙФЕРА, ПОДВЕШЕННОГО НА ГИБКОМ ПОДВЕСЕ, ПРИ ПОВОРОТЕ КРАНА

**В.С. Ловейкин, проф., д.т.н., Ю.В. Човнюк, доц., к.т.н.,
П.В. Лымарь, асп., В.В. Мельниченко, асп., Национальный университет
биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев**

Аннотация. Обоснована физико-механическая модель, описывающая возможные типы движений грейфера, подвешенного на гибком подвесе, при поворотах крана. Для анализа кинематических и силовых характеристик указанных движений использован метод фазовых портретов (классического и более высоких порядков).

Ключевые слова: модели, движение, груз, гибкий подвес, поворот, грейфер.

ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ РУХУ ГРЕЙФЕРА, ПІДВІШЕНОГО НА ГНУЧКОМУ ПІДВІСІ, ПРИ ПОВОРОТІ КРАНА

**В.С. Ловейкін, проф., д.т.н., Ю.В. Човнюк, доц., к.т.н., П.В. Лимар, асп.,
В.В. Мельниченко, асп., Національний університет біоресурсів
і природокористування України, м. Київ**

Анотація. Обґрунтовано фізико-механічну модель, яка описує можливі типи рухів грейфера, підвішеного на гнучкому підвісі, при поворотах крана. Для аналізу кінематичних і силових характеристик вказаних рухів використано метод фазових портретів (класичного та більш високих порядків).

Ключові слова: моделі, рух, вантаж, гнучкий підвіс, поворот, грейфер.

DYNAMIC ANALYSIS OF MOTION OF A CLAMSHELL SUSPENDED ON A FLEXIBLE SUSPENSION, DURING CRANE TURNING

**V. Loveykin, Prof., Dr., Eng. Sc., Yu. Chovnyuk, Assoc. Prof., Cand., Eng. Sc.,
P. Lyumar, postgraduate, V. Melnichenko, postgraduate,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv**

Abstract. A mechanical and physical model describing possible types of motions of a clamshell suspended on a flexible suspension during a crane turning has been proposed. The method of phase portraits (classical one and of higher orders) has been used to analyze kinematic and force characteristics of these motions.

Key words: models, motion, cargo, flexible suspension, turn, clamshell.

Введение

Состояние развития подъемно-транспортного оборудования требует дальнейшего усовершенствования математических моделей технологических процессов управления, производительности и точности позиционирования груза при повороте крана. Решение

указанных проблем требует дополнительного динамического анализа движения груза на тросе в горизонтальной плоскости при равноускоренном повороте крана. Также существует необходимость расчёта собственных колебаний, которые возникают при раскачивании груза вдоль переносного вращательного движения стреловой системы крана. Рас-

чётный анализ механической системы «стрела крана – гибкий подвес – грейфер» даёт путь к определению динамических нагрузок на основные элементы несущей конструкции крана.

Одной из причин уменьшения производительности кранов с подвешенным грейфером является именно раскачивание груза на гибком подвесе (канате). Для стреловых кранов наиболее характерным является раскачивание захвата с грузом при повороте его стрелы. Помимо действия центробежной силы, силы Кориолиса, возникающих при повороте стрелы крана, на груз также действует и сила инерции, из-за которой угол отклонения каната от вертикали максимален при пуске/остановке механизма поворота крана. Груз совершает колебания, представляющие собой сложное пространственное движение. Для уменьшения колебаний можно увеличить время переходных процессов, однако это увеличивает время рабочего цикла, что, в свою очередь, снижает производительность механизма. В настоящее время применяют электропривод с мехатронной информационной системой управления, позволяющей задавать программу управления электроприводом механизма поворота крана, а также с помощью регулируемого модального регулятора эффективно гасить нежелательные колебания груза на тросе. Естественно, что для составления подобной программы управления движением крана необходимо подобрать режим его поворота, который бы учитывал влияние его конструктивных особенностей и обеспечивал простоту управления самим механизмом.

Для решения поставленных задач требуется знание обобщённых уравнений движения, учитывающих весь спектр сил, действующих на грейфер с грузом, подвешенный на канате крана. Подобные уравнения достаточно точно могут описывать поведение груза в режиме реальной эксплуатации крана.

Анализ публикаций

Расчётные подходы, учитывающие влияние центробежных сил инерции на характер колебания груза при повороте стрелы крана, представлены в работах [1–10]. В [11] проведен анализ динамических режимов раскачивания груза в горизонтальной плоскости колебаний с учётом влияния ускорения

Кориолиса на относительную траекторию груза на канате. Авторы [12, 13] обосновывают уравнения движения груза на гибком подвесе при повороте крана, однако без учёта сил Кориолиса. Следует отметить, что в [11] рассмотрен равномерный поворот стрелы крана, а в [13] – неравномерный.

Цель и постановка задачи

Целью работы является обоснование математической модели, описывающей динамику и определяющей вид относительной траектории движения грейфера с грузом на тросе при различных режимах поворота стрелы крана в горизонтальной плоскости колебаний (с одновременным учётом как относительно поворота вертикальной плоскости колебаний груза, так и влияния ускорения Кориолиса на вид относительной траектории груза, который раскачивается на канате). Для достижения цели работы использован метод (классического) фазового портрета и метод фазовых портретов высших порядков, первый из которых применён в [13].

Уравнение движения грейфера с грузом на крановом канате, описывающее собственные колебания, и его анализ

Используя результаты работ [1, 13], можно получить уравнение движения груза на канате, которое адекватно описывает его собственные колебания

$$\ddot{\theta} - (\alpha + \sin \theta)\omega^2 \cos \theta + \beta \sin \theta = 0, \quad (1)$$

где введены обозначения работы [13]:

$\ddot{\theta} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$, t – время, θ – угол отклонения каната от вертикали; ω – угловая частота вращения стрелы крана при его повороте (в (1) $\omega = \text{const}$); $\beta = g/l$, $\alpha = \frac{r_0}{l}$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, l – длина гибкого подвеса груза (рис. 1).

Если в (1) учесть (вязкое) трение – затухание колебаний $\theta(t)$, тогда (1) приобретает вид

$$\ddot{\theta} - (\alpha + \sin \theta)\omega^2 \cos \theta + \gamma \dot{\theta} + \beta \sin \theta = 0, \quad (2)$$

где γ – коэффициент (приведенный) вязкого трения, $\dot{\theta} = d\theta/dt$.

Для малых углов ($\theta < 1$) из (2) легко получить

$$\ddot{\theta} + \gamma\dot{\theta} + (\beta - \omega^2)\theta = \alpha\omega^2. \quad (3)$$

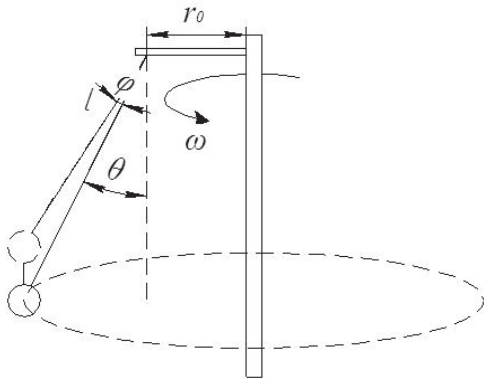


Рис. 1. Динамическая модель движения крана

Решение (3) в общем виде имеет вид

$$\theta = \frac{\alpha\omega^2}{\beta - \omega^2} + \exp(-\gamma t) \times \left[c_1 \sin(\beta - \omega^2)t + c_2 \cos(\beta - \omega^2)t \right], \quad (4)$$

где константы c_1 и c_2 находим из начальных условий

$$\theta|_{t=0} = \theta_0; \quad \dot{\theta}|_{t=0} = \dot{\theta}_0. \quad (5)$$

Анализ решения (4) показывает, что при условии

$$\beta \rightarrow \omega^2 \Rightarrow \theta \rightarrow \infty, \quad (6)$$

то есть при возникновении резонанса

$$\omega = \sqrt{\beta} \quad (7)$$

возникает резкое раскачивание груза на тресе крана. Заметим, что $\sqrt{\beta} = \sqrt{\frac{g}{l}}$ – угловая частота собственных колебаний математического маятника.

Численный анализ уравнения (2) при $\alpha=2$, $\beta=0,3 \text{ с}^{-2}$, $l=30 \text{ м}$, $r_0=60 \text{ м}$ и нулевых начальных условиях (5) проведен на ПЭВМ для случая, когда $\omega = \omega(t)$ [13], а результаты представлены на рис. 2.

$$\omega(t) = \omega_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{2t_n}t\right); \quad t_n = 5\text{с};$$

$$\omega_0 = 0,8 \text{ рад/с}, \quad 0 < t \leq t_n \quad (8)$$

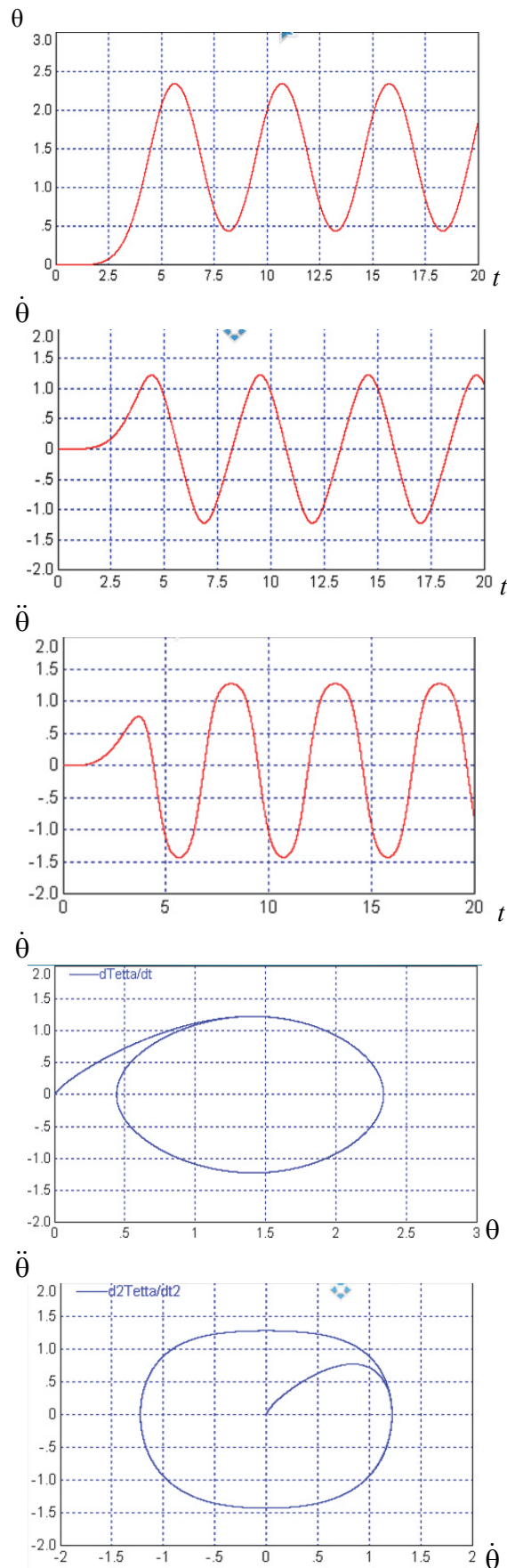


Рис. 2. Графики функций угла отклонения каната от вертикали – θ , скорости – $\dot{\theta}$, ускорения – $\ddot{\theta}$ и их фазовых портретов

Проведён также численный анализ уравнения (2) с учётом затухания колебаний груза при $\alpha=2$, $\beta=2,6 \text{ с}^{-2}$, $l=3,77 \text{ м}$, $r_0=7,54 \text{ м}$, $\gamma=0,5^{-1} \text{ с}$ нулевыми начальными условиями (рис. 3).

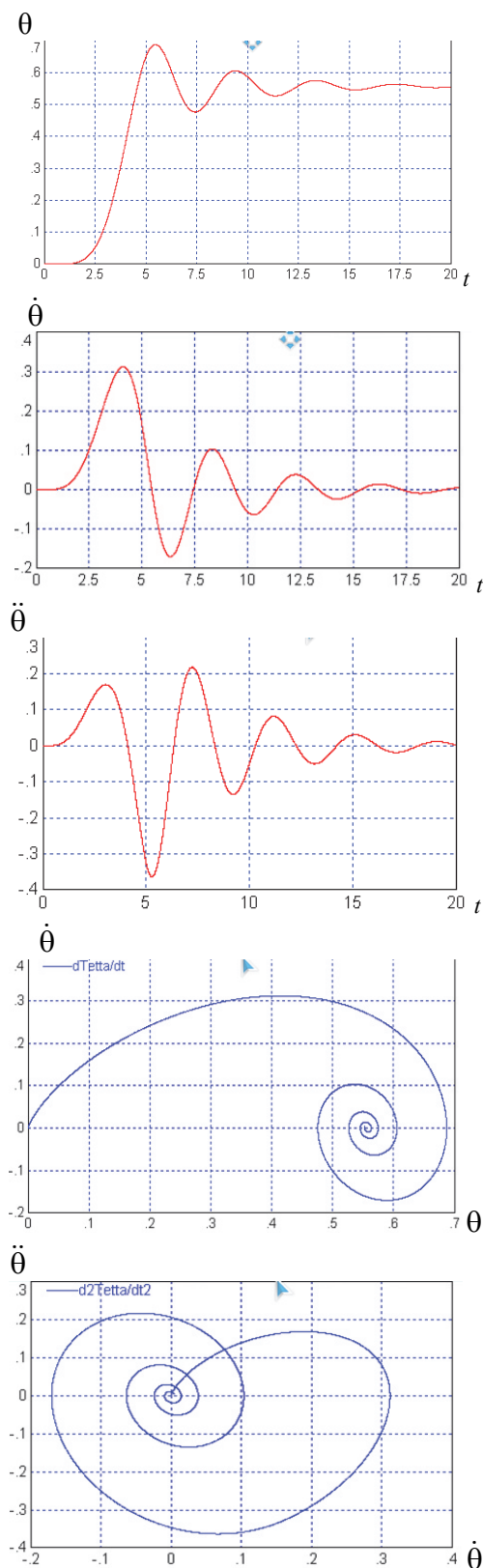


Рис. 3. Графики функций θ , $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$ и их фазовых портретов с учётом затуханий колебания груза

На рис. 2 и 3 представлены зависимости $\theta(t)$, $\dot{\theta}(t)$, $\ddot{\theta}(t)$ и фазовые портреты, характеризующие движение груза на канате: 1) классический – $(\theta, \dot{\theta})$; 2) высших порядков $(\dot{\theta}, \ddot{\theta})$ – для разных значений исходных параметров.

Анализ графиков на рис. 2 показывает, что при данных значениях параметров (α , β , l , r_0) наблюдаются колебания угла отклонения груза от вертикали (θ), соответствующей угловой скорости ($\dot{\theta}$) и угловому ускорению ($\ddot{\theta}$) (фазовые портреты в плоскостях $(\theta, \dot{\theta})$, $(\dot{\theta}, \ddot{\theta})$ имеют замкнутые траектории).

Анализ графиков на рис. 3 показывает, что при данных значениях параметров (α , β , l , r_0 , γ) колебания груза со временем затухают, сам угол отклонения (θ) от вертикали стабилизируется и составляет $\theta \approx 0,55$ рад (фазовые портреты в плоскостях $(\theta, \dot{\theta})$, $(\dot{\theta}, \ddot{\theta})$ описывают переход системы из начальной точки $(0;0)$ в точку устойчивого фокуса $(\theta;0)$ или $(0;0)$ соответственно).

Уравнения колебаний груза на гибком подвесе, возникающих вне плоскости качания стрелы, и их численный анализ

В случае, когда колебания груза совершаются вне плоскости качания стрелы крана [13], они приобретают вид

$$\begin{cases} \ddot{\theta} + \alpha \dot{\omega} \cos \theta \sin \varphi - \alpha \omega^2 \cos \theta \cos \varphi - \\ - (\omega + \dot{\varphi})^2 \sin \theta \cos \theta + \beta \sin \theta = 0 \\ (\dot{\omega} + \ddot{\varphi}) \sin \theta + 2(\omega + \dot{\varphi}) \dot{\theta} \cos \theta + \\ + \alpha \dot{\omega} \cos \varphi + \alpha \omega^2 \sin \varphi = 0, \end{cases} \quad (9)$$

где $\varphi(t)$ – угол между проекцией подвеса на горизонтальную плоскость OXY и осью OX (рис. 1). При этом для $\dot{\omega}(t)$ имеем

$$\dot{\omega}(t) = \frac{\omega_0 \pi}{2t_r} \sin\left(\frac{\pi t}{t_r}\right), \quad 0 < t \leq t_r. \quad (10)$$

Построим графики функций углов θ , φ и их фазовые портреты для следующих значений параметров: $\alpha = 0,377$, $\beta = 0,491 \text{ с}^{-2}$, $l = 20 \text{ м}$, $r_0 = 7,54 \text{ м}$ и нулевых начальных условий (рис. 4, 5).

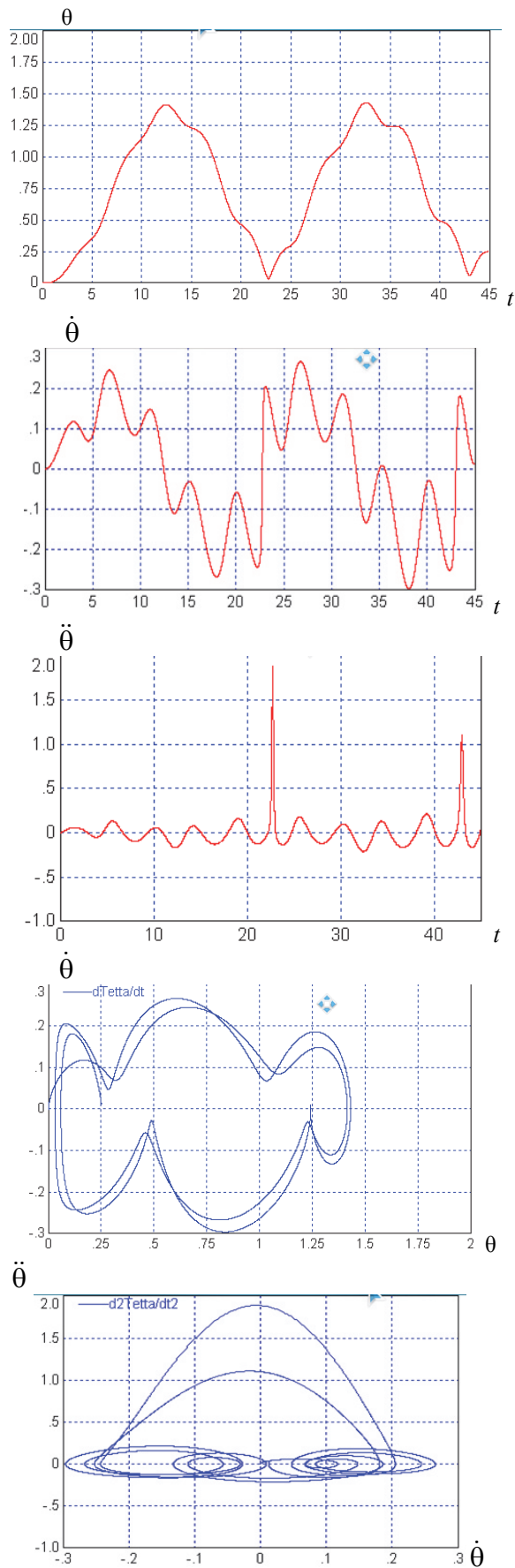


Рис. 4. Графики функций угла отклонения каната от вертикали – θ , скорости – $\dot{\theta}$, ускорения – $\ddot{\theta}$ и их фазовых портретов

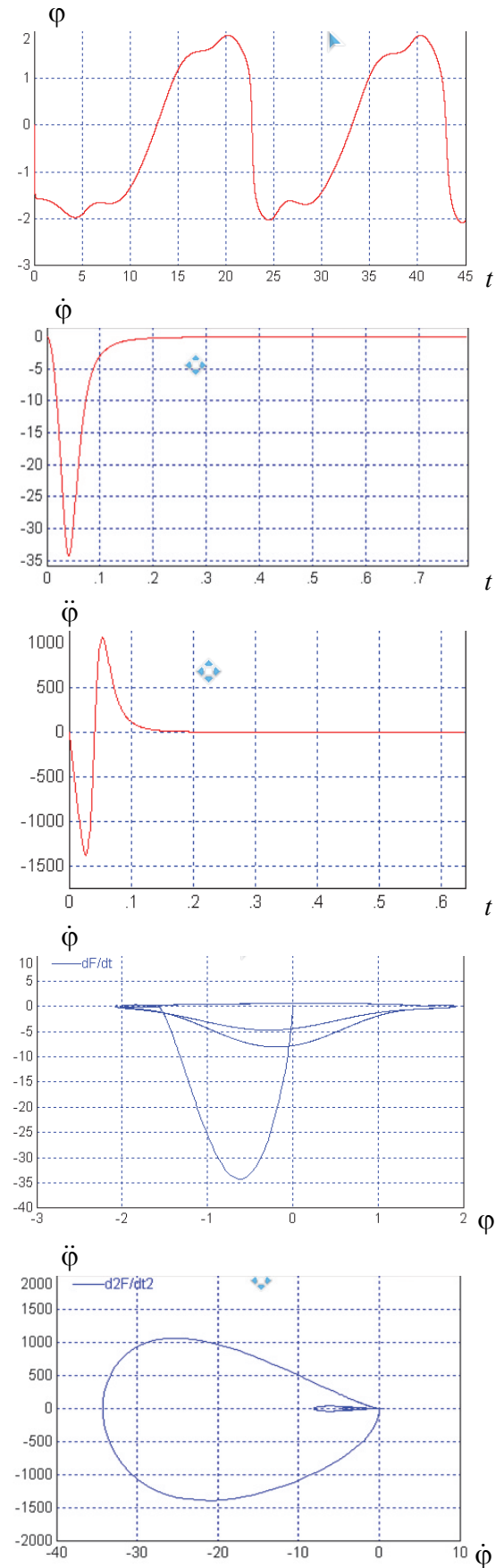


Рис. 5. Графики функций угла отклонения маятника от вертикали в плоскости поворота – ϕ , скорости – $\dot{\phi}$, ускорения – $\ddot{\phi}$ и их фазовых портретов

На рис. 4, 5 представлены зависимости $\theta(t)$, $\varphi(t)$ и их производных до второго порядка по t включительно, а также соответствующие фазовые портреты для разных значений исходных параметров.

Из рис. 4 видно, что законы движения $\theta(t)$, $\dot{\theta}(t)$, $\ddot{\theta}(t)$ носят колебательный (циклический) характер (соответствующие фазовые портреты в плоскостях $(\theta, \dot{\theta})$ и $(\dot{\theta}, \ddot{\theta})$ характеризуются замкнутыми траекториями).

Рис. 5 описывает законы движения груза на канате в плоскости, перпендикулярной к вертикальной (описывающей колебания $\theta(t)$, $\dot{\theta}(t)$, $\ddot{\theta}(t)$) и характеризуемой углом отклонения $\varphi(t)$. При длительном наблюдении за величиной $\varphi(t)$ ($t \approx 45$ с) она носит циклический характер. В течение времени поворота ($t \approx 1$ с) $\varphi(t)$, $\dot{\varphi}(t)$, $\ddot{\varphi}(t)$ – ациклические (фазовые портреты в плоскостях $(\varphi, \dot{\varphi})$ и $(\dot{\varphi}, \ddot{\varphi})$ характеризуются переходом системы из положения $(0;0)$ в устойчивый фокус $(-2;0)$ или $(0;0)$ соответственно).

Выводы

Полученные решения уравнений относительного (абсолютного) движения груза учитывают влияние типичных начальных условий задачи, а также обладают «резонансными» свойствами, проявляющими себя в сильном (по амплитуде) раскачивании груза, выходе колебаний из горизонтальной плоскости, когда частота вращения стрелы крана совпадает с собственной частотой угловых колебаний (математического маятника) системы. Подобных ситуаций следует избегать в режимах реальной эксплуатации крана.

Результаты данной работы представляют собой основу для дальнейшего изучения динамики раскачивания груза на гибком подвесе, для построения эпюр внутренних силовых факторов в несущих конструкциях его стрелы, для анализа статических и динамических характеристик автоматических и ручных систем управления, а также для уточнения и совершенствования инженерных методов расчета подобных систем как на стадиях их проектирования/конструирования, так и в режимах реальной эксплуатации.

Литература

1. Кузьмин А.Н. Исследование колебаний груза на гибком подвесе при повороте крана / А.Н. Кузьмин, В.В. Суглобов, В.И. Федун // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. – 2011. – Вип. 13. – С. 141–147.
2. Разработка оптимального управления движениями башенного крана / Е.В. Макаревич, В.Н. Шамардина, Ф. Палис и др. // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – №3. – С. 170–171.
3. Герасимьяк Р.П. Особливості керування електроприводом механізму вильоту стріли під час обертання крана з підвішеним вантажем / Р.П. Герасимьяк, О.В. Найдено // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2007. – Вип. 68. – С. 11–15.
4. Управление и защита грузоподъемного крана с гашением раскачивания груза. Часть 1 / А.А. Зарецкий, Л.С. Каминский, Д.М. Маш и др. // Все краны. – 2007. – №16/16 (декабрь). – С. 10–13.
5. Управление и защита грузоподъемного крана с гашением раскачивания груза. Часть 2 / А.А. Зарецкий, Л.С. Каминский, Д.М. Маш и др. // Все краны. – 2008. – №01/17 (январь-февраль). – С. 8–12.
6. Дрёмов В.И. К вопросу о создании энергоэффективных отечественных мощных грузоподъемных средств для условий природно-техногенных катаклизмов / В.И. Дрёмов, В.Г. Ивахник, А.В. Ляхомский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – №6. – С. 274–278.
7. Корытов М.С. О перемещении груза автокраном вдоль заданной траектории при ограничении количества одновременно управляемых координат / М.С. Корытов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2009. – №2 (24). – С. 105–112.
8. Голдобина Л.А. Теоретическое обоснование снижения раскачивания груза на канате строительного крана / Л.А. Голдобина, А.В. Власов, А.Л. Бочков // Технично-технологические проблемы сервиса. – 2011. – Т. 2, №16. – С. 52–60.
9. Подобед В.А. Теоретические исследования основных показателей работы портального крана «Альбрехт» при динамич-

- ческом воздействии ветра / В.А. Подобед // Вестник Мурманского государственного университета. – 2006. – Т. 9, №3. – С. 522–530.
10. Ловейкін В.С. Нелінійні маятникові коливання вантажу на гнучкому підвісі при різних режимах обертання / В.С. Ловейкін, А.А. Бойко, Ю.В. Човнюк // Вісник ТНТУ (машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки). – 2010. – Т. 15, №3. – С. 41–48.
11. Періг О.В. Горизонтальні коливання вантажу на тросі при рівномірному повороті стріли крана / О.В. Періг, О.М. Стадник, О.І. Дериглазов // Механіка та машинобудування. – 2012. – №1. – С. 33–40.
12. Смехов А.А. Оптимальное управление подъёмно-транспортными машинами / А.А. Смехов, Н.И. Ерофеев. – М.: Машиностроение, 1975. – 240 с.
13. Уравнения движения груза на гибком подвесе при повороте крана / А.Н. Кузьмин, В.В. Суглобов, В.И. Федун и др. // Захист металургійних машин від поломок. – 2012. – Вип. 14. – С. 168–173.

Рецензент: А.А. Тропина, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2014 г.
