

УДК 681.518

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С КОМПЕНСАЦИЕЙ СИЛ ИНЕРЦИИ

А.В. ПАШУК, М.К. ХАДЖИНОВ, О.А. ШВЕДОВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 4 ноября 2015*

Приведены результаты моделирования влияния сил инерции на поведение тележки и груза грузоподъемного механизма поворотного типа, разработки и исследования способов компенсации данных сил в разомкнутых системах управления. Проведено моделирование эффективности алгоритмов управления с формирующими фильтрами в системах с компенсацией сил инерции.

*Ключевые слова:* грузоподъемные механизмы, подавление колебаний, компенсация сил инерции.

### Введение

В настоящее время при исследовании способов эффективного управления грузоподъемными механизмами особого внимания заслуживают вопросы, связанные с подавлением колебаний, возникающих при одновременном перемещении тележки и повороте стрелы грузоподъемного механизма поворотного типа. При выполнении операций по перемещению полезного груза возникают колебания, амплитуда которых может превышать заданный предел, они должны быть подавлены, иначе операция должна быть остановлена, это приводит к ухудшению быстродействия системы. Проблемы, связанные с подавлением колебаний, привели к появлению множества алгоритмов управления, позволяющих автоматизировать операции грузоподъемного механизма. Однако большинство из них не являются подходящими для практического применения, поэтому большое количество промышленных грузоподъемных механизмов не автоматизированы и все еще зависит от действий человека. При этом обеспечить должную компенсацию колебаний в состоянии только высококвалифицированный крановщик.

Глобальной целью исследования является изучение способов эффективного подавления колебаний, обеспечивающих оптимальное по быстродействию управление грузоподъемными механизмами поворотного типа.

### Теоретический анализ

Анализируя работу грузоподъемных механизмов по перемещению полезного груза, можно выделить следующие виды движения исполнительных элементов, которые могут способствовать возникновению колебаний груза:

- поступательное изменение длины подвеса при подъеме груза;
- поступательное движение тележки по мосту или стреле грузоподъемного механизма;
- поступательное движение моста грузоподъемного механизма;
- вращательное движение стрелы грузоподъемного механизма;
- смешанное или одновременное движение, когда присутствуют несколько видов движения.

Поступательное движение можно считать самым простым для моделирования поведения системы случаем перемещения груза. Этот вид движения присущ порталным, мостовым или козловым кранам. В качестве смешанного движения нескольких поступательных можно выделить одновременное движение моста и тележки крана, когда перемещение тележки в продольном направлении и перемещение моста в поперечном направлении происходят одновременно. При определенных допущениях, такое движение при моделировании можно рассматривать как два независимых поступательных движения [1].

Считая изменения длины подвеса и угол отклонения малыми, можно получить линейную модель системы, которую затем использовать при разработке или проверке различных методов управления. Существует множество различных алгоритмов подавления колебаний, возникающих при поступательном движении, начиная с методов, основанных на определении периода колебаний, и заканчивая управлением с использованием интеллектуальных моделей [2].

Вращательное движение и поступательное, смешанное с ним, являются более сложными для анализа и моделирования. Система уравнений, описывающая процессы в системе, приобретает значительную нелинейность, что усложняет разработку эффективных алгоритмов управления грузоподъемными механизмами поворотного типа. Эти виды движения присущи стреловым и башенным кранам.

### Методика эксперимента

Для анализа и моделирования вращательного движения используется схематическая модель грузоподъемного механизма поворотного типа [3], которая представлена на рис. 1.

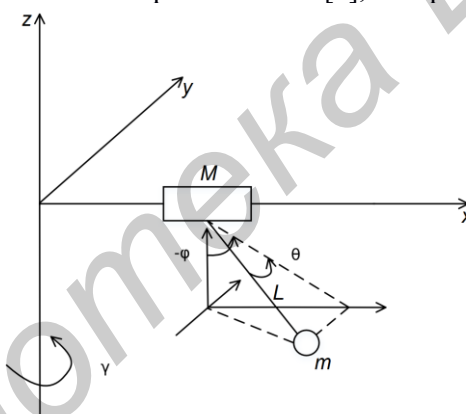


Рис. 1. Модель грузоподъемного механизма поворотного типа с указанием действующих сил

Полная система уравнений, описывающая такую модель, является громоздкой и нелинейной и, как следствие, непригодна для синтеза системы управления. Однако при небольших величинах углов отклонения и незначительном изменении длины подвеса уравнения можно упростить [1]. При указанных допущениях система уравнений, описывающая грузоподъемный механизм, приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} M \cdot \ddot{x} + m \cdot g \cdot \varphi = F_x \\ L \cdot \ddot{\varphi} + g \cdot \varphi - \ddot{x} + L \cdot \ddot{\gamma} \cdot \theta = 0 \\ (J_0 + M \cdot x^2) \cdot \ddot{\gamma} - m \cdot g \cdot x \cdot \theta = T_\gamma \\ L \cdot \ddot{\theta} + g \cdot \theta + x \cdot \ddot{\gamma} - L \cdot \ddot{\gamma} \cdot \varphi = 0 \end{cases}$$

Используя упрощенную систему уравнений, можно получить линеаризованную модель объекта, представленную на рис. 2, где приняты следующие обозначения:  $v_{tel}$  – задание скорости тележки вдоль стрелы,  $v_{bashni}$  – задание скорости поворота стрелы,  $R_{tel}$  – расстояние от башни до тележки,  $V_{tel}$  – скорость тележки вдоль стрелы,  $dx_{gruz}$  – отклонение груза по оси  $x$ ,  $dy_{gruz}$  – отклонение груза по оси  $y$ ,  $V_{bashni}$  – угловая скорость стрелы.

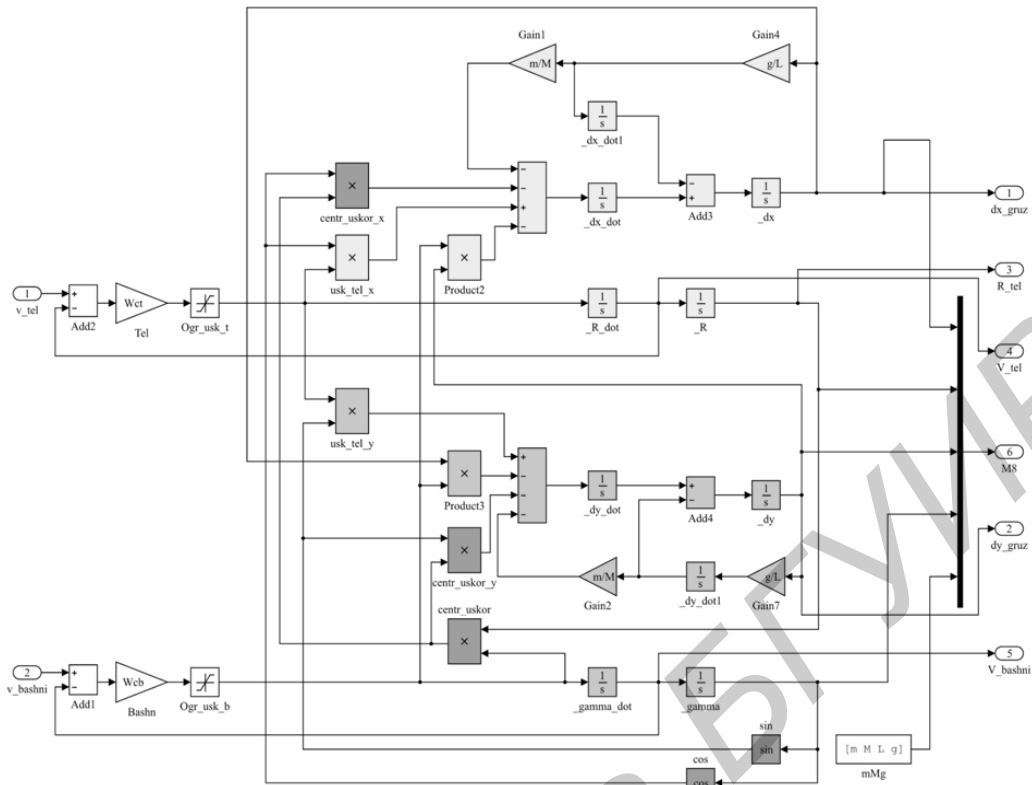


Рис. 2. Модель грузоподъемного механизма поворотного типа в программе Matlab Simulink

Для оценки влияния сил инерции на качество управления грузоподъемным механизмом поворотного типа с подавлением колебаний была рассмотрена модель системы управления с формирующими фильтрами (input shaping filters) [1, 4], изображенной на рис. 3.

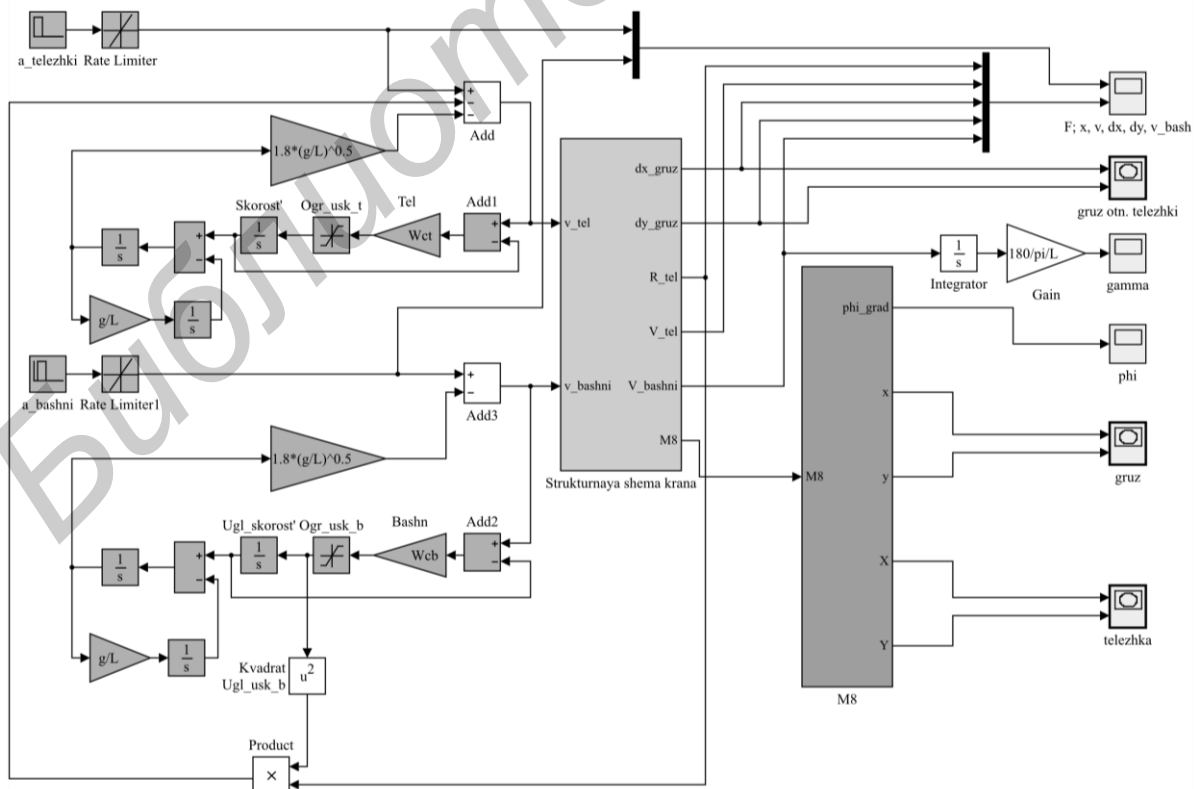


Рис. 3. Модель системы управления с шейпинг-фильтрами в программе Matlab Simulink

Стоит отметить, что для упрощения расчетов из модели удалены взаимосвязи, характеризующие влияние отклонения груза и скорости башни на тележку и влияние всех элементов крана на башню. Предполагается, что электроприводы тележки и башни реализованы таким образом, что они способны поддерживать заданные ускорения (скорости) даже в условия сильных возмущений.

Данная модель уже использовалась для исследования эффективности управления грузоподъемными механизмами с помощью формирующих фильтров [1, 4]. Однако быстрое развитие промышленности и постоянная необходимость в ускорении процессов приводят к вынужденному увеличению производительности промышленной техники. В случае с подъемными кранами — это увеличение скоростей при перемещении грузов. Таким образом, можно предположить, что полученная система управления нуждается в пересмотре, т.к. увеличение скоростей ведет к увеличению сил инерции, действующих на груз.

### Экспериментальная часть

С помощью рабочей модели грузоподъемного механизма поворотного типа было проведено моделирование и получены необходимые значения ускорений, порождающих силы инерции: центробежного ускорения и ускорения Кориолиса. На рис. 4 приведены графики изменения ускорений при ускорении тележки  $at = 1 \text{ м/с}^2$  и ускорении башни  $ab = 0,05 \text{ рад/с}$ , длина подвеса 10 м.

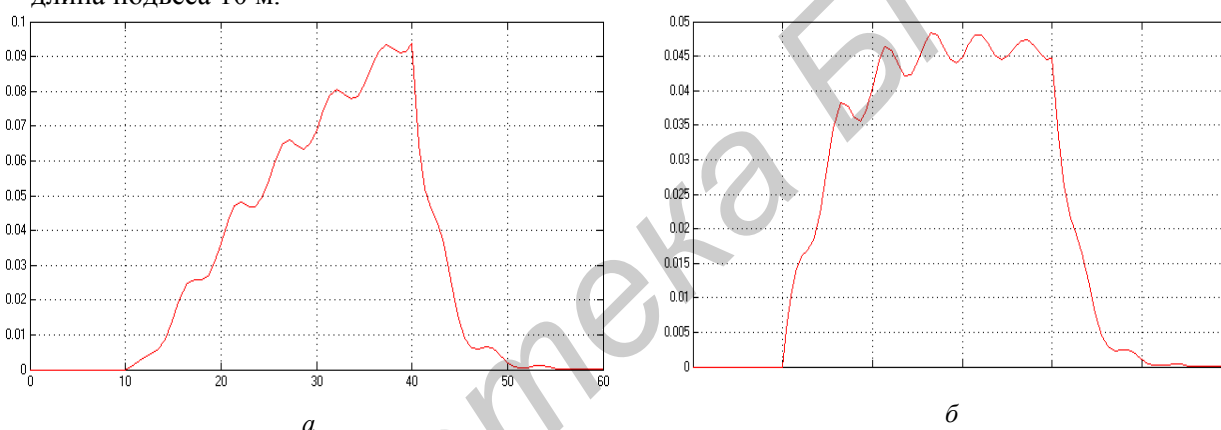


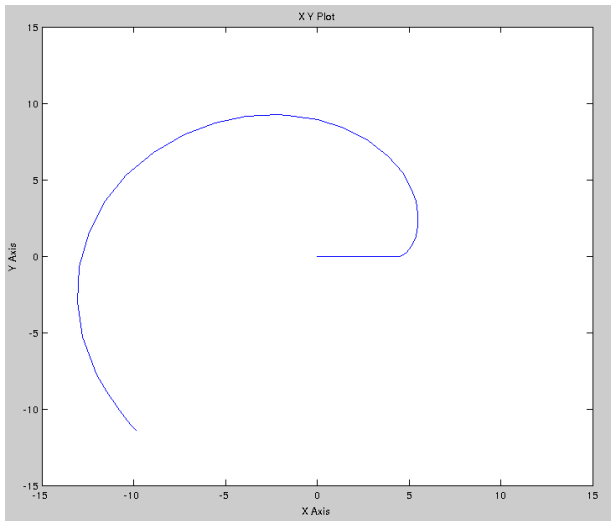
Рис. 4. Графики изменения ускорений тележки при перемещении полезного груза:  
*а* – центробежного; *б* – Кориолиса

Из приведенных графиков видно, что центробежное ускорение и ускорение Кориолиса полезного груза достигают  $0,1 \text{ м/с}^2$  и  $0,05 \text{ м/с}^2$ . Таким образом, значения ускорений соизмеримы со значениями задаваемых параметров и необходимо провести дополнительные исследования для выяснения влияния сил инерции, порождаемых этими ускорениями. При необходимости ввести дополнительные связи, позволяющие оценить и устранить влияние сил инерции на груз.

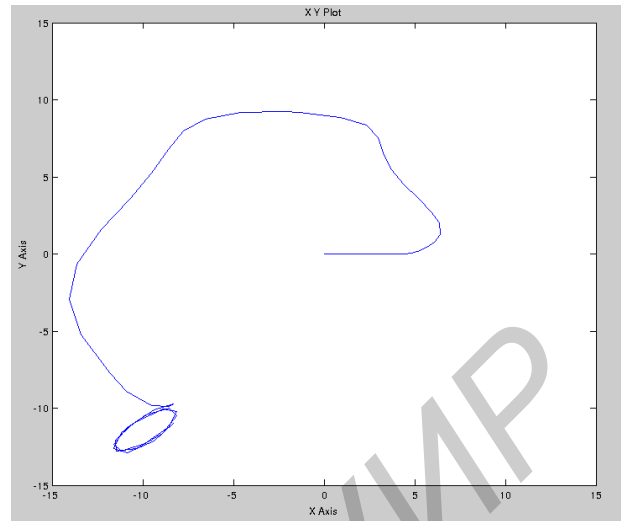
Центробежное ускорение может быть компенсировано противоположным управляющим воздействием. Для компенсации центростремительного ускорения можно ввести дополнительное поступательное смещение тележки по стреле, пропорциональное величине центробежного ускорения. Таким образом, центробежное ускорение от стрелы компенсируется введением ускорения от перемещения точки подвеса вовнутрь на величину, пропорциональную квадрату угловой скорости стрелы и расстоянию от оси вращения. Ускорение Кориолиса может быть компенсировано аналогичным способом: введением дополнительного смещения башни.

### Результаты и их обсуждение

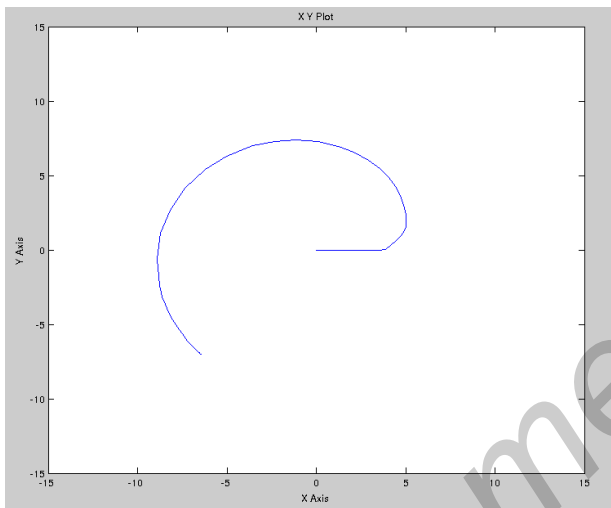
Рассмотренное управление с подавлением колебаний за счет использования формирующих фильтров при добавлении связей, учитывающих центростремительное ускорение, дает результат, показанный на рис. 5. Графики *а*, *в*, *д* изображают траектории движения тележки, груза и траекторию движения груза относительно тележки в системе без учета сил инерции, графики *б*, *г*, *е* – в системе с компенсацией данных сил.



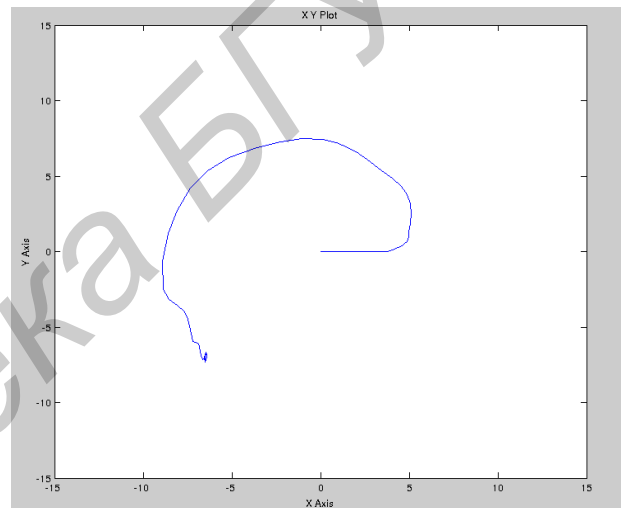
*a*



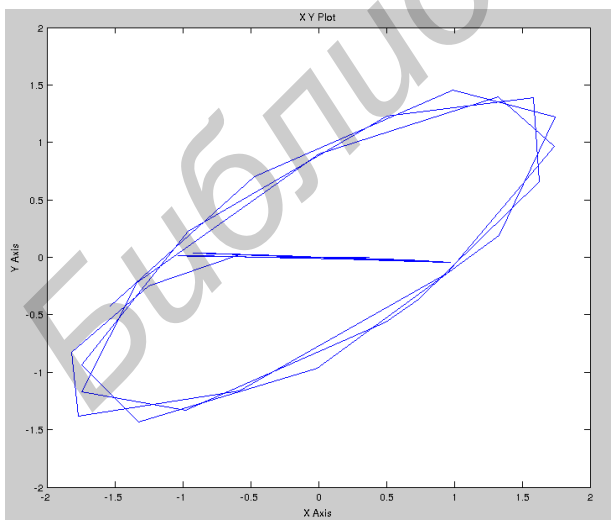
*б*



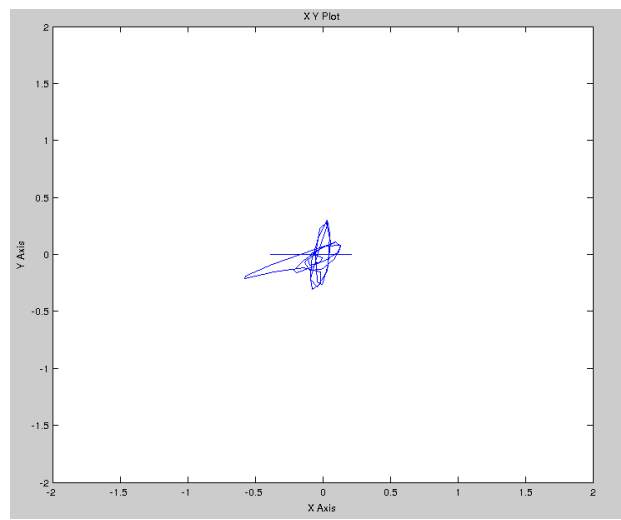
*в*



*г*



*д*



*e*

Рис. 5. Траектории движения тележки и груза: *a, в* – траектория движения тележки, при неподвижной ориентации, наблюдение с башни; *б, г* – траектория движения груза, при неподвижной ориентации, наблюдение с башни; *д, e* – траектория движения груза при неподвижной ориентации, наблюдение с тележки

Графики 5 *а, в* представляют собой траекторию движения тележки в системе управления без учета сил инерции и с компенсацией данных сил, соответственно. Аналогично, графики 5 *б, г* характеризуют поведение груза при перемещении тележки и повороте башни. Из рис. 5, *б* видно, что в системе без компенсации сил инерции присутствуют значительные остаточные колебания (от 0,2 м до 2 м). В то же время, в системе с компенсацией колебания практически отсутствуют (до 0,1 м до 0,4 м). Графики 5 *д, е* отражают траекторию движения груза относительно тележки.

Из рис. 5 следует, что, несмотря на подавление колебаний, эффективность фильтров заметно снизилась. Таким образом, необходимы другие способы управления, учитывающие особенности вращательного движения. Комбинация алгоритма управления с подавлением колебаний и дополнительными связями, компенсирующими инерционные силы, позволяет устранить большую часть колебаний в системе без учета внешних воздействий.

Стоит отметить, что при работе реального объекта, которым и является любой грузоподъемный механизм, также нельзя исключать влияние внешних возмущений, таких как погодные условия. Для компенсации таких возмущений необходимы замкнутые системы управления с использованием наблюдателей состояния или регуляторов на базе нечеткой логики (fuzzy-controller) [2, 3].

### Заключение

Моделирование грузоподъемных механизмов в полной мере отражает тот факт, что ввиду различий между поступательным и вращательным движениями использование алгоритмов управления для поступательного движения не дает высоких показателей качества при вращательном движении без внесения соответствующих изменений или разработки новых алгоритмов. При реализации новых систем управления необходимо учитывать, что качество управления во многом определяется точностью используемых математических моделей, в частности, если речь идет о разомкнутых системах управления. Полученные в данной работе результаты моделирования показывают, что при разработке систем управления с подавлением колебаний для грузоподъемных механизмов необходимо также учитывать силы инерции, порождаемые центробежным ускорением и ускорением Кориолиса. Характеристики современных грузоподъемных механизмов достигли уровня, при котором становится невозможным игнорировать данные силы.

## MODELING OF MANAGEMENT SYSTEM WITH INERTIAL FORCES COMPENSATION FUNCTIONING ALGORITHMS

A.V. PASHUK, M.K. HADZHINOV, O.A. SHVEDOVA

### Abstract

The analysis results of inertial forces effect on the behavior of cargo and trolley, development and research methods of compensation this forces in anti-sway control systems are presented. As shown by simulation, inertial forces should be taken into account when develop anti-sway control methods. We have proposed ways to compensate this forces in control system with input shaping control system.

*Keywords:* lifting mechanism, vibration suppression, compensation of inertial forces.

### Список литературы

1. *Шмарловский А.С.* Алгоритмы и системы управления приводами подъемно-транспортных механизмов: Дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2012.
2. *Эняяталлах Алави Сейед* Система гашения колебаний груза подъемных кранов на основе методов нечеткой логики: Дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2011.
3. *Отар Н.М.* Control of gantry and tower cranes. PhD Dissertation. Virginia, 2003.
4. *Пашук А.В.* Микроконтроллерная система управления электроприводом подъемного крана: Дипломный проект. Минск, 2014.