

На правах рукописи



Аксаментов Дмитрий Николаевич

**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГАШЕНИЕМ КОЛЕБАНИЙ И  
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ ГРУЗА МОСТОВОГО КРАНА НА  
ПРОИЗВОДСТВЕ**

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИргУПС)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов»  
**Круглов Сергей Петрович**

Официальные оппоненты: **Кузнецов Николай Константинович**  
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», заведующий кафедры «Конструирования и стандартизации в машиностроении»

**Косов Александр Аркадьевич**  
кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск**

Защита диссертации состоится «26» сентября 2024 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 44.2.002.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» по адресу: 664074, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, ауд. А-803, тел. 8 (3952) 63-83-94, e-mail: [diss\\_sovet@irgups.ru](mailto:diss_sovet@irgups.ru).

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» и на сайте <https://www.irgups.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, доцент



Л.В. Аршинский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В современном мире грузоподъемные краны широко применяются в различных отраслях деятельности человека. Использование кранов позволяет сократить время рабочего процесса при перемещении грузов и снизить трудозатраты рабочего персонала. Однако использование кранов сопряжено с колебаниями переносимого груза – явлением, встречающимся на всех типах крановых установках, где используется подвесное крепление груза. Колебания возникают, в основном, из-за ускорения и торможения крана, или при воздействии каких-либо внешних возмущений (ветер, неровности пути перемещения крана, перебои в электропитании электропривода и т.д.). Из-за колебаний груза требуется дополнительное время на ожидание успокоения груза перед точной установкой в назначенное место. Неспособность контролировать углы качения может привести к затруднениям в автоматизации системы, а также к поломке переносимого груза или среды вокруг рабочей зоны крана. Колебания транспортируемого груза сопряжены с дополнительными нагрузками на механизмы и металлические конструкции, вследствие чего, повышается усталостный износ крановой системы. Колебания снижают производительность погрузочно-разгрузочных работ и повышают энергопотребление. Например, устранение маятниковых колебаний груза позволит сэкономить до 20% рабочего времени.

Ещё одной важной причиной наличия эффективной системы управления краном является обеспечение безопасной работы. Краны являются причиной одной трети всех смертельных случаев и травм во время строительных и ремонтных работах. С точки зрения безопасности, к более безопасным относится тот кран, который является полностью управляемым, без произвольных колебаний груза.

Ученые, внесшие значительный вклад в автоматизацию управления кранами с подвесным креплением груза: Черноусько Ф.Л., Хижняков Ю.Н., Южаков А.А., Герасимяк Р.П., Щербаков В.С., Шершнева Е.О., Елисеев С.В., Корытов М.С., Петренко Ю.Н., Александров, М.П., Величко В.С., Yang B., Xiong B., Orbisaglia M., Ngo Q.H., Chen Z.M., Boustany F., Fang Y., Rhim S., Rishmawi S., Vaughan J., Omar H.M., Ahmad M.A. и многие другие.

Наиболее распространенным недостатком существующих систем является неспособность обеспечить качественного управления в условиях текущей неопределенности о параметрах объекта управления и воздействии внешних неконтролируемых возмущений. На сегодняшний день одним из основных направлений в развитии грузоподъемного оборудования является гашение колебаний груза, разработка качественно новых и модернизация существующих систем управления для увеличения производительности.

**Цель и задачи.** Повышение производительности погрузочно-разгрузочных работ мостовым краном на производстве в условиях текущей неопределенности параметров крана и внешних возмущений за счёт адаптивной автоматизации.

Решаемые задачи для достижения поставленной цели:

– обоснование актуальности темы исследования, постановка задач исследования, анализ существующих способов управления;

- обоснование математических моделей объекта управления для трех постановок задач управления краном;
- разработка алгоритмов системы управления, обоснование устойчивости и параметров замкнутой системы управления;
- определение эффективности системы управления на основе имитационного моделирования;
- разработка экспериментальной установки мостового крана;
- исследования эффективности системы управления мостового крана на экспериментальной установке.

Задачи по обоснованию математической модели, синтеза закона управления и анализа свойств полученных решений будут реализованы для трех постановок задач управления краном (по их усложнению): при управлении перемещением груза по одной горизонтальной оси, по двум горизонтальным осям и при двухмаятниковой схеме подвеса груза.

**Объект исследования.** Система управления мостовым краном.

**Предмет исследования.** Алгоритмическое обеспечение системы управления мостовым краном с реализацией её адаптивных свойств.

**Научная новизна.** Следующие результаты диссертационного исследования характеризуют научную новизну работы:

- найдены линеаризованные математические модели объекта управления, отличающиеся от известных описанием взаимосвязи перемещения груза (крюка) от скорости тележки (балки);
- сформирован способ адаптивного управления мостовым краном, основанный на идентификационном алгоритме, неявной эталонной модели и «упрощенных» условий адаптируемости;
- разработана структура адаптивной системы управления краном, отличающейся прямым отслеживанием перемещения груза (крюка) и управления по заданной скорости перемещения тележки (балки) крана;
- определены условия устойчивости замкнутого контура системы управления и требования к эталонной модели.

**Практическая значимость работы.** Повышение производительности работы мостового крана (до 20%); простота управления, малое время и высокая точность позиционирования переносимого груза; быстрое парирование внешних возмущений; сокращения сроков обучения операторов крана; применение адаптивной системы для других типов кранов с подвешенным грузом, в том числе с качающимся основанием (на судах); возможность построения дистанционных систем управления краном или системой кранов.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных в диссертационном исследовании задач использовались: методы теории автоматического управления, теоретической механики, а также методы имитационного моделирования с реализацией модели мостового крана в программной среде Matlab/Simulink/SimMechanics(MultiBody). Практические исследования проводились на экспериментальной установке мостового крана.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Математические модели объекта при управлении по заданной скорости для трех задач исследования.

2. Способ адаптивного управления мостовым краном с параметрической идентификацией, эталонной моделью и «упрощенными» условиями адаптируемости, отличающейся тем, что в условиях многообразия режимов работы и возмущений способен устранять качку переносимого груза и парировать внешних возмущений с заданными свойствами.

3. Структура системы управления краном с прямым отслеживанием за перемещением груза с формированием заданной скорости перемещения тележки (балки) крана, что заменяет решение двух традиционных задач устранение раскочки и позиционирование груза.

4. Условия устойчивости замкнутой системы управления, сводящиеся к выбору параметров эталонной модели и наличии приблизительной информации о длине подвеса и радиусе инерции груза.

**Степень достоверности и апробации результатов.** Достоверность теоретических результатов основываются на корректном использовании методов теории автоматического управления и адаптивного управления, совпадением полученных результатов с результатами других ученых. Корректность модельных исследований основывается на широко используемом и многократно проверенном компьютерном инструменте Matlab/Simulink/SimMechanics(MultiBody). Также экспериментальные исследования подтверждаются на макете крановой установки с реальными датчиками информации и микроконтроллерной системой управления.

Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на: Всероссийской научно-практической конференции «Образование-Наука-Производство», Чита, ЗаБИЖТ, 2018 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте», Самара, СамГУПС, 2019 г.; Десятой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», Иркутск, ИрГУПС, 2019 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Наука и Молодёжь», Иркутск, ИрГУПС, 2020 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Наука и Молодёжь», Иркутск, ИрГУПС, 2021 г.; Областном фестивале изобретателей ОО «ВОИР», Иркутск, 2021 г.; Двенадцатой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», Иркутск, ИрГУПС, 2021 г, Восьмая всероссийская научно-практическая конференция «Наука и Молодёжь», Иркутск, ИрГУПС, 2022 г, Международная научно-практическая конференция «Наука в XXI веке: инновационный потенциал развития», Уфа, НИЦ «Вестник науки». Участвовал в 3 научно-исследовательских и опытно конструкторских работах (НИОКР). Разработанный способ управления был представлен инжиниринговым компаниям г. Иркутска ООО «Техноавтоматика» и ООО ИТЦ "Альтер Энерго", получено два акта об использовании результатов диссертационной работы. Подписано соглашение о научно-производственном сотрудничестве с АО «Магнитогорский крановый завод» в целях производственных исследованиях и внедрения системы управления.

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 13 работах, в том числе в 4 изданиях рекомендуемых ВАК по специальности 2.3.3, патент на изобретение по способу адаптивного управления краном.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, включающего 180 наименований и трех приложений. Общий объём диссертации составляет 164 страницы, включая 48 рисунков и 9 таблиц.

**Личный вклад автора.** Разработка математических моделей перемещения груза по одной и двум горизонтальным осям, разработка алгоритма и структуры управления краном для задач перемещения груза по одной и двум горизонтальным осям. Определены условия устойчивости для закона управления при переносе груза по двум горизонтальным осям.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с паспортом специальности 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», пункты направления исследования № 4 (Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами), № 5 (Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами.), № 12 (Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, теоретическая и практическая значимость работы, цель, основные задачи и методы исследования.

**В первой главе** представляется краткий обзор основных типов крановых установок, принцип их действия и анализ общеизвестных способов управления грузовыми кранами. Описаны их отличительные черты, преимущества и недостатки. Наиболее распространенным недостатком является неспособность существующих систем обеспечить качественного управления в условиях большого многообразия режимов работы крана, параметров груза и воздействию неконтролируемых внешних возмущений. С точки зрения управления задача усложняется тем, что объект является существенно нелинейным.

В следствие этого автор работы считает, что одним из перспективных направлений является использование адаптивной системы управления с неявной эталонной моделью, идентификационным алгоритмом с оцениванием параметров крана в текущий момент времени и «упрощенными» условиями адаптируемости, которая потенциально направлена на решение указанных задач.

**Во второй главе** определены математические модели объекта управления для разных постановок задач: при движении груза по одной оси, одновременно по двум осям и при двухмятниковой схеме движения груза. Модели строятся на основании

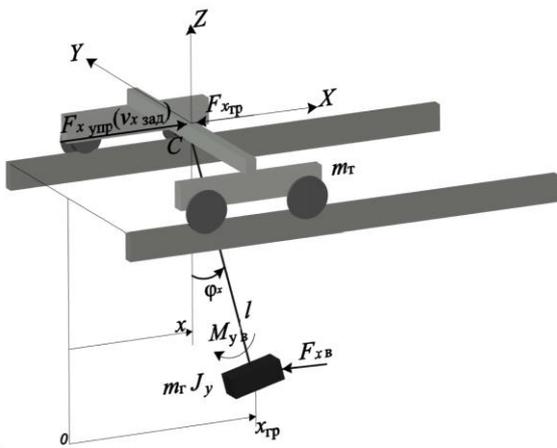


Рисунок 1 - Схема перемещения груза по одной оси

привод или шаговый двигатель. Эта постановка упрощает реализацию системы управления, в частности, становится проще алгоритм текущей идентификации из-за уменьшения числа искомых параметров. Также получены собственные частоты колебаний маятниковых систем рассматриваемых моделей.

Схема движения тележки крана и перемещение груза по одной оси представлена на рисунке 1. На рисунке введены следующие обозначения: тележка с линейным перемещением  $x$  по оси  $X$  с массой  $m_T$ , с учётом индекса вращающихся масс (колёс),  $v_{зад} = v_x = \dot{x}$  – скорость перемещения тележки, она же – управляющий сигнал; на тележку действует управляющая сила  $F_{x\text{упр}}$ , формируемая сервоприводом по входному сигналу  $v_{x\text{зад}}$ , и сила трения  $F_{x\text{тр}}$ ; груз массой  $m_T$  с центральным моментом инерции  $J_y$ ; на груз действует горизонтальная сила воздействия ветра  $F_{x\text{в}}$ ; груз связан с тележкой с помощью гибкой подвески длиной  $l$ ;  $\varphi_x$  – угол отклонения троса от вертикальной оси вдоль оси  $X$ ;  $x_{гр}$  – координата перемещения груза по оси  $X$ .

По уравнению Эйлера-Лагранжа поступательное и вращательное движение системы «тележка-маятник» с применением теоремы Пуансо по переносу силы  $F_{x\text{в}}$  на линию действия управляющей силы  $F_{x\text{упр}}$  описывается относительно  $\ddot{x}$  и  $\ddot{\varphi}_x$ :

$$\begin{cases} \gamma_x \ddot{x} = (m_T l^2 + J_y) [m_T l \sin \varphi_x \dot{\varphi}_x^2 + F_{x\text{упр}} - F_{x\text{тр}} - F_{x\text{в}}] - \\ - m_T l^2 \cos \varphi_x (F_{x\text{в}} \cos \varphi_x - g m_T \sin \varphi_x); \\ \gamma_x \ddot{\varphi}_x = -m_T l \cos \varphi_x [m_T l \sin \varphi_x \dot{\varphi}_x^2 + F_{x\text{упр}} - F_{x\text{тр}} - F_{x\text{в}}] + \\ + (m_T + m_T) l (F_{x\text{в}} \cos \varphi_x - g m_T \sin \varphi_x); \\ x_{гр} = x + l \sin \varphi_x, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\gamma_x = (m_T + m_T)(m_T l^2 + J_y) - (m_T l \cos \varphi_x)^2$ .

Это выражение соответствует нелинейной модели мостового крана при движении по одной оси.

уравнений Эйлера-Лагранжа<sup>1</sup>, поступательного и вращательного движения системы «тележка-маятник», при ряде очевидных допущений.

Математическая модель динамики горизонтального перемещения груза строится на трех уровнях: полное нелинейное описание (исходное описание), линеаризованные уравнения с управлением в виде силы, действующей на тележку (балку), и при управлении в виде заданной скорости тележки (балки). Последнее решение оправдано, если в качестве привода тележки крана используется серво-

<sup>1</sup> Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Наука, Механика. - 1979. - Т. 1. 3-е изд. - 520 с.

Учитывая небольшие углы отклонения груза (типичное значение  $|\varphi_x| < 30^\circ$ ), малую скорость углового перемещения и физику движения, подставляя в систему равенство  $F_{x\text{тр}} = k_x \dot{x} + F_{x\text{тк}}$  ( $F_{x\text{тк}}$  – сила трения качения, направленная по оси  $X$ ;  $k_x$  – коэффициент вязкого трения поступательного движения тележки), и на основании первых двух уравнений системы, получаем уравнение динамики исследуемого объекта (линеаризованная модель динамики перемещения груза при управлении тележки силой):

$$\ddot{x}_{\text{гр}} \approx a_1 F_{x\text{упр}} + a_2 \varphi_x + a_3 \dot{x} + a_4, \quad (2)$$

где  $a_1 = a_{x1} + la_{\varphi_x1}$ ;  $a_2 = a_{x2} + la_{\varphi_x2}$ ;  $a_3 = a_{x3} + la_{\varphi_x3}$ ;  $a_4 = a_{x4} + la_{\varphi_x4}$ ;  
 $a_{x1} = \gamma_x^{-1}(m_{\Gamma}l^2 + J_y)$ ;  $a_{x2} = \gamma_x^{-1}g(m_{\Gamma}l)^2$ ;  $a_{x3} = -\gamma_x^{-1}(m_{\Gamma}l^2 + J_y)k_x$ ;  
 $a_{x4} = -\gamma_x^{-1}[m_{\Gamma}l^2 F_{x\text{в}} + (m_{\Gamma}l^2 + J_y)F_{x\text{тк}}]$ ;  $a_{\varphi_x1} = -\gamma_x^{-1}m_{\Gamma}l$ ;  
 $a_{\varphi_x2} = -\gamma_x^{-1}(m_{\Gamma} + m_{\Gamma})m_{\Gamma}gl$ ;  $a_{\varphi_x3} = \gamma_x^{-1}m_{\Gamma}lk_x$ ;  
 $a_{\varphi_x4} = \gamma_x^{-1}l[m_{\Gamma}F_{x\text{тк}} - (m_{\Gamma} + 2m_{\Gamma})F_{x\text{в}}]$

Линеаризованная модель движения объекта при управляющем воздействии на тележку в виде заданной скорости, с учётом того, что  $(a_3 - a_1 a_{x3}/a_{x1}) = 0$ , имеет вид:

$$\ddot{x}_{\text{гр}} \approx a_1^V \dot{v}_x + a_2^V \varphi_x + a_3^V, \quad (3)$$

где  $a_1^V = a_1/a_{x1} = J_y/(J_y + m_{\Gamma}l^2)$ ,  $1 \geq a_1^V \geq 0$ ;  $a_2^V = (a_2 - a_1 a_{x2}/a_{x1})$ ;  
 $a_3^V = (a_4 - a_1 a_{x4}/a_{x1})$ .

Собственная частота маятника с неподвижным основанием и отсутствии каких-либо внешних сил относительно оси  $X$  описывается следующим равенством:

$$\omega_{0x} = \sqrt{-a_{\varphi_x2}} = \sqrt{\gamma_x^{-1}(m_{\Gamma} + m_{\Gamma})m_{\Gamma}gl}. \quad (4)$$

На рисунке 2 представлена схема перемещения груза по двум горизонтальным

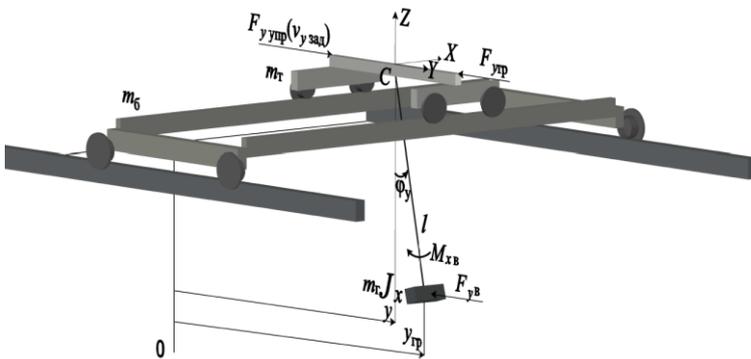


Рисунок 2 – Схема перемещения груза по осям  $X$  и  $Z$

осям со следующими обозначениями: балка с линейным перемещением  $y$  по оси  $Y$ ;  $y_{\text{гр}}$  – координата перемещения груза по оси  $Y$ ;  $\varphi_y$  – угол отклонения троса от вертикальной прямой вдоль оси  $Y$ ;  $J_x$  – центральный момент инерции груза относительно оси  $Y$ ;  $F_{y\text{упр}}$  – сила управляющего воздействия на балку крана, формируемая сервоприводом по входному сигналу

$v_{y\text{зад}}$  направленная по оси  $Y$ ;  $v_{y\text{зад}} = v_y = \dot{y}$  – скорость перемещения балки крана, она же – управляющий сигнал;  $F_{y\text{тр}}$  – сила трения, направленная по оси  $Y$ ;  $F_{y\text{в}}$  – сила воздействия ветра, направленная по оси  $Y$ ;  $m_6$  – масса поперечной балки.

По аналогии с выводом системы нелинейной модели мостового крана при движении по одной оси для первой задачи (1) строится система уравнений движения модели по двум осям, ее отличие заключается в том, что при одновременном

движении балки и тележки крана возникают перекрестные составляющие в виде  $\cos \varphi_y$  и  $\cos \varphi_x$  при определении  $\ddot{\varphi}_y$  и  $\ddot{\varphi}_x$ .

По аналогии с (2) и (3) для вывода линеаризованной модели динамики перемещения груза применяем те же упрощения, это позволяет сократить и перекрестные составляющие. Вследствие этого движение груза по каждой оси можно рассматривать отдельно, а управление балкой и тележкой крана строить в виде двух несогласованных между собой законов управления. Этому также способствует предлагаемое адаптивное управление. Отсюда следует, что для рассматриваемого объекта достаточно далее рассматривать уравнения только по оси  $Y$ .

Отсюда получаем уравнения динамики исследуемого объекта, управляемого силой по оси  $Y$ :

$$\ddot{y}_{гр} \approx b_{y_{гр1}} F_{y_{упр}} + b_{y_{гр2}} \varphi_y + b_{y_{гр3}} \dot{y} + b_{y_{гр4}} \quad (5)$$

где  $b_{y_{гр1}}, b_{y_{гр2}}, b_{y_{гр3}}, b_{y_{гр4}}$  – параметры объекта управления.

Уравнение динамики перемещения груза в зависимости от скорости движения поперечной балки крана, с учётом того, что  $b_{y_{гр3}} - b_{y_{гр1}} b_{y3}/b_{y1} = 0$ :

$$\ddot{y}_{гр} \approx b_{y1}^V \dot{V}_y + b_{y2}^V \varphi_y + b_{y3}^V \quad (6)$$

где  $b_{y1}^V = J_x / (J_x + m_{гр} l^2)$ ,  $1 \geq b_{y1}^V > 0$ ;  $b_{y2}^V = (b_{y_{гр2}} - b_{y_{гр1}} b_{y2}/b_{y1})$ ;  $b_{y3}^V = (b_{y_{гр4}} - b_{y_{гр1}} b_{y4}/b_{y1})$ .

Собственная частота маятника по оси  $Y$  определяется идентичным образом, что и для оси  $X$ .

Схема перемещения крана с двухмаятниковым подвесом груза при его движении по одной оси представлена на рисунке 3.

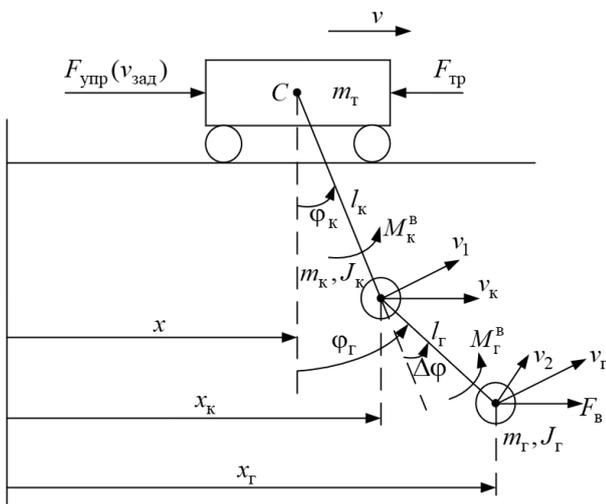


Рисунок 3 – Двухмаятниковая модель подвеса груза на мостовом кране

На рисунке обозначено:  $m_K$  – масса,  $J_K$  – центральные осевые (ось перпендикулярна рисунку) моменты инерции крюка и груза соответственно;  $l_K, l_G$  – длина подвеса крюка и длина подвеса груза соответственно;  $\varphi_K, \varphi_G$  – углы отклонения подвеса крюка и подвеса груза соответственно от вертикальной оси;  $\Delta\varphi = \varphi_G - \varphi_K$  – угол отклонения подвеса груза относительно подвеса крюка (относительный угол отклонения груза);  $x_K = x + l_K \sin \varphi_K$  – линейное перемещение крюка по горизонтальной оси;  $M_K^B, M_G^B$  – внешние моменты, действующие на

подвес крюка и груза соответственно из-за воздействия ветра (оба момента при отсутствии ветра равны нулю);  $v_1 = l_K \dot{\varphi}_K$ ,  $v_2 = l_G \dot{\varphi}_G$  – линейные скорости крюка и груза;  $v_K, v_G$  – полные линейные скорости крюка и груза.

По уравнению Эйлера-Лагранжа выражение полной нелинейной модели двухмаятникового подвеса груза имеет вид:

$$\begin{cases} (m_T + m_K + m_\Gamma)\ddot{x} + (m_K + m_\Gamma)l_K(\ddot{\varphi}_K \cos \varphi_K - \dot{\varphi}_K^2 \sin \varphi_K) + \\ + m_\Gamma l_\Gamma(\ddot{\varphi}_\Gamma \cos \varphi_\Gamma - \dot{\varphi}_\Gamma^2 \sin \varphi_\Gamma) = F_{\text{упр}} - F_{\text{тр}} + F_B; \\ [J_K + (m_K + m_\Gamma)l_K^2]\ddot{\varphi}_K + (m_K + m_\Gamma)l_K\ddot{x} \cos \varphi_K + \\ + m_\Gamma l_K l_\Gamma(\ddot{\varphi}_\Gamma \cos \Delta\varphi - \dot{\varphi}_\Gamma^2 \sin \Delta\varphi) + (m_K + m_\Gamma)gl_K \sin \varphi_K = l_K F_B \cos \varphi_K; \\ m_\Gamma l_\Gamma \ddot{x} \cos \varphi_\Gamma + m_\Gamma l_K l_\Gamma(\ddot{\varphi}_K \cos \Delta\varphi - \dot{\varphi}_K^2 \sin \Delta\varphi) + \\ + (J_\Gamma + m_\Gamma l_\Gamma^2)\ddot{\varphi}_\Gamma + m_\Gamma gl_\Gamma \sin \varphi_\Gamma = l_\Gamma F_B \cos \varphi_\Gamma. \end{cases} \quad (7)$$

Динамику изменения переменной  $x_K$  в линеаризованном виде можно записать в виде равенства:

$$\ddot{x}_K \approx \tilde{a}_{x_K}^{\dot{x}} \dot{x} + \tilde{a}_{x_K}^{\varphi_K} \varphi_K + \tilde{a}_{x_K}^{\Delta\varphi} \Delta\varphi + \tilde{a}_{x_K}^1 + \tilde{a}_{x_K}^{F_{\text{упр}}} F_{\text{упр}}, \quad (8)$$

где  $\tilde{a}_{x_K}^{\dot{x}}$ ,  $\tilde{a}_{x_K}^{\varphi_K}$ ,  $\tilde{a}_{x_K}^{\Delta\varphi}$ ,  $\tilde{a}_{x_K}^1$ ,  $\tilde{a}_{x_K}^{F_{\text{упр}}}$  – параметры объекта управления.

Уравнение динамики перемещения крюка в зависимости от скорости движения тележки крана имеет вид:

$$\ddot{x}_K \approx a_{x_K}^{\dot{v}} \dot{v} + a_{x_K}^{\varphi_K} \varphi_K + a_{x_K}^{\Delta\varphi} \Delta\varphi + a_{x_K}^1, \quad (9)$$

где  $a_{x_K}^{\dot{v}} = \tilde{a}_{x_K}^{F_{\text{упр}}} / a_x^{F_{\text{упр}}}$ ;  $a_{x_K}^{\varphi_K} = \tilde{a}_{x_K}^{\varphi_K} - (a_x^{\varphi_K} + a_x^{\varphi_\Gamma}) a_{x_K}^{\dot{v}}$ ;  $a_{x_K}^{\Delta\varphi} = \tilde{a}_{x_K}^{\Delta\varphi} - a_x^{\varphi_\Gamma} a_{x_K}^{\dot{v}}$ ;  $a_{x_K}^1 = \tilde{a}_{x_K}^1 - a_x^1 a_{x_K}^{\dot{v}}$ .

Собственная частота колебания крюка ( $\omega_{0K}$ ) и груза ( $\omega_{0\Gamma}$ ) с неподвижным основанием и отсутствии каких-либо внешних сил, действующих на него, описываются как:

$$\omega_{0K} = \sqrt{-a_{\varphi_K}^{\varphi_K}} = \sqrt{\gamma^{-1}(m_K + m_\Gamma)gl_K[(m_K + m_\Gamma)(J_\Gamma + m_\Gamma l_\Gamma^2) + m_\Gamma J_\Gamma]}, \quad (10)$$

$$\omega_{0\Gamma} = \sqrt{-a_{\varphi_\Gamma}^{\varphi_\Gamma}} = \sqrt{\gamma^{-1}m_\Gamma gl_\Gamma[m_\Gamma(m_K + m_\Gamma)l_K^2 + (m_\Gamma + m_K + m_\Gamma)J_K]}. \quad (11)$$

Минимальное значение собственной частоты колебания в последующем будет необходимо для настройки системы управления.

**В третьей главе** описывается подход автоматического управления мостовым краном, который нацелен на непосредственное отслеживание (относительно неявной эталонной модели) горизонтального перемещения груза (крюка) в назначенную точку в условиях текущей неопределенности параметров груза и внешних возмущений. Подход заменяет решение двух традиционных задач: отслеживание перемещения тележки крана в заданную точку и демпфирование угловых колебаний груза. На основе полученных линеаризованных моделей строятся законы адаптивного управления по поставленным задачам с использованием схемы, включающей алгоритм текущей параметрической идентификации, неявную эталонную модель и «упрощенные» условия адаптируемости.

На рисунке 4 изображена блок-схема адаптивной системы управления при перемещении груза по одной оси  $X$ . Предлагается подход автоматического управления мостового крана, нацеленный на непосредственное отслеживание (относительно неявной эталонной модели) горизонтального перемещения груза (крюка) в назначенную точку  $x_{\Gamma p}^{\text{зад}}$  в условиях текущей неопределенности параметров груза и

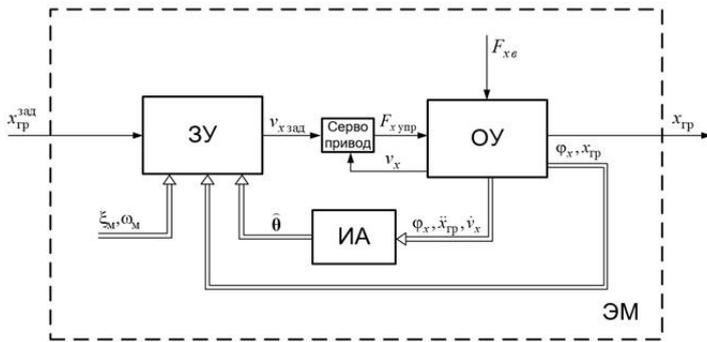


Рисунок 4 – Схема адаптивной системы управления

внешних возмущений. К последним относятся воздействия ветра, изменения трения перемещения тележки крана и другие, воздействующие на объект управления (ОУ). На основе полученных линеаризованных моделей строятся законы адаптивного управления с использованием идентификационного алгоритма (ИА), определяющий вектор текущих оценок неизвестных параметров  $\hat{\theta}$ , неявную эталонную модель (ЭМ) и «упрощенные» условия адаптируемости.

На блок ЗУ (закон управления) от оператора подается целевая точка доставки груза  $x_{гр}^{зад}$  и ранее настроенные параметры эталонной модели. Также на вход блока ЗУ подается сигналы с датчиков обратной связи и оценки неизвестных параметров  $\hat{\theta}$  в текущий момент времени. Исходя из этого формируется управляющий сигнал  $v_{x,зад}$ , поступающий на вход сервопривода тележки крана. По заданному управляющему сигналу  $v_{x,зад}$  на сервопривод и сигналу обратной связи о текущей скорости тележки  $v_x$  формируется  $F_{x,упр}$  воздействующая на тележку крана.

В качестве эталонной модели, задающей требуемые характеристики перемещения груза, принимается неявная модель в виде колебательного звена:

$$\ddot{x}_M = a_{M1}\dot{x}_M + a_{M0}(x_M - x_{гр}^{зад}), x_M(t_0) = x_{гр}(t_0), \quad (12)$$

где  $x_M$  – переменная, описывающая эталонную динамику движения груза по оси X; выбираемые параметры эталонной модели:  $a_{M1} = -2\xi_M\omega_M$ ,  $a_{M0} = -(\omega_M)^2$ ;  $\xi_M, \omega_M$  – эталонные значения относительного коэффициента затухания и собственной частоты соответственно<sup>2</sup>;  $t_0$  – начальный момент времени.

В качестве алгоритма текущей параметрической идентификации используется рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + P_i y_{r i} \varepsilon_i; \varepsilon_i \triangleq z_i - y_{r i}^T \hat{\theta}_{i-1}; \\ P_i = [P_{i-1} - P_{i-1} y_{r i} y_{r i}^T P_{i-1} (1 + y_{r i}^T P_{i-1} y_{r i})^{-1}] / \beta; \\ P_0 = \vartheta E_2; \beta < 1; \beta \rightarrow 1, \end{cases} \quad (13)$$

где индекс  $i = 1, 2, 3, \dots$  – обозначает дискретные моменты времени с шагом  $\Delta t$ ;  $\hat{\theta}_i \triangleq [\hat{a}_{2i}^V, \hat{a}_{3i}^V]^T$  – вектор искомых оценок; верхний индекс «Т» означает транспонирование;  $P_i$  – матричный коэффициент усиления алгоритма ( $2 \times 2$ );  $y_{r i} = [\varphi_{x i}, 1]^T$  – вектор регрессоров, соответствующий искомым оценкам;  $\varepsilon_i$  – невязка идентификации;  $z_i$  – отклик объекта, в данном случае – это  $(\ddot{x}_{гр} - \hat{a}_1^V \dot{v})_i$ ; оценка  $\hat{a}_1^V$  будет назначаться постоянной в силу свойств замкнутой адаптивной системы управления,

<sup>2</sup> Круглов С.П. Условия адаптируемости систем управления с идентификатором и эталоном. – Saarbuckten, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2012. – 125 с.

построенной на «упрощенных» условиях адаптируемости и известных диапазонов этой оценки;  $\beta$  – назначаемый фактор забывания прошедших измерений для слежения за изменяющимися во времени искомыми параметрами;  $\vartheta$  – большое положительное число;  $E_2$  – единичная ( $2 \times 2$ ) матрица.

На основе сравнения уравнений (3) и  $\ddot{x}_{\text{гр}} - a_{m1}\dot{x} - a_{m0}(x_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}})$ , определяем заданную скорость тележки  $v_{x \text{ зад}}$  вычисленную с учётом оцениваемых параметров объекта управления вместо их действительных величин:

$$\hat{T} \dot{v}_{x \text{ зад}} + v_{x \text{ зад}} = -a_{m1}^{-1} [a_{m0}(\hat{x}_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) - \hat{a}_2^V \varphi_x - \hat{a}_3^V], \quad (14)$$

где  $\hat{T} = -\hat{a}_1^V/a_{m1}$  – постоянная времени,  $\hat{x}_{\text{гр}} = \int_0^t v_{x \text{ зад}}(t)dt + \hat{l}\varphi_x$  – оценка положения груза; верхний индекс «^» означает оценку соответствующего элемента.

На основе использования функции Ляпунова доказано, что замкнутая система управления устойчива, если коэффициенты эталонной модели удовлетворяют требованию:

$$\omega_m < \omega_{0x}, \quad 0 < \tilde{\xi}_m < 1, \quad \tilde{\xi}_m \rightarrow 0, \quad (15)$$

Требование к точности оценки  $\hat{a}_1^V$  может быть очень слабым (соответствует «упрощенным» условиям адаптируемости) и сводится к соотношениям:

$$\text{sign}(\hat{a}_1^V) = \text{sign}(a_1^V); \quad |a_1^V|/2 \leq \hat{a}_1^V \leq |\hat{a}_1^V|_{\text{max}}; \quad d\hat{a}_1^V/dt \rightarrow 0. \quad (16)$$

Значение назначаемого параметра  $a_1^V$  зависит от длины подвеса и радиуса инерции крюка (3):

$$a_1^V = a_1/a_{x1} = J_y/(J_y + m_r l^2) = r_{gx}^2/(r_{gx}^2 + l^2) \Rightarrow 0 < a_1^V \ll 1 \quad (17)$$

где  $r_{gx}$  – радиус инерции груза  $J_y = m_r r_{gx}^2$ ; обычно  $r_{gx}^2 \ll l^2$ .

Для перемещения груза по оси  $Y$  назначается такая же эталонная модель, что и для первой задачи.

По аналогии с решением первой задачи (перемещение груза по одной оси) определяем закон управления при перемещении груза по двум горизонтальным осям:

$$\begin{cases} \hat{T}_x \dot{v}_{x \text{ зад}} + v_{x \text{ зад}} = -a_{m1}^{-1} [a_{m0}(\hat{x}_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) - \hat{a}_2^V \varphi_x - \hat{a}_3^V]; \\ \hat{T}_y \dot{v}_{y \text{ зад}} + v_{y \text{ зад}} = -b_{m1}^{-1} [b_{m0}(\hat{y}_{\text{гр}} - y_{\text{гр}}^{\text{зад}}) - \hat{b}_{y2}^V \varphi_y - \hat{b}_{y3}^V], \end{cases} \quad (18)$$

где  $\hat{T}_x = -\hat{a}_1^V/a_{m1}$ ,  $\hat{x}_{\text{гр}} = \int_0^t v_{x \text{ зад}}(t)dt + \hat{l}\varphi_x$ ;  $\hat{T}_y = -\hat{b}_{y1}^V/b_{m1}$ ,

$\hat{y}_{\text{гр}} = \int_0^t v_{y \text{ зад}}(t)dt + \hat{l}\varphi_y$ .

Доказательство устойчивости замкнутой системы управления для перемещения груза по двум горизонтальным осям будет аналогичным, как и для первой задачи.

Назначаемый параметр  $\hat{b}_{y1}^V$  определяется аналогичным способом, как было описано для закона управления по перемещению груза по одной оси.

Для двухмаятниковой системы эталонная модель движения крюка описывается как:

$$\ddot{x}_{\text{км}} = a_{m1}\dot{x}_{\text{км}} + a_{m0}(x_{\text{км}} - x_{\text{к}}^{\text{зад}}); \quad x_{\text{км}}(t_0) = x_{\text{к}}(t_0), \quad (19)$$

где  $x_{\text{км}}$  – переменная эталонной модели, соответствующая  $x_{\text{к}}$ ;  $a_{m1} = -2\tilde{\xi}_m\omega_m$ ;  $a_{m0} = -(\omega_m)^2$ .

Предполагая, что эталонное движение по переменной  $x_k$  описывается в виде  $\ddot{x}_k = a_{m1}\dot{x} + a_{m0}(x_k - x_k^{зад})$  и сравнивая это равенство с уравнением (9) получаем заданную скорость тележки с учётом оцениваемых параметров объекта управления:

$$(-a_{m1})^{-1} \hat{a}_{x_k}^v \dot{v}_{зад} + v_{зад} = (-a_{m1})^{-1} [a_{m0}(x_k - x_k^{зад}) - \hat{a}_{x_k}^{\varphi_k} \varphi_k - \hat{a}_{x_k}^{\Delta\varphi} \Delta\varphi - \hat{a}_{x_k}^1]. \quad (20)$$

Доказательство устойчивости строится аналогичным образом, что и для предыдущих задач.

Алгоритм идентификации (15) здесь имеет следующие переменные:

$$\hat{\theta}_i \triangleq [(\hat{a}_{x_k}^{\varphi_k})_i, (\hat{a}_{x_k}^{\Delta\varphi})_i, (\hat{a}_{x_k}^1)_i]^T; y_{ri} = [\varphi_{ki}, \Delta\varphi, 1]^T; z_i = \ddot{\varphi}_{ki} - \hat{a}_{x_k}^v v_{зад}.$$

Значение назначаемой оценки  $\hat{a}_{x_k}^v$  находится в диапазоне, аналогичном (16).

Для сокращения времени на гашения колебаний груза относительно крюка предлагается модифицировать величину  $x_k^{зад}$  в виде:

$$x_k^{зад} = x_{\Gamma}^{зад} - l_{\Gamma} f_{\text{НЧ}}(\varphi_{\Gamma}) + k_{\text{д}} l_{\Gamma} f_{\text{форс}}(\Delta\varphi), \quad (21)$$

где последнее слагаемое предназначено для усиления демпфирования колебаний

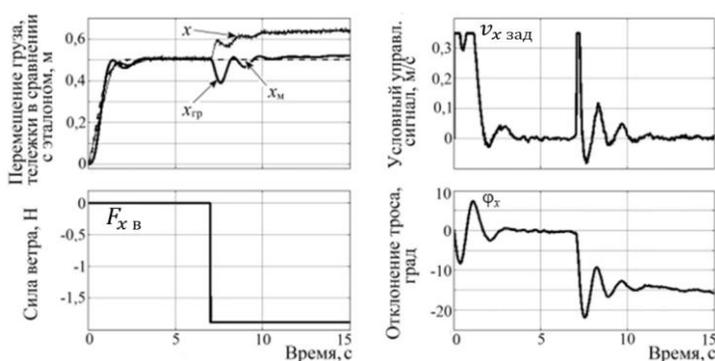


Рисунок 5 - Результаты 1-го исследования

груза за счет небольшого заданного перемещения крюка в сторону колебательного перемещения груза;  $k_{\text{д}} > 0$  – подбираемый коэффициент;  $f_{\text{форс}}(\Delta\varphi)$  – функция форсирования сигнала  $\Delta\varphi$ , для того, чтобы из-за задержки системой управления, указанный сигнал демпфирования попадал в нужную фазу.

**В четвертой главе** приведены результаты имитационных исследований адаптивной системы управления по моделям экспериментальной установки и модели полного типового крана в программной среде Matlab/Simulink/SimMechanics(MultiBody).

На рисунке 5 представлены результаты исследования системы управления моделью экспериментальной установки при перемещении груза по одной оси, параметры груза назначались следующие (1-е исследование):  $m_{\Gamma} = 0,85$  кг,  $J_y = 0,00204$  кг м<sup>2</sup>,  $l = 0,55$  м. Результаты исследования показывают высокую эффективность предложенной системы управления при большом многообразии грузов. Данный закон управления обеспечивает точное перемещение груза за короткий промежуток времени (время переходного процесса около 3 с), гасит колебания груза, которые возникают во время ускорения и торможения тележки, и способен парировать внешнее возмущение не более чем за 2 с. При этом система требует минимальной предварительной настройки. В условиях текущей неопределенности система управления быстро подстраивается под реальные характеристики объекта управления и внешние неконтролируемые возмущения.

На рисунке 6 представлены результаты исследования работоспособности системы управления моделью экспериментальной установки при перемещении груза

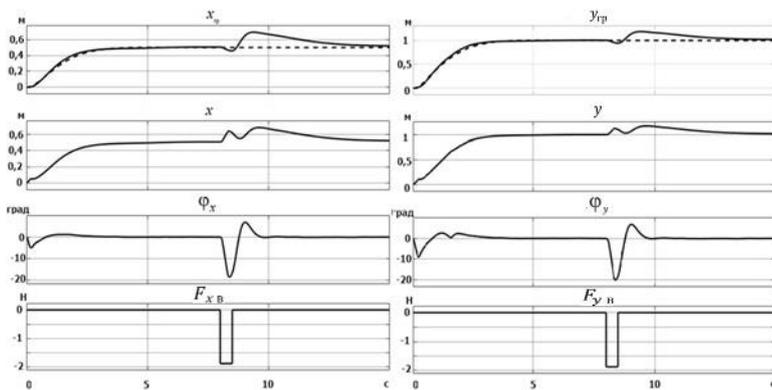


Рисунок 6 – Результаты 2-го исследования

ных осей движения. Также парировается внешнее импульсное возмущение, направленное по диагонали осей перемещения. Подобные результаты были получены в исследованиях имитационной модели полноразмерного крана при транспортировке груза по двум горизонтальным осям. Также во время транспортировки груза производился его спуск и подъём.

Результаты исследования системы управления двухмаятниковым подвесом

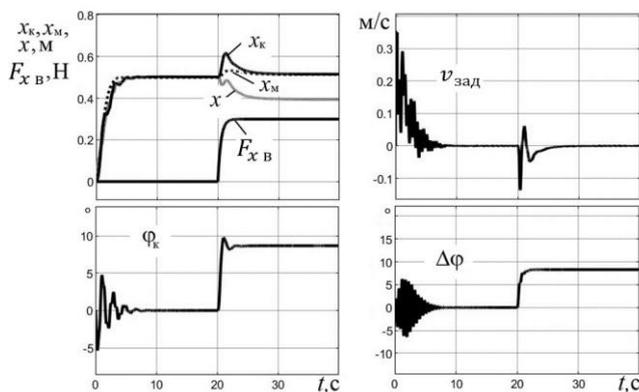


Рисунок 7 – Результаты 3-го исследования

ветрового воздействия не превышает 5 с.

Также с помощью имитационных моделей экспериментальной установки и полноразмерного грузового крана исследована зависимость качества управления от изменения основных факторов, влияющих на качество адаптивной системы управления (уровня зашумленности сигналов обратной связи, в виде гауссовского центрированного со среднеквадратичным отклонением, значения назначаемой оценки  $\hat{a}_1^V$ , время задержки управляющего сигнала). Максимально допустимая величина зашумленности сигналов обратной связи в виде гауссовского центрированного со среднеквадратичного отклонения для  $\dot{\phi}_x$ ,  $\ddot{x}_{гр}$ ,  $x$  для экспериментальной установки составили 0,8 град/с, 0,8 м/с<sup>2</sup> и 0,01, для полноразмерного крана – 0,8 град/с, 0,8 м/с<sup>2</sup> и 0,08 м соответственно. Также определили, что система управления устойчива, если значение оценки  $\hat{a}_1^V$  находится в диапазоне от  $a_1^V$  до 15  $a_1^V$  для макета мостового крана, для полноразмерного крана это диапазон от 5  $a_1^V$  до 80  $a_1^V$ . Максимальная величина задержки сигнала управления по аналогии составила 0,057 с и

по двум горизонтальным осям при параметрах (2-е исследование):  $m_T = 1$  кг,  $m_{Г} = 1$  кг,  $m_6 = 2$  кг,  $J_x = J_y = 0,008$  кг·м<sup>2</sup>,  $l = 0,6$  м.

Предлагаемый способ управления обеспечивает точное перемещение груза, гасит диагональные колебания, возникающие от ускорения и торможения крана, относительно двух взаимно перпендикулярных осей движения.

представлены на рисунке 7. Параметры соответствуют экспериментальной установке (3-е исследование:  $m_T = 0,85$  кг,  $m_K = 0,1$  кг,  $m_{Г} = 0,1$  кг,  $r_K = 0,03$  м,  $l_{Г} = 0,1$  м,  $x_{Г}^{зад} = 0,5$  м,  $k_{Гр} = 0,3$  Н·с/м,  $l_K = 0,8$  м,  $r_{Г} = 0,05$  м.

Время перемещения груза в целевую точку в условиях текущей неопределенности параметров крана, груза и внешних возмущений составляет не более 3-4 с (до 5 % ошибки по эталону), время успокоения угловых колебаний (до амплитуды в 5°) после начала перемещения груза или

0,11 с при текущих настройках системы управления. Из результатов исследований видно, что для построения адаптивной системы управления подойдёт большинство современного оборудования.

Для сравнения производительности крана при адаптивном способе управления и другими, наиболее распространенными (управление с ПИД-регулированием и нечёткой логикой), проведены исследования на имитационной модели грузоподъёмного крана. Расчет производительности крана производился при большом многообразии груза и длины подвеса, параметры крана назначались согласно ГОСТ 3332-54. Груз переносился по одной оси на расстояние 5 м. Из имитационных исследований определили, что лучшие результаты переходных процессов получены при адаптивном способе управления, а среднее увеличение производительности относительно ПИД-регулирования составило 17,8%, относительно управления с нечёткой логикой – 2,7%. При расчете производительности крана учитывалась средняя скорость перемещения груза по одной оси и скорость его подъёма/опускания. В следствие этого можно сделать вывод, что предложенный способ управления позволяет увеличить производительность крана относительно исследуемых до 20 %. Разность производительности относительно управления без систем гашения колебаний может достигать более 20%. Также разность в производительности может возрасти, при увеличении скорости перемещения крана, за счет установки более мощного привода.

**В пятой главе** описывается разработанная экспериментальная установка мостового крана для исследования предлагаемой системы управления на реальном объекте с учетом большинства факторов, присущих практической эксплуатации крана, что достаточно сложно симитировать при аналитическом моделировании.

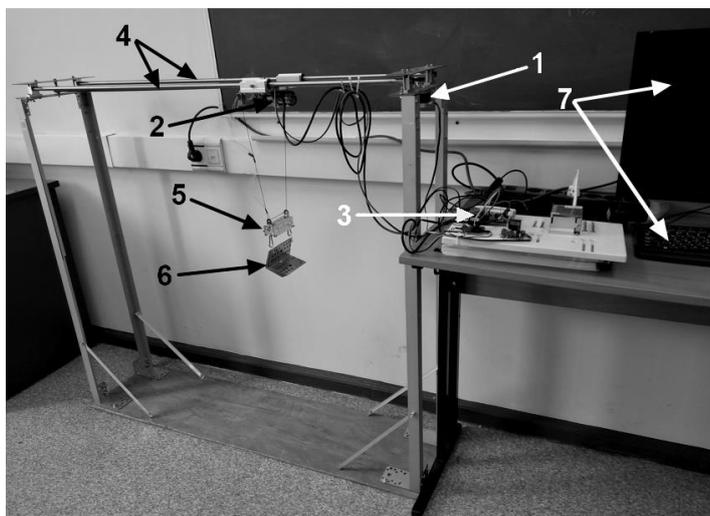


Рисунок 8 - Макет мостового крана

С помощью макета имитируется транспортировка груза по одной горизонтальной оси.

Собранный макет крановой установки представлен на рисунке 8. На рисунке используются следующие обозначения: 1 – привод тележки; 2 – привод подъёмного механизма; 3 – одноплатный компьютер Raspberry Pi 3 Model B+; 4 – цилиндрические направляющие; 5 – датчик угловой скорости GY-521 (на фотографии не видно); 6 – транспортируемый груз; 7 – монитор и клавиатура для управления одноплатным компьютером.

Результаты исследования адаптивной системы управления при перемещении груза по одной оси на макете мостового крана представлены на рисунке 9. Параметры объекта управления (4-е исследование:  $m_r = 1,05$  кг,  $J_y = 0,011655$  кг · м<sup>2</sup>,  $l = 0,61$  м.

Время регулирования составило не более 3 с. Транспортировка груза происходит с минимальными колебаниями груза и обеспечивается его точное позиционирование.

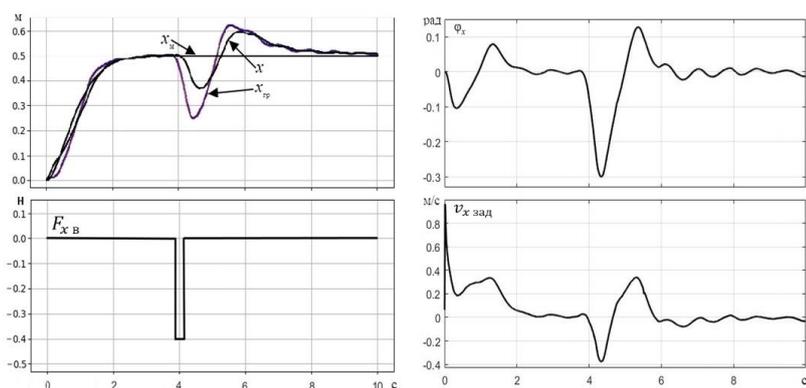


Рисунок 9 - Результаты 4-го исследования

Результаты исследования на экспериментальной установке указывают на возможность практической реализации предлагаемой системы управления.

Для анализа результатов исследования, полученных на макете мостового крана и в программной среде Matlab рассчитано среднее значение

среднеквадратичного отклонения при большой многообразии параметров объекта управления в момент переходного процесса: 9,1% в сравнении ЭМ и результатов, полученных в программной среде Matlab; 7% в сравнении ЭМ и результатов, полученных при исследовании на макете мостового крана. Среднеквадратичное отклонение рассчитывалось в диапазоне времени регулирования (до перемещения груза в заданное положение  $x_{гр}^{зад} \pm 5\%$ ).

Также стоит отметить, что при изменении массы груза, его момента инерции и длины подвеса характеристики переходного процесса менялись незначительно. А внешнее импульсное возмущение парировалось за короткий промежуток времени, не более чем за 4,2 с.

В заключении отражены результаты диссертационного исследования. В приложениях приведен программный код с алгоритмом адаптивной системы управления с неявной эталонной моделью, идентификационным алгоритмом и «упрощенными» условиями адаптируемости, акты о реализации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Обоснована актуальность темы исследования на основе анализа существующих способов управления крановыми системами с подвесным креплением груза и выявления их недостатков. К ним можно отнести неспособность качественного управления в условиях текущей неопределенности о параметрах крана и внешних возмущениях.

2. На основании уравнения Эйлера-Лагранжа сформированы математические модели одномятниковой и двухмятниковой системы крана по перемещению груза по одной и двум горизонтальным осям. Получено полное нелинейное описание движения и линеаризованное, последнее – при условии воздействия управляющей силы и при управлении по заданной скорости тележки (балки).

3. На основе полученных моделей одномятниковой и двухмятниковой системы обоснован способ адаптивного управления. Он построен на схеме, включающей алгоритм текущей параметрической идентификации, неявную эталонную модель, «упрощенные» условия адаптируемости и направлен на непосредственное отслеживание перемещения груза (крюка) по свойствам назначенного эталона.

Эталонная модель представляет собой колебательное звено и задаёт требуемые характеристики перемещения груза. Используя второй метод Ляпунова, определены условия устойчивости замкнутой системы управления и параметры эталонной модели.

В качестве алгоритма текущей параметрической идентификации предложено использовать рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания. В соответствии с «упрощенными» условиями адаптируемости, требования к качеству функционирования алгоритма идентификации сводятся к свойству сходимости невязки идентификации и довольно приблизительной информации о длине подвеса и радиуса инерции груза.

4. Обоснована структура системы управления, включающая вычислитель, реализующий указанный способ управления с формированием заданной скорости тележки (балки), датчики-энкодеры на тележке (балке) и датчик угловой скорости (угла) и линейного ускорения на крюке.

5. Приведены результаты компьютерного моделирования системы управления с тремя разными задачами: движения по одной и двум осям, двухмаятниковое движение подвеса груза при большом разнообразии параметров крана и переносимого груза и действии внешних возмущений. Система показала высокую эффективность управления в условиях текущей неопределенности в отличие от традиционных методов управления краном.

Проведен анализ увеличения производительности грузоподъемного крана при адаптивном способе управления. Определили, что лучшие результаты переходных процессов получены при адаптивном способе управления, среднее увеличение производительности относительно ПИД-регулирования составило 17,8%, относительно управления с нечёткой логикой – 2,7%. Разность в производительности исследуемых способов управления может возрасти при установке на кран более скоростного привода.

6. Разработана экспериментальная установка мостового крана, позволяющая оценить функциональность предлагаемой системы управления в условиях реального оборудования. Сформирован программный код алгоритмического обеспечения адаптивной системы управления. Результаты исследования на макете мостового крана подтвердили работоспособность системы управления: обеспечивается достаточно точное позиционирование груза, время регулирования составило не более 3 с, демпфируются маятниковых колебаний и парируются внешние возмущения. Груз перемещается согласно заданной траектории эталонной модели. Были определены требования к оборудованию системы управления.

7. Результаты исследования на экспериментальной установке показывают, что система эффективно справляется с гашением колебаний груза в условиях текущей параметрической неопределенности и действии внешних возмущений. Среднее значение среднеквадратичного отклонения при большой многообразии груза и длины его подвеса составило 9,1% в сравнении ЭМ и результатов, полученных в программной среде Matlab, 7% в сравнении ЭМ и результатов, полученных при исследовании на макете мостового крана. Среднеквадратичное отклонение

рассчитывалось в диапазоне времени регулирования (до достижения груза положения  $x_{гр}^{зад} \pm 5\%$ ).

8. По результатам диссертационной работы получено два акта о реализации от инжиниринговых компаний ООО «Техноавтоматика», ООО ИТЦ "Альтер Энерго" и подписано Соглашение о научно-производственном сотрудничестве с АО «Магнитогорский крановый завод» для производственных исследований.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В изданиях, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов работы:**

1. Круглов С.П. Метод адаптивного управления мостовым краном с прямым отслеживанием перемещения груза / С.П. Круглов., Д.Н. Аксаментов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – № 21(12). – С. 682–688.

2. Круглов С.П. Адаптивное управление мостовым краном по скорости перемещения тележки / С.П. Круглов, Д.Н. Аксаментов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники – 2022. – Том 25, № 1 – С. 86-92.

3. Аксаментов Д.Н. Исследование адаптивного закона управления мостовым краном на его макете / Д.Н. Аксаментов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2022 – 2, – С. 47-57.

4. Круглов С.П. Адаптивное управление двухмаятниковым подвесом мостового крана / С.П. Круглов, С.В. Ковыршин, Д.Н. Аксаментов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – № 23(9). – С. 451–461.

### **Патент на изобретение:**

5. Круглов С.П. Способ адаптивного управления мостовым краном / С.П. Круглов, С.В. Ковыршин, Д.Н. Аксаментов – патент RU 2744647 С1, В66С 13/18, опубликовано 12.03.2021.

### **Публикации в прочих научных изданиях:**

6. Аксаментов Д.Н. Автоматизация демпфирования колебаний груза на крановых установках / Д.Н. Аксаментов // Всероссийская научно-практическая конференция. ЗАБИЖТ, 2018, Том 2. С. 132-136.

7. Аксаментов Д.Н. Анализ подходов к автоматизации парирования раскачки груза мостового крана / Д.Н. Аксаментов, С.П. Круглов, С.В. Ковыршин // Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте. Всероссийская научно-практическая конференция. СамГУПС, 2019, С. 16-20.

8. Аксаментов Д.Н. Установка по исследованию алгоритмов успокоения колебаний груза мостового крана / Д.Н. Аксаментов, С.П. Круглов, С.В. Ковыршин. Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2019. – Т. 2. – С. 288–292.

9. Аксаментов Д.Н. Сравнительный анализ методов управления мостовым краном / Д.Н. Аксаментов, С.П. Круглов, С.В. Ковыршин. Электронный научный журнал «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами». – 2019. Т. 4. – С. 29–39.

10. Круглов С.П. Отладка системы управления экспериментальной установкой по исследованию законов управления мостовым краном / С.П. Круглов, С.В. Ковыршин, Д.Н. Аксаментов // Молодая наука Сибири – 2020, Том 2(8), ИрГУПС.

11. Аксаментов Д.Н. Исследование адаптивной системы управления мостового крана на экспериментальной установке / Д.Н. Аксаментов, С.П. Круглов, С.В. Ковыршин // Молодая наука Сибири. 2021, № 1(11), ИрГУПС. С. 1-10.

12. Аксаментов Д.Н. Исследование адаптивной системы управления мостовым краном при перемещении груза по двум осям / Д.Н. Аксаментов // Молодая наука Сибири. – 2022. – 2(16).

13. Аксаментов Д.Н. Исследование эффективности адаптивного управления мостовым краном / Д.Н. Аксаментов // Вестник науки. Наука в XXI веке: Инновационный потенциал развития. – 2022 – 9, – С. 258-269.