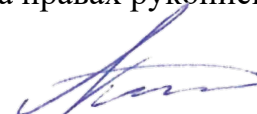


ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Иркутский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО ИрГУПС)

На правах рукописи



Аксаментов Дмитрий Николаевич

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

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Круглов Сергей Петрович

Иркутск – 2024

Содержание

Список сокращений.....	4
Введение.....	5
1 Степень разработанности темы исследования.....	11
1.1 Разомкнутые и комбинированные системы управления.....	17
1.2 Системы управления с обратной связью.....	20
1.3 Постановка задач диссертационного исследования.....	26
2 Математические модели объекта управления.....	28
2.1 Уравнение динамики объекта управления «тележка мостового крана – переносимый груз» при движении по одной оси.....	29
2.2 Уравнение динамики объекта управления «тележка, балка – переносимый груз» при движении по двум горизонтальным осям.....	35
2.3 Уравнение динамики двухмаятникового подвеса мостового крана.....	42
2.4 Выводы.....	50
3 Адаптивный закон управления.....	51
3.1 Закон управления тележкой мостового крана в задаче управления движением груза по одной оси	52
3.2 Алгоритм текущей идентификации.....	55
3.3 Закон управления мостовым краном в задаче управления перемещением груза по двум осям.....	58
3.4 Управление двухмаятниковым подвесом мостового крана.....	59
3.5 Выводы.....	64
4 Исследование адаптивной СУ на имитационной компьютерной модели.....	66
4.1 Исследование закона управления на имитационной модели при перемещении груза по одной оси.....	66

4.2 Сравнительный анализ методов управления мостовым краном по одной оси на имитационной модели (имитационные исследования экспериментальной установки).....	68
4.3 Расчёт производительности крана при адаптивном способе управления (имитационные исследования грузоподъёмного крана).....	77
4.4 Анализ факторов, влияющих на качество адаптивной системы управления (имитационные исследования экспериментальной установки).....	83
4.5 Анализ факторов, влияющих на качество системы управления (имитационные исследования грузоподъёмного крана).....	92
4.6 Исследования адаптивного закона управления на имитационной модели при перемещении груза по двум осям.....	100
4.7 Исследование адаптивного закона управления при подъёме и перемещении груза по двум горизонтальным осям.....	105
4.8 Исследование закона управления двухмаятниковым подвесом мостового крана.....	110
4.9 Выводы.....	114
5 Исследование адаптивного способа управления на макете мостового крана при перемещении груза по одной оси.....	116
5.1 Выводы.....	125
Заключение.....	126
Список используемых источников.....	130
Приложение А.....	149
Приложение Б.....	163
Приложение В.....	164

Список сокращений

ОУ – объект управления

ЗУ – закон управления

СУ – система управления

ЗСУ – замкнутая система управления

РСУ – разомкнутая система управления

ЭМ – эталонная модель

ОС – обратная связь

МК – мостовой кран

САУ – система автоматического управления

ИА – идентификационный алгоритм

Введение

Актуальность темы исследования. В современном мире грузоподъемные краны широко применяются в различных отраслях человеческой деятельности, например в цехах, судоходных портах, строительных площадках, железнодорожных тупиках, шахтах и т.д. Использование кранов позволяет снизить трудозатраты человека и сократить время рабочего процесса. Однако использование кранов сопряжено с колебаниями переносимого груза – явлением, встречающимся на всех типах крановых установках, где используется подвесное крепление груза. Колебания возникают, в основном, во время ускорения и торможения крана, или при воздействии каких-либо внешних неконтролируемых возмущений (ветер, неровности подкранового пути, перебои в электропитании привода крана и т.д.). Из-за колебаний груза требуется дополнительное время на ожидание его стабилизации перед его точной установкой в назначенное место. Неспособность контролировать раскачивание груза может привести к затруднениям в автоматизации системы, а также к поломки 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, повышают энергопотребление исполнительных механизмов. Например, устранение маятниковых колебаний груза позволит сэкономить до 20% рабочего времени [1].

Ещё одной важной причиной наличия эффективной СУ краном является обеспечение безопасной работы. Как сообщается в [2], краны являются причиной одной трети всех смертельных случаев и травм во время строительных и ремонтных работах. Согласно [3], в период с января 2011 года по октябрь 2015 года основной причиной аварий было случайное опрокидывание крана. Другой причиной, о которой сообщалось, были случаи столкновения человека с движущимся грузом. Обе причины несчастных случаев могут быть связаны с раскачиванием груза и

неэффективностью их управления. С точки зрения безопасности, к более безопасным относится тот кран, который является полностью управляемым, без произвольных колебаний груза.

Исходя из этого, одним из основных направлений в развитии грузоподъемного оборудования является гашение колебаний груза, разработка качественно новых и модернизация существующих СУ для увеличения производительности. Данная задача решена только при априорной информации о параметрах крана его СУ и отсутствии возмущений, либо имеет низкие эксплуатационные свойства. При эксплуатации крановых установок определить все необходимые параметры достаточно сложно, это в свою очередь негативно отражается на качестве управления большинства предлагаемых способов. Также частая настройка СУ краном под определенный тип параметров груза, замедляет рабочий процесс, плюс появляется вероятность совершить ошибку при настройке, что негативно скажется на качестве управления.

Очевидно, на сегодняшний день актуальной задачей, для повышения производительности и безопасности работ на крановых установках, является разработка СУ, способной в текущий момент времени подстраиваться под конкретные параметры груза и внешние возмущения, обеспечивая точное перемещение груза в назначенное положение.

Цель и задачи. Целью диссертационной работы является повышение производительности погрузочно-разгрузочных работ мостовым краном на производстве в условиях текущей неопределённости 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 двухмятниковой 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.

Теоретическая значимость работы. Формирование алгоритмического обеспечения системы автоматического управления мостовым краном, способной достигать цели управления (быстрое перемещение груза в назначенную точку, парирование инерционных колебаний груза и внешних возмущений) в условиях текущей параметрической неопределенности параметров крана, системы управления и внешних возмущений. Доказательство условий устойчивости замкнутой системы управления и параметров системы управления.

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 раскачки 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 получаемых результатов с результатами других ученых. Корректность модельных исследований основывается на широко используемом и многократно проверенном компьютерном инструменте, как программная среда 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

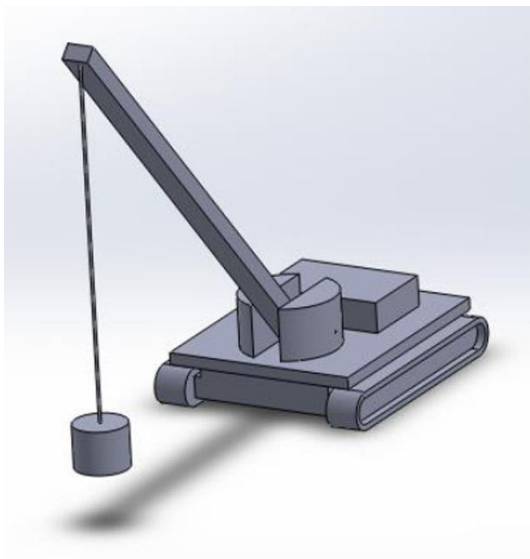
конференция «Наука в XXI веке: инновационный потенциал развития», Уфа, НИЦ «Вестник науки».

Участвовал в 3 научно-исследовательских и опытно конструкторских работах (НИОКР).

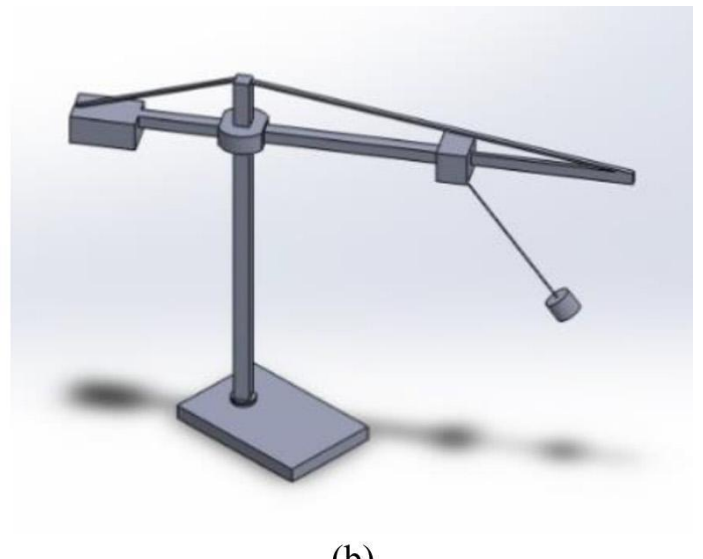
Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 13 работах, в том числе 4 статьи в научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК, 8 статей в сборниках трудов и материалах международных и всероссийских конференций, патент на изобретение № RU 2744647 C1 способ адаптивного управления мостовым краном, опубликовано 12.03.2021, Бюл.8.

1 Степень разработанности темы исследования

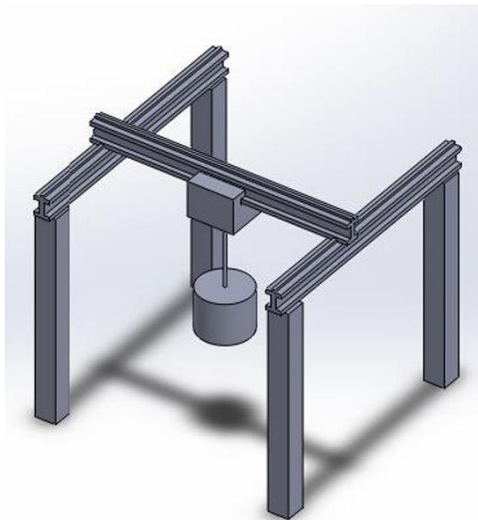
Грузоподъёмные краны широко применяются в различных отраслях промышленности. В настоящее время существует немалое количество разновидностей крана. Все они находят применения в зависимости от задач и условий их эксплуатации. К наиболее распространённым видам кранов можно отнести мостовые краны, козловые краны, башенные краны и стреловые краны. Схематичное представление этих кранов изображено на рисунке 1.1.



(a)



(b)



(c)

Рисунок 1.1 – Виды грузоподъёмных кранов. (a) – стреловой кран; (b) – башенный кран; (c) – мостовой кран

В целом, эти краны можно разделить на две группы в зависимости от их конструкции и характера движения: 1 – мостовые краны и козловые краны; 2 – башенные краны и стреловые краны.

Кран-балка также известна как МК, работает на эстакаде, вдоль производственной линии, рабочей зоны крана. Обычно МК способен перемещать груз по трем осям: две горизонтальные оси – перемещение груза вдоль линии движения поперечной балки и тележки крана; вертикальная ось – подъём или опускание подвешенного груза. МК конструктивно и по характеру перемещения груза схожи с козловыми кранами. Различия состоит только в том, что у МК поперечная балка перемещается по подкрановому пути, расположенному в верхней зоне, у козловых кранов подкрановые пути расположены на уровне земли. Козловые краны и МК обычно используются на заводах, портах, железнодорожных тупиках и складах.

Башенные краны имеют радиальное движение, при котором стрела вращается вокруг фиксированной вертикальной оси. Угол поворота обычно составляет до 180 или 360 градусов. Тележка перемещает груз вдоль стрелы в поступательном направлении. Башенные краны широко применяются в строительстве, а также в портах.

В качестве грузозахватного устройства может выступать крюк, грейфер, магнит и другие формы захватов [4].

Во время перемещения груза краном он подвержен чрезмерному раскачиванию, что отрицательно влияет на точность позиционирования, качество, эффективность и безопасность его эксплуатации. Неспособность контролировать колебания может привести к затруднениям в автоматизации системы, а также к поломке переносимого груза или среды вокруг рабочей зоны крана при его столкновении вследствие раскачивания груза. Статистика показывает, что традиционное крановое оборудование тратит порядка 30% времени на фиксацию груза при погрузочно/разгрузочных работах [5].

Амплитуда колебаний подвешенного груза зависит от длины подвеса и от величины ускорения тележки (балки) МК. При снижении ускорения можно добиться

уменьшения раскачивания груза, но это приводит к росту времени цикла работы крана, а значит снижению производительности. При движении механизма на него действует не только реактивная сила сопротивления, но и горизонтальная сила от натяжения канатов системы подвеса, что влияет на плавность движения и проскальзывание колес, а также значительно усложняет построение системы автоматизированного управления [6, 7].

При перемещении тележки (балки) МК возникают упругие динамические нагрузки в механических передачах. Также дополнительную нагрузку создают вынужденные колебания подвешенного груза, которые имеют меньшую величину, чем упругие колебания в связях, однако также влияют на равномерность хода тележки (балки), на удобство эксплуатации крана, а также на точность позиционирования груза [8, 9, 10]:

Грузоподъемные краны можно рассматривать как сложно управляемые системы, у которых количество приводов меньше числа степеней свободы. Следовательно, оператору бывает непросто обеспечить качественное управление краном при раскачивании груза. Из-за этого операторы нередко прибегают к снижению скорости перемещения груза при его транспортировке. Опытные операторы крановых установок, в принципе способны эффективно гасить колебания груза. Но воздействие внешних возмущений на переносимый груз требуют быстрой реакции и постоянный контроль, что не всегда человек способен обеспечить, так как ручной труд, как показывает практика, сопряжен с ошибками из-за усталости. Кроме того, для обучения операторов требуется длительное время и затраты.

В настоящее время большое количество работ посвящено разработке способов управления крановыми системами, главной задачей которых является уменьшение колебаний груза при его транспортировке за счёт чего увеличивается производительность работ крана [5].

Ученые, внесшие значительный вклад в автоматизацию управления кранами с подвесным креплением груза: Черноусько Ф.Л., Хижняков Ю.Н., Южаков А.А., Герасимьяк 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.

Демпфирующая способность системы кранов играет важную роль в обеспечении точности движения груза. Гашение маятниковых колебаний достигается путём применения пассивных или активных методов демпфирования. Внешние демпфирующие системы, такие как амортизаторы и вязкие демпферы являются примерами пассивных методов [12]. В работах [13-22] для минимизации колебаний используются дополнительные средства, соединяющие несущие элементы и механизмы крепления груза, такие как специальные траверсы, гидроцилиндры, приводные лебедки, специальные схемы подвеса и др. В [23] предлагается ввести в конструкцию крана дополнительный электропривод, который поступательным движением воздействует на точку подвеса груза для демпфирования колебаний груза. Однако подобный метод значительно усложняет и удорожает конструкцию крана.

СУ с обратной связью (ОС) или разомкнутые системы управления (PCY) – это активные методы [14].

Основным недостатком пассивных методов демпфирования является то, что для их реализации необходимо вносить изменение в конструкцию самого крана, чтобы установить дополнительные механизмы. Это не всегда возможно из-за места и условий эксплуатации крана, поскольку подобные изменения могут сказаться на габаритах системы в целом и ее производительной способности, уменьшение рабочего хода крана или высоты подъёма груза. Также подобного рода изменения в конструкции крана влекут за собой необходимость внесения соответствующих изменений в его паспорт.

Проблемы со стабильностью работы крана зачастую возникают из-за колебаний груза в момент его перемещения. Взаимосвязь между тележкой крана и раскачивающимся грузом нелинейна и тесно связана. Более того, внешние возмущения, такие как ветер и наличие неопределенностей о параметрах крана, могут негативно сказываться на стабильной работе. При подъёме груза также могут

возникнуть проблемы, с которыми сталкиваются операторы, поскольку это может способствовать раскачиванию груза [5].

Основные параметры, влияющие на управление краном: масса тележки, масса и момент инерции груза, длина троса, за который крепится груз, сила трения между колесами тележки и подкрановым путем и сила воздействия внешнего возмущения. Фактически же, основные источники колебаний груза – это ускорение или торможение тележки и момент инерции, возникающий в результате движения [11, 15]. Поскольку краны обычно слабо демпфированы, любое кратковременное движение требует длительного времени на успокоение груза [17].

Колебания груза можно разделить на две составляющие: продольные (угол отклонения груза от вертикальной прямой в плоскости перемещения крана) и поперечные (угол отклонения вне плоскости перемещения крана). Продольные колебания можно уменьшить за счёт перемещения тележки крана с определенной скоростью и ускорением. Однако для снижения поперечных колебаний может потребоваться более сложная СУ [28].

Из этого можно сделать вывод, что существует потребность в разработке СУ, которая способна одновременно подавлять колебания груза как продольные, так и поперечные.

Решению этой задачи, в разных ее постановках, с помощью активных способов демпфирования посвящено немалое количество работ, например [29-149]. Все они в большей или меньшей степени решают свою задачу. Разработанные СУ можно разделить на методы разомкнутой и замкнутой СУ. Кроме того, были предложены и комбинированные СУ. Большая часть общеизвестных способов управления грузовыми кранами с разделением их на группы представлена на рисунке 1.2 [29].

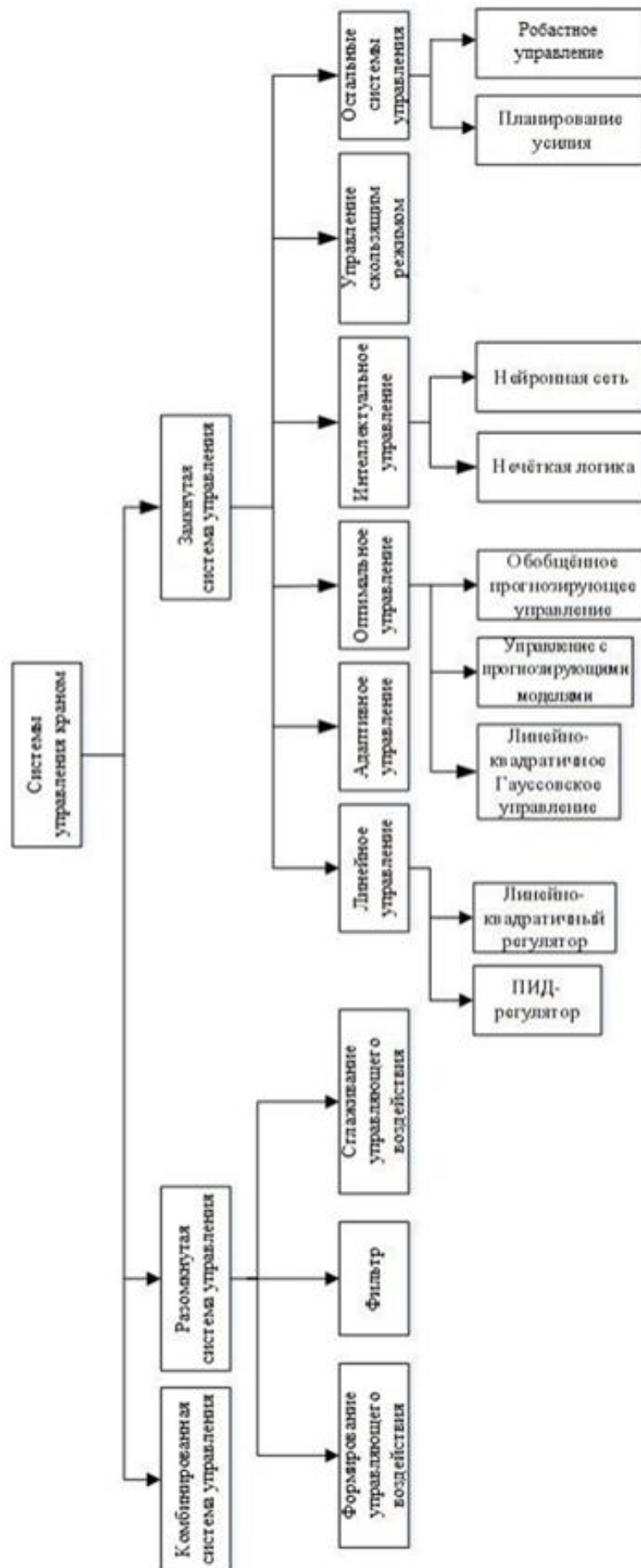


Рисунок 1.2 – Группировка способов управления грузовыми кранами

Также встречаются и ручные способы гашения колебаний [30-33]. Такие способы подразумевают, что оператор крана определенным образом управляет перемещением тележки или балки, например, следующим образом: при разгоне осуществляют операции «пуск – торможение – пуск», а при торможении «торможение – пуск – торможение». Такой способ один из самых простых в реализации, однако требует высокой квалификации оператора крана и безошибочной работы.

1.1 Разомкнутые и комбинированные системы управления

Системы управления с разомкнутым контуром широко использовались в различных исследованиях для снижения колебаний груза. РСУ крановыми установками сравнительно несложно реализовать, поскольку для этого не требуется монтаж дополнительных устройств ОС, что, безусловно, экономия с точки зрения материальных и временных затрат, также в большинстве случаев алгоритм управления подобных СУ достаточно прост [34]. Структурная схема РСУ представлена на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Структурная схема РСУ

Однако главный недостаток такой системы в том, что она чувствительна к внешним возмущениям, а также к изменениям параметров крана [35]. Поскольку данная СУ не способно подстраивать управляющее воздействия в таких случаях. Примером внешнего возмущения, которое всегда влияет на работу крана, является ветер или морская волна у кранов, которые используются на судах.

Формирование входного воздействия – это один из методов РСУ, который можно применять в реальном времени. Этот метод широко используется многими исследователями для управления кранами с целью минимизации колебаний груза.

Например, для управления поворотными кранами [36-44]. В этом случае колебания снижаются за счёт построения входного управляющего сигнала с последовательностью импульсов, которые были сформированы на основе собственных частот и коэффициентов демпфирования системы. Для козловых кранов подобные решения встречаются в работах [45-49], для МК в [50-52].

Существует метод с применением обычного релейного управления электроприводом [53]. Процесс разгона точки подвеса груза разбивается на три этапа с различными ускорениями, это позволяет выйти на режим максимальной скорости перемещения при незначительном отклонении груза относительно гравитационной вертикали. Это обеспечивает предотвращение раскачивания груза только в момент разгона и торможения в определённом диапазоне параметрах СУ.

Известен классический вариант решения задачи оптимального управления по критерию «быстродействие» с использованием принципа максимума Л.С. Понтрягина [54, 55]. Он даёт решение в виде многократного переключения между максимальными и минимальными значениями силы, действующей на тележку или балку крана. Для настройки СУ требуется точная информация о параметрах системы.

Известны способы управления с использованием *shaping*-фильтров [56-58]. Они основаны на временном перераспределении силового воздействия на механизм крана, например, на тележку в момент разгона и торможения, при сохранении неизменного суммарного воздействия. За счёт увеличения времени перехода тележки с одной скорости на другую обеспечивается сдвиг управляющего воздействия на период и/или полпериода вычисленных колебаний груза и при наложении этого сдвига на колебания груза, в идеальном случае, полное их подавление. К наиболее распространённым *shaping*-алгоритмам относятся: ZV-shaper (ZeroVibration shaper), ZVD-shaper (Zero-Vibration and Derivative shaper), ZVDD-shaper (Zero-Vibration and Derivative-Derivative shaper).

Метод разомкнутой системы формирования управляющего сигнала, чувствителен к внешним возмущениям, а также к изменениям параметров [35]. Способ формирования входного воздействия также чувствителен к частоте

колебаний. В начальный момент движения крана угол отклонения груза должен быть равен нулю, иначе управляющее воздействие может вызвать усиление колебаний. Несмотря на эти недостатки, способ формирования управляющего сигнала считается недорогим и сравнительно простым в реализации [13].

Были предложены способы объединить РСУ с ЗСУ [59-62]. Здесь ЗСУ обеспечивает точное позиционирование тележки и парирование внешних возмущений, а система формирования управляющего воздействия способствует подавлению собственных колебаний груза. Структурная схема комбинированной СУ представлена на рисунке 1.4.

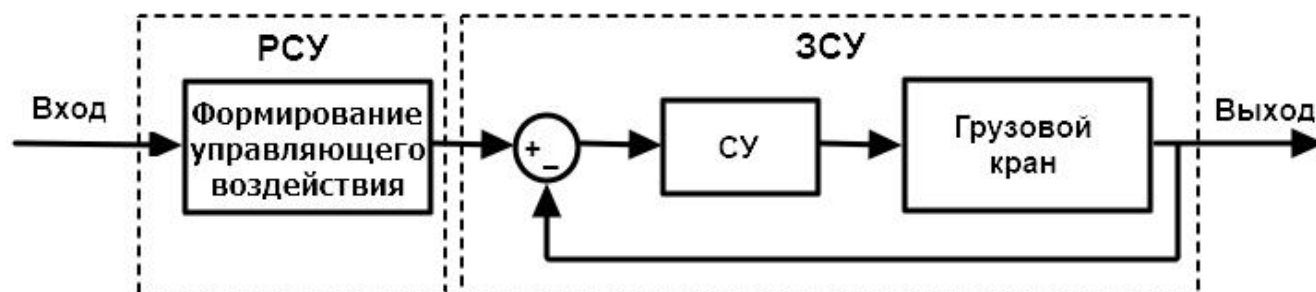


Рисунок 1.4 – Структурная схема комбинированной СУ

В работе [63] описывается комбинированный способ управления, который формирует сигналы перемещения в заданную точку груза и гашения остаточных колебаний двухмятниковой системы МК. Его исследование на макете МК показало существенное снижение остаточных колебаний.

В целях устранения колебаний в условиях неопределенности параметров и возможным их изменением во время движения были разработаны адаптивные СУ. В [64] предложили адаптивное формирование управляющего воздействия на основе изменения собственной частоты, чтобы справиться с неопределенностями параметров. В [65] предлагается адаптивное управление, в котором амплитуда и частота управляющих импульсов изменяются для компенсации неопределенностей системы. Формирование адаптивного управляющего воздействия было предложено в [66] с использованием РСУ, в котором коэффициенты ОУ могут быть оценены напрямую без необходимости сбора информации о параметрах системы.

Также были предложены способы управления грузовыми кранами, использующие фильтры с бесконечной импульсной характеристикой и фильтры с конечной импульсной характеристикой. В [67] фильтр с бесконечной импульсной характеристикой использовали для построения СУ мостовым краном, для козлового крана в [68] и для башенного крана в [69]. Фильтры с конечной импульсной характеристикой использовали для башенного крана в [70], козлового крана [71] и стрелового крана [72].

Сглаживание управляющего воздействия – это способ управления, который способен в значительной мере снизить колебания груза [51]. Сглаживающий фильтр формируется путём оценки собственной частоты системы и коэффициента демпфирования. Существует несколько вариантов, которые используются для уменьшения колебаний: «S-траектория», тригонометрическая функция, функция Гаусса, сплайн-фильтрация и полиномиальные фильтры. В [51] способ сглаживания управляющего воздействия исследовали на одно- и двух маятниковых крановых системах. Разработанный сглаживающий фильтр также успешно работает с многорежимной системой подавления колебаний. Однако данный метод способен снижать колебания, возникающие от управления оператором, и не способен парировать внешние возмущения.

В [73,74] сглаживающее управляющее воздействие использовалось для подавления колебаний МК, который рассматривался как система с двойным маятником. Разработанный способ представлял собой комбинацию низкочастотного и высокочастотного фильтра, который способен устранять колебания двухмаятниковой системы. Также способ сглаживающего управляющего воздействия был объединен с системой подавления внешних возмущений (ветра) [75]. Эффективность комбинированной системы управления проверена на лабораторном стенде МК.

1.2 Системы управления с обратной связью

Системы управления с обратной связью также широко известны в задачах управления крановыми системами. Такие системы позволяют регулировать управляющий сигнал в зависимости от желаемой выходной величины. В системах с ОС используется измерение необходимых величин и оценка состояний для формирования управляющего сигнала, который способен снизить колебания груза и точно переместить груз. Следовательно, ЗСУ менее чувствительна к внешним возмущениям и изменениям параметров крана, чем РСУ [76]. Структурная схема ЗСУ представлена на рисунке 1.5.

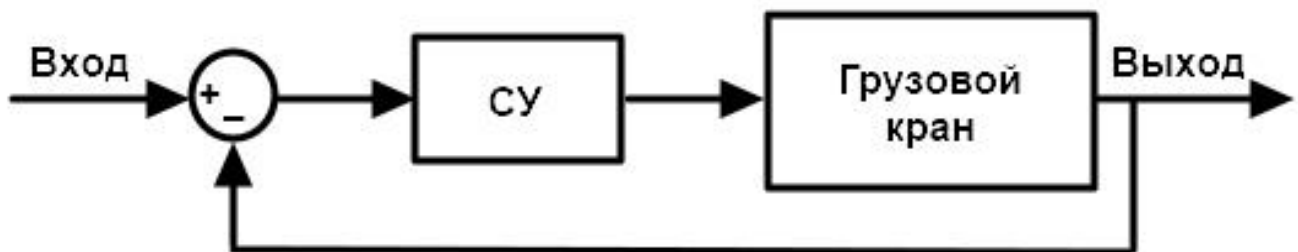


Рисунок 1.5 – Структурная схема ЗСУ

Однако для построения подобных систем требуются датчики ОС, измеряющие необходимые величины, например, положения тележки и угла отклонения груза [12]. Установка необходимых датчиков в крановые системы, настройка и их обслуживание требует дополнительного времени и затрат. Кроме того, для СУ с обратной связью возникают проблемы со стабильностью и зашумлением сигнала, что может негативно сказываться на работе крана. Также ЗСУ более медленные из-за задержек сигналов ОС и их обработки. Например, требуется дополнительный промежуток времени на определение угла отклонения груза до формирования управляющего воздействия [61]. Однако хорошо настроенная СУ может привести к более высокой производительности, по сравнению с СУ без обратной связи.

Другой сложностью в применении СУ с обратной связью на промышленных кранах является необходимость точного измерения необходимой величины.

Совместная работа операторов крана и системы гашения колебаний груза может нарушить процесс работы, потому как операторам перед эксплуатацией крана потребуется дополнительное время на обучение и получение практических навыков по управлению краном. Поскольку неквалифицированные операторы часто раздражаются от несогласованности их желаемых действий с действиями крана под управлением системой, корректирующей их управление [25].

В задачах управления грузовыми кранами широко распространены СУ с ПИД-регулированием [77, 78]. В работе [79] предлагается использовать модернизированный ПД-регулятор с сигмоидальной функцией, в [80] – принцип модального управления, в [81] – ПИД-регулятор с генетическим алгоритмом, [82, 83] предполагает систему гашения колебаний на основе настраиваемого ПИД-регулятора. В работе [34] для управления козловым краном используется ПИД-регулятор с системой самонастройки, основанной на нейронной сети. Однако данный алгоритм был настроен на минимизацию колебаний груза от управляющих воздействий оператора. В [4] предлагается нейронный ПИД-регулятор, позволяющий упростить настройку коэффициента усиления для обеспечения хорошего отклика системы при управлении положением и гашением колебаний груза козлового крана. Предложенная СУ не требовала больших дифференциальных и интегральных коэффициентов с гарантией асимптотической устойчивости системы по сравнению с другими классическими и нейронными ПИД-регуляторами.

Известен способ снижения колебаний груза с помощью изменения длины его подвеса [84]. В [85] рассматривается синтез двухконтурной СУ с ПИД-регулированием, где в первом контуре обеспечивается задача снижения величины угла отклонения груза, а во втором контуре решается задача перемещения груза на заданное расстояние. В работе [86] предлагается формировать ЗУ на основе заранее назначенной эталонной траектории перемещения груза. Все эти работы и им подобные предполагают наличие априорной информации о параметрах крана и внешнем возмущении, либо отсутствии последнего. Известно, что данные

регуляторы не обеспечивают должного качества управления при значительном многообразии вариантов груза, длины троса и внешних возмущений.

Линейно-квадратичные регуляторы также используются для управления грузовыми кранами. Например, в [87] предложена подобная СУ мостовым краном. Метод параметрической формулы использовался для решения обратных задач при нахождении соответствующей весовой матрицы. В [88-90] линейно-квадратичные регуляторы применялись для стреловых кранов. В [91] был сформулирован подход линейного матричного неравенства. Однако конструкция системы с линейным управлением требует наличия линеаризованного ОУ, что, в случае с крановыми системами, не актуально. Нелинейные факторы, такие как ветер, изменение длины кабеля, масса груза и трение тележки крана, не учитывались. Все эти факторы могут повлиять на надежность и производительность линеаризованной модели и снизить их до минимума.

Управление с прогнозирующими моделями широко распространенный алгоритм многопараметрического управления благодаря своим преимуществам в работе, возможности использования простых моделей, обеспечению устойчивости ЗСУ и устойчивости к параметрическим неопределенностям [92]. В [93-96] приведены примеры его использования в СУ мостовыми и козловыми кранами. Промышленное применение управления с прогнозирующими моделями было продемонстрировано в [97] с помощью портового мобильного крана LIEBHERR (стрелового крана), система эффективно предотвращала раскачивание груза во время его подъема и транспортировки. Работа была усовершенствована за счёт дополнительного контура ОС для повышения устойчивости СУ [98].

В [99] было предложено линейно-квадратичное гауссовское управление для уменьшения колебаний груза при эксплуатации МК. В СУ квадратичная производная составляющая переменную состояния была добавлена в общие стандартные показатели эффективности, как для управления, так и для оценивания. Эта дополнительная составляющая позволила разработать весовую функцию для минимизации заданных показателей производительности. Результаты показали, что

назначенную дополнительную составляющую можно использовать для уменьшения колебаний груза. Два типа управления, линейно-квадратичное гауссовское управление и обобщенно прогнозирующее управление, реализовали и сравнили их эффективность в [100, 101] для управления колебаниями груза морского крана.

В [102] была разработана и реализована СУ на основе обобщенно прогнозирующего управления. Предлагаемое управление направлено на повышение устойчивости при изменении параметров крана, длины троса и массы груза, а также для снижения остаточных колебаний и их минимизации во время перемещения груза. Для определения параметров в текущий момент времени использовался алгоритм идентификации.

Способ управления с нейронной сетью имеет множество вариантов решения проблемы математических моделей. Нейронная сеть обладает хорошей способностью к нелинейной обработке и устойчивостью из-за своей параллельной архитектуры [105]. Более того, нейронная сеть устойчива к изменению параметров крана во время движения [34]. В [106] описывается способ управления МК с помощью нейронной сети, где для настройки параметров системы используется алгоритм управления со скользящим режимом. Другие варианты самонастраивающейся нейронной сети описываются в [107] и рекуррентная нейронная сеть в [108].

Управление с нечёткой логикой широко применяется в крановых установках [121-130], однако оно не всегда способно качественно решать задачу управления в условиях неконтролируемых возмущений. Имеются решения управления кранами на основе скользящих режимов, в том числе, в сочетании с нечетким управлением и нейроконтроллерами, например, [131-133]. Данные системы отличаются робастными свойствами к неизвестным параметрам СУ и возмущениям, но связаны практически с постоянным возбужденным состоянием системы, что влечёт расходы на управление и быстрое расходование ресурса приводов.

Известен способ управления МК с использованием робастного управления [134], [135] – управление козловым краном. В работе [136] предлагается адаптивный алгоритм с планированием управляющего сигнала для осуществления

поступательного и вращательного движения башенного крана при большом многообразии груза и различной длиной троса. Однако подобные способы управления не всегда способны эффективно парировать внешние возмущения.

Известен подход с текущим оцениванием неизвестных параметров СУ, например, [137,138]. Управление строится в 2 этапа: на первом формируется «S-траектория» тележки с учетом ее характеристик, на втором реализуется оптимальный (в энергетическом смысле) адаптивный ЗУ для перемещения по заданной траектории. Адаптивный закон реализован на градиентном алгоритме идентификации параметров. Последнее является недостатком, поскольку связано с проблемами выбора параметров алгоритма идентификации для конкретных случаев, а также низкими идентифицирующими свойствами. Подобными свойствами обладает работа [139], предлагающая строить адаптивный ЗУ краном на основе использования функции Ляпунова.

В работе [140] предлагается использовать адаптивную СУ с идентификационным алгоритмом. С его помощью в начальный момент времени оцениваются параметры крана, затем строится ЗУ на основе использования функции Ляпунова. Поскольку идентификация параметров крана происходит только в начальный момент времени, ЗУ не может учитывать текущие изменения параметров и возмущения.

Известны реально существующие системы автоматического гашения колебаний груза, разработанные ведущими производителями средств автоматизации производственных процессов: SIEMENS SIMOCRANE Sway Control - система гашения колебаний, основанная на расчётах математической модели с использованием камеры [141]; MAGNETEK ASC Electromotive – оптимальное управление краном строится после предварительного ввода параметров крана и груза [142]; ABB ACS880 Drives with anti-Sway Control система оценивает постоянную времени маятника, за счёт измерения скорости и величины угла отклонения, далее на ее основе рассчитывается оптимальная скорость передвижения тележки [143]. Известна система подавления колебаний от фирмы Schneider Electric – крановая

карта. Это отдельный модуль, который легко встраивается в стандартный частотный преобразователь и управляет приводами, берет на себя управление всей системой по шине CANopen. Крановая карта корректирует управляющий сигнал оператора, задающий скорость вращения электропривода, непрерывно ограничивая раскачку. При ускорении или торможении тележки крана, собственные колебания груза значительно снижаются [144]. Данная система не использует дополнительных датчиков, кроме опционального прибора для измерения длины подвеса, в следствии этого не способна парировать внешние неконтролируемые возмущения и чувствительна к изменению параметров груза, поскольку настраивается под усредненный тип параметров. Кроме того, для корректной работы СУ необходимо задавать вручную или измерять длину подвеса груза.

Система контроля раскачивания Sway Control System [145, 146] от ведущего мирового кранового производителя Konecranes имеет в своей основе блок для обеспечения точного позиционирования груза. Система управления рассчитывает оптимальные кривые ускорения и замедления механизма крана для демпфирования раскачивания груза. Система управления также позволяет обеспечить защиту от соударения подвеса со стеной или оборудованием.

Данные СУ не всегда способны быстро демпфировать колебания груза при большом многообразии его возможных параметров, без дополнительной настройки, а также парировать внешние возмущения.

1.3 Постановка задач диссертационного исследования

На основании проведенного анализа методов управления грузовыми кранами можно сделать вывод, что большинство существующих СУ не способны обеспечить качественного управления при практической эксплуатации в условиях текущей неопределенности о параметрах крана и внешних возмущениях. Автор работы считает, что одним из перспективных направлений является адаптивные СУ с

невной ЭМ, идентификационным алгоритмом с оцениванием параметров крана в текущий момент времени и «упрощенными» условиями адаптируемости.

Из вышесказанного следует основная цель диссертационного исследования: повышение производительности погрузочно-разгрузочных работ МК на производстве, за счёт адаптивной автоматизации управления краном в условиях текущей неопределённости параметров крана и внешних возмущений.

В соответствии с указанной целью исследования в диссертационной работе ставятся следующие задачи:

- обоснование актуальности темы исследования, постановка задач исследования;
- 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.

2 Математические модели объекта управления

Для построения ЗУ и последующего исследования его устойчивости необходимо определить математическую модель ОУ для разных постановок задач управления краном: при движении груза по одной оси, одновременно по двум осям и при двухмаятниковой схеме движения груза. Модели предполагается построить на основании уравнений Эйлера-Лагранжа, поступательного и вращательного движения системы «тележка-маятник». При этом будут допускаться следующие упрощения: не учитывается встречное сопротивление воздуха во время движения системы; не учитываются масса троса и его трение углового движения, в силу их малости; не учитываются начальные значения переменных по положению и скорости ОУ.

Математические модели динамики горизонтального перемещения груза будем строить 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 или балки крана используется асинхронный двигатель в связке с частотным преобразователем. Стоит отметить, что в настоящее время наибольшее распространение в крановом электроприводе имеет именно асинхронный двигатель (более 90% всех двигателей крановой серии) [147]. А применение частотно регулируемых систем управления переменного тока в механизмах мостового крана позволяет снизить потери в переходных режимах работы крана [148]. Системы с частотными преобразователями при одинаковой нагрузке позволяют снизить в 1,5 – 1,8 раза энергопотребления двигателей по сравнению с системами регулирования без применения преобразователей частоты или плавного пуска за счет оптимального управления [149].

Также такая постановка упрощает реализацию СУ, в частности, становится проще алгоритм текущей идентификации из-за уменьшения числа искомым параметров.

2.1 Уравнение динамики объекта управления «тележка мостового крана – переносимый груз» при движении по одной оси

Математическое описание МК при перемещении груза по одной оси достаточно хорошо изучено, например в [150-161]. Схема движения тележки крана и перемещение груза представлена на рисунке 2.1.

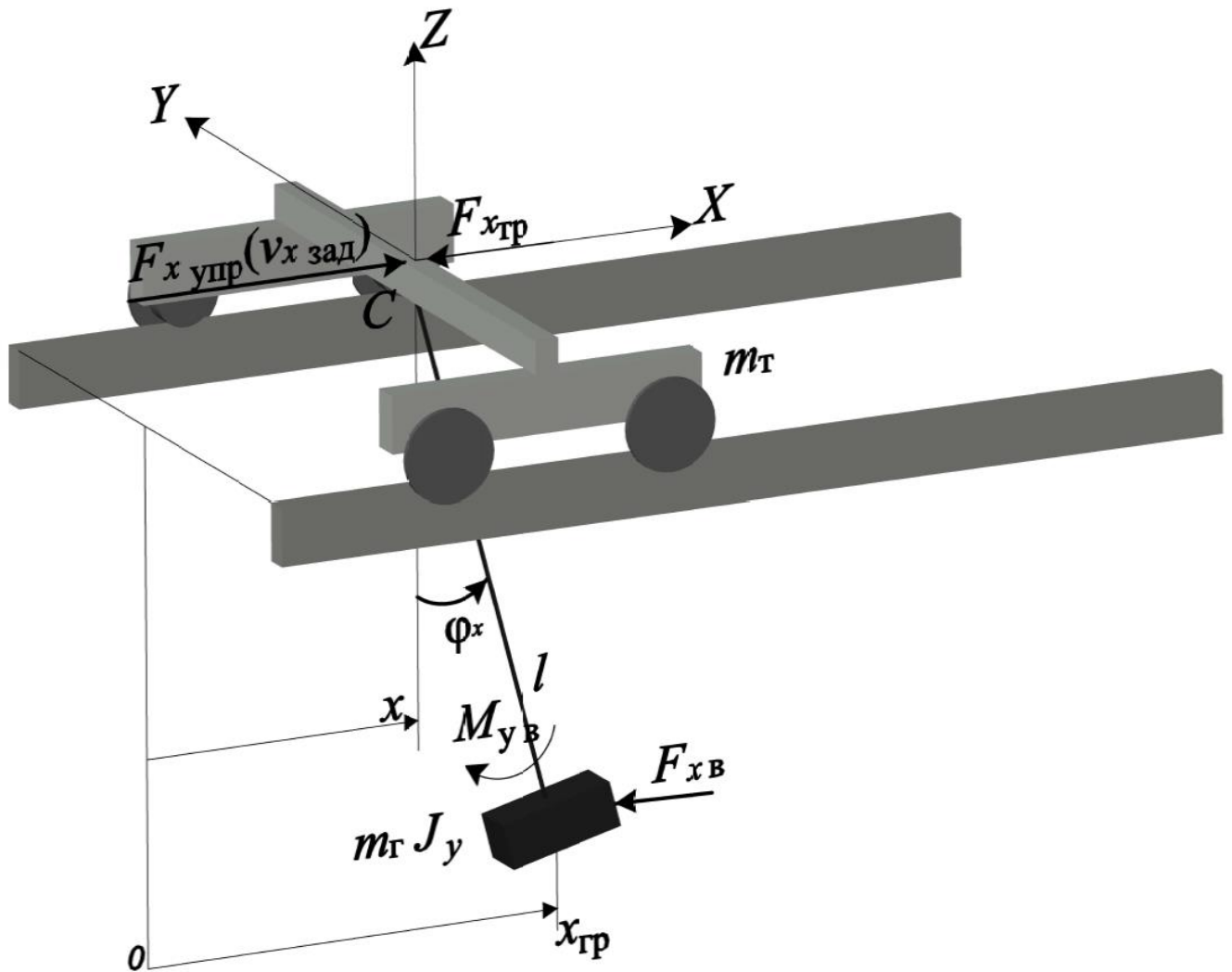


Рисунок 2.1 - Схема перемещения груза по одной оси

На рисунке введены следующие обозначения: тележка с линейным перемещением x по оси X с массой m_T , с учётом индекса вращающихся масс (колёс), $v_{x \text{ зад}} = v_x = \dot{x}$ – 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_G с центральным моментом

инерции J_y относительно оси Y ; на груз действует горизонтальная сила воздействия ветра $F_{xв}$; точка подвеса груза C ; груз связан с тележкой с помощью гибкой подвески длиной l ; φ_x – угол отклонения троса от вертикальной оси вдоль оси X ; $x_{гр}$ – координата перемещения груза по оси X .

Для определения влияния ветра на систему используем теорему Пуансо по параллельному переносу силы, при этом считая, что подвес груза является абсолютно жестким телом (такое можно допустить, исходя из принятой безынерционности тросового соединения). Согласно теореме, вектор силы $F_{xв}$ можно параллельно переместить в точку подвески груза на тележке (в виде дополнительной силы на тележку) с приложением момента на подвес груза: $M_{yв} = lF_{xв} \cos \varphi_x$.

2.1.1 Вывод нелинейного уравнения движения

По уравнению Эйлера-Лагранжа для неконсервативных механических систем [167] поступательное и вращательное движение системы «тележка-маятник» с применением теоремы Пуансо по переносу силы $F_{xв}$ на линию действия управляющей силы $F_{xупр}$ описывается равенством (в соответствии с рис.2.1):

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F_{xупр} - F_{xтр} - F_{xв}; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_x} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_x} = -M_{yв}. \end{cases} \quad (2.1)$$

Указанные производные переменных взяты по времени (t). L – функция Лагранжа, определяется по формуле:

$$L = T_K - \Pi, \quad (2.2)$$

где T_K – полная кинетическая энергия рассматриваемой механической системы,

Π – полная потенциальная энергия рассматриваемой механической системы.

Квадрат скорости движения груза при разложении на горизонтальную и вертикальную составляющие можно описать следующим равенством:

$$\dot{x}_{гр}^2 = (\dot{x} + l\dot{\varphi}_x \cos \varphi_x)^2 + (l\dot{\varphi}_x \sin \varphi_x)^2. \quad (2.3)$$

Кинетическая энергия с учётом (2.3) определяется горизонтальным перемещением тележки и груза:

$$T_K = 0,5m_T\dot{x}^2 + 0,5m_r(\dot{x} + l\dot{\varphi}_x \cos \varphi_x)^2 + 0,5m_r(l\dot{\varphi}_x \sin \varphi_x)^2 + 0,5J_y\dot{\varphi}_x^2. \quad (2.4)$$

Приводится упрощенное выражение кинетической энергии без учета колес тележки в силу того, что будет использоваться идентификационный алгоритм с оцениваем неизвестных параметров в текущий момент времени и адаптивных свойств предполагаемой СУ.

Потенциальная энергия:

$$\Pi = gm_rl(1 - \cos \varphi_x), \quad (2.5)$$

где g – ускорение свободного падения.

Отсюда находим L :

$$L = 0,5(m_T + m_r)\dot{x}^2 + m_rl\dot{x}\dot{\varphi}_x \cos \varphi_x + 0,5(m_rl^2 + J_y)\dot{\varphi}_x^2 - gm_rl(1 - \cos \varphi_x). \quad (2.6)$$

Определяем слагаемые системы уравнений Эйлера-Лагранжа:

$$\frac{\partial L}{\partial x} = 0;$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = (m_T + m_r)\dot{x} + m_rl \cos \varphi_x \dot{\varphi}_x;$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = (m_T + m_r)\ddot{x} + m_rl \cos \varphi_x \ddot{\varphi}_x - m_rl \sin \varphi_x \dot{\varphi}_x^2;$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = (m_T + m_r)\ddot{x} + m_rl \cos \varphi_x \ddot{\varphi}_x - m_rl \sin \varphi_x \dot{\varphi}_x^2;$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi_x} = -m_rl\dot{x}\dot{\varphi}_x \sin \varphi_x - gm_rl \sin \varphi_x;$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_x} = m_rl\dot{x} \cos \varphi_x + (m_rl^2 + J_y)\dot{\varphi}_x;$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_x} \right) = m_rl \cos \varphi_x \ddot{x} - m_rl\dot{x}\dot{\varphi}_x \sin \varphi_x + (m_rl^2 + J_y)\ddot{\varphi}_x;$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_x} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_x} = m_rl \cos \varphi_x \ddot{x} + (m_rl^2 + J_y)\ddot{\varphi}_x + gm_rl \sin \varphi_x.$$

Подставляя полученные равенства в (2.1), получаем уравнения поступательного и вращательного движения системы «тележка-маятник» без учёта массы троса и трения углового движения, в силу их малости, а также без учёта начальных значений переменных по положению и скорости:

$$\begin{cases} (m_{\Gamma} + m_{\Gamma})\ddot{x} + m_{\Gamma}l \cos \varphi_x \ddot{\varphi}_x - m_{\Gamma}l \sin \varphi_x \dot{\varphi}_x^2 = F_{x \text{ упр}} - F_{x \text{ тр}} - F_{x \text{ в}}; \\ m_{\Gamma}l \cos \varphi_x \ddot{x} + (m_{\Gamma}l^2 + J_y) \ddot{\varphi}_x = l(F_{x \text{ в}} \cos \varphi_x - gm_{\Gamma} \sin \varphi_x); \\ x_{\text{Гр}} = x + l \sin \varphi_x. \end{cases} \quad (2.7)$$

Разрешая эту систему относительно \ddot{x} и $\ddot{\varphi}_x$, получаем:

$$\begin{cases} \gamma_x \ddot{x} = (m_{\Gamma}l^2 + J_y) [m_{\Gamma}l \sin \varphi_x \dot{\varphi}_x^2 + F_{x \text{ упр}} - F_{x \text{ тр}} - F_{x \text{ в}}] - \\ - m_{\Gamma}l^2 \cos \varphi_x (F_{x \text{ в}} \cos \varphi_x - gm_{\Gamma} \sin \varphi_x); \\ \gamma_x \ddot{\varphi}_x = -m_{\Gamma}l \cos \varphi_x [m_{\Gamma}l \sin \varphi_x \dot{\varphi}_x^2 + F_{x \text{ упр}} - F_{x \text{ тр}} - F_{x \text{ в}}] + \\ + (m_{\Gamma} + m_{\Gamma})l(F_{x \text{ в}} \cos \varphi_x - gm_{\Gamma} \sin \varphi_x); \\ x_{\text{Гр}} = x + l \sin \varphi_x, \end{cases} \quad (2.8)$$

где $\gamma_x = (m_{\Gamma} + m_{\Gamma})(m_{\Gamma}l^2 + J_y) - (m_{\Gamma}l \cos \varphi_x)^2$.

Это выражение согласуется с приведенной системой в [150] и соответствует упрощенной нелинейной модели мостового крана при перемещении груза по одной оси, при движении тележки крана.

2.1.2 Описание линеаризованной модели движения объекта при управляющем воздействии на тележку в виде силы

Учитывая небольшие углы отклонения груза (типичное значение $|\varphi_x| < 30^\circ$), малую скорость углового перемещения и физику движения, примем следующие упрощения: $\sin \varphi_x \approx \varphi_x$, $\cos \varphi_x \approx 1$, $\sin \varphi_x \dot{\varphi}_x^2 \cong 0$:

$$\begin{cases} \gamma_x \ddot{x} \approx (m_{\Gamma}l^2 + J_y)(F_{x \text{ упр}} - F_{x \text{ тр}} - F_{x \text{ в}}) - m_{\Gamma}l^2(F_{x \text{ в}} - gm_{\Gamma}\varphi_x); \\ \gamma_x \ddot{\varphi}_x \approx -m_{\Gamma}l(F_{x \text{ упр}} - F_{x \text{ тр}} - F_{x \text{ в}}) + (m_{\Gamma} + m_{\Gamma})l(F_{x \text{ в}} - gm_{\Gamma}\varphi_x); \\ x_{\text{Гр}} \approx x + l\varphi_x; \dot{x}_{\text{Гр}} \approx \dot{x} + l\dot{\varphi}_x; \ddot{x}_{\text{Гр}} \approx \ddot{x} + l\ddot{\varphi}_x. \end{cases} \quad (2.9)$$

Подставляем в систему (2.9) 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), получаем систему (линеаризованная модель):

$$\begin{cases} \ddot{x} \approx a_{x1} F_{x \text{ упр}} + a_{x2} \varphi_x + a_{x3} \dot{x} + a_{x4}; \\ \ddot{\varphi}_x \approx a_{\varphi_x1} F_{x \text{ упр}} + a_{\varphi_x2} \varphi_x + a_{\varphi_x3} \dot{x} + a_{\varphi_x4}; \\ x_{\text{гр}} \approx x + l\varphi_x; \dot{x}_{\text{гр}} \approx \dot{x} + l\dot{\varphi}_x; \ddot{x}_{\text{гр}} \approx \ddot{x} + l\ddot{\varphi}_x, \end{cases} \quad (2.10)$$

где $a_{x1} = \gamma_x^{-1}(m_\Gamma l^2 + J_y)$;

$$a_{x2} = \gamma_x^{-1} g(m_\Gamma l)^2;$$

$$a_{x3} = -\gamma_x^{-1}(m_\Gamma l^2 + J_y)k_x;$$

$$a_{x4} = -\gamma_x^{-1}[m_\Gamma l^2 F_{x \text{ в}} + (m_\Gamma l^2 + J_y)F_{x \text{ тк}}];$$

$$a_{\varphi_x1} = -\gamma_x^{-1} m_\Gamma l;$$

$$a_{\varphi_x2} = -\gamma_x^{-1}(m_\Gamma + m_\Gamma) m_\Gamma g l;$$

$$a_{\varphi_x3} = \gamma_x^{-1} m_\Gamma l k_x;$$

$$a_{\varphi_x4} = \gamma_x^{-1} l[m_\Gamma F_{x \text{ тк}} - (m_\Gamma + 2m_\Gamma)F_{x \text{ в}}];$$

$$\gamma_x = m_\Gamma m_\Gamma l^2 + (m_\Gamma + m_\Gamma)J_y.$$

Приближенное описание динамики в виде (2.10) обосновано также использованием последующей аппроксимации (2.10) и (2.8) за счёт оценок параметров, доставляемых алгоритмом текущей идентификации.

Из последнего равенства системы (2.10), на основании первых двух уравнений, получаем уравнение динамики исследуемого объекта, управляемого силой:

$$\ddot{x}_{\text{гр}} \approx a_1 F_{x \text{ упр}} + a_2 \varphi_x + a_3 \dot{x} + a_4, \quad (2.11)$$

где $a_1 = a_{x1} + l a_{\varphi_x1}$;

$$a_2 = a_{x2} + l a_{\varphi_x2};$$

$$a_3 = a_{x3} + l a_{\varphi_x3};$$

$$a_4 = a_{x4} + l a_{\varphi_x4}.$$

Полученное равенство (2.11) описывает зависимость динамики перемещения груза от приложенной силы $F_{x \text{ упр}}$ на тележку вдоль оси X , по средствам которой происходит линейное перемещение тележки.

2.1.3 Описание линеаризованной модели движения объекта при управляющем воздействии на тележку в виде заданной скорости

Для вывода уравнения динамики перемещения груза в зависимости от скорости тележки выполним следующее преобразование: из первой зависимости системы (2.10) выразим значение $F_{x \text{ упр}}$ и подставим его в (2.11), получим равенство, с учётом того, что $(a_3 - a_1 a_{x3}/a_{x1}) = 0$:

$$\ddot{x}_{\text{гр}} \approx a_1^V \dot{V}_x + a_2^V \varphi_x + a_3^V, \quad (2.12)$$

где $a_1^V = a_1/a_{x1} = J_y/(J_y + m_{\text{г}} l^2)$, $1 \geq a_1^V \geq 0$;

$$a_2^V = (a_2 - a_1 a_{x2}/a_{x1});$$

$$a_3^V = (a_4 - a_1 a_{x4}/a_{x1}).$$

Далее это уравнение, описывающее динамику перемещения груза (линеаризованная модель динамики перемещения груза при управлении тележкой по заданной скорости), будем использовать в качестве ОУ с формированием управляющего воздействия в виде изменения заданной скорости перемещения тележки $v_x = v_{\text{зад}}$ с учётом φ_x и оценок параметров (2.12), доставляемых алгоритмом идентификации, для обеспечения перемещения груза в заданную точку и гашения угловых колебаний, как это было предложено в работе [170].

2.1.4 Определение собственной частоты колебаний

Известно [167], что собственное колебание подвеса груза, как и любого другого маятника с неподвижным основанием $\dot{x} = 0$ и отсутствии каких-либо внешних сил $F_{x \text{ упр}} \equiv 0$, $a_{\varphi x4} \equiv 0$, действующих на него, можно описать уравнением: $\ddot{\varphi}_x + \omega_{0x}^2 \varphi_x = 0$ с собственной частотой ω_{0x} . Отсюда с учётом второго равенства системы (2.10) определяем собственную частоту маятника относительно оси X:

$$\omega_{0x} = \sqrt{-a_{\varphi x2}} = \sqrt{\gamma_x^{-1} (m_{\text{т}} + m_{\text{г}}) m_{\text{г}} g l}. \quad (2.13)$$

Далее приближительная величина собственной частоты маятника будет необходима для настройки СУ.

2.2 Уравнение динамики объекта управления «тележка, балка – переносимый груз» при движении по двум горизонтальным осям

В большинстве случаев при разработке и исследовании способов управления МК рассматривается перемещение груза только по одной оси. Однако большинство кранов мостового типа имеют возможность перемещать груз по двум осям горизонтальной плоскости, по направлению движения тележки и поперечной балки крана.

Одновременное перемещение груза по двум горизонтальным осям может негативно сказаться на качестве управления. Поскольку несогласованное управление тележкой и поперечной балкой может повлиять на динамику перемещения груза по каждой оси.

Рассмотрим математическое описание ОУ. На рисунке 2.2 представлена схема перемещения груза по двум горизонтальным осям.

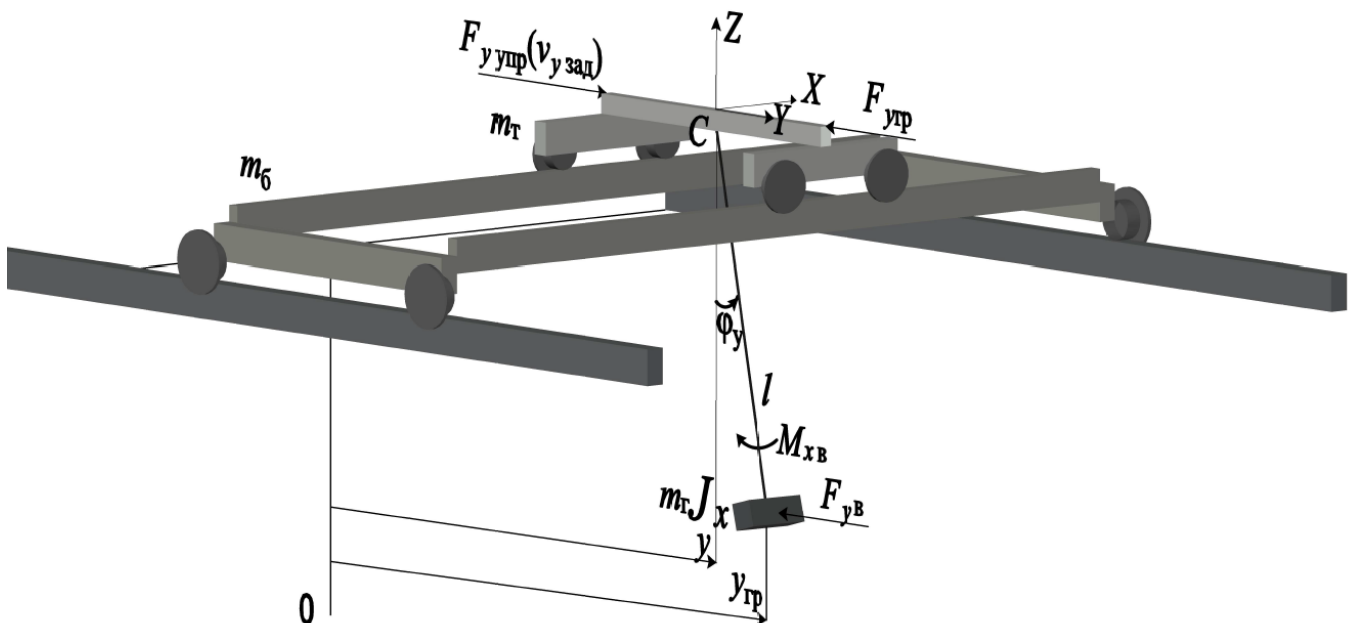


Рисунок 2.2 – Схема перемещения груза по осям X и Z

На рисунке используются следующие обозначения: балка с линейным перемещением y по оси Y ; $y_{гр}$ – координата перемещения груза по оси Y ; φ_y – угол отклонения троса от вертикальной прямой вдоль оси Y ; J_x – центральный момент

инерции груза относительно оси X ; $F_{y \text{ упр}}$ – сила управляющего воздействия на балку крана, направленная по оси Y , формируемая сервоприводом по входному сигналу $v_{y \text{ зад}}$; $v_{y \text{ зад}} = v_y = \dot{y}$ – 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 МК.

2.2.1 Вывод нелинейного уравнения движения груза по двум осям

По уравнению Эйлера-Лагранжа [167] движение системы по двум осям с применением теоремы Пуансо с переносом сил $F_{x \text{ в}}$ и $F_{y \text{ в}}$ на линию действия управляющих сил $F_{x \text{ упр}}$ и $F_{y \text{ упр}}$ (в соответствии с рис. 2.1, 2.2):

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F_{x \text{ упр}} - F_{x \text{ тр}} - F_{x \text{ в}}; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_x} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_x} = -M_{y \text{ в}}; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} = F_{y \text{ упр}} - F_{y \text{ тр}} - F_{y \text{ в}}; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_y} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_y} = -M_{x \text{ в}}, \end{cases} \quad (2.14)$$

где $M_{x \text{ в}} = lF_{y \text{ в}} \cos \varphi_y$.

Кинетическая энергия определяется горизонтальным перемещением тележки, балки и груза:

$$T_K = 0,5(m_{\text{т}}\dot{x}^2 + (m_{\text{т}} + m_6)\dot{y}^2) + 0,5m_{\text{т}}(\dot{x}_{\text{гр}}^2 + \dot{y}_{\text{гр}}^2) + 0,5(J_y\dot{\varphi}_x^2 + J_x\dot{\varphi}_y^2). \quad (2.15)$$

Также приводится упрощенное выражение кинетической энергии без учета колес поперечной балки крана в силу последующей аппроксимации за счёт оценок параметров, доставляемых алгоритмом текущей идентификации.

Квадраты составляющих линейной скорости груза определяется очевидными равенствами (рис. 2.1, 2.2):

$$\begin{aligned} \dot{x}_{\text{гр}}^2 &= (\dot{x} + l\dot{\varphi}_x \cos \varphi_x)^2 + (l\dot{\varphi}_x \sin \varphi_x)^2, \\ \dot{y}_{\text{гр}}^2 &= (\dot{y} + l\dot{\varphi}_y \cos \varphi_y)^2 + (l\dot{\varphi}_y \sin \varphi_y)^2. \end{aligned}$$

Потенциальная энергия системы тележка, балка и груза:

$$\Pi = gm_{\Gamma}l(1 - \cos \varphi), \quad (2.16)$$

где φ – пространственный угол, $\cos \varphi = \cos \varphi_x \cos \varphi_y$.

Отсюда согласно (2.3) получаем T_K :

$$\begin{aligned} T_K = & 0,5(m_{\Gamma}\dot{x}^2 + (m_{\Gamma} + m_{\delta})\dot{y}^2) + 0,5(J_y\dot{\varphi}_x^2 + J_x\dot{\varphi}_y^2) - \\ & - gm_{\Gamma}l(1 - \cos \varphi_x \cos \varphi_y)0,5m_{\Gamma} \left((\dot{x} + l\dot{\varphi}_x \cos \varphi_x)^2 + \right. \\ & \left. + (l\dot{\varphi}_x \sin \varphi_x)^2 + (\dot{y} + l\dot{\varphi}_y \cos \varphi_y)^2 + (l\dot{\varphi}_y \sin \varphi_y)^2 \right). \end{aligned} \quad (2.17)$$

Определяем слагаемые системы уравнений Эйлера-Лагранжа для задачи перемещения груза по двум горизонтальным осям:

$$\frac{\partial L}{\partial x} = 0;$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = (m_{\Gamma} + m_{\Gamma})\dot{x} + lm_{\Gamma}\dot{\varphi}_x \cos \varphi_x;$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = (m_{\Gamma} + m_{\Gamma})\ddot{x} + lm_{\Gamma}\ddot{\varphi}_x \cos \varphi_x - lm_{\Gamma}\dot{\varphi}_x^2 \sin \varphi_x;$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = (m_{\Gamma} + m_{\Gamma})\ddot{x} + lm_{\Gamma}\ddot{\varphi}_x \cos \varphi_x - lm_{\Gamma}\dot{\varphi}_x^2 \sin \varphi_x;$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi_x} = -gm_{\Gamma}l \sin \varphi_x \cos \varphi_y - m_{\Gamma}l\dot{x}\dot{\varphi}_x \sin \varphi_x;$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_x} = J_y\dot{\varphi}_x + 0,5m_{\Gamma}(2\dot{x}l \cos \varphi_x + 2l^2\dot{\varphi}_x(\cos \varphi_x)^2 + 2l^2\dot{\varphi}_x(\sin \varphi_x)^2);$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_x} \right) = (m_{\Gamma}l^2 + J_y)\ddot{\varphi}_x + m_{\Gamma}\ddot{x}l \cos \varphi_x - m_{\Gamma}l\dot{x}\dot{\varphi}_x \sin \varphi_x;$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_x} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_x} = (m_{\Gamma}l^2 + J_y)\ddot{\varphi}_x + m_{\Gamma}\ddot{x}l \cos \varphi_x + gm_{\Gamma}l \sin \varphi_x \cos \varphi_y;$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} = (m_{\Gamma} + m_{\Gamma} + m_{\delta})\ddot{y} + lm_{\Gamma}\ddot{\varphi}_y \cos \varphi_y - lm_{\Gamma}\dot{\varphi}_y^2 \sin \varphi_y;$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_y} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_y} = (m_{\Gamma}l^2 + J_x)\ddot{\varphi}_y + m_{\Gamma}\ddot{y}l \cos \varphi_y + gm_{\Gamma}l \sin \varphi_y \cos \varphi_x.$$

Подставляя полученные равенства в (2.14), получаем уравнения поступательного и вращательного движения системы по двум осям без учёта массы троса и трения углового движения:

$$\left\{ \begin{array}{l} (m_{\Gamma} + m_{\text{T}})\ddot{x} + lm_{\Gamma}\ddot{\varphi}_x \cos \varphi_x = lm_{\Gamma}\dot{\varphi}_x^2 \sin \varphi_x + F_{x \text{ упр}} - F_{x \text{ тр}} - F_{x \text{ в}}; \\ (m_{\Gamma}l^2 + J_y)\ddot{\varphi}_x + m_{\Gamma}\ddot{x}l \cos \varphi_x = l(F_{x \text{ в}} \cos \varphi_x - gm_{\Gamma} \sin \varphi_x \cos \varphi_y); \\ x_{\text{гр}} = x + l \sin \varphi_x; \\ (m_{\Gamma} + m_{\text{T}} + m_{\text{б}})\ddot{y} + lm_{\Gamma}\ddot{\varphi}_y \cos \varphi_y = lm_{\Gamma}\dot{\varphi}_y^2 \sin \varphi_y + F_{y \text{ упр}} - F_{y \text{ тр}} - F_{y \text{ в}}; \\ (m_{\Gamma}l^2 + J_x)\ddot{\varphi}_y + m_{\Gamma}\ddot{y}l \cos \varphi_y = l(F_{y \text{ в}} \cos \varphi_y - gm_{\Gamma} \sin \varphi_y \cos \varphi_x); \\ y_{\text{гр}} = y + l \sin \varphi_y. \end{array} \right. \quad (2.18)$$

Стоит отметить, что при одновременном движении балки и тележки крана возникают перекрестные составляющие, влияющие на динамику движения груза. Они выражаются во втором и четвертом уравнении системы (2.18) в виде $\cos \varphi_y$ и $\cos \varphi_x$.

Далее разрешаем эту систему относительно \ddot{x} , \ddot{y} , $\ddot{\varphi}_x$ и $\ddot{\varphi}_y$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_x \ddot{x} = (lm_{\Gamma}\dot{\varphi}_x^2 \sin \varphi_x + F_{x \text{ упр}} - F_{x \text{ тр}} - F_{x \text{ в}})(m_{\Gamma}l^2 + J_y) - \\ - (lF_{x \text{ в}} \cos \varphi_x - gm_{\Gamma}l \sin \varphi_x \cos \varphi_y)m_{\Gamma}l \cos \varphi_x; \\ \gamma_x \ddot{\varphi}_x = l(F_{x \text{ в}} \cos \varphi_x - gm_{\Gamma} \sin \varphi_x \cos \varphi_y)(m_{\Gamma} + m_{\text{T}}) - \\ - m_{\Gamma}l \cos \varphi_x (m_{\Gamma}l\dot{\varphi}_x^2 \sin \varphi_x + F_{x \text{ упр}} - F_{x \text{ тр}} - F_{x \text{ в}}); \\ x_{\text{гр}} = x + l \sin \varphi_x; \\ \gamma_y \ddot{y} = (lm_{\Gamma}\dot{\varphi}_y^2 \sin \varphi_y + F_{y \text{ упр}} - F_{y \text{ тр}} - F_{y \text{ в}})(m_{\Gamma}l^2 + J_x) - \\ - (lF_{y \text{ в}} \cos \varphi_y - gm_{\Gamma}l \sin \varphi_y \cos \varphi_x)m_{\Gamma}l \cos \varphi_y; \\ \gamma_y \ddot{\varphi}_y = l(F_{y \text{ в}} \cos \varphi_y - gm_{\Gamma} \sin \varphi_y \cos \varphi_x)(m_{\Gamma} + m_{\text{T}} + m_{\text{б}}) - \\ - (lm_{\Gamma}\dot{\varphi}_y^2 \sin \varphi_y + F_{y \text{ упр}} - F_{y \text{ тр}} - F_{y \text{ в}})m_{\Gamma}l \cos \varphi_y; \\ y_{\text{гр}} = y + l \sin \varphi_y. \end{array} \right. \quad (2.19)$$

где $\gamma_y = (m_{\Gamma} + m_{\text{T}} + m_{\text{б}})(m_{\Gamma}l^2 + J_x) - (m_{\Gamma}l \cos \varphi_y)^2$.

Отсюда получаем упрощенную нелинейную модель перемещения груза при одновременном движении тележки и поперечной балки МК.

2.2.2 Описание линеаризованной модели движения объекта при управляющем воздействии на балку и тележку в виде силы

По аналогии с (2.8-2.9), учитывая небольшие углы отклонения груза (менее 30°) и малую скорость углового перемещения, примем следующие упрощения $\sin \varphi_x \approx \varphi_x$, $\cos \varphi_x \approx 1$, $\dot{\varphi}_x^2 \sin \varphi_x \approx 0$, $\sin \varphi_y \approx \varphi_y$, $\cos \varphi_y \approx 1$, $\dot{\varphi}_y^2 \sin \varphi_y \approx 0$:

$$\begin{cases} \gamma_x \ddot{x} \approx (F_{x \text{ упр}} - F_{x \text{ тр}} - F_{x \text{ в}})(m_{\Gamma} l^2 + J_y) - (F_{x \text{ в}} - g m_{\Gamma} \varphi_x) m_{\Gamma} l^2; \\ \gamma_x \ddot{\varphi}_x \approx l(F_{x \text{ в}} - g m_{\Gamma} \varphi_x)(m_{\Gamma} + m_{\text{Т}}) - m_{\Gamma} l(F_{x \text{ упр}} - F_{x \text{ тр}} - F_{x \text{ в}}); \\ x_{\text{Гр}} \approx x + l\varphi_x; \dot{x}_{\text{Гр}} \approx \dot{x} + l\dot{\varphi}_x; \ddot{x}_{\text{Гр}} \approx \ddot{x} + l\ddot{\varphi}_x; \\ \gamma_y \ddot{y} \approx (F_{y \text{ упр}} - F_{y \text{ тр}} - F_{y \text{ в}})(m_{\Gamma} l^2 + J_x) - (F_{y \text{ в}} - g m_{\Gamma} \varphi_y) m_{\Gamma} l^2; \\ \gamma_y \ddot{\varphi}_y \approx l(F_{y \text{ в}} + g m_{\Gamma} \varphi_y)(m_{\Gamma} + m_{\text{Т}} + m_{\text{б}}) - (F_{y \text{ упр}} - F_{y \text{ тр}} - F_{y \text{ в}}) m_{\Gamma} l; \\ y_{\text{Гр}} \approx y + l\varphi_y; \dot{y}_{\text{Гр}} \approx \dot{y} + l\dot{\varphi}_y; \ddot{y}_{\text{Гр}} \approx \ddot{y} + l\ddot{\varphi}_y. \end{cases} \quad (2.20)$$

Как видно из (2.20) в силу принятых упрощений сократились и перекрестные составляющие, возникающие от одновременного движения груза по двум осям. Вследствие этого движение груза по одной оси можно рассматривать отдельно, а управление балкой и тележкой крана строить в виде двух несогласованных между собой ЗУ. Этому также способствует предлагаемое адаптивное управление. Также отсюда следует, что для рассматриваемого объекта (движение по двум осям) достаточно далее рассмотреть уравнения только по оси Y , дополненные уравнениями (2.7) – (2.13).

Подставляем в систему (2.20) равенства $F_{y \text{ тр}} = k_y \dot{y} + F_{y \text{ тк}}$ ($F_{y \text{ тк}}$ – сила трения качения, направленная по оси Y ; k_y – коэффициент вязкого трения поступательного движения поперечной балки крана) и получаем:

$$\begin{cases} \gamma_y \ddot{y} \approx b_{y1} F_{y \text{ упр}} + b_{y2} \varphi_y + b_{y3} \dot{y} + b_{y4}; \\ \gamma_y \ddot{\varphi}_y \approx b_{\varphi_y1} F_{y \text{ упр}} + b_{\varphi_y2} \varphi_y + b_{\varphi_y3} \dot{y} + b_{\varphi_y4}; \\ y_{\text{Гр}} \approx y + l\varphi_y; \dot{y}_{\text{Гр}} \approx \dot{y} + l\dot{\varphi}_y; \ddot{y}_{\text{Гр}} \approx \ddot{y} + l\ddot{\varphi}_y, \end{cases} \quad (2.21)$$

где $b_{y1} = \gamma_y^{-1}(m_{\Gamma} l^2 + J_x)$;

$$b_{y2} = \gamma_y^{-1} g(m_{\Gamma} l)^2;$$

$$b_{y3} = -\gamma_y^{-1}(m_{\Gamma} l^2 + J_x) k_y;$$

$$b_{y4} = \gamma_y^{-1} [-(F_{y_{TK}} + F_{y_B})(m_\Gamma l^2 + J_x) - m_\Gamma l^2 F_{y_B}];$$

$$b_{\varphi_y1} = -\gamma_y^{-1} m_\Gamma l;$$

$$b_{\varphi_y2} = -\gamma_y^{-1} (m_\Gamma + m_T + m_\delta) m_\Gamma g l;$$

$$b_{\varphi_y3} = \gamma_y^{-1} m_\Gamma l k_y;$$

$$b_{\varphi_y4} = \gamma_y^{-1} l [m_\Gamma F_{y_{TK}} - (2m_\Gamma + m_T + m_\delta) F_{y_B}];$$

$$\gamma_y = (m_\Gamma + m_T + m_\delta)(m_\Gamma l^2 + J_x) - (m_\Gamma l)^2.$$

Приближенное описание динамики в виде (2.21) также обосновано использованием последующей аппроксимации за счёт оценок параметров, доставляемых алгоритмом текущей идентификации.

Выполняем те же преобразования системы (2.21) как и с (2.10-2.11): из получаем уравнение динамики исследуемого объекта, управляемого силой по оси Y :

$$\ddot{y}_{\Gamma p} \approx b_{y_{\Gamma p}1} F_{y_{упр}} + b_{y_{\Gamma p}2} \varphi_y + b_{y_{\Gamma p}3} \dot{y} + b_{y_{\Gamma p}4}, \quad (2.22)$$

где $b_{y_{\Gamma p}1} = b_{y1} + l b_{\varphi_y1}$;

$$b_{y_{\Gamma p}2} = b_{y2} + l b_{\varphi_y2};$$

$$b_{y_{\Gamma p}3} = b_{y3} + l b_{\varphi_y3};$$

$$b_{y_{\Gamma p}4} = b_{y4} + l b_{\varphi_y4}.$$

Отсюда получаем уравнение динамики перемещения груза вдоль оси Y при управлении силой $F_{y_{упр}}$.

2.2.3 Описание линеаризованной модели движения объекта при управляющем воздействии на поперечную балку крана в виде заданной скорости

Согласно (2.11–2.12) получаем уравнение динамики перемещения груза в зависимости от скорости движения поперечной балки крана, с учётом того, что

$$b_{y_{\Gamma p}3} - b_{y_{\Gamma p}1} b_{y3} / b_{y1} = 0:$$

$$\ddot{y}_{\Gamma p} \approx b_{y1}^V \dot{V}_y + b_{y2}^V \varphi_y + b_{y3}^V, \quad (2.23)$$

где $b_{y1}^V = b_{y_{гp1}}/b_{y1} = J_x/(J_x + m_{г}l^2)$, $1 \geq b_{y1}^V > 0$;

$$b_{y2}^V = (b_{y_{гp2}} - b_{y_{гp1}}b_{y2}/b_{y1});$$

$$b_{y3}^V = (b_{y_{гp4}} - b_{y_{гp1}}b_{y4}/b_{y1}).$$

Далее это уравнение, описывающее динамику перемещения груза по горизонтальной оси Y , будем использовать в качестве ОУ с формированием управляющего воздействия в виде изменения заданной скорости перемещения поперечной балки $v_y = v_{y \text{ зад}}$ с учётом φ_y . Оценки параметров (2.23) будут определяться алгоритмом текущей идентификации.

2.2.4 Собственная частота маятниковых колебаний при движении по оси Y

По аналогии с (2.13) и в соответствии с (2.21) определяем собственную частоту маятника по оси Y (ω_{0y}):

$$\omega_{0y} = \sqrt{-b_{\varphi y2}} = \sqrt{\gamma_y^{-1}(m_{г} + m_{т} + m_{б})m_{г}gl}. \quad (2.24)$$

Приблизительная величина собственной частоты маятника по оси Y в последующем будет необходима для настройки СУ.

2.3 Уравнение динамики двухмаятникового подвеса мостового крана

Обычно при анализе динамики МК и построения систем управления рассматривают одномаятниковую модель в виде движущейся тележки с подвешенным грузом. Однако подвесная система крана образует двухмаятниковую механическую систему: крюк и переносимый груз.

В случае, когда массо-инерционные параметры переносимого груза намного больше, чем у крюка, с учетом близкого расположения крюка и груза (что соответствует большинству случаев), одномаятниковая модель вполне применима. Однако при близости указанных массо-инерционных параметров и в некоторых других ситуациях могут проявляться свойства, описываемые только

двухмаятниковой моделью. В частности, могут появляться двухмаятниковые колебания, которые сложно погасить даже опытному оператору крана. Поэтому для автоматизации управления краном на указанных режимах необходимо использовать двухмаятниковую модель.

Схема перемещения крана с двухмаятниковым подвесом груза при его движении по одной оси представлена на рисунке 2.3.

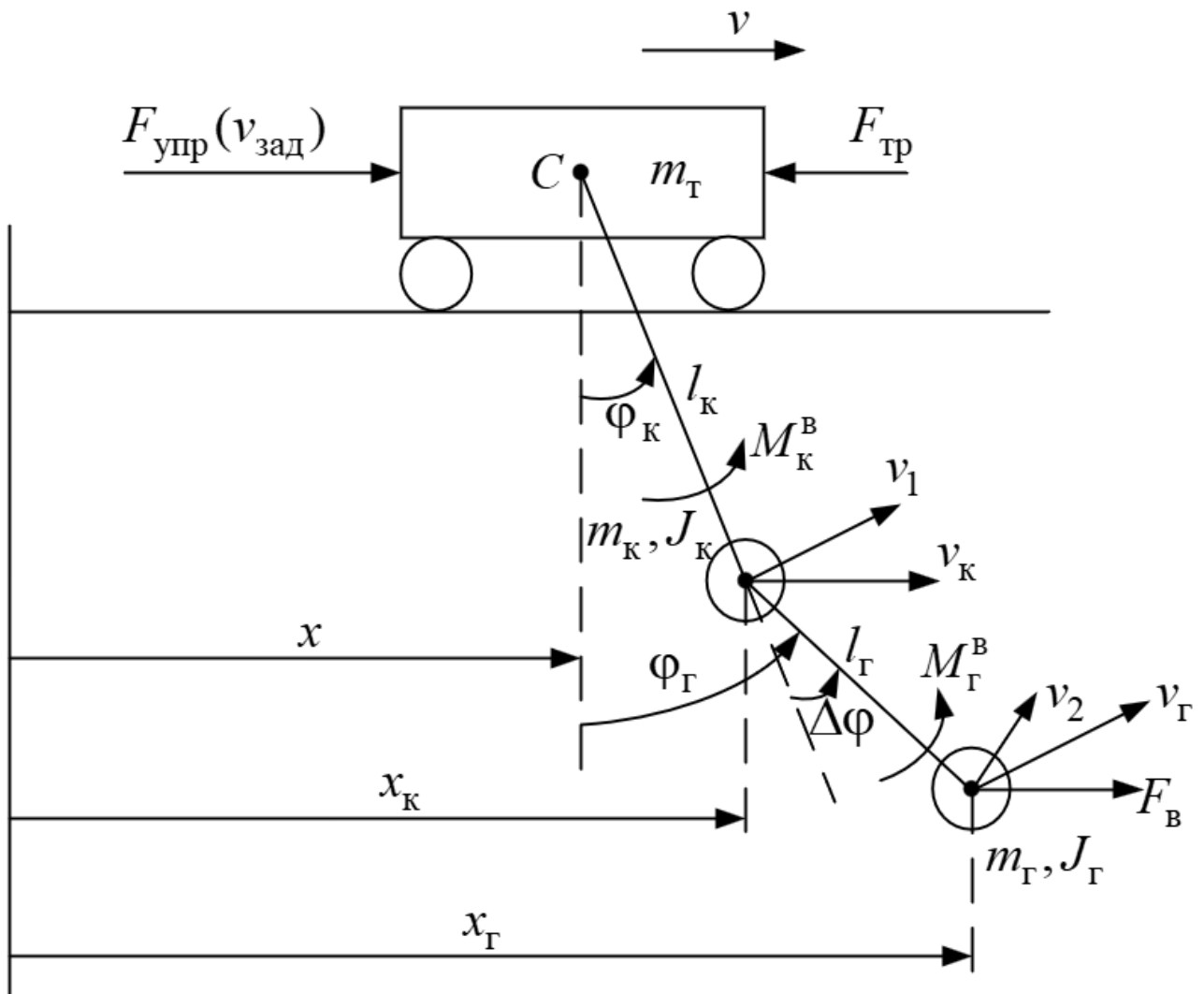


Рисунок 2.3 – Двухмаятниковая модель подвеса груза на мостовом кране

Первый маятник образует крюк, подвешенный к тележке крана, а второй – переносимый груз, подвешенный на крюк. Будем считать, что тросовые подвесы не имеют массы и момента инерции, а угловые движения не имеют сопротивлений. На рисунке представлена первая форма колебаний двухмаятникового подвеса как наиболее

вероятная. Также будем считать, что вертикального перемещения груза нет, ветер непосредственно воздействует только на переносимый груз.

На рисунке обозначено: m_k – масса крюка; J_k, J_Γ – центральные осевые (ось перпендикулярна рисунку) моменты инерции крюка и груза соответственно, примем условие: $J_k < J_\Gamma$; l_k, l_Γ – длина подвеса крюка и длина подвеса груза соответственно, т.е. длина подвеса от точки его крепления на тележке до центра тяжести крюка и от центра тяжести крюка (считаем, что эта точка совпадает с точкой подвеса груза) до центра тяжести груза соответственно; $v = \dot{x}$ – линейная скорость перемещения тележки, а $v_{зад}$ – заданное ее значение; $F_{упр}$ – управляющая сила, формируемая сервоприводом по входному сигналу $v_{зад}$; $F_{тр} = k_{тр}v$ – сила трения, противодействующая линейному перемещению тележки крана, $k_{тр}$ – коэффициент вязкого трения (более точная модель возможного трения не приводится в силу использования управления по заданной скорости); F_B – сила ветрового воздействия на груз, которая в соответствии с теоремой Пуансо по параллельному переносу силы, может выразиться в виде дополнительной силы F_B на тележку и момента на подвес груза $M_\Gamma^B = l_\Gamma F_B \cos \varphi_\Gamma$ и крюка $M_k^B = l_k F_B \cos \varphi_k$; будем считать, что $|F_B| \ll m_\Gamma g$; $\varphi_k, \varphi_\Gamma$ – углы отклонения подвеса крюка и подвеса груза соответственно от вертикальной оси; $\Delta\varphi = \varphi_\Gamma - \varphi_k$ – 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; $x_\Gamma = x_k + l_\Gamma \sin \varphi_\Gamma$ – аналогичное перемещение груза; M_k^B, M_Γ^B – внешние моменты, действующие на подвес крюка и груза соответственно из-за воздействия ветра (оба момента при отсутствии ветра равны нулю); $v_1 = l_k \dot{\varphi}_k, v_2 = l_\Gamma \dot{\varphi}_\Gamma$ – линейные скорости крюка и груза, если считать линейные скорости точек опоры их подвесов нулевыми (перпендикулярны линиям l_k, l_Γ соответственно); v_k, v_Γ – полные линейные скорости крюка и груза соответственно.

2.3.1 Вывод нелинейного уравнения движения двухмаятниковой системы

Представленная механическая система является трёхзвенной, включающая тележку крана с линейным перемещением x , на которую воздействует сила $(F_{\text{упр}} - F_{\text{тр}} + F_{\text{в}})$, подвес крюка с угловым движением $\varphi_{\text{к}}$, к которому приложен момент от ветра $M_{\text{к}}^{\text{в}}$ и подвес груза с угловым движением $\varphi_{\text{г}}$, $\Delta\varphi$ и приложенным моментом $M_{\text{г}}^{\text{в}}$. Поэтому для описания динамики движения этой системы используем уравнение Эйлера-Лагранжа [167] для неконсервативных механических систем и получаем:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F_{\text{упр}} - F_{\text{тр}} + F_{\text{в}}; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_{\text{к}}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_{\text{к}}} = l_{\text{к}} F_{\text{в}} \cos \varphi_{\text{к}}; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_{\text{г}}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_{\text{г}}} = l_{\text{г}} F_{\text{в}} \cos \varphi_{\text{г}}. \end{cases} \quad (2.25)$$

Кинетическая энергия определяется выражением:

$$T_{\text{к}} = 0,5(m_{\text{т}}v^2 + m_{\text{к}}v_{\text{к}}^2 + m_{\text{г}}v_{\text{г}}^2 + J_{\text{к}}\dot{\varphi}_{\text{к}}^2 + J_{\text{г}}\dot{\varphi}_{\text{г}}^2). \quad (2.26)$$

Квадраты полных линейных скоростей крюка и груза находятся из их составляющих по горизонтальной и вертикальной осям:

$$\begin{aligned} v_{\text{к}}^2 &= (v_1 \cos \varphi_{\text{к}} + v)^2 + (v_1 \sin \varphi_{\text{к}})^2 = \\ &= (l_{\text{к}}\dot{\varphi}_{\text{к}} \cos \varphi_{\text{к}} + v)^2 + (l_{\text{к}}\dot{\varphi}_{\text{к}} \sin \varphi_{\text{к}})^2, \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} v_{\text{г}}^2 &= (v_1 \cos \varphi_{\text{к}} + v + v_2 \cos \varphi_{\text{г}})^2 + (v_1 \sin \varphi_{\text{к}} + v_2 \sin \varphi_{\text{г}})^2 = \\ &= (l_{\text{к}}\dot{\varphi}_{\text{к}} \cos \varphi_{\text{к}} + v + l_{\text{г}}\dot{\varphi}_{\text{г}} \cos \varphi_{\text{г}})^2 + (l_{\text{к}}\dot{\varphi}_{\text{к}} \sin \varphi_{\text{к}} + l_{\text{г}}\dot{\varphi}_{\text{г}} \sin \varphi_{\text{г}})^2 \end{aligned} \quad (2.28)$$

Потенциальная энергия имеет вид:

$$\Pi = (m_{\text{к}} + m_{\text{г}})gl_{\text{к}}(1 - \cos \varphi_{\text{к}}) + m_{\text{г}}gl_{\text{г}}(1 - \cos \varphi_{\text{г}}). \quad (2.29)$$

Первое слагаемое определяет увеличение потенциальной энергии при $\Delta\varphi \equiv 0$, второе – при независимом изменении угла $\varphi_{\text{г}}$.

Подставляем уравнения (2.26–2.29) в (2.25) с определением частных производных (по аналогии с представленным выше):

$$\left\{ \begin{array}{l} (m_T + m_K + m_\Gamma)\ddot{x} + (m_K + m_\Gamma)l_K(\ddot{\varphi}_K \cos \varphi_K - \dot{\varphi}_K^2 \sin \varphi_K) + \\ + m_\Gamma l_\Gamma(\ddot{\varphi}_\Gamma \cos \varphi_\Gamma - \dot{\varphi}_\Gamma^2 \sin \varphi_\Gamma) = F_{\text{упр}} - F_{\text{тр}} + F_B; \\ [J_K + (m_K + m_\Gamma)l_K^2]\ddot{\varphi}_K + (m_K + m_\Gamma)l_K\ddot{x} \cos \varphi_K + \\ + m_\Gamma l_K l_\Gamma(\ddot{\varphi}_\Gamma \cos \Delta\varphi - \dot{\varphi}_\Gamma^2 \sin \Delta\varphi) + (m_K + m_\Gamma)gl_K \sin \varphi_K = l_K F_B \cos \varphi_K; \\ m_\Gamma l_\Gamma \ddot{x} \cos \varphi_\Gamma + m_\Gamma l_K l_\Gamma(\ddot{\varphi}_K \cos \Delta\varphi - \dot{\varphi}_K^2 \sin \Delta\varphi) + \\ + (J_\Gamma + m_\Gamma l_\Gamma^2)\ddot{\varphi}_\Gamma + m_\Gamma gl_\Gamma \sin \varphi_\Gamma = l_\Gamma F_B \cos \varphi_\Gamma. \end{array} \right. \quad (2.30)$$

Получаем систему дифференциальных уравнений, описывающую динамику перемещения тележки и двухмаятникового подвеса вдоль ось X .

2.3.2 Описание линеаризованной модели движения двухмаятниковой системы при управляющем воздействии в виде силы

Учитывая, что угловые движения подвесов крюка и груза чаще всего имеют малый диапазон и малую скорость, примем: $\cos \varphi_K \approx 1$, $\cos \varphi_\Gamma \approx 1$, $\cos \Delta\varphi \approx 1$, $\sin \varphi_K \approx \varphi_K$, $\sin \varphi_\Gamma \approx \varphi_\Gamma$, $\sin \Delta\varphi \approx \Delta\varphi$, $\dot{\varphi}_K^2 \sin \varphi_K \approx 0$, $\dot{\varphi}_\Gamma^2 \sin \varphi_\Gamma \approx 0$, $\dot{\varphi}_\Gamma^2 \sin \Delta\varphi \approx 0$, $\dot{\varphi}_K^2 \sin \Delta\varphi \approx 0$. Динамику движения крана можно приблизительно описать как:

$$\left\{ \begin{array}{l} (m_T + m_K + m_\Gamma)\ddot{x} + (m_K + m_\Gamma)l_K\ddot{\varphi}_K + m_\Gamma l_\Gamma \ddot{\varphi}_\Gamma \approx F_{\text{упр}} - F_{\text{тр}} + F_B; \\ (m_K + m_\Gamma)l_K\ddot{x} + [J_K + (m_K + m_\Gamma)l_K^2]\ddot{\varphi}_K + m_\Gamma l_K l_\Gamma \ddot{\varphi}_\Gamma \approx -(m_K + m_\Gamma)gl_K \varphi_K + l_K F_B; \\ m_\Gamma l_\Gamma \ddot{x} + m_\Gamma l_K l_\Gamma \ddot{\varphi}_K + (J_\Gamma + m_\Gamma l_\Gamma^2)\ddot{\varphi}_\Gamma \approx l_\Gamma(F_B - m_\Gamma g \varphi_\Gamma). \end{array} \right. \quad (2.31)$$

Разрешая эту систему уравнений относительно переменных \ddot{x} , $\ddot{\varphi}_K$ и $\ddot{\varphi}_\Gamma$, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} \approx a_x^{\dot{x}} \dot{x} + a_x^{\varphi_K} \varphi_K + a_x^{\varphi_\Gamma} \varphi_\Gamma + a_x^1 + a_x^{F_{\text{упр}}} F_{\text{упр}}; \\ \ddot{\varphi}_K \approx a_{\varphi_K}^{\dot{x}} \dot{x} + a_{\varphi_K}^{\varphi_K} \varphi_K + a_{\varphi_K}^{\varphi_\Gamma} \varphi_\Gamma + a_{\varphi_K}^1 + a_{\varphi_K}^{F_{\text{упр}}} F_{\text{упр}}; \\ \ddot{\varphi}_\Gamma \approx a_{\varphi_\Gamma}^{\dot{x}} \dot{x} + a_{\varphi_\Gamma}^{\varphi_K} \varphi_K + a_{\varphi_\Gamma}^{\varphi_\Gamma} \varphi_\Gamma + a_{\varphi_\Gamma}^1 + a_{\varphi_\Gamma}^{F_{\text{упр}}} F_{\text{упр}}, \end{array} \right. \quad (2.32)$$

где $a_x^{\dot{x}} = -\gamma^{-1} k_{\text{тр}} [(J_K + m_K l_K^2)(J_\Gamma + m_\Gamma l_\Gamma^2) + m_\Gamma l_K^2 J_\Gamma]$;

$a_x^{\varphi_K} = \gamma^{-1} (m_K + m_\Gamma) gl_K^2 [m_K (J_\Gamma + m_\Gamma l_\Gamma^2) + m_\Gamma J_\Gamma]$;

$a_x^{\varphi_\Gamma} = \gamma^{-1} g m_\Gamma^2 l_\Gamma^2 J_K$;

$a_x^1 = \gamma^{-1} J_K J_\Gamma F_B$;

$$a_x^{F_{\text{упр}}} = \gamma^{-1}[(J_K + m_K l_K^2)(J_\Gamma + m_\Gamma l_\Gamma^2) + m_\Gamma l_K^2 J_\Gamma];$$

$$a_{\varphi_K}^{\dot{x}} = \gamma^{-1} k_{\text{тр}} l_K [m_K (J_\Gamma + m_\Gamma l_\Gamma^2) + m_\Gamma J_\Gamma];$$

$$a_{\varphi_K}^{\varphi_K} = -\gamma^{-1} (m_K + m_\Gamma) g l_K [(m_\Gamma + m_K)(J_\Gamma + m_\Gamma l_\Gamma^2) + m_\Gamma J_\Gamma];$$

$$a_{\varphi_K}^{\varphi_\Gamma} = \gamma^{-1} g m_\Gamma l_K m_\Gamma^2 l_\Gamma^2;$$

$$a_{\varphi_K}^1 = \gamma^{-1} m_\Gamma J_\Gamma l_K F_B;$$

$$a_{\varphi_K}^{F_{\text{упр}}} = -\gamma^{-1} l_K [m_K (J_\Gamma + m_\Gamma l_\Gamma^2) + m_\Gamma J_\Gamma];$$

$$a_{\varphi_\Gamma}^{\dot{x}} = \gamma^{-1} k_{\text{тр}} m_\Gamma l_\Gamma J_K;$$

$$a_{\varphi_\Gamma}^{\varphi_K} = \gamma^{-1} (m_K + m_\Gamma) m_\Gamma m_\Gamma g l_\Gamma l_K^2;$$

$$a_{\varphi_\Gamma}^{\varphi_\Gamma} = -\gamma^{-1} m_\Gamma g l_\Gamma [m_\Gamma (m_K + m_\Gamma) l_K^2 + (m_\Gamma + m_K + m_\Gamma) J_K];$$

$$a_{\varphi_\Gamma}^1 = \{[m_\Gamma (J_K + m_K l_K^2) + m_K J_K] l_\Gamma \gamma^{-1}\} F_B;$$

$$a_{\varphi_\Gamma}^{F_{\text{упр}}} = -\gamma^{-1} m_\Gamma l_\Gamma J_K;$$

$$\gamma = m_\Gamma [(J_K + m_K l_K^2)(J_\Gamma + m_\Gamma l_\Gamma^2) + m_\Gamma l_K^2 J_\Gamma] + (m_K + m_\Gamma) J_K J_\Gamma + m_K m_\Gamma l_\Gamma^2 J_K > 0.$$

Все указанные параметры (2.32), за исключением a_x^1 , $a_{\varphi_K}^1$ и $a_{\varphi_\Gamma}^1$ являются постоянными. Считается, что все они и их составляющие неизвестны в текущий момент времени, допускается лишь приблизительная информация о них. Полагаем, что точно известными являются лишь массо-инерционные параметры крюка и величина l_Γ .

Поставим задачу управления тележкой крана в указанных условиях в виде того, чтобы обеспечить скорейшее перемещение груза в заданное положение по горизонтальной оси (в целевую точку) с демпфированием его колебаний и парированием возмущений. При этом решение будем строить посредством управления положением крюка – основного места для расположения необходимых датчиков с дистанционной передачей данных. Таким образом, задача управления в условиях текущей параметрической неопределенности может быть обозначена следующими требованиями (в условиях возможного воздействия ветра: $F_B = \text{const} \neq 0$):

$$x_K \rightarrow x_K^{\text{зад}} = x_\Gamma^{\text{зад}} - l_\Gamma f_{\text{ФНЧ}}(\varphi_\Gamma); \dot{\varphi}_K \rightarrow 0; \Delta\varphi \rightarrow 0, \quad (2.33)$$

где $x_k^{\text{зад}}$ – заданное положение крюка, определяемое по $x_\Gamma^{\text{зад}}$ – заданному положению груза;

$f_{\text{ФНЧ}}(\varphi_\Gamma)$ – функция низкочастотной фильтрации угла отклонения подвеса груза с получением среднего его значения.

В условиях использования сервопривода для управления тележкой, целесообразно в качестве управляющего сигнала формировать заданную скорость перемещения тележки $v_{\text{зад}}$.

На основании рисунка 2.3 и уравнения (2.32) динамику изменения переменной x_k можно записать как:

$$\ddot{x}_k \approx \tilde{a}_{x_k}^{\dot{x}} \dot{x} + \tilde{a}_{x_k}^{\varphi_k} \varphi_k + \tilde{a}_{x_k}^{\Delta\varphi} \Delta\varphi + \tilde{a}_{x_k}^1 + \tilde{a}_{x_k}^{F_{\text{упр}}} F_{\text{упр}}, \quad (2.34)$$

где $\tilde{a}_{x_k}^{\dot{x}} = a_x^{\dot{x}} + l_k a_{\varphi_k}^{\dot{x}}$;

$$\tilde{a}_{x_k}^{\varphi_k} = (a_x^{\varphi_k} + a_x^{\varphi_\Gamma}) + l_k (a_{\varphi_k}^{\varphi_k} + a_{\varphi_k}^{\varphi_\Gamma});$$

$$\tilde{a}_{x_k}^{\Delta\varphi} = a_x^{\varphi_\Gamma} + l_k a_{\varphi_k}^{\varphi_\Gamma};$$

$$\tilde{a}_{x_k}^1 = a_x^1 + l_k a_{\varphi_k}^1;$$

$$\tilde{a}_{x_k}^{F_{\text{упр}}} = a_x^{F_{\text{упр}}} + l_k a_{\varphi_k}^{F_{\text{упр}}}.$$

2.3.3 Описание линеаризованной модели двухмаятниковой системы при управляющем воздействии в виде заданной скорости

Для исключения из (2.34) сигнала $F_{\text{упр}}$ выражаем этот сигнал из первого равенства (2.32): $F_{\text{упр}} \approx [\ddot{x} - a_x^{\dot{x}} \dot{x} - (a_x^{\varphi_k} + a_x^{\varphi_\Gamma}) \varphi_k - a_x^{\varphi_\Gamma} \Delta\varphi - a_x^1] / a_x^{F_{\text{упр}}}$, подставим результат в (2.34). С учетом того, что $\tilde{a}_{x_k}^{\dot{x}} - a_x^{\dot{x}} \tilde{a}_{x_k}^{F_{\text{упр}}} / a_x^{F_{\text{упр}}} = 0$, получим:

$$\ddot{x}_k \approx a_{x_k}^{\dot{v}} \dot{v} + a_{x_k}^{\varphi_k} \varphi_k + a_{x_k}^{\Delta\varphi} \Delta\varphi + a_{x_k}^1, \quad (2.35)$$

где $a_{x_k}^{\dot{v}} = \tilde{a}_{x_k}^{F_{\text{упр}}} / a_x^{F_{\text{упр}}}$;

$$a_{x_k}^{\varphi_k} = \tilde{a}_{x_k}^{\varphi_k} - (a_x^{\varphi_k} + a_x^{\varphi_\Gamma}) a_{x_k}^{\dot{v}};$$

$$a_{x_k}^{\Delta\varphi} = \tilde{a}_{x_k}^{\Delta\varphi} - a_x^{\varphi_\Gamma} a_{x_k}^{\dot{v}};$$

$$a_{x_k}^1 = \tilde{a}_{x_k}^1 - a_x^1 a_{x_k}^{\dot{v}}.$$

Далее уравнение (2.35) будем использовать в качестве ОУ двухмаятникового подвеса мостового крана с управляющим воздействием на него в виде заданной скорости $v = v_{\text{зад}}$.

2.3.4 Собственная частота колебаний двухмаятниковой системы

Собственная частота колебания крюка $\omega_{0к}$ и груза $\omega_{0г}$ с неподвижным основанием и отсутствии каких-либо внешних сил, действующих на него, согласно (2.32) и по аналогии вывода (2.13) имеет вид:

$$\omega_{0к} = \sqrt{-a_{\varphi_k}^{\varphi_k}} = \sqrt{\gamma^{-1}(m_k + m_r)gl_k[(m_k + m_r)(J_r + m_r l_r^2) + m_r J_r]}, \quad (2.36)$$

$$\omega_{0г} = \sqrt{-a_{\varphi_r}^{\varphi_r}} = \sqrt{\gamma^{-1}m_r gl_r[m_r(m_k + m_r)l_k^2 + (m_r + m_k + m_r)J_k]}. \quad (2.37)$$

Приблизительные значения собственных частот в последующем будет также необходимо для назначения эталонной модели СУ

2.4 Выводы

1. В данной главе рассмотрены математические модели динамики мостового крана, соответствующих трем постановкам задач управления мостовым краном: перемещение груза по одной горизонтальной оси, по двум горизонтальным осям и перемещение груза при двухмаятниковой схеме его подвеса.

2. Получены полные нелинейные аналитические зависимости поступательного и вращательного движения системы «тележка-маятник» при движении МК по задачам (2.8), (2.19), (2.30).

3. Получены линеаризованные модели движения системы «тележка-маятник» при воздействии на тележку (балку) управляющей силы (2.11), (2.22), (2.34).

4. Сформулированы линеаризованные модели системы «тележка-маятник» в случае движения тележки (балки) по заданной скорости (2.12), (2.23), (2.35).

5. Определены собственные частоты маятниковых движений системы «тележка-маятник» (2.13), (2.24), (2.36-2.37).

3 Адаптивный закон управления

Предлагается подход автоматического управления МК, нацеленный на непосредственное отслеживание (относительно неявной эталонной модели) горизонтального перемещения груза (крюка) в назначенную точку в условиях текущей неопределенности параметров груза и внешних возмущений. К последним относятся воздействия ветра, изменения трения перемещения тележки крана и др. Подход заменяет решение двух традиционных задач: отслеживание перемещения тележки (балки) крана в заданную точку и демпфирование угловых колебаний груза (крюка). Подход также включает то, что управление будет строиться посредством заданной скорости перемещения тележки (балки) мостового крана. Данный способ был рассмотрен в работах [170, 171].

На основе полученных линеаризованных моделей строятся законы адаптивного управления по поставленным задачам (движении груза по одной оси; одновременное движение груза по двум осям; перемещение при двухмаятниковой схеме движения груза) с использованием схемы, включающей алгоритм текущей параметрической идентификации, неявную эталонную модель и «упрощенные» условия адаптируемости. Блок-схема предлагаемой ЗСУ перемещения груза по одной оси X представлена на рисунке 3.1.

На рисунке 3.2 изображена структурная схема адаптивной СУ при перемещении груза по одной оси X .

Система включает в себя: пульт управления, с помощью которого оператор крана задает назначенное место доставки груза $x_{гр}^{зад}$ (целевую точку); управляющая ЦВМ, в её состав входит контроллер, устройства ввода/вывода, коммуникационные устройства и т.д.; энкодер для определения положения и скорости движения тележки (балки) крана; датчик гироскоп/акселерометр, установленный на крюке, для определения угловой скорости колебаний и линейного ускорения подвешенного груза (крюка).

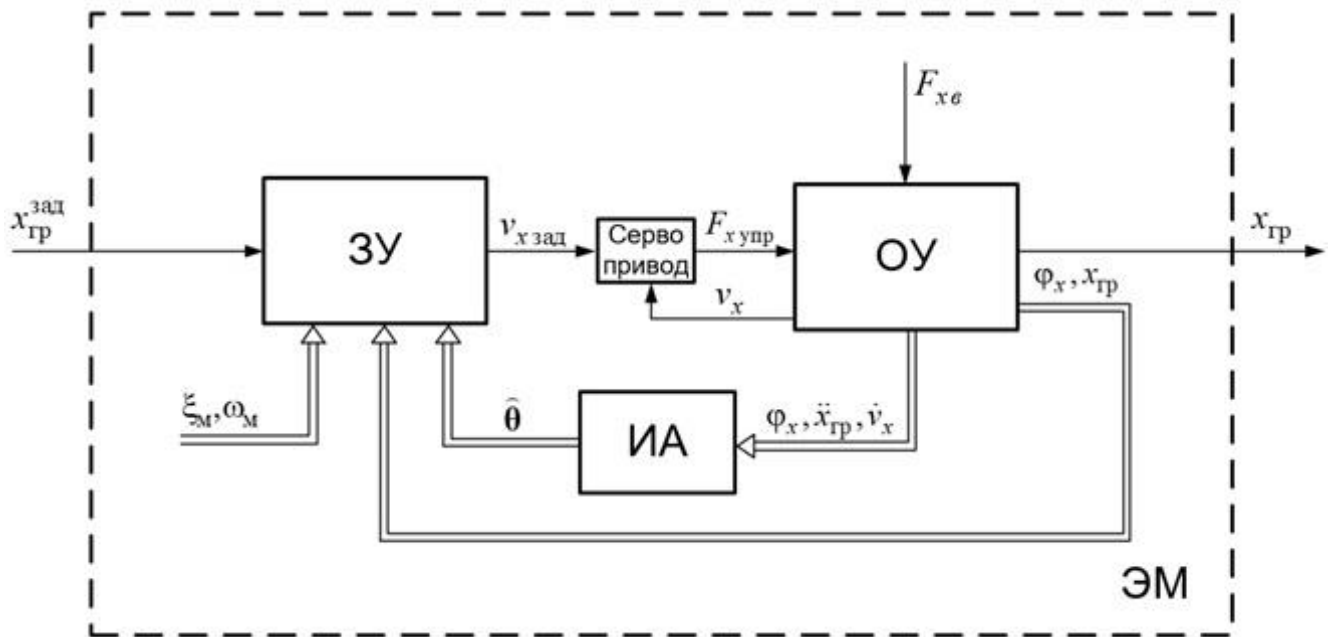


Рисунок 3.1 – Блок-схема ЗСУ по одной оси X

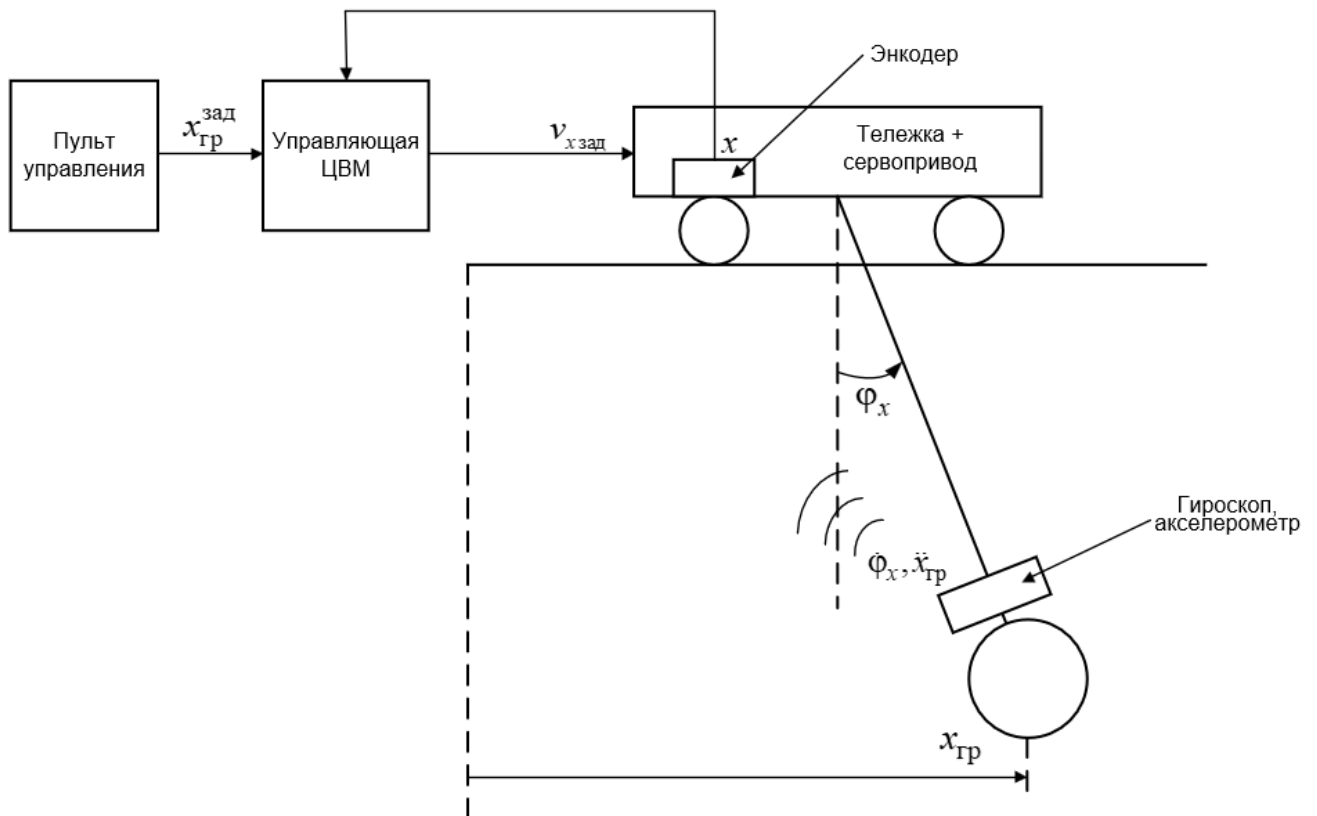


Рисунок 3.2 – Структура адаптивной СУ

Контроллер в текущий момент времени производит сбор данных с датчиков и пульта управления, идентифицирует оценки неизвестных параметров ОУ и формирует управляющее воздействие в виде заданной скорости линейного движения

тележки (балки) крана. Такой подход обеспечивает точное перемещение груза, гашения маятниковых колебаний и парирование внешних возмущений.

3.1 Закон управления тележкой мостового крана в задаче управления движением груза по одной оси

В соответствии с методологией синтеза адаптивного управления, изложенной в [165], в качестве ЭМ, задающей требуемые характеристики перемещения груза, принимается неявная модель в виде колебательного звена со значениями переменных в начальный момент времени, равными соответствующим для исходного объекта [162]:

$$\ddot{x}_m = a_{m1}\dot{x}_m + a_{m0}(x_m - x_{гр}^{зад}), x_m(t_0) = x_{гр}(t_0), \quad (3.1)$$

где x_m – переменная, описывающая эталонную динамику движения груза по оси X ;

выбираемые параметры ЭМ: $a_{m1} = -2\xi_m\omega_m$; $a_{m0} = -(\omega_m)^2$;

ξ_m, ω_m – эталонные значения относительного коэффициента затухания и собственной частоты соответственно [162];

t_0 – начальный момент времени.

Параметры ЭМ будут определены далее при анализе устойчивости ЗСУ.

Предположим, что динамика движения груза вместо уравнения (2.11) описывается равенством:

$$\ddot{x}_{гр} = a_{m1}\dot{x}_{гр} + a_{m0}(x_{гр} - x_{гр}^{зад}), \quad (3.2)$$

что соответствует динамике назначенной ЭМ (3.1). Рассмотрим, как этого добиться путем формирования ЗУ – заданной скорости перемещения тележки (условного управляющего сигнала).

Подставляя в уравнение (2.12) вместо его левой части правую часть уравнения (3.2) и заменяя $\dot{x}_{гр}$ на \dot{x} , чтобы устранить внутреннюю неустойчивость [24] (уточнение этой замены будет приведено далее), определяем условный управляющий сигнал $v_{x\text{ зад}}$ вычисленный при точных значениях параметров объекта:

$$T\dot{v}_{x \text{ зад}} + v_{x \text{ зад}} = -a_{m1}^{-1}[a_{m0}(x_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) - a_2^V \phi_x - a_3^V], \quad (3.3)$$

где $T = -a_1^V/a_{m1}$.

Из полученной зависимости следует, что искомый условный управляющий сигнал можно получить путем фильтрации сигнала, описываемого правой частью (3.3), на апериодическом звене $1/(Ts + 1)$, где s – переменная преобразования Лапласа. Поскольку параметр a_1^V положительный, а параметр a_{m1} – отрицательный, то $T > 0$, отсюда обеспечивается внутренняя устойчивость формирования $v_{x \text{ зад}}$ в зависимости от правой части (3.3).

Если ЗУ (3.3) подставить в (2.11), то получим уравнение движения ЗСУ

$$\ddot{x}_{\text{гр}} - a_{m1}\dot{x}_{\text{гр}} - a_{m0}(x_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) \approx -a_{m1}l\dot{\phi}_x. \quad (3.4)$$

Или через уравнение несоответствия ЗСУ, заданной ЭМ (ошибки управления): $e = x_m - x_{\text{гр}}$, на основании (3.4) и (3.1) получаем уравнение:

$$\ddot{e} - a_{m1}\dot{e} - a_{m0}e \approx a_{m1}l\dot{\phi}_x, \quad e(t_0) = 0. \quad (3.5)$$

В силу устойчивости назначенной ЭМ, левые части равенств (2.11) и первого из (3.5) описываются устойчивым дифференциальным уравнением. Поэтому, если в процессе управления обеспечивается условие: $\dot{\phi} \rightarrow 0$, то налицо асимптотическая тождественность поведения ЗСУ назначенному эталону. Докажем, что ЗУ (3.3) обеспечивает это в целевой точке.

Заметим, что из (3.4) непосредственно следует, что условие: $x_{\text{гр}}(t_0) = x_{\text{гр}}^{\text{зад}}$, $\dot{\phi}_x(t_0) = 0$ – соответствует устойчивому состоянию ЗСУ, а $x_{\text{гр}}(t_0) \neq x_{\text{гр}}^{\text{зад}}$, $\dot{\phi}_x(t_0) = 0$ – началу движения груза в сторону целевой точки. Запишем уравнение (3.4) в виде:

$$\ddot{x}_{\text{гр}} - a_{m1}\dot{x}_{\text{гр}} - a_{m0}(x_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) \approx 0. \quad (3.6)$$

Назначим функцию Ляпунова:

$$\Lambda = 0,5 \left[\dot{x}_{\text{гр}}^2 - a_{m0}(x_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}})^2 \right] \geq 0. \quad (3.7)$$

Заметим, что $\Lambda = 0$ только при $\dot{x}_{\text{гр}} = 0$ и $x_{\text{гр}} = x_{\text{гр}}^{\text{зад}}$. Производная этой функции в силу (3.6) равна: $\Lambda' = a_{m1}\dot{x}_{\text{гр}}$. Поскольку по (3.1) $a_{m1} < 0$, для того, чтобы эта

функция Ляпунова уменьшалась по времени, необходимо постоянное, или на подавляющей части периода колебаний маятника выполнение условия: $\text{sign}(\dot{x}) = \text{sign}(\dot{x}_{\text{гр}})$. Рассмотрим, при каких условиях это можно обеспечить.

В силу равенства: $x_{\text{гр}} \approx x + l\varphi_x$ по рис.2.1 и $a_{\text{м0}} = -\omega_{\text{м}}^2$ по (3.1), уравнение (3.6) можно переписать в виде равенства:

$$\ddot{x} = -a_{\text{м1}}\dot{x} - a_{\text{м0}}(x - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) \approx -l(\ddot{\varphi}_x + \omega_{\text{м}}^2\varphi_x). \quad (3.8)$$

Известно, что собственное колебание подвеса груза, как и любого другого маятника в принятых условиях, можно описать уравнением: $\ddot{\varphi}_x + \omega_{0x}^2\varphi_x = 0$, с собственной частотой ω_{0x} . Прибавляя к правой части предыдущего равенства этот нуль, умноженный на l , получим:

$$\ddot{x} - a_{\text{м1}}\dot{x} - a_{\text{м0}}(x - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) \approx (\omega_{0x}^2 - \omega_{\text{м}}^2)l\varphi_x \approx (\omega_{0x}^2 - \omega_{\text{м}}^2)(x_{\text{гр}} - x). \quad (3.9)$$

Дифференцируя это равенство (для (3.9) это оправдано, поскольку приближительное равенство основано на линеаризации с сохранением производных), можно записать:

$$\ddot{x} + 2\tilde{\xi}_{\text{м}}\omega_{0x}\dot{x} + \omega_{0x}^2x \approx (\omega_{0x}^2 - \omega_{\text{м}}^2)\dot{x}_{\text{гр}}. \quad (3.10)$$

где $\tilde{\xi}_{\text{м}} = \xi_{\text{м}}\omega_{\text{м}}/\omega_{0x}$ – результирующий коэффициент демпфирования.

Полученное уравнение по теории автоматического управления означает, что динамика движения тележки по переменной \dot{x} соответствует колебательному звену с собственной частотой ω_{0x} и относительным коэффициентом затухания $\tilde{\xi}_{\text{м}} > 0$ со стремлением: $\dot{x} \rightarrow [(\omega_{0x}^2 - \omega_{\text{м}}^2)/\omega_{0x}^2]\dot{x}_{\text{гр}}$. В силу назначенного эталона и реализованного ЗУ основная частота движений по переменной $\dot{x}_{\text{гр}}$ будет равна $\omega_{\text{м}}$. Если потребовать выполнение условия $\omega_{\text{м}} < \omega_{0x}$, то переменная \dot{x} на переходных процессах будет изменяться быстрее $\dot{x}_{\text{гр}}$ и, соответственно, иметь на подавляющей части периода колебательных движений тот же знак, то есть $\text{sign}(\dot{x}) = \text{sign}(\dot{x}_{\text{гр}})$.

Если таким образом обеспечить уменьшение по времени назначенной функции Ляпунова, то по указанным ее свойствам получим: $\dot{x}_{гр} \rightarrow 0$ ($\ddot{x}_{гр} \rightarrow 0$), а также $x_{гр} \rightarrow x_{гр}^{зад}$. Тогда из (3.6) следует, что $\dot{x} \rightarrow 0$, а значит и $\dot{\phi} \rightarrow 0$.

Таким образом, для достижения устойчивости подвеса груза, то есть для: $x_{гр} \rightarrow x_{гр}^{зад}$, $\dot{x} \rightarrow 0$, $\dot{\phi} \rightarrow 0$, требуется обеспечить надлежащий выбор параметров ЭМ. Общее указанное требование к ω_m со значения результирующего коэффициента затухания ξ_m , можно сформировать требования к параметрам ЭМ (3.5) в виде:

$$\omega_m < \omega_{0x}, 0 < \xi_m < 1, \xi_m \rightarrow 1. \quad (3.11)$$

Отсюда видно, что параметры ЭМ несложно определить, при настройке СУ.

3.2 Алгоритм текущей идентификации

Полученный ЗУ (3.3) построен при условиях, что параметры ОУ (a_1^V, a_2^V, a_3^V) известны. Однако, по условию решаемой задачи, они не определены. Для поиска оценок указанных параметров по (2.11) в текущем времени используем алгоритм идентификации с лучшими идентифицирующими свойствами, способный оценивать переменные по времени – рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания [164], представлен в виде системы:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + P_i y_{r i} \varepsilon_i; \quad \varepsilon_i \triangleq z_i - y_{r i}^T \hat{\theta}_{i-1}; \\ P_i = [P_{i-1} - P_{i-1} y_{r i} y_{r i}^T P_{i-1} (1 + y_{r i}^T P_{i-1} y_{r i})^{-1}] / \beta; \\ P_0 = \vartheta E_2; \quad \beta < 1; \quad \beta \rightarrow 1, \end{cases} \quad (3.13)$$

где индекс $i = 1, 2, 3, \dots$ – обозначает дискретные моменты времени с шагом Δt ;

$\hat{\theta}_i \triangleq [\hat{a}_{2i}^V, \hat{a}_{3i}^V]^T$ – вектор искомых оценок;

верхний индекс «Т» означает транспонирование;

P_i – матричный коэффициент усиления алгоритма (2×2);

$y_{r i} = [\varphi_{x i}, 1]^T$ – вектор регрессоров, соответствующий искомым оценкам;

ε_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 СУ, построенной на «упрощенных» условиях адаптируемости [162] и известных диапазонов этой оценки;

β – назначаемый фактор забывания прошедших измерений для слежения за изменяющимися во времени искомыми параметрами;

ϑ – большое положительное число, определяющее начальную скорость изменения оценок параметров;

E_2 – единичная (2×2) матрица.

Закон управления с учётом оцениваемых параметров ОУ вместо их действительных величин в отличии от (3.3) имеет вид:

$$\hat{T} \dot{v}_{x \text{ зад}} + v_{x \text{ зад}} = -a_{m1}^{-1} [a_{m0} (\hat{x}_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) - \hat{a}_2^V \varphi_x - \hat{a}_3^V], \quad (3.14)$$

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

верхний индекс «^» означает оценку соответствующего элемента.

Как показано в работе [162, 165], требование к точности оценки \hat{a}_1^V может быть очень слабым (соответствует «упрощенным» условиям адаптируемости) и сводится к соотношениям:

$$\text{sign}(\hat{a}_1^V) = \text{sign}(a_1^V); |a_1^V|/2 \leq \hat{a}_1^V \leq |a_1^V|_{\text{max}}; d\hat{a}_1^V/dt \rightarrow 0. \quad (3.15)$$

где $|a_1^V|_{\text{max}} \geq 2|a_1^V|$ – верхнее ограничение указанной оценки, которое определяется экспериментально по качеству результирующего управления.

Из комментариев к (2.8) и (2.9) можно определить значение параметра a_1^V :

$$a_1^V = a_1/a_{x1} = J_y/(J_y + m_{\text{г}} l^2) = r_{\text{г}x}^2/(r_{\text{г}x}^2 + l^2) \Rightarrow 0 < a_1^V \ll 1, \quad (3.16)$$

где $r_{\text{г}x}$ – радиус инерции груза $J_y = m_{\text{г}} r_{\text{г}x}^2$; обычно $r_{\text{г}x}^2 \ll l^2$.

Опираясь на полученные границы параметра a_1^V (3.16), всегда можно найти приблизительное значение оценки \hat{a}_1^V .

Для того, чтобы распространить выводы по устойчивости ЗСУ при точном ЗУ (3.3) на СУ с реальным законом (3.14), выполним следующее. В силу быстрой сходимости невязки идентификации в алгоритме (3.13), буквально с первых шагов работы [162], уравнение ОУ (2.11) можно переписать как равенство:

$$\ddot{x}_{\text{гр}} \approx \hat{a}_1^V \dot{v}_x + \hat{a}_2^V \varphi_x + \hat{a}_3^V. \quad (3.17)$$

Подставляя сюда ЗУ (3.14), получаем:

$$\ddot{x}_{\text{гр}} - a_{m1} \dot{x}_{\text{гр}} - a_{m0} (x_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) \approx -a_{m1} l_{\text{ср}} \dot{\varphi}_x, \quad (3.18)$$

где $l_{\text{ср}}$ – среднее значение длины подвеса груза.

Или через уравнение несоответствия ЗСУ заданной ЭМ (ошибки управления): $e = x_m - x_{\text{гр}}$, на основании (3.18) и (3.1) получаем уравнение:

$$\ddot{e} - a_{m1} \dot{e} - a_{m0} e \approx a_{m1} l_{\text{ср}} \dot{\varphi}_x, \quad e(t_0) = 0. \quad (3.19)$$

В силу устойчивости назначенной ЭМ, левые части равенств (3.17) и первого из (3.19) описываются устойчивым дифференциальным уравнением. Поэтому также, как и описывалось выше, если в процессе управления обеспечивается условие $\dot{\varphi} \rightarrow 0$, то налицо асимптотическая тождественность поведения ЗСУ назначенному эталону. Реальный ЗУ (3.14), как и (3.3), обеспечивает это в целевой точке. Отсюда уравнение (3.18) можно представить в виде (3.6).

Назначая функцию Ляпунова (3.7), мы получаем те же рассуждения и выводы, которые приведены для зависимостей с ЗУ, построенным на точных значениях параметров ОУ.

Рассмотрим, при каких условиях можно обеспечить $\text{sign}(\dot{x}) = \text{sign}(\dot{x}_{\text{гр}})$.

В силу равенства: $x_{\text{гр}} \approx x + l_{\text{ср}} \varphi_x$ по рис.2.1 и $a_{m0} = -\omega_m^2$ по (3.1), уравнение (3.6) можно переписать в виде равенства:

$$\ddot{x} - a_{m1} \dot{x} - a_{m0} (x - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) \approx -l_{\text{ср}} (\ddot{\varphi}_x + \omega_m^2 \varphi_x). \quad (3.20)$$

Отсюда, опираясь на рассуждения, описанные выше, получаем равенство

$$\ddot{x} - a_{m1} \dot{x} - a_{m0} (x - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) \approx (\omega_{0x}^2 - \omega_m^2) l_{\text{ср}} \varphi_x \approx (\omega_{0x}^2 - \omega_m^2) (x_{\text{гр}} - x). \quad (3.21)$$

Дифференцируя это равенство, получаем (3.10). В силу этого получаем те же выводы и требования к назначению параметров ЭМ (3.11-3.12), которые были получены для зависимостей с ЗУ, построенным на точных значениях параметров.

3.3 Закон управления мостовым краном в задаче управления перемещением груза по двум осям

Закон управления по оси X описан уравнениями (3.3), (3.14).

В качестве ЭМ, задающей требуемые характеристики перемещения груза посредством поперечной балки МК, принимается неявная модель в виде колебательного звена со значениями переменных в начальный момент времени:

$$\ddot{y}_m = b_{m1}\dot{y}_m + b_{m0}(y_m - y_{гр}^{зад}), y_m(t_0) = y_{гр}(t_0), \quad (3.22)$$

где y_m – переменная, описывающая эталонную динамику движения груза по оси Y ;

$y_{гр}^{зад}$ – заданное значение $y_{гр}$, или назначенное место доставки груза (целевая точка);

выбираемые параметры ЭМ: $b_{m1} = -2\xi_m\omega_m$; $b_{m0} = -(\omega_m)^2$.

ЭМ модель для переноса груза по оси X используем ту же, что описывалась в предыдущем разделе (3.1).

Величины эталонных значений ξ_m , ω_m используется те же, что и для ЭМ, применяемой для перемещения груза по оси X .

Отсюда находим условные управляющие сигналы $v_{y\text{ зад}}$ и $v_{x\text{ зад}}$, вычисленные при точных значениях параметров ОУ:

$$\begin{cases} T_x \dot{v}_{x\text{ зад}} + v_{x\text{ зад}} = -a_{m1}^{-1} [a_{m0}(x - x_{гр}^{зад}) - a_2^V \varphi_x - a_3^V]; \\ T_y \dot{v}_{y\text{ зад}} + v_{y\text{ зад}} = -b_{m1}^{-1} [b_{m0}(y - y_{гр}^{зад}) - b_{y2}^V \varphi_y - b_{y3}^V], \end{cases} \quad (3.23)$$

где $T_x = -a_1^V/a_{m1}$;

$T_y = -b_{y1}^V/b_{m1}$.

Закон управления с учётом оцениваемых параметров ОУ с помощью алгоритма идентификации вместо их действительных величин имеет вид:

$$\begin{cases} \hat{T}_x \dot{v}_{x\text{ зад}} + v_{x\text{ зад}} = -\hat{a}_{m1}^{-1} [\hat{a}_{m0}(\hat{x}_{гр} - x_{гр}^{зад}) - \hat{a}_2^V \varphi_x - \hat{a}_3^V]; \\ \hat{T}_y \dot{v}_{y\text{ зад}} + v_{y\text{ зад}} = -\hat{b}_{m1}^{-1} [\hat{b}_{m0}(\hat{y}_{гр} - y_{гр}^{зад}) - \hat{b}_{y2}^V \varphi_y - \hat{b}_{y3}^V], \end{cases} \quad (3.24)$$

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

$$\hat{T}_y = -\hat{b}_{y1}^V/b_{m1}, \hat{y}_{гр} = \int_0^t v_{y\text{зад}}(t)dt + \hat{l}\varphi_y.$$

Доказательство устойчивости ЗСУ и определение \hat{b}_{y1}^V происходит аналогичным способом, как было описано выше для ЗУ (3.16), (3.18-3.21), который используется для перемещения груза по оси X .

3.4 Управление двухмаятниковым подвесом мостового крана

В соответствии с использованием схемы адаптивного управления с алгоритмом текущей параметрической идентификации, неявной ЭМ, на основе «упрощенных» условий адаптируемости с непосредственным отслеживанием перемещения груза, ОУ в виде (2.31) и задачей управления (2.30), определяем ЭМ движения крюка в виде:

$$\ddot{x}_{км} = a_{m1}\dot{x}_{км} + a_{m0}(x_{км} - x_{к}^{\text{зад}}); x_{км}(t_0) = x_{к}(t_0), \quad (3.25)$$

где $x_{км}$ – переменная эталонной модели, соответствующая $x_{к}$;

$$a_{m1} = -2\xi_m\omega_m;$$

$$a_{m0} = -(\omega_m)^2;$$

Требования к выбору параметров ξ_m и ω_m будет определено ниже.

В соответствии с указанным эталоном, предположим, что требуется получить эталонное движение по переменной $x_{к}$ в виде (переменная $\dot{x}_{к}$ заменена на \dot{x} для обеспечения внутренней устойчивости закона управления):

$$\ddot{x}_{к} = a_{m1}\dot{x} + a_{m0}(x_{к} - x_{к}^{\text{зад}}). \quad (3.26)$$

Приравнивая правые части этого уравнения с правой частью (2.35), найдем заданную скорость тележки при условии точной информации о параметрах ОУ:

$$a_{x_k}^{\dot{v}} \dot{v}_{\text{зад}}^* / a_{m1} + v_{\text{зад}}^* = (-a_{m1})^{-1} [a_{m0}(x_{к} - x_{к}^{\text{зад}}) - a_{x_k}^{\varphi_k} \varphi_k - a_{x_k}^{\Delta\varphi} \Delta\varphi + a_{x_k}^1], \quad (3.27)$$

где $v_{\text{зад}}^*$ – точное значение заданной скорости тележки.

Из комментариев к (2.32), (2.31) и (2.29) можно определить значение параметра $a_{x_k}^{\dot{v}}$. С учетом того, что крюк является небольшим объектом с сосредоточенной массой, отдаленным от своей точки подвески, что дает $J_k + m_k l_k^2 \approx m_k l_k^2$:

$$a_{x_k}^{\dot{\psi}} = \frac{J_k(J_\Gamma + m_\Gamma l_\Gamma^2)}{(J_k + m_k l_k^2)(J_\Gamma + m_\Gamma l_\Gamma^2) + m_\Gamma l_k^2 J_\Gamma} \approx \frac{(r_k/l_k)^2}{\chi} \Rightarrow \quad (3.28)$$

$$0 < a_{x_k}^{\dot{\psi}} \leq \max(a_{x_k}^{\dot{\psi}}) \ll 1,$$

где r_k – радиус инерции крюка $J_k = m_k r_k^2$;

$$\chi = 1 + \frac{m_\Gamma}{m_k} \frac{J_\Gamma}{J_\Gamma + m_\Gamma l_\Gamma^2} \geq 1 \quad \text{– безразмерный параметр};$$

$\max(a_{x_k}^{\dot{\psi}}) = (r_k/l_k)^2$ – приблизительное максимальное значение параметра $a_{x_k}^{\dot{\psi}}$, зависящее только от r_k, l_k .

Приведенные соотношения показывают, что параметр $a_{x_k}^{\dot{\psi}}$ положителен, чем обеспечивается внутренняя устойчивость ЗУ по формированию $v_{зад}^*$ в (3.27). А также дают возможность его приблизительного расчета.

Рассмотрим дает ли закон управления (3.27) достижения цели (2.30) относительно подвеса крюка, когда на него не действует возмущение от колебаний груза ($\Delta\varphi \equiv 0$), т.е. будет ли достигаться условие: $x_k \rightarrow x_k^{зад}$, $\dot{\varphi}_k \rightarrow 0$. Для простоты рассуждений примем вначале, что $x_k^{зад} = const$.

Назначим функцию Ляпунова:

$$\Lambda = 0,5[\dot{x}_k^2 - a_{m0}(x_k - x_k^{зад})^2] \geq 0.$$

Заметим, что $\Lambda = 0$ только при $\dot{x}_k = 0$ и $x_k = x_k^{зад}$. Производная этой функции в силу (3.26) равна: $\Lambda' = a_{m1}\dot{x}_k$. Поскольку по (3.25) $a_{m1} < 0$, для того, чтобы эта функция Ляпунова уменьшалась по времени, необходимо постоянное, или на подавляющей части периода колебаний маятника выполнение условия: $\text{sign}(\dot{x}) = \text{sign}(\dot{x}_k)$. Рассмотрим, при каких условиях это можно обеспечить.

В силу равенства: $\Lambda' = a_{m1}\dot{x}_k$, $x_k \approx x + l_k\varphi_k$ по рисунку 2.3 и $a_{m0} = -\omega_M^2$ по (3.25), уравнение (3.26) можно переписать в виде:

$$\ddot{x} - a_{m1}\dot{x} - a_{m0}(x - x_k^{зад}) \approx -l_k(\ddot{\varphi}_k + \omega_M^2\varphi_k).$$

Известно, что собственное колебание подвеса крюка, как и любого другого маятника в принятых условиях, можно описать уравнением [167]: $\ddot{\varphi}_k + \omega_{k0}^2\varphi_k = 0$, с

собственной частотой ω_{k0} . Прибавляя к правой части предыдущего равенства этот нуль, умноженный на l_k , получим:

$$\ddot{x} - a_{m1}\dot{x} - a_{m0}(x - x_k^{\text{зад}}) \approx (\omega_{k0}^2 - \omega_m^2)l_k\varphi_k \approx (\omega_{k0}^2 - \omega_m^2)(x_k - x).$$

Продифференцируем это равенство, с учетом (3.25) это оправдано, поскольку приближительное равенство основано на линеаризации с сохранением производных:

$$\ddot{x} + 2\tilde{\xi}_m\omega_{k0}\dot{x} + \omega_{k0}^2x \approx (\omega_{k0}^2 - \omega_m^2)\dot{x}_k,$$

где $\tilde{\xi}_m = \xi_m\omega_m/\omega_{k0}$ – результирующий коэффициент демпфирования.

Полученное уравнение по теории автоматического управления означает, что динамика движения тележки по переменной \dot{x} соответствует колебательному звену с собственной частотой ω_{k0} и относительным коэффициентом затухания $\tilde{\xi}_m > 0$ со стремлением: $\dot{x} \rightarrow [(\omega_{k0}^2 - \omega_m^2)/\omega_{k0}^2]\dot{x}_k$. В силу назначенного эталона (3.25) и реализованного закона управления (3.27) основная частота движений по переменной \dot{x}_k будет равна ω_m . Если потребовать выполнение условия $\omega_m < \omega_{k0}$, то переменная \dot{x} на переходных процессах будет изменяться быстрее \dot{x}_k и, соответственно, иметь на подавляющей части периода колебательных движений тот же знак, т.е. $\text{sign}(\dot{x}) = \text{sign}(\dot{x}_k)$.

Если таким образом обеспечить уменьшение по времени назначенной функции Ляпунова, то по указанным ее свойствам получим: $\dot{x}_k \rightarrow 0$ ($\ddot{x}_k \rightarrow 0$), а также $x_k \rightarrow x_k^{\text{зад}}$. Тогда из (3.26) следует, что $x_k \rightarrow x_k^{\text{зад}}$, $\dot{x} \rightarrow 0$, а значит и $\dot{\varphi}_k \rightarrow 0$.

Таким образом, для достижения устойчивости подвеса крюка, т.е. для: $x_k \rightarrow x_k^{\text{зад}}$, $\dot{x} \rightarrow 0$, $\dot{\varphi}_k \rightarrow 0$, требуется обеспечить надлежащий выбор параметров эталонной модели. Этот вывод можно сделать и для медленно меняющегося значения $x_k^{\text{зад}}$, соответствующего общему случаю в соответствии с (2.30). Обобщая указанное требование к ω_m со значениями результирующего коэффициента затухания $\tilde{\xi}_m$, можно сформировать требования к параметрам ЭМ (3.25) в виде:

$$\omega_m < \omega_{k0}, 0 < \tilde{\xi}_m < 1, \tilde{\xi}_m \rightarrow 1, \quad (3.29)$$

где под ω_{k0} будем понимать собственную частоту колебаний подвеса крюка совместно с грузом, когда относительных колебаний груза нет, т.е. $\Delta\varphi \equiv 0$, и при

$v = 0$. Последнее соответствует условию стабилизации угловых движений в районе заданного положения груза и управлению по скорости.

Поскольку параметры объекта управления по условию неизвестны, вместо (3.27) используем закон управления:

$$(-a_{m_1})^{-1} \hat{a}_{x_k}^{\dot{v}} \dot{v}_{\text{зад}} + v_{\text{зад}} = (-a_{m_1})^{-1} [a_{m_0} (x_k - x_k^{\text{зад}}) - \hat{a}_{x_k}^{\varphi_k} \varphi_k - \hat{a}_{x_k}^{\Delta\varphi} \Delta\varphi - \hat{a}_{x_k}^1]. \quad (3.30)$$

Для получения оценок неизвестных параметров используется алгоритм текущей параметрической идентификации, рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания со следующими переменными: $\hat{\theta}_i \triangleq [(\hat{a}_{x_k}^{\varphi_k})_i, (\hat{a}_{x_k}^{\Delta\varphi})_i, (\hat{a}_{x_k}^1)_i]^T$; $y_{ri} = [\varphi_{ki}, \Delta\varphi, 1]^T$; $z_i = \ddot{\varphi}_{ki} - \hat{a}_{x_k}^{\dot{v}} v_{\text{зад}}$, определение $\hat{a}_{x_k}^{\dot{v}}$ будет описано ниже.

Предположим, что через малый промежуток времени работы системы невязка идентификации будет близка к нулю ($\varepsilon \cong 0$), тогда можно в непрерывном времени записать вместо (2.32):

$$\ddot{x}_k \approx \hat{a}_{x_k}^{\dot{v}} \dot{v} + \hat{a}_{x_k}^{\varphi_k} \varphi_k + \hat{a}_{x_k}^{\Delta\varphi} \Delta\varphi + \hat{a}_{x_k}^1.$$

Что и дает основание для записи закона (3.30) и выводу аналогичных свойств точного закона управления (3.27), при условии, что оценка $\hat{a}_{x_k}^{\dot{v}}$ удовлетворяет требованиям «упрощенных» условий адаптируемости:

$$\text{sign}(\hat{a}_{x_k}^{\dot{v}}) = \text{sign}(a_{x_k}^{\dot{v}}); |a_{x_k}^{\dot{v}}|/2 \leq |\hat{a}_{x_k}^{\dot{v}}| \leq |\hat{a}_{x_k}^{\dot{v}}|_{\text{max}}; d\hat{a}_{x_k}^{\dot{v}}/dt \rightarrow 0, \quad (3.31)$$

где $|\hat{a}_{x_k}^{\dot{v}}|_{\text{max}} \geq 2|a_{x_k}^{\dot{v}}|$ – верхнее ограничение оценки параметра $\hat{a}_{x_k}^{\dot{v}}$, которое определяется экспериментально по качеству результирующего управления.

В связи с этим оценка $\hat{a}_{x_k}^{\dot{v}}$ принята постоянной, заранее назначаемой с соблюдением (3.31), и исключена из алгоритма идентификации. Опыт исследований показывает, что на основании (3.28) и (3.31) достаточно назначить оценку $\hat{a}_{x_k}^{\dot{v}}$ в виде максимального значения истинной величины этого параметра по (3.28), то есть:

$$\hat{a}_{x_k}^{\dot{v}} = (r_k / \hat{l}_k)^2, \quad (3.32)$$

где \hat{l}_k – оценка параметра l_k , которая может быть получена, например, путем интегрирования вертикальной скорости (обычно постоянной) перемещения груза.

Как точный закон управления (3.27), так и реальный (3.30) при выполнении указанных выше условий обеспечивают два первых требования (2.30). Если теперь принять во внимание относительное колебание груза, то есть $\Delta\varphi \neq 0$, то можно построить следующие заключения. Из физики явления следует, что движения маятниковой системы по углам φ_k и $\Delta\varphi$ взаимосвязано, в т.ч. колебания по $\Delta\varphi$ возбуждают колебания по φ_k . Поскольку система управления обеспечивает $\dot{\varphi}_k \rightarrow 0$, то за счет обратного влияния это потенциально направлено на противодействие указанному возмущению, то есть на его гашение. Это справедливо, если среднее значение частной производной $\partial\varphi_k/\partial\Delta\varphi$ будет достаточно большим по модулю. Однако анализ фазовых траекторий $\varphi_k(\Delta\varphi)$ для типовых случаев показывает (физика явления это подтверждает), что с увеличением момента инерции груза J_Γ модуль среднего значения указанной частной производной уменьшается, то есть снижается влияние φ_k на $\Delta\varphi$. Последнее будет порождать затянутость процесса гашения колебаний по $\Delta\varphi$.

Для устранения этого предлагается модифицировать величину $x_k^{\text{зад}}$, определенную по (2.30), в законах управления (3.27) и (3.30), в виде:

$$x_k^{\text{зад}} = x_\Gamma^{\text{зад}} - l_\Gamma f_{\text{ФНЧ}}(\varphi_\Gamma) + k_d l_\Gamma f_{\text{форс}}(\Delta\varphi), \quad (3.33)$$

где последнее слагаемое предназначено для усиления демпфирования колебаний груза за счет небольшого заданного перемещения крюка в сторону колебательного перемещения груза (аналогично приведенным выше доводам по устойчивости подвеса крюка);

$k_d > 0$ – 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.

Последнюю целесообразно представить в виде приближения к обратной динамике ЭМ, что можно записать в изображениях Лапласа как:

$$f_{\text{форс}}(\Delta\varphi, p) = \frac{\omega_m^{-2} p^2 + 2\xi_m \omega_m^{-1} p + 1}{k_{\phi 1} p^2 + k_{\phi 2} p + 1} \Delta\varphi(p), \quad (3.34)$$

где p – переменная преобразования Лапласа;

$k_{\phi 1}$, $k_{\phi 2}$ – малые положительные коэффициенты для реализуемости и устойчивости указанной передаточной функции.

Для того, чтобы выбрать собственную частоту ЭМ для соблюдения (3.29), а также параметры функции $f_{\text{ФНЧ}}(\varphi_{\Gamma})$ в (3.33), нужно знать собственную частоту колебаний подвеса крюка совместно с грузом при $\Delta\varphi \equiv 0(\omega_{\kappa 0})$ и аналогичную по углу $\Delta\varphi(\omega_{\Gamma 0})$ при $\nu \cong 0$. Эти частоты можно получить из второго и третьего уравнений системы (2.29). Действительно, при условии $\dot{x} \equiv 0$, $F_{\text{упр}} \equiv 0$, $\xi_{\text{тр}} \equiv 0$, $F_{\text{в}} \equiv 0$, их можно записать в виде:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_{\kappa} \approx (a_{\varphi_{\kappa}}^{\varphi_{\kappa}} + a_{\varphi_{\kappa}}^{\varphi_{\Gamma}})\varphi_{\kappa} + a_{\varphi_{\kappa}}^{\varphi_{\Gamma}}\Delta\varphi; \\ \Delta\ddot{\varphi} \approx (a_{\varphi_{\Gamma}}^{\varphi_{\kappa}} + a_{\varphi_{\Gamma}}^{\varphi_{\Gamma}} - a_{\varphi_{\kappa}}^{\varphi_{\kappa}} - a_{\varphi_{\kappa}}^{\varphi_{\Gamma}})\varphi_{\kappa} + (a_{\varphi_{\Gamma}}^{\varphi_{\Gamma}} - a_{\varphi_{\kappa}}^{\varphi_{\Gamma}})\Delta\varphi. \end{cases}$$

Отсюда, с учетом известной и указанной выше формулы колебательного собственного движения, находим $\omega_{\kappa 0}$ при $\Delta\varphi \equiv 0$ и $\omega_{\Gamma 0}$ при $\varphi_{\kappa} \equiv 0$:

$$\omega_{\kappa 0}^2 \approx -(a_{\varphi_{\kappa}}^{\varphi_{\kappa}} + a_{\varphi_{\kappa}}^{\varphi_{\Gamma}}), \quad \omega_{\Gamma 0}^2 \approx a_{\varphi_{\Gamma}}^{\varphi_{\Gamma}} - a_{\varphi_{\kappa}}^{\varphi_{\Gamma}}. \quad (3.35)$$

На практике при текущей неопределенности эти параметры могут быть найдены приблизительно опытным путем по периодам соответствующих колебаний.

3.5 Выводы

1. Определена ЭМ, задающую требуемые характеристики перемещения груза по одной оси для системы «тележка-маятник».
2. Получено уравнение ЗСУ перемещением груза по одной оси с управляющим сигналом в виде заданной скорости при точных значениях параметров ОУ.
3. Доказана устойчивость ЗСУ и определены условия, обеспечивающие это свойство (3.11).
4. Описан ИА, доставляемый необходимые оценки параметров ОУ для построения СУ (3.13). В соответствии с «упрощенными» условиями адаптируемости

к алгоритму идентификации предъявляются достаточно простые условия (3.15). Они сводятся к сходимости невязки идентификации при функционировании алгоритма текущей идентификации и выбору в определенном диапазоне постоянной оценки \hat{a}_1^V .

5. Определена ЭМ и получено уравнение ЗСУ перемещения груза по двум горизонтальным осям для системы «балка-тележка-маятник» (3.24).

6. Назначена ЭМ, определяющая требуемые характеристики движения двухмаятниковой системы.

7. Выведено уравнение ЗСУ перемещения груза (крюка) по одной оси с учётом точных и оцениваемых параметров ОУ.

8. Доказана устойчивость ЗСУ двухмаятниковой моделью и определены необходимые условия для этого (3.16), (3.18-3.21).

4 Исследование адаптивной СУ на имитационной компьютерной модели

Для исследования адаптивного ЗУ и оценки качества СУ при большом многообразии грузов и внешних возмущений при различных параметрах ее работы была разработана имитационная модель мостового крана в программной среде Matlab/Simulink/SimMechanics(MultiBody). Такая система позволяет смоделировать динамику перемещения груза с учётом многих факторов присущих САУ, например, зашумление сигналов датчиков ОС, задержка сигналов ОС, задержка управляющего сигнала и так далее. Данные вопросы также описаны в работах [165, 166, 173, 174].

4.1 Исследование закона управления на имитационной модели при перемещении груза по одной оси

При построении имитационной модели для исследования адаптивного закона управления параметры ОУ принимались в соответствии с разработанным макетом МК [168]: $m_T = 1$ кг; длина троса во время конкретного исследования неизменна. На макете МК для измерения переменных $\dot{\varphi}_x$ и $\ddot{x}_{гр}$ используется MEMS гироскоп-акселерометр (GY-521, построенный на микромеханическом чипе MPU-6000/MPU-6050, измеряющем угловые скорости и ускорения по трем осям [169]), установленный на трос. Сигнал φ_x – определялся интегрированием измеренного $\dot{\varphi}_x$. Определение переменной x осуществляется по количеству управляющих импульсов шагового двигателя (привода тележки). В соответствии с этим шумы измерения переменных $\dot{\varphi}_x$, $\ddot{x}_{гр}$ и \ddot{x} считались гауссовскими центрированными, со среднеквадратичным отклонением соответственно: 0,05 град/с; 0,1 м/с²; 0,1 м/с².

Параметры ЭМ: $\xi_m = 0,9$; $\omega_m = 2,28$ с⁻¹ (собственная частота неподвижного подвеса при его длине 0,55 м и указанных ниже вариантах груза около: 6 с⁻¹). Заданное расстояние $x_{гр}^{зад} = 0,5$ м. Параметры алгоритма идентификации и ЗУ: $\Delta t = 0,01$ с; $\vartheta = 10$; $\beta = 0,99$.

В результате предварительных исследований СУ, и на основании соотношений, экспериментально была определена величина назначаемого параметра $\hat{a}_1^V = 0,1$ (другие значения этой оценки из диапазона (3.15) изменяют качества управления незначительно).

Для анализа свойств парирования внешних возмущений, смоделировано воздействие ветра на подвешенный груз. Это воздействие начинается в момент времени 7,5 с, имеет ступенчатый вид и пропорционально массе груза.

На рисунке 4.1 представлен результат исследования функционирования СУ при параметрах груза: $m_{\Gamma} = 0,85$ кг, $J_{\gamma} = 0,00204$ кг м², $l = 0,55$ м.

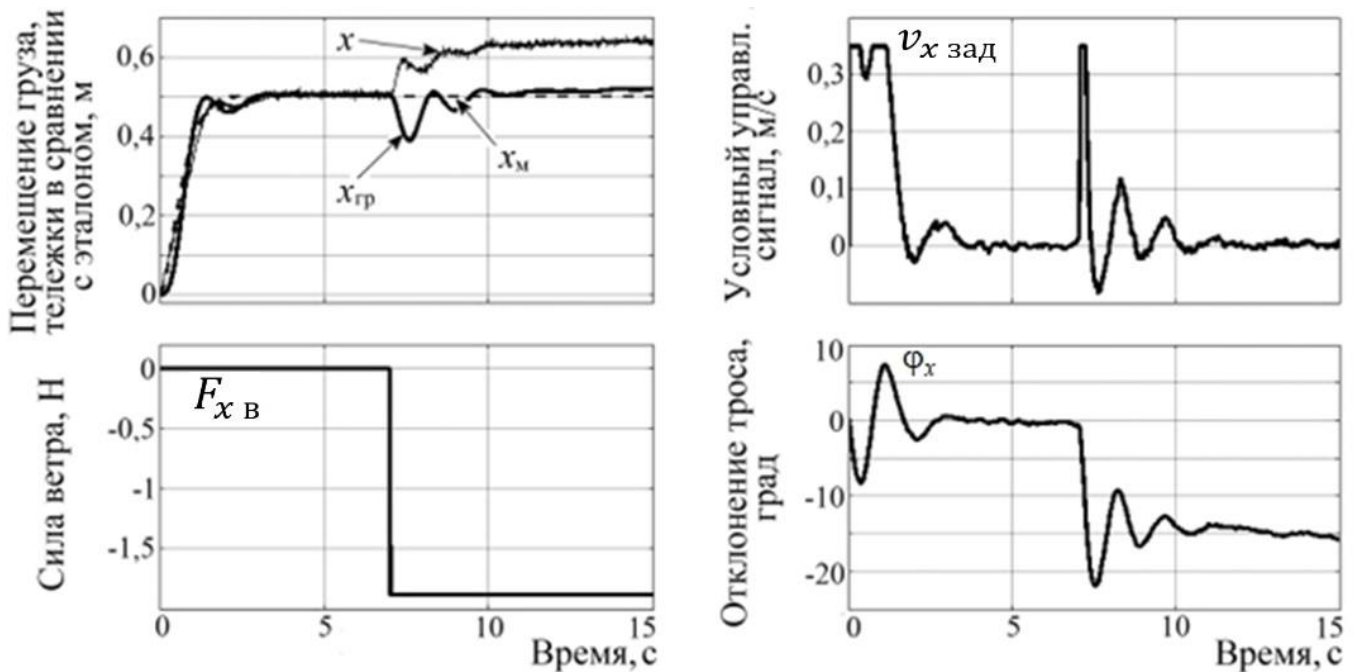


Рисунок 4.1 - Переходный процесс СУ при
 $m_{\Gamma} = 0,85$ кг, $J_{\gamma} = 0,00204$ кг м², $l = 0,55$ м

На рисунке 4.2 представлен результат исследования функционирования СУ при параметрах груза: $m_{\Gamma} = 2$ кг, $J_{\gamma} = 0,0048$ кг м², $l = 0,8$ м.

Результаты исследования показывают высокую эффективность предложенной системы управления. 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 СУ быстро подстраивается под реальные характеристики ОУ и внешние неконтролируемые возмущения.

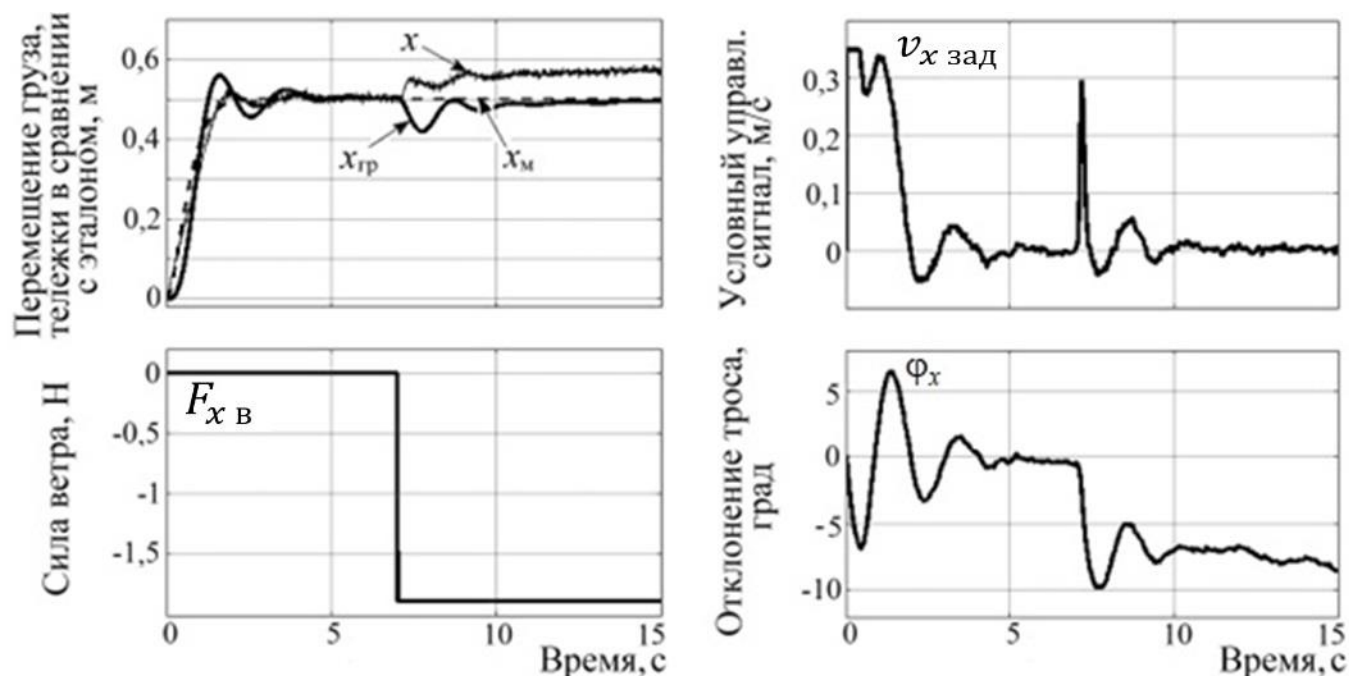


Рисунок 4.2 - Переходный процесс СУ при

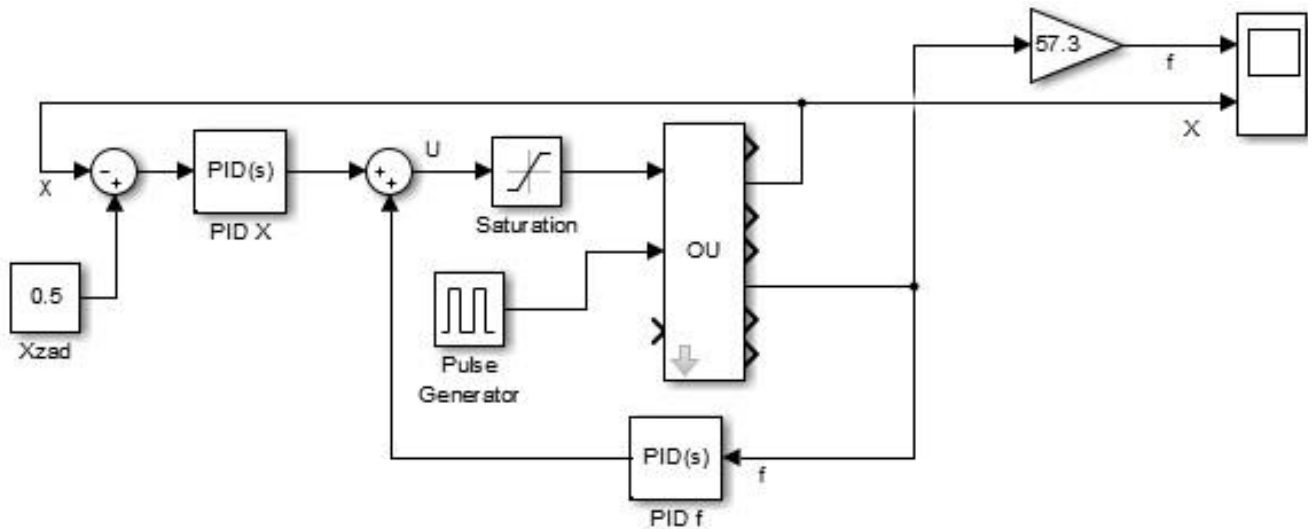
$$m_{\Gamma} = 2 \text{ кг}, J_{\gamma} = 0,0048 \text{ кг м}^2, l = 0,8 \text{ м}$$

4.2 Сравнительный анализ методов управления мостовым краном по одной оси на имитационной модели (имитационные исследования экспериментальной установки)

Для исследования эффективности управления краном наиболее распространенных методов управления (управление с ПИД-регулированием и управлением с нечёткой логикой), а также сравнения их с эффективностью предлагаемой адаптивной системы управления были проведены испытания при большом многообразии груза и длины подвеса [166].

Одним из самых часто встречаемых способов управления МК является управления с ПИД-регулированием. Для более эффективного управления обычно

используют два регулятора: первый для точного позиционирования тележки, второй для гашения маятниковых колебаний [85]. Для исследования эффективности управления подобного способа была составлена модель управления МК с двухконтурным ПИД-регулированием в программной среде Matlab/Simulink изображена на рисунке 4.3.



PID X – ПИД-регулятор по перемещению тележки; PID f – ПИД-регулятор для гашения колебаний груза; Pulse Generator – блок, задающий внешнее возмущение; Saturation – блок ограничения управляющего воздействия; OU – подсистема, моделирующая динамику ОУ; Xzad – заданное перемещение тележки; U – управляющее воздействие; X и f – перемещение тележки и угол отклонения груза от вертикали соответственно

Рисунок 4.3 - Модель управления с ПИД-регуляторами

Коэффициенты ПИД-регуляторов были найдены путём автоматической настройки, средствами программной среды Matlab/Simulink, для обеспечения наилучшего качества переходного процесса при параметрах ОУ: $m_T = 1$ кг; $m_G = 2$ кг; $l = 0,5$ м; $J_y = 0,008$ кг м². Найденные коэффициенты ПИД-регулятора для линейного перемещения тележки: $k_p = 3,76$ (пропорциональный коэффициент), $k_i = 0,04$ (интегральный коэффициент), $k_d = 4,06$ (дифференциальный коэффициент), $N = 30$ (частота среза, рад/с фильтра в дифференцирующей ветви ПИД-регулятора, соответствует максимальной собственной частоты объекта). Найденные коэффициенты ПИД-регулятора для гашения маятниковых колебаний груза: $k_p = 17,86$, $k_i = 12,69$, $k_d = 3,67$, $N = 30$.

График переходного процесса при управлении краном СУ с двухконтурным ПИД-регулятором представлен на рисунке 4.4.

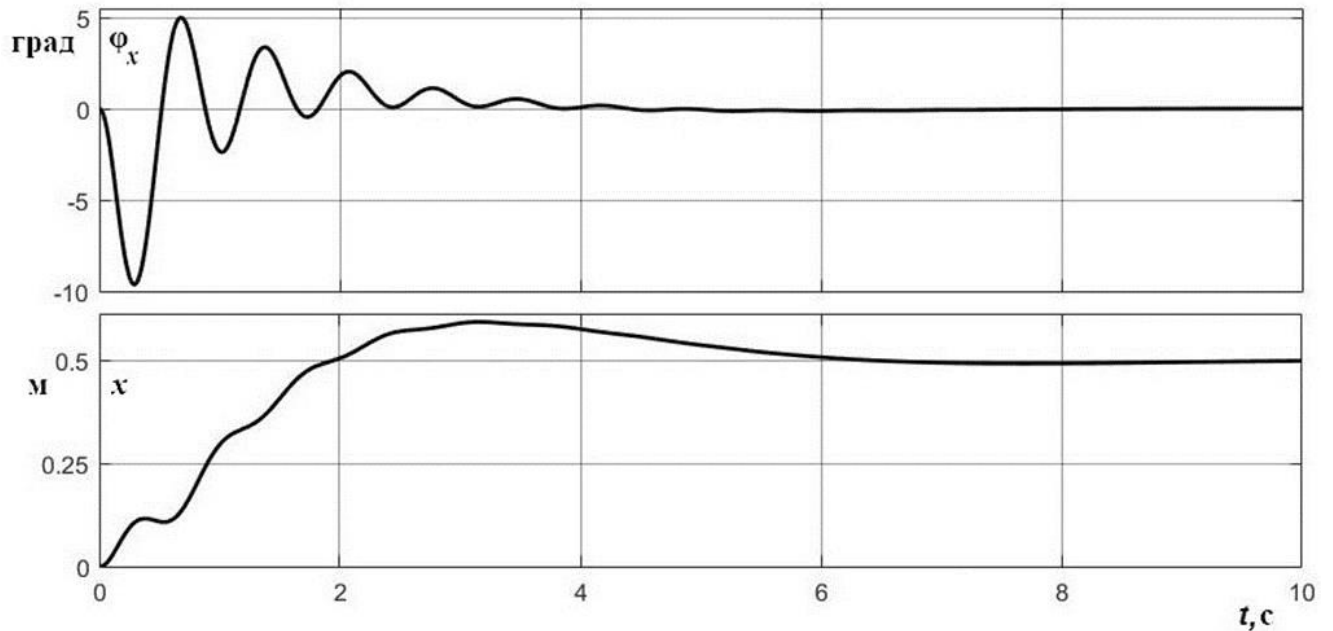


Рисунок 4.4 - Графики переходного процесса при управлении с ПИД-регулированием

Второй анализируемый способ управления краном – управление с нечёткой логикой. Данный способ также широко применяется в задачах управления грузовыми кранами [121, 122]. Алгоритм нечёткой логики является продуктом искусственного интеллекта, интенсивно развивающейся в последнее время областью исследований. Главным свойством нечёткой логики является использование лингвистических переменных. Эти переменные представляются в виде набора, который называется нечётким множеством.

Для решения поставленной задачи, аналогично, как и в первом примере, используется два блока управления: блок, отвечающий за позиционирование тележки (Fuzzy Logic Controller for X), и блок, отвечающий за демпфирование колебаний подвешенного груза (Fuzzy Logic Controller for f). Построенная для исследования эффективности имитационная модель управления с нечёткой логикой в программной среде Matlab/Simulink изображена на рисунке 4.5.

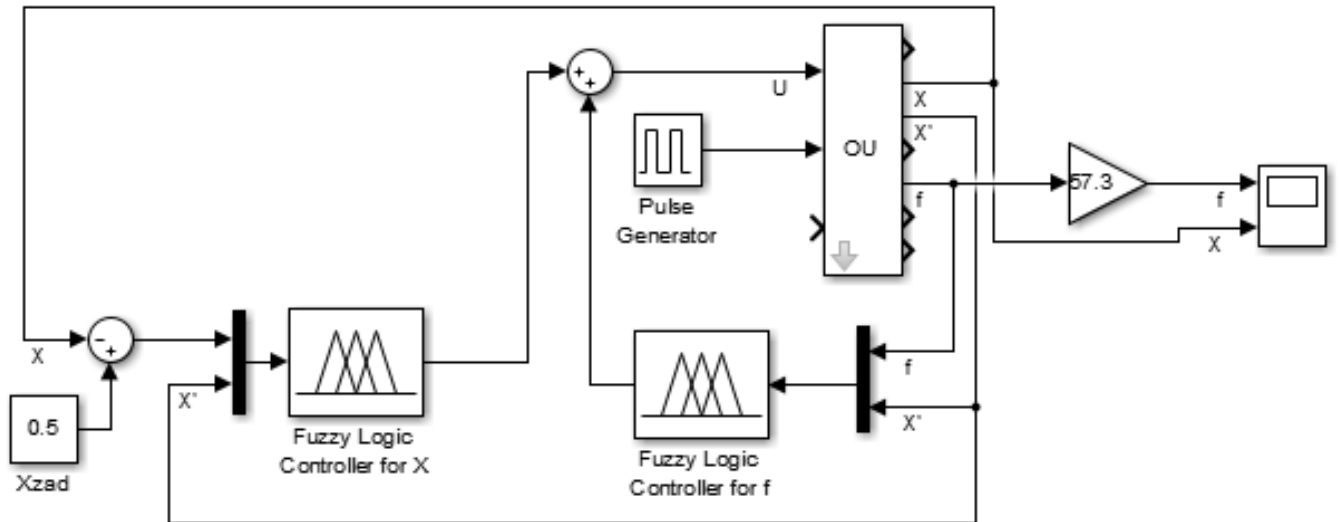


Рисунок 4.5 - Модель с нечёткой логикой управления

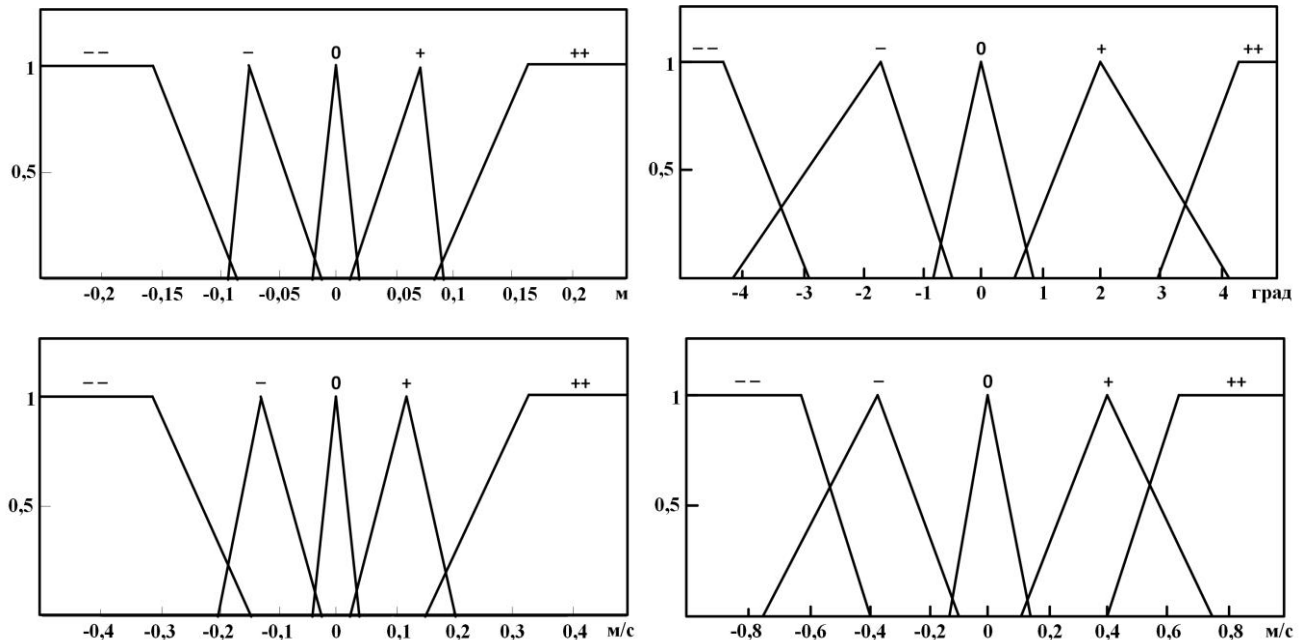


Рисунок 4.6 - Функции принадлежности блока управления положением тележки и блока управления углом отклонения соответственно

При построении нечёткой системы управления по необходимым физическим переменным были определены соответствующие лингвистические переменные. Для блока позиционирования – это переменные пройденного пути и скорости тележки, для блока демпфирования – угол отклонение маятника и скорость передвижения тележки. Для каждой переменной были взяты пять термов: очень отрицательно (--), отрицательно (-), ноль (0), положительно (+), очень положительно (++).

При построении СУ, исследуемой модели, использовались функции принадлежности стандартного типа – треугольной формы и кусочно-линейной. Полученные функции принадлежности представлены на рисунке 4.6.

Далее сформулировали базу нечётких правил, по 25 штук для каждого блока (таблица 1 и таблица 2).

Таблица 1 – База нечётких правил для управление положением тележки

$X \backslash X'$	--	-	0	+	++
--	0	--	--	--	--
-	+	0	-	--	--
0	++	+	0	-	--
+	++	++	+	0	-
++	++	++	++	++	0

Таблица 2 – База нечётких правил для управление углом отклонения

$\varphi_x \backslash X'$	--	-	0	+	++
--	0	-	--	--	--
-	+	0	-	--	--
0	+	+	0	-	-
+	++	++	+	0	-
++	++	++	++	+	0

Параметры ОУ при настройке ЗУ использовались те же, что и с ПИД-регулированием. Результаты моделирования представлены на рисунке 4.7.

При построении адаптивного закона управления с неявной эталонной моделью, идентификационным алгоритмом и «упрощенными» условиями адаптируемости для сравнения эффективности с двумя вышеупомянутыми способами использовали следующие параметры СУ: параметры ЭМ : $\xi_m = 0,9$ и $\omega_m = 2,28 \text{ с}^{-1}$; параметры алгоритма идентификации и ЗУ $\Delta t = 0,01 \text{ с}$, $\vartheta = 10$ и $\beta = 0,99$. Параметры ОУ при настройке ЗУ использовались те же, что и с ПИД-регулированием.

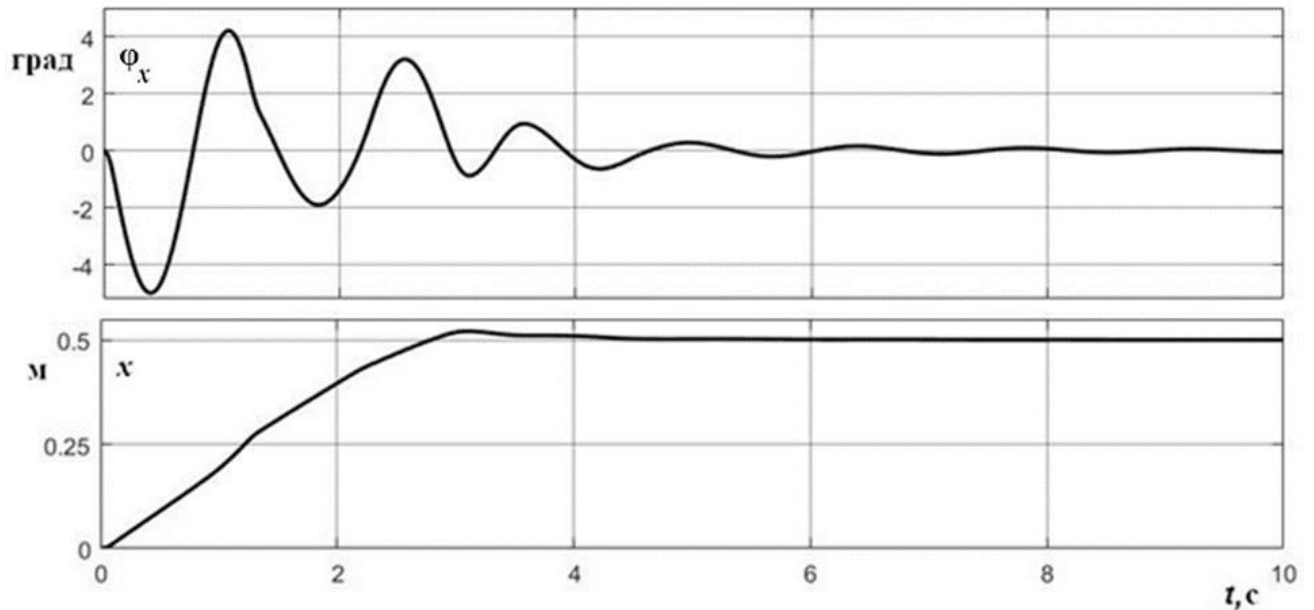


Рисунок 4.7 - График переходного процесса при управлении с нечёткой логикой

Результаты моделирования адаптивной СУ представлены на рисунке 4.8.

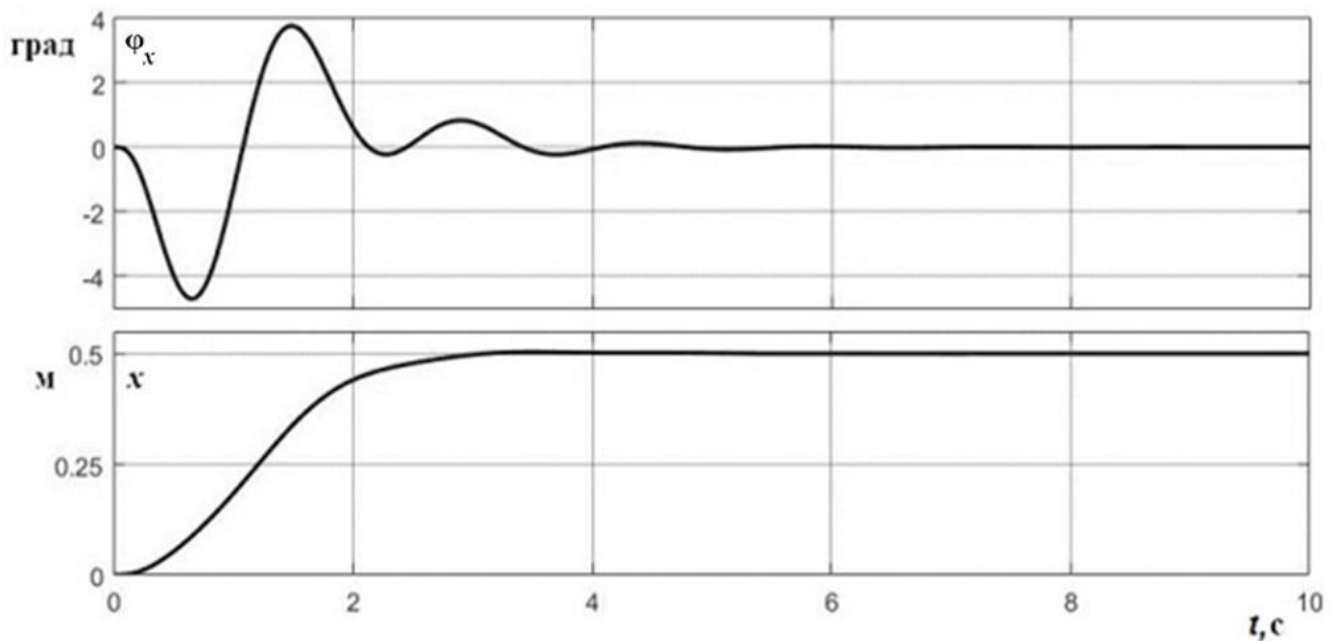


Рисунок 4.8 - График переходного процесса адаптивной системы управления

Далее для более глубокого анализа качества управления трёх вышеупомянутых способов, смоделируем перемещение груза при большом многообразии его параметров и длины подвеса. Все варианты используемых параметров ОУ представлены в таблице 3. Момент инерции переносимого груза рассчитывался согласно [167].

Таблица 3 – Варианты исследований

№	Параметры ОУ	Тип и размеры груза	№	Параметры ОУ	Тип и размеры груза
1	$m_r=2 \text{ кг}; l=0,5 \text{ м}; J_y=0,008 \text{ кг*м}^2$	Полнотельный шар $r = 0,1 \text{ м}$	15	$m_r=5 \text{ кг}; l=1 \text{ м}; J_y=0,045188 \text{ кг*м}^2$	Контейнер 0,303м х 0,122м х 0,129м
2	$m_r=2 \text{ кг}; l=1 \text{ м}; J_y=0,008 \text{ кг*м}^2$		16	$m_r=5 \text{ кг}; l=0,2 \text{ м}; J_y=0,045188 \text{ кг*м}^2$	
3	$m_r=2 \text{ кг}; l=0,1 \text{ м}; J_y=0,008 \text{ кг*м}^2$		17	$m_r=2 \text{ кг}; l=1 \text{ м}; J_y=0,018075 \text{ кг*м}^2$	
4	$m_r=4 \text{ кг}; l=0,5 \text{ м}; J_y=0,016 \text{ кг*м}^2$		18	$m_r=2 \text{ кг}; l=0,4 \text{ м}; J_y=0,018075 \text{ кг*м}^2$	
5	$m_r=4 \text{ кг}; l=0,1 \text{ м}; J_y=0,016 \text{ кг*м}^2$		19	$m_r=2 \text{ кг}; l=0,1 \text{ м}; J_y=0,018075 \text{ кг*м}^2$	
6	$m_r=4 \text{ кг}; l=0,3 \text{ м}; J_y=0,016 \text{ кг*м}^2$		20	$m_r=5 \text{ кг}; l=0,5 \text{ м}; J_y=0,037891 \text{ кг*м}^2$	Труба размером $l=0,3 \text{ м}$ $r_1=0,0125 \text{ м},$ $r_2=0,01225 \text{ м}$
7	$m_r=1 \text{ кг}; l=1 \text{ м}; J_y=0,004 \text{ кг*м}^2$		21	$m_r=5 \text{ кг}; l=0,1 \text{ м}; J_y=0,037891 \text{ кг*м}^2$	
8	$m_r=1 \text{ кг}; l=0,3 \text{ м}; J_y=0,004 \text{ кг*м}^2$		22	$m_r=3 \text{ кг}; l=0,1 \text{ м}; J_y=0,022734 \text{ кг*м}^2$	
9	$m_r=1 \text{ кг}; l=0,1 \text{ м}; J_y=0,004 \text{ кг*м}^2$		23	$m_r=3 \text{ кг}; l=0,5 \text{ м}; J_y=0,022734 \text{ кг*м}^2$	
10	$m_r=5 \text{ кг}; l=0,3 \text{ м}; J_y=0,02 \text{ кг*м}^2$		24	$m_r=3 \text{ кг}; l=1 \text{ м}; J_y=0,022734 \text{ кг*м}^2$	
11	$m_r=5 \text{ кг}; l=0,1 \text{ м}; J_y=0,02 \text{ кг*м}^2$		25	$m_r=3 \text{ кг}; l=0,2 \text{ м}; J_y=0,022734 \text{ кг*м}^2$	
12	$m_r=7 \text{ кг}; l=0,5 \text{ м}; J_y=0,063263 \text{ кг*м}^2$	26	$m_r=1 \text{ кг}; l=1 \text{ м}; J_y=0,007578 \text{ кг*м}^2$		
13	$m_r=7 \text{ кг}; l=0,2 \text{ м}; J_y=0,063263 \text{ кг*м}^2$	27	$m_r=1 \text{ кг}; l=0,1 \text{ м}; J_y=0,007578 \text{ кг*м}^2$		
14	$m_r=5 \text{ кг}; l=0,5 \text{ м}; J_y=0,045188 \text{ кг*м}^2$	28	$m_r=1 \text{ кг}; l=0,5 \text{ м}; J_y=0,007578 \text{ кг*м}^2$		
		Контейнер 0,303м х 0,122м х 0,129м			

При исследовании изменялись только параметры ОУ, указанные в таблице 3, Настройка законов управления оставалось неизменной.

Качество системы управления оценивалось по времени регулирования переходного процесса. В нашем случае под временем регулирования принимали интервал времени, за который груз достигал заданного положения с погрешностью $\pm 5\%$ (0,475м – 0,525м). Результаты исследования, анализируемых способов управления при большом многообразии параметров ОУ согласно таблице 3, изображены на рисунке 4.9. На рисунке представлены графики зависимостей времени регулирования трёх способов управления от вариации параметров ОУ.

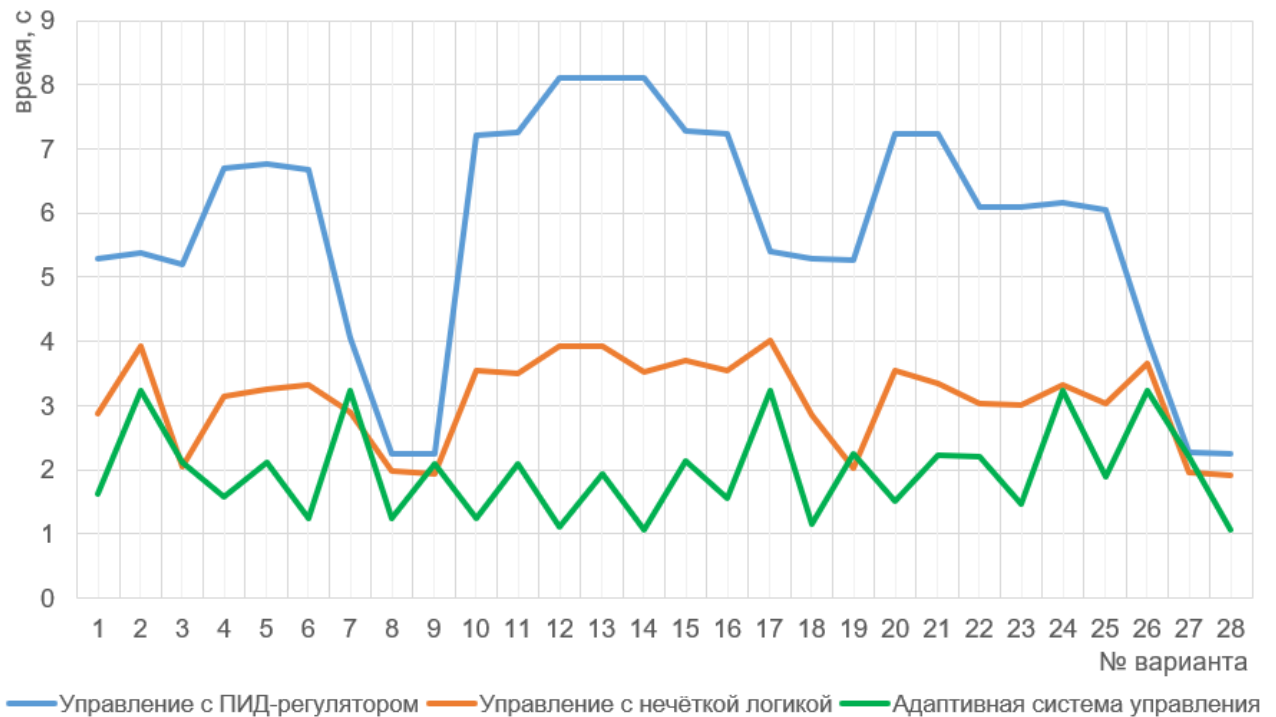


Рисунок 4.9 – Характеристики СУ в зависимости от изменений параметров груза (время регулирования СУ)

По результатам исследований видно, что лучшие результаты переходных процессов получены при адаптивном способе управления, среднее время регулирования составляет 1,97 секунды, при управлении с нечёткой логикой – 3,1 секунды, при ПИД-регулировании – 5,76 секунды.

Для анализа свойств парирования внешних неконтролируемых факторов трех рассматриваемых систем управления провели исследования с имитацией воздействия ветра на подвешенный груз. Скорость ветра моделировалась 15 м/с. Возмущение имитировалось в момент, когда подвешенный груз был в неподвижном состоянии, а его трос располагался вертикально. Воздействие ветра на груз приняли импульсным длительностью в 0,2 секунды. Сила воздействия ветра на подвешенный груз рассчитывалась согласно [177].

Под временем парирования внешнего возмущения принимали промежуток времени, за который груз возвращался в исходное место $\pm 0,025$ м (в котором он находился до воздействия на него ветра) с момента начала возмущения. В случае если от возмущения груз не выходил за диапазон $\pm 0,025$ м, время парирования

принималось равным 0 с. Графики зависимостей времени парирования от вариации параметров груза представлены на рисунке 4.10.

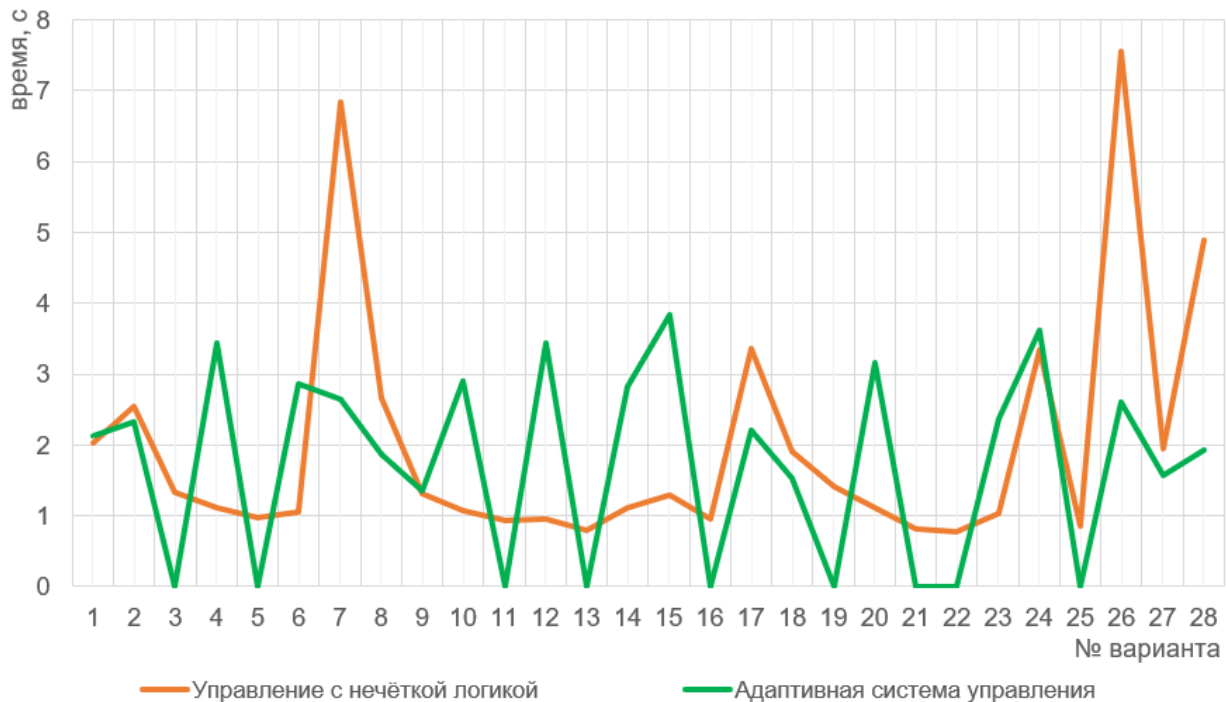


Рисунок 4.10 – Характеристики СУ в зависимости от изменений параметров груза (время парирования внешнего возмущения)

Среднее время парирования внешнего возмущения при адаптивной системе управления составило 1,73 с, при управлении с нечёткой логикой – 2 с. Поскольку при управлении с ПИД-регулированием в большинстве исследований груз не возвращался в исходное местоположение $\pm 0,025$ м, его график не приведён.

Результаты моделирования указывают на высокую эффективность адаптивной системы управления с идентификационным алгоритмом и неявной ЭМ относительно других способов управления. Это объясняется тем, что адаптивная система управления с идентификационным алгоритмом по оценкам неизвестных параметров, доставляемых алгоритмом идентификации в текущем времени, формирует ЗУ краном. Система в априорно неопределённых условиях быстро подстраивается к неизвестным и изменяющимся параметрам ОУ и внешним неконтролируемым возмущениям. При этом получаем сравнительно быстрое гашение колебаний груза после начала движения и при действии внешних возмущений, обеспечивается высокая точность позиционирования. Данный подход имеет лучшие робастные свойства системы при

изменяющихся параметрах ОУ и внешних возмущающих факторах, таких как воздействие ветра, неровности подкранового пути и так далее.

4.3 Расчёт производительности крана при адаптивном способе управления (имитационные исследования грузоподъёмного крана)

Для сравнения производительности крана при адаптивном способе управления и другими, наиболее распространёнными (управление с ПИД-регулированием и нечёткой логикой), провели исследования на имитационной модели большого грузоподъёмного крана. Расчет производительности крана производился при большом многообразии груза и длины подвеса.

В качестве имитируемого ОУ для исследования системы принят кран с параметрами реальной промышленной грузоподъёмной системы. Его параметры выбирались согласно ГОСТ 3332-54 [176]: масса тележки $m_t = 4000$ кг, грузоподъёмность до 5000 кг, длина троса до 16 м, скорость перемещения крана до 80 м/мин.

Принято, что сигналы ОС $\dot{\varphi}_x$, $\ddot{x}_{гр}$, x измеряются с зашумлением, гауссовским центрированным со среднеквадратичным отклонением, величиной 0,1 град/с, 0,1 м/с² и 0,01 м соответственно.

Структура управления краном с нечёткой логикой и ПИД-регулированием строилась аналогичным образом, как и в предыдущем исследовании за исключением того, что в данном исследовании управляющий сигнал формировался в виде заданной скорости перемещения балки крана.

Коэффициенты ПИД-регуляторов определены средствами автоматической настройки программной среды Matlab/Simulink для достижения наилучшего качества управления. Найденные коэффициенты ПИД-регулятора для линейного перемещения балки: $k_p = 3,07$, $k_i = 0,16$, $k_d = 7,15$, $N = 810$. коэффициенты ПИД-регулятора для гашения маятниковых колебаний груза: $k_p = 67,93$, $k_i = 24,02$, $k_d = 47,55$, $N = 271$.

График переходного процесса при управлении с ПИД-регулированием изображен на рисунке 4.11. Параметры груза и длины подвеса: $m_{\Gamma} = 3000$ кг; $l = 10$ м; $J_y = 1200$ кг·м². Заданное расстояние груза 5 м (груз перемещался по одной оси).

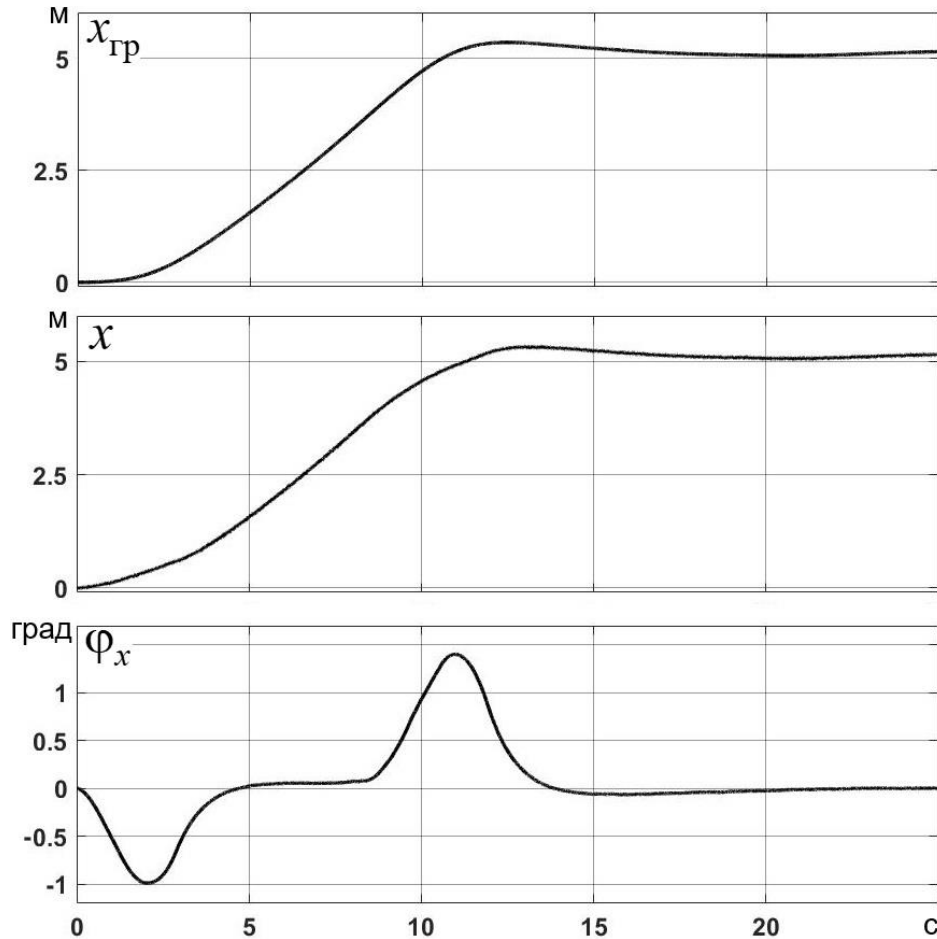


Рисунок 4.11 - График переходного процесса при управлении с ПИД-регулированием

Для исследования качества управления системы с нечёткой логикой на имитационной модели большого грузоподъёмного крана применялись те же базы нечётких правил, которые использовались в предыдущем испытании. Функции принадлежности блока управления положением тележки и блока управления углом определены опытным путем с наилучшими переходными характеристиками. Функции принадлежности изображены на рисунке 4.12.

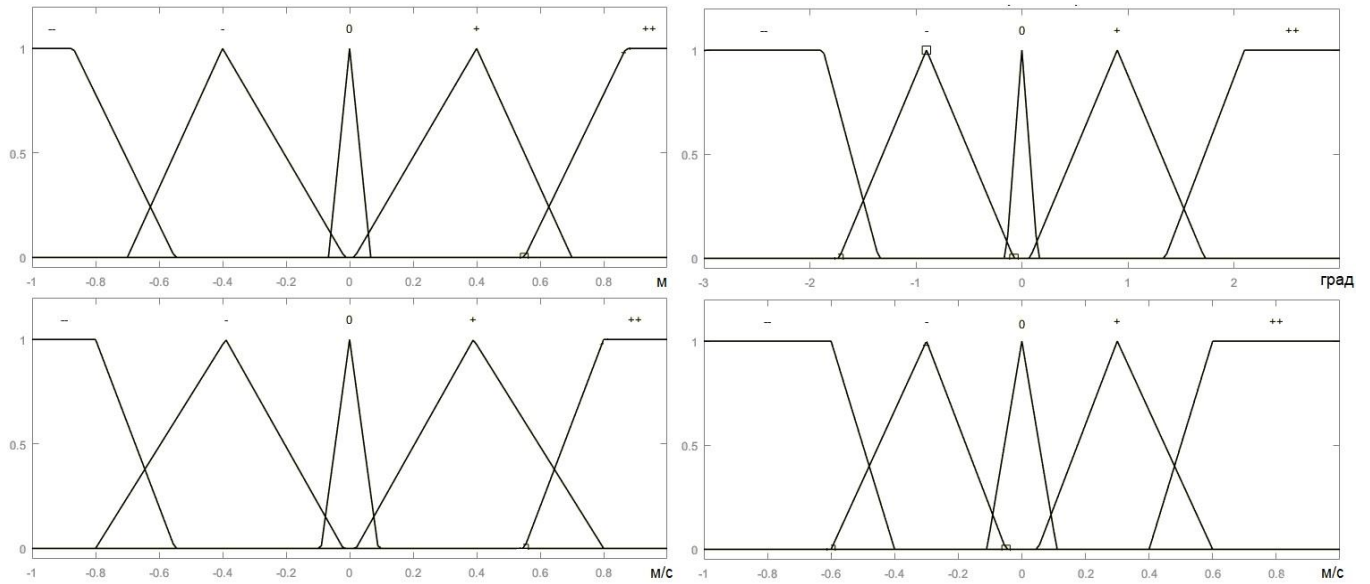


Рисунок 4.12 - Функции принадлежности блока управления положением тележки и блока управления углом отклонения соответственно

График переходного процесса при управлении с нечёткой логикой изображен на рисунке 4.13. Параметры груза имитировались те же.

Для построения адаптивного способа управления использовали следующие настройки СУ: параметры ЭМ $\xi_M = 0,9$ и $\omega_M = 2,28 \text{ с}^{-1}$; параметры алгоритма идентификации и ЗУ $\Delta t = 0,01 \text{ с}$, $\vartheta = 10$ и $\beta = 0,99$. Параметры ОУ использовались те же, что и с ПИД-регулированием. Результаты представлены на рисунке 4.14.

Для определения среднего времени регулирования вышеупомянутых способов управления смоделируем перемещение груза при большом многообразии его параметров и длины подвеса. Все варианты используемых параметров ОУ представлены в таблице 4. Момент инерции переносимого груза рассчитывался согласно [167].

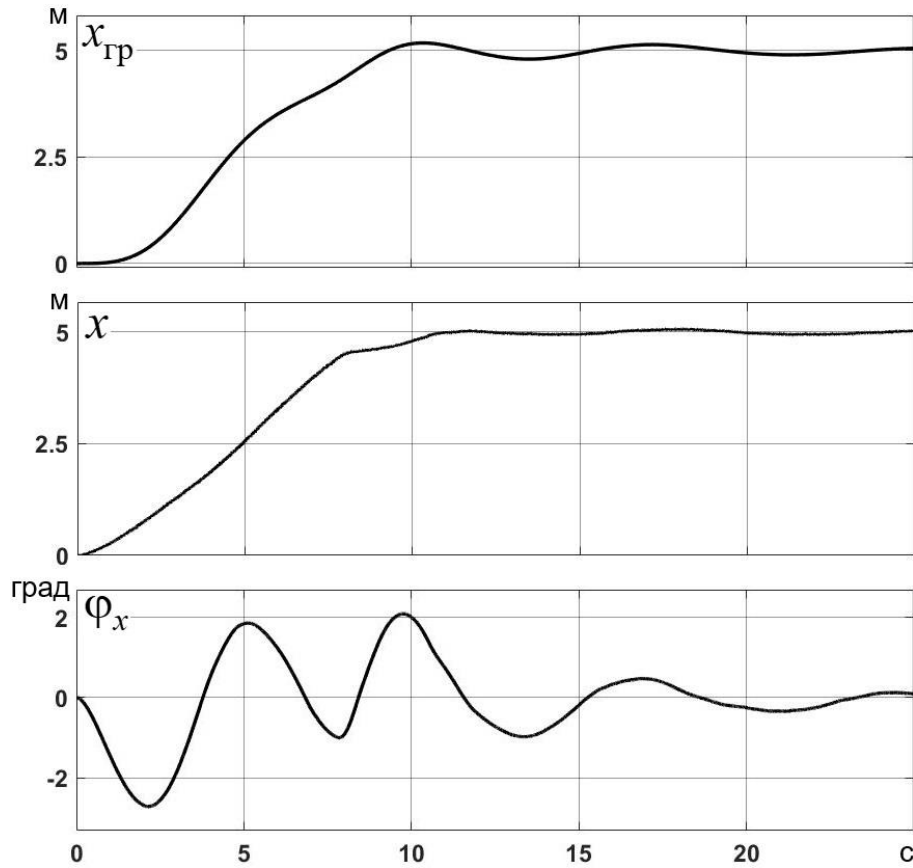


Рисунок 4.13 - График переходного процесса при управлении с нечёткой логикой

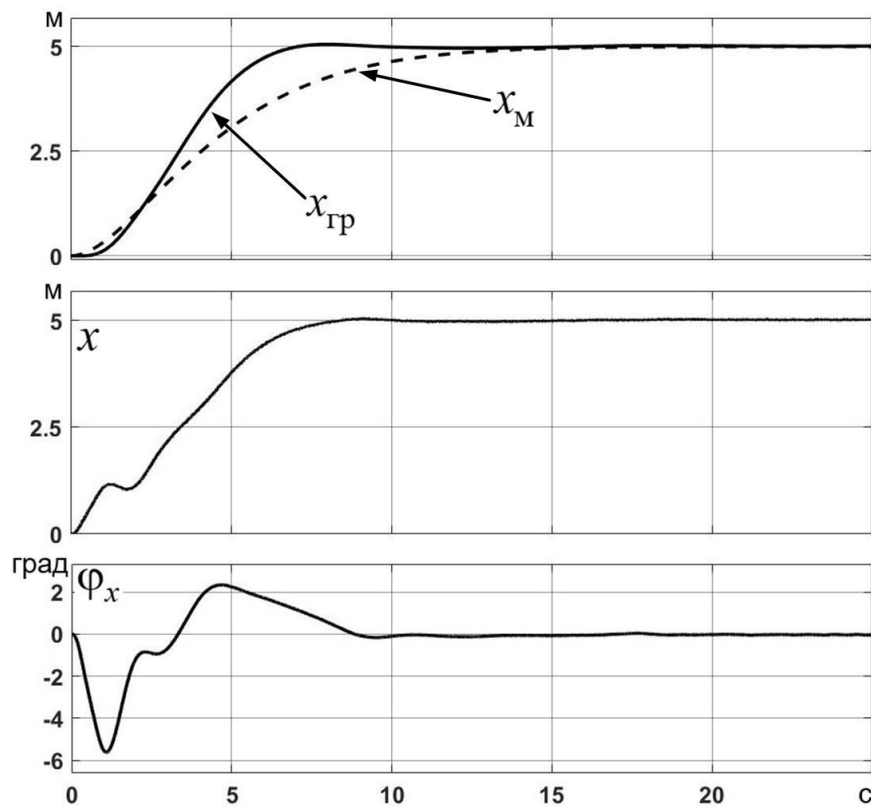


Рисунок 4.14 - График переходного процесса адаптивной системы управления

Таблица 4 – Варианты параметров груза и длины подвеса

№	Параметры ОУ	Тип и размеры груза	№	Параметры ОУ	Тип и размеры груза
1	$m_r=3000$ кг; $l=10$ м; $J_y=1200$ кг·м ²	Полнотелый шар $r = 1$ м	7	$m_r=3500$ кг; $l=10$ м; $J_y=13125$ кг·м ²	Контейнер 6 м x 3 м x 3 м
2	$m_r=3000$ кг; $l=4$ м; $J_y=1200$ кг·м ²		8	$m_r=3500$ кг; $l=4$ м; $J_y=13125$ кг·м ²	
3	$m_r=500$ кг; $l=10$ м; $J_y=200$ кг·м ²		9	$m_r=1000$ кг; $l=10$ м; $J_y=3750$ кг·м ²	
4	$m_r=500$ кг; $l=4$ м; $J_y=200$ кг·м ²		10	$m_r=1000$ кг; $l=4$ м; $J_y=3750$ кг·м ²	
5	$m_r=1000$ кг, $l=10$ м; $J_y=3125$ кг·м ²	Труба $r=0,5$ м, $l_{тр}=6$ м	11	$m_r=500$ кг, $l=10$ м; $J_y=729$ кг·м ²	Труба $r_1=0,5$ м, $l_{тр}=4$ м
6	$m_r=1000$ кг, $l=4$ м; $J_y=3125$ кг·м ²		12	$m_r=500$ кг, $l=4$ м; $J_y=729$ кг·м ²	

Качество системы управления также оценивали по времени регулирования переходного процесса. В нашем случае под временем регулирования принимали интервал времени, за который груз достигал заданного положения с погрешностью $\pm 5\%$ (4,75 м – 5,25 м). Результаты исследования, анализируемых способов управления при большом многообразии грузов и длины подвеса, изображены на рисунке 4.15. На рисунке представлены графики зависимостей времени регулирования трёх способов управления от вариации грузов.

По результатам видно, что лучшие результаты переходных процессов получены при адаптивном способе управления, среднее время регулирования составляет 7,63 секунды, при управлении с нечёткой логикой – 8,58 секунды, при ПИД-регулировании – 19,97 секунды.

Далее произведем расчёт средней часовой производительности работы мостового крана при перемещении груза по одной оси, для этого используем следующую формулу:

$$P_r = 3600 Q_{гр} / T_c, \quad (4.1)$$

где 3600 – переводной коэффициент;

$Q_{гр}$ – масса груза, перерабатываемого за 1 цикл, т., используем среднее значение переносимых грузов согласно таблице 4 ($Q_{гр} = 1,6$ т);

$T_{ц}$ – продолжительность одного цикла (сумма времени отдельных операций), с.

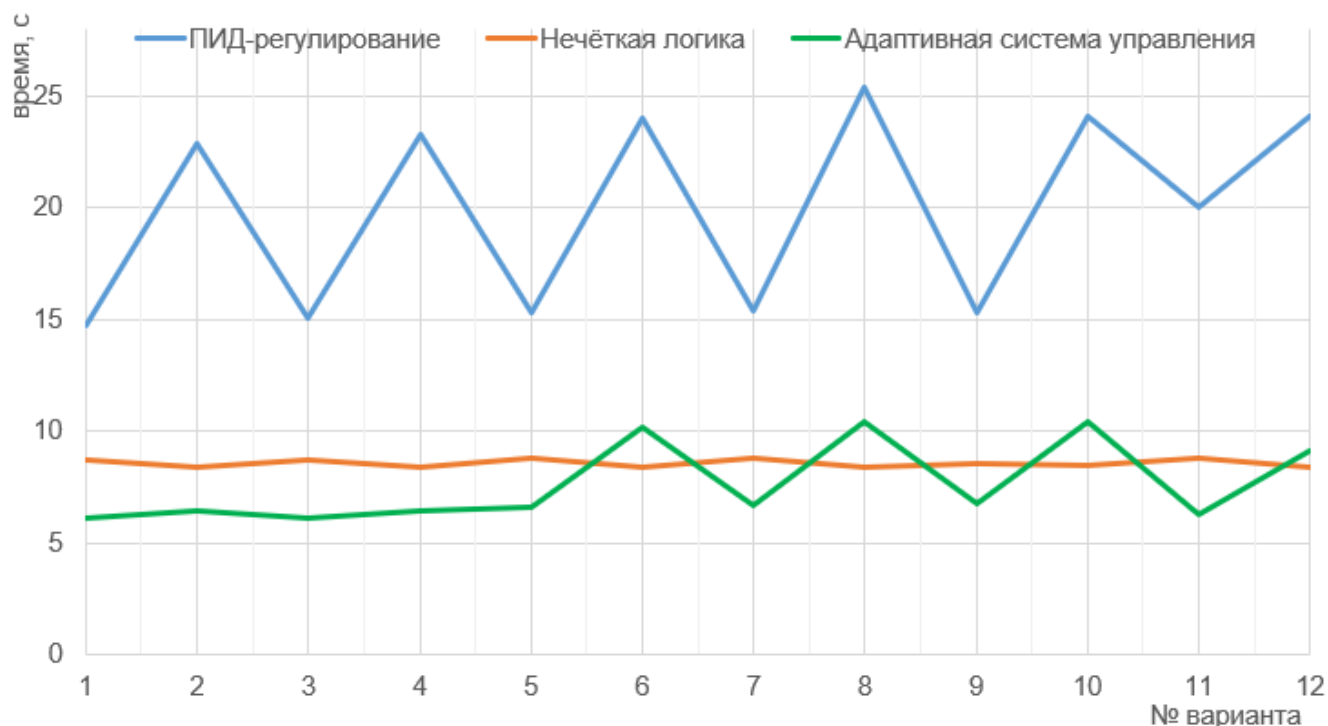


Рисунок 4.15 – Характеристики СУ в зависимости от изменений параметров груза (время регулирования СУ)

Продолжительность одного цикла транспортировки груза по одной оси для козловых и мостовых кранов определяется по упрощенной формуле:

$$T_{ц} = (4H/V_{под} + 2l_{кр}/V_{пер})\eta, \quad (4.2)$$

где H – средняя высота подъема груза, м (принимается за 6 м);

$l_{кр}$ – среднее расстояние перемещение крана, м ($l_{кр} = x_{гр}^{зад}$);

$V_{под}$ – скорость подъема и опускания груза, м/с (согласно [176] $V_{под} = 1$ м/с);

$V_{пер}$ – скорость передвижения крана, м/с (принимается за величину, которая равна отношению заданному расстоянию груза к среднему времени регулирования СУ);

η – коэффициент, учитывающий совмещение операций во времени (в расчетах принимаем 0,8).

Отсюда получаем среднечасовую производительность крана при управлении тремя рассматриваемыми способами: при адаптивном управлении $P_T = 1,52$ т/ч; при

управлении с нечёткой логикой $P_T = 1,48$ т/ч; при ПИД-регулировании $P_T = 1,29$ т/ч. Далее несложно рассчитать среднее увеличение производительности при адаптивном способе управления относительно ПИД-регулирования, оно составило 17,8%, и управления с нечёткой логикой – 2,7%.

Результаты данного исследования подтверждают превосходство адаптивной системы управления в сравнении с ПИД-регулированием и управлением с нечёткой логикой в рамках производительности погрузочно-разгрузочных работ краном мостового типа до 20%.

Также стоит отметить, что в конструкции мостового крана, как правило, имеется запас механической прочности и возможность использования двигателей большей мощности для увеличения скорости передвижения механизмов крана. Однако увеличение скорости движения крана, без систем гашения колебаний, вызывает большее раскачивание груза при разгонах и торможениях. В таком случае при проектировании системы электропривода искусственно уменьшают величины рабочих скоростей механизмов для обеспечения лучшего позиционирования груза при его остановке [176]. В случае использования двигателей большей мощности и увеличения скорости перемещения крана также увеличится и производительность работы крана при адаптивном способе управления.

4.4 Анализ факторов, влияющих на качество адаптивной системы управления (имитационные исследования экспериментальной установки)

Из многочисленных исследований СУ кранами можно заметить, что качество их управления во многом зависит от настройки СУ, величины внешнего возмущения, параметров груза и длины подвеса.

Выше было исследована работоспособность адаптивной СУ при транспортировке различных видов груза, с различной массой, моментом инерции и длиной подвеса. Адаптивная СУ с первых секунд подстраивается под текущие параметры ОУ и формирует управляющий сигнал, способный за короткий

промежуток времени снизить колебания груза до минимума и перенести груз в целевую точку. Такие результаты были достигнуты при неизменной настройке ЗУ, постоянном диапазоне зашумленности сигналов ОС и постоянной временной задержки управляющего воздействия.

При реальной апробации предлагаемой системы управления могут быть использованы различные датчики для измерения угла отклонения подвешенного груза, линейного перемещения и ускорения тележки и груза. Их характеристики могут отличаться от датчиков, которые использовались для макета МК, разработанного в рамках работы [168].

Поскольку эффективность СУ также зависит и от качества сигналов ОС, возникает необходимость опытным путем определить допустимый диапазон их уровня зашумленности.

Примем, что при построении СУ будем получать с помощью датчиков ОС следующие величины: угловая скорость троса $\dot{\varphi}_x$, линейное ускорение груза $\ddot{x}_{гр}$ и линейное положение тележки x . Для определения максимально возможного зашумления этих сигналов и влияние на качество управления системы в целом проведем ряд имитационных испытаний с различной величиной погрешности сигналов ОС.

При исследовании использовались следующие настройки: параметры ЭМ – $\xi_m = 0,9$ и $\omega_m = 2,28 \text{ с}^{-1}$; параметры алгоритма идентификации и ЗУ – $\Delta t = 0,01 \text{ с}$, $\vartheta = 10$, $\beta = 0,99$, $\hat{a}_1^V = 0,1$. Задержка управляющего сигнала $0,01 \text{ с}$. Заданное расстояние $x_{гр}^{зад} = 1 \text{ м}$, длина подвеса $l = 0,55 \text{ м}$, масса телеги $m_t = 1 \text{ кг}$, масса груза $m_r = 2 \text{ кг}$, груз в форме шара радиусом $0,1 \text{ м}$ и момент инерции $J_y = 0,008 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Принято, что сигналы ОС измеряются с зашумлением, гауссовским центрированным со среднеквадратичным отклонением. Качество системы управления оценивалось по времени регулирования переходного процесса и максимальному углу отклонения маятника во время переходного процесса. Под временем регулирования принимали интервал времени, за который груз достигал

заданного положения с погрешностью $\pm 5\%$ (0,95 м – 1,05 м) и угол отклонения становился менее 3 градусов.

Варианты уровня зашумления и результаты исследования представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Варианты уровня зашумления сигналов ОС и результаты исследования

№	Зашумленность $\dot{\varphi}_x$, град/с	Зашумленность $\ddot{x}_{гр}$, м/с ²	Зашумленность x , м	Время регулирования, с	Максимальный угол отклонения груза, град
1	0,1	0,1	0,00125	2,37	24
2	0,2	0,2	0,0025	2,3	23,7
3	0,3	0,3	0,00375	2,3	21,6
4	0,4	0,4	0,005	2,51	21,5
5	0,5	0,5	0,00625	2,46	22,2
6	0,6	0,6	0,0075	8,38	22,8
7	0,7	0,7	0,00875	13,7	22,4
8	0,8	0,8	0,01	11,3	22,3

График переходного процесса с вариантом зашумления № 1 изображен на рисунке № 4.11. График переходного процесса с вариантом зашумления № 8 изображен на рисунке № 4.12.

В результате исследования зависимости качества управления от уровня зашумленности сигналов ОС можно сделать вывод, что характер переходного процесса от увеличения погрешности сигнала изменяется незначительно. С увеличением шума сигналов увеличивается амплитуда автоколебаний системы в установившемся состоянии. Максимально допустимая величина среднеквадратичного отклонения для $\dot{\varphi}_x$, $\ddot{x}_{гр}$, x составила 0,8 град/с, 0,8 м/с² и 0,01 м соответственно. При большем зашумлении амплитуда автоколебаний переходного процесса выходит за рамки ограничений, по которым определялось время регулирования. Отсюда можно сделать вывод, что требования к чистоте сигналов ОС

достаточно низкое, которое может удовлетворить большинство современных датчиков.

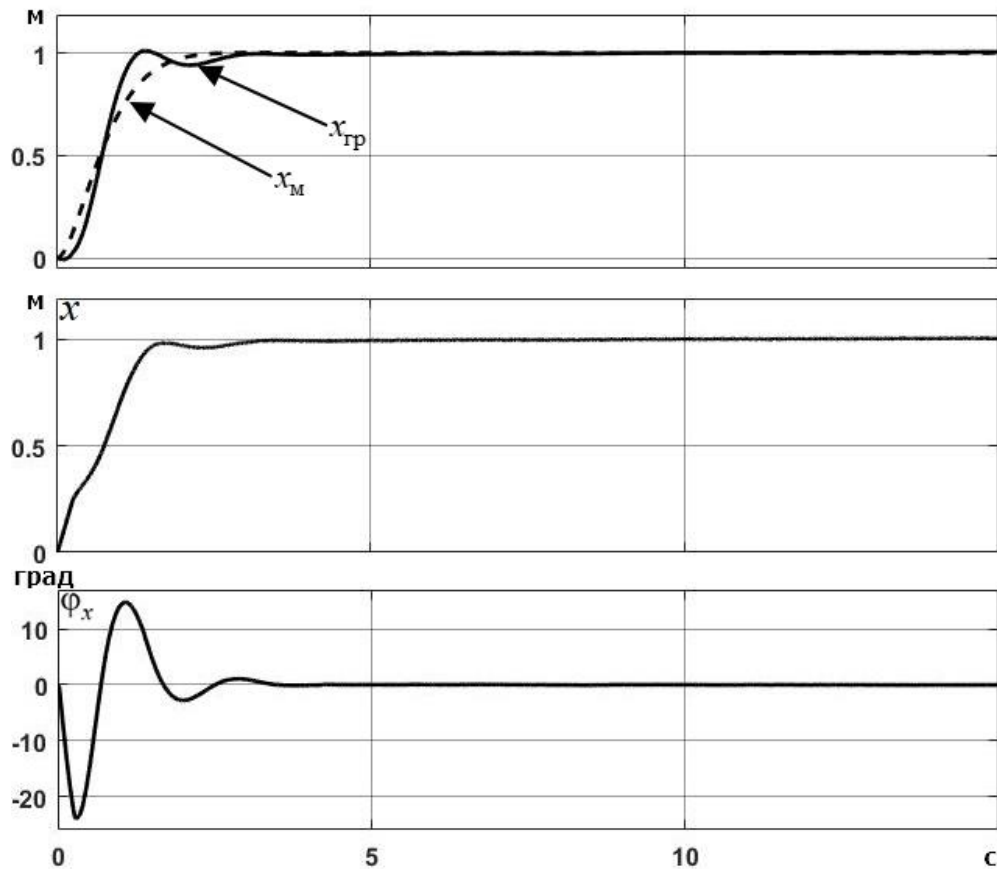


Рисунок 4.11 – График переходного процесса с вариантом зашумления № 1

Предлагаемый метод основан на схеме адаптивного управления с «упрощенными» условиями адаптируемости, что сводится к требованию сходимости невязки идентификации при функционировании алгоритма текущей идентификации и выбору в определенном диапазоне постоянной оценки параметра \hat{a}_1^V при управлении [165].

Как показано в работе [162, 165], требование к точности оценки \hat{a}_1^V может быть очень слабым и сводится к соотношениям (3.15–3.16). Однако, если настроить оценку \hat{a}_1^V некорректно, это может в значительной мере сказаться на эффективности управления или вовсе привести к нестабильной работе.

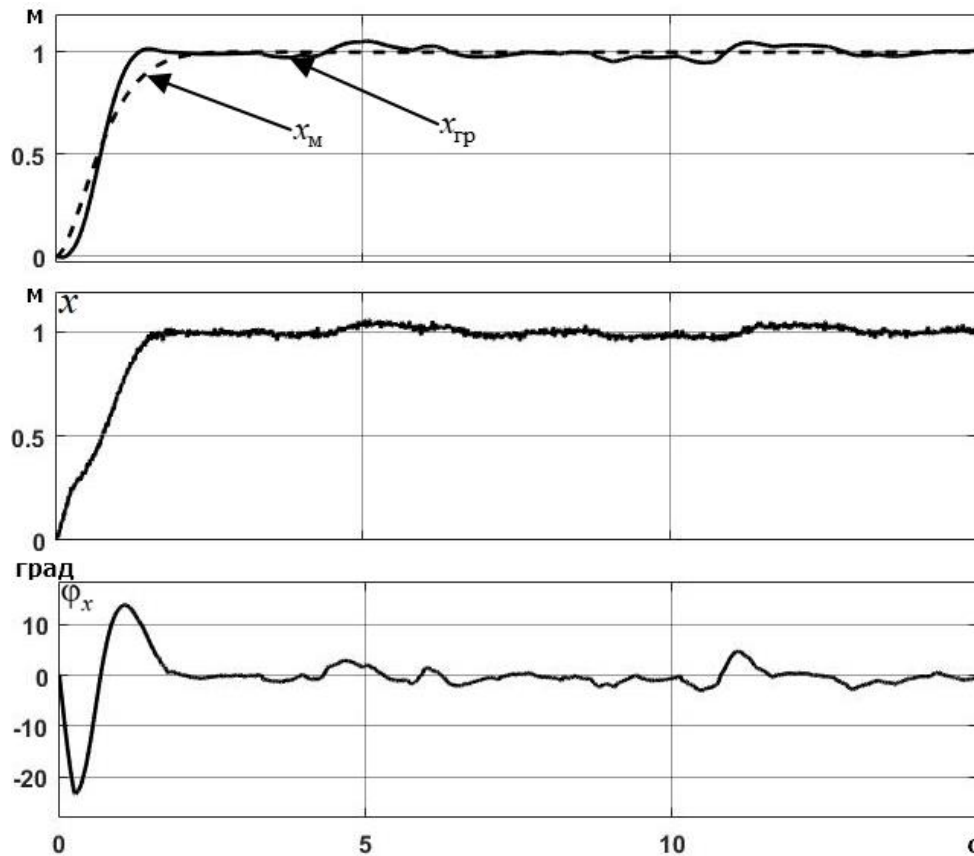


Рисунок 4.12 – График переходного процесса с вариантом зашумления № 8

Для анализа зависимости качества управления адаптивной системы от изменения назначаемой оценки \hat{a}_1^V , проведем исследования при различных ее значениях. Параметры ОУ, алгоритма идентификации и настройки ЭМ назначаем такие же, что в предыдущем исследовании. Зашумление измеряемых сигналов $\dot{\varphi}_x$, $\ddot{x}_{ГР}$, x принимаем следующие: 0,1 град/с, 0,1 м/с² и 0,00125 м соответственно.

Во время исследования все параметры ОУ и настройки СУ неизменны, кроме назначаемой оценки \hat{a}_1^V . Все её вариации и полученные результаты испытаний приведены в таблице 5.

На рисунках 4.13-4.15 приведены графики переходных процессов при \hat{a}_1^V равной $6a_1^V$, a_1^V и $15a_1^V$ соответственно.

По результатам исследования определили, что СУ устойчива, если значение оценки \hat{a}_1^V находится в диапазоне от a_1^V до $15a_1^V$. В иных случаях СУ не способна эффективно демпфировать колебания груза и переносить его в назначенное место. Наилучшие характеристики переходного процесса были получены при $6a_1^V$. Область

значений \hat{a}_1^V , при котором система остается в устойчивом состоянии, достаточно велика и находится в диапазоне (3.16).

Таблица 5 – Результаты исследования СУ при различных значениях оценки \hat{a}_1^V

№	Значение \hat{a}_1^V	Время регулирования, с	Перерегулирование, %	Максимальный угол отклонения груза, град
1	$15a_1^V$	2,5	20	25,9
2	$12a_1^V$	2	14	24,2
3	$10a_1^V$	1,9	10,8	24,1
4	$8a_1^V$	1,75	8,3	25,1
5	$6a_1^V$	1,6	4	23,3
6	$4a_1^V$	2,3	1	24,3
7	$2a_1^V$	2,5	-	22,8
8	a_1^V	2,46	2,2	30

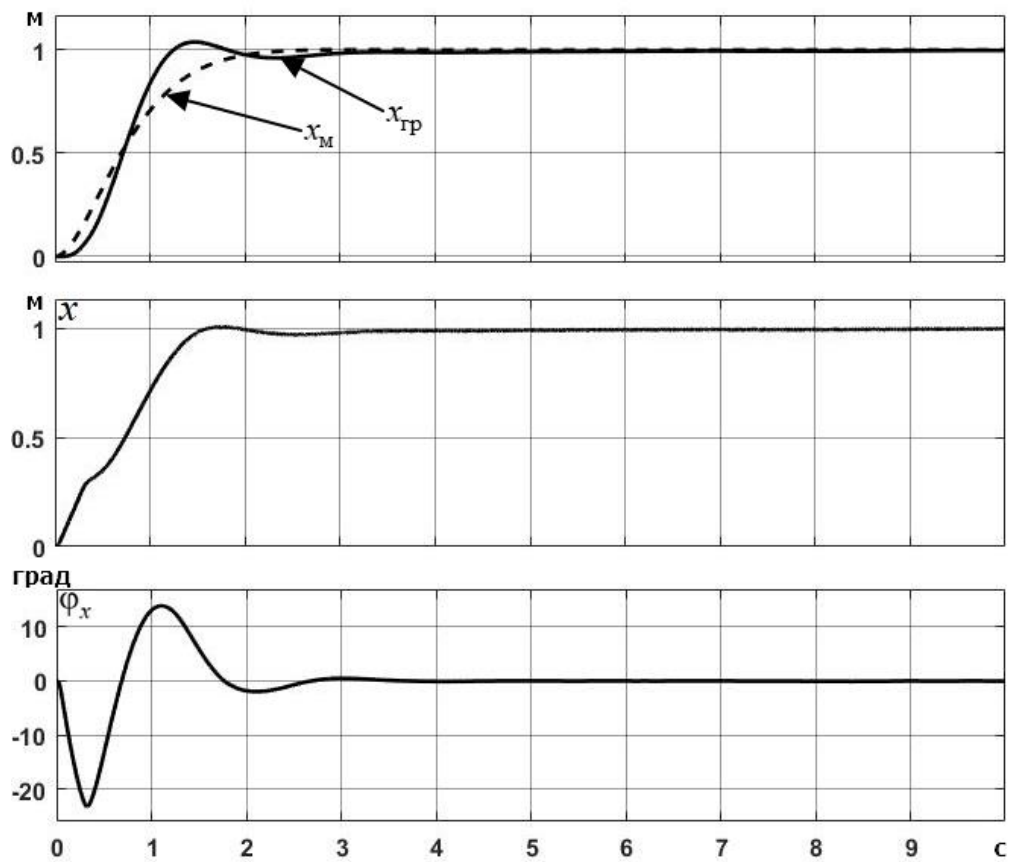


Рисунок 4.13 – График переходного процесса при $\hat{a}_1^V = 6 \cdot a_1^V$

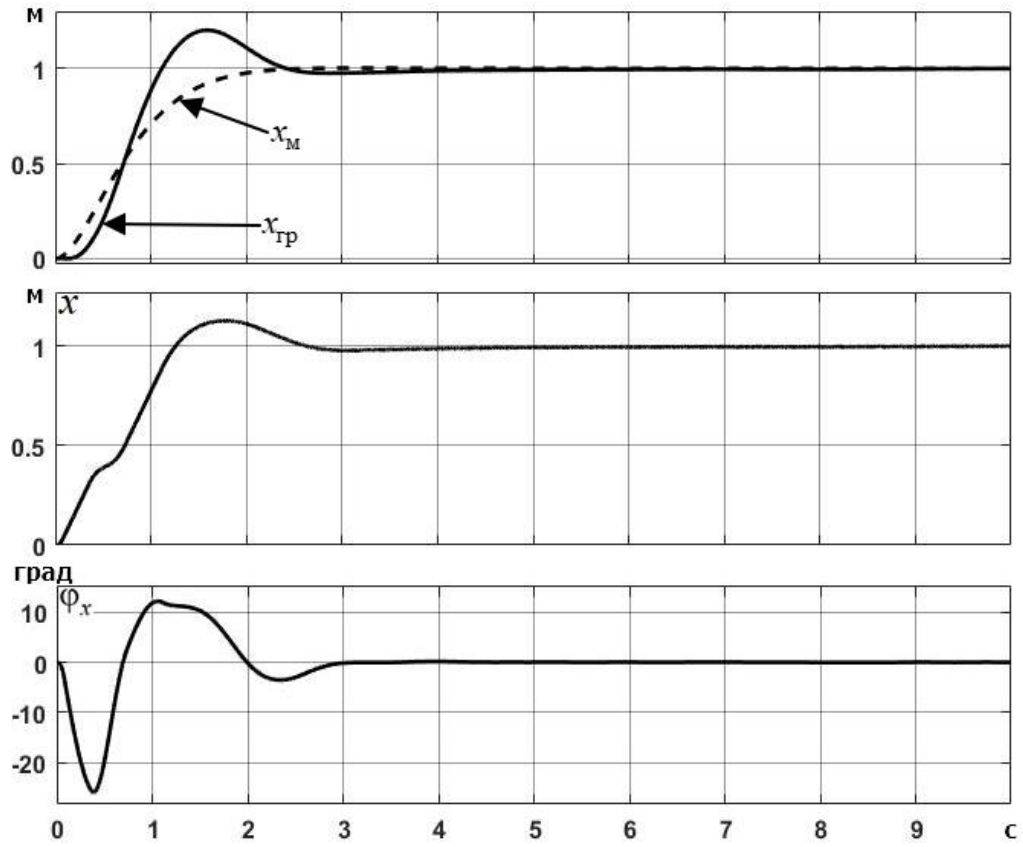


Рисунок 4.14 – График переходного процесса при $\hat{a}_1^V = 15 \cdot a_1^V$

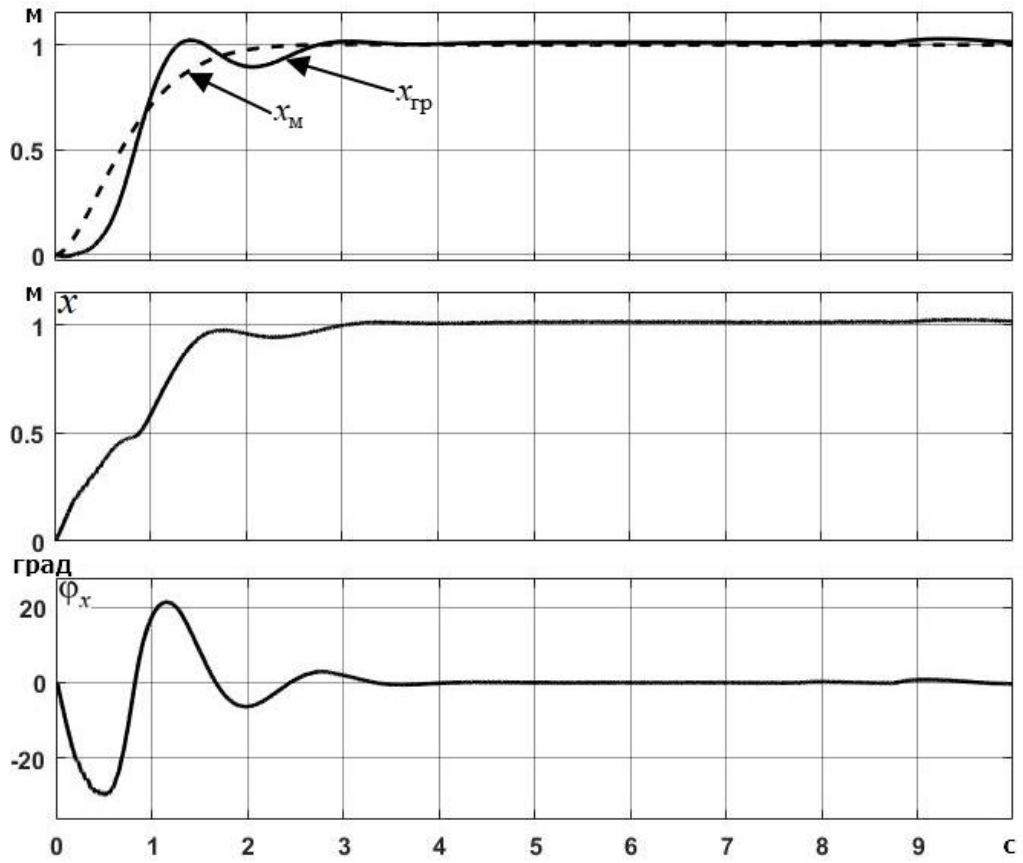


Рисунок 4.15 – График переходного процесса при $\hat{a}_1^V = a_1^V$

При увеличении оценки \hat{a}_1^V от $4 a_1^V$ до $15 a_1^V$ заметно растет значение перерегулирования переходного процесса. Если назначаемая оценка $\hat{a}_1^V > 15 a_1^V$, СУ все ещё остается устойчивой, однако перерегулирование переходного процесса составляет более 20%.

При снижении оценки \hat{a}_1^V от $4 a_1^V$ в меньшую сторону, значительно увеличивается время регулирования переходного процесса. И в итоге, при назначении $\hat{a}_1^V < a_1^V$, СУ перестает быть устойчивой.

Далее исследуем зависимость устойчивости системы от временной задержки управляющего сигнала. Поскольку данный параметр зависит во многом от аппаратной части реализуемой СУ, то он может варьироваться в большую или меньшую сторону.

Отсюда возникает необходимость определить допустимый диапазон задержки управляющего сигнала, чтобы корректно подобрать оборудования, на котором будет реализовываться система адаптивного управления краном.

Поскольку все предыдущие исследования проводились с задержкой управляющего сигнала равным 0,01 с, то настоящие испытания будем проводить с большей задержкой, от 0,01 и выше. Параметры ОУ, алгоритма идентификации и настройки ЭМ назначаем такие же, что в предыдущем исследовании, назначаемая оценка $\hat{a}_1^V = 0,19$. Зашумление измеряемых сигналов $\dot{\varphi}_x$, $\ddot{x}_{гр}$ и x принимаем следующие: 0,1 град/с, 0,1 м/с² и 0,00125 м соответственно.

Результаты исследования зависимости устойчивости СУ от времени задержки управляющего сигнала представлены в таблице 6.

На рисунке 4.16 изображен график переходных процессов с временем задержки управляющего сигнала 0,057 с.

В результате исследования получили максимальную величину задержки сигнала 0,057 с при текущих настройках СУ. При увеличении этого времени система не способно гасить колебания груза и транспортировать его в назначенную точку. Однако полученного диапазона достаточно для построения реальной системы

управления. Поскольку большинство современного оборудования сможет удовлетворить подобным требованиям.

Таблица 6 – Результаты исследования СУ при различных значениях задержки управляющего сигнала

№	Задержка управляющего сигнала, с	Время регулирования, с	Максимальный угол отклонения груза, град
1	0,01	1,6	25,05
2	0,02	1,62	25,8
3	0,03	1,63	24,4
4	0,04	1,67	25,85
5	0,05	1,72	26,8
6	0,057	2,38	27,23

В рамках проведенных исследований опытным путем определили зависимость эффективности адаптивной СУ от изменения назначаемой оценки \hat{a}_1^V , определили ее допустимый диапазон, максимальный уровень зашумленности сигналов ОС и максимально допустимое время задержки управляющего сигнала.

Возможный диапазон значений оценки \hat{a}_1^V достаточно велик, и при настройке СУ определить его не составляет большого труда. Допустимый уровень зашумленности сигналов ОС находится в пределах, который могут удовлетворить большинство контрольно-измерительных приборов, эксплуатируемых на промышленных объектах. Максимальное время задержки управляющего сигнала, при котором система управления способна выполнять свои функции также имеет большой диапазон, которому может соответствовать большинство современного оборудования.

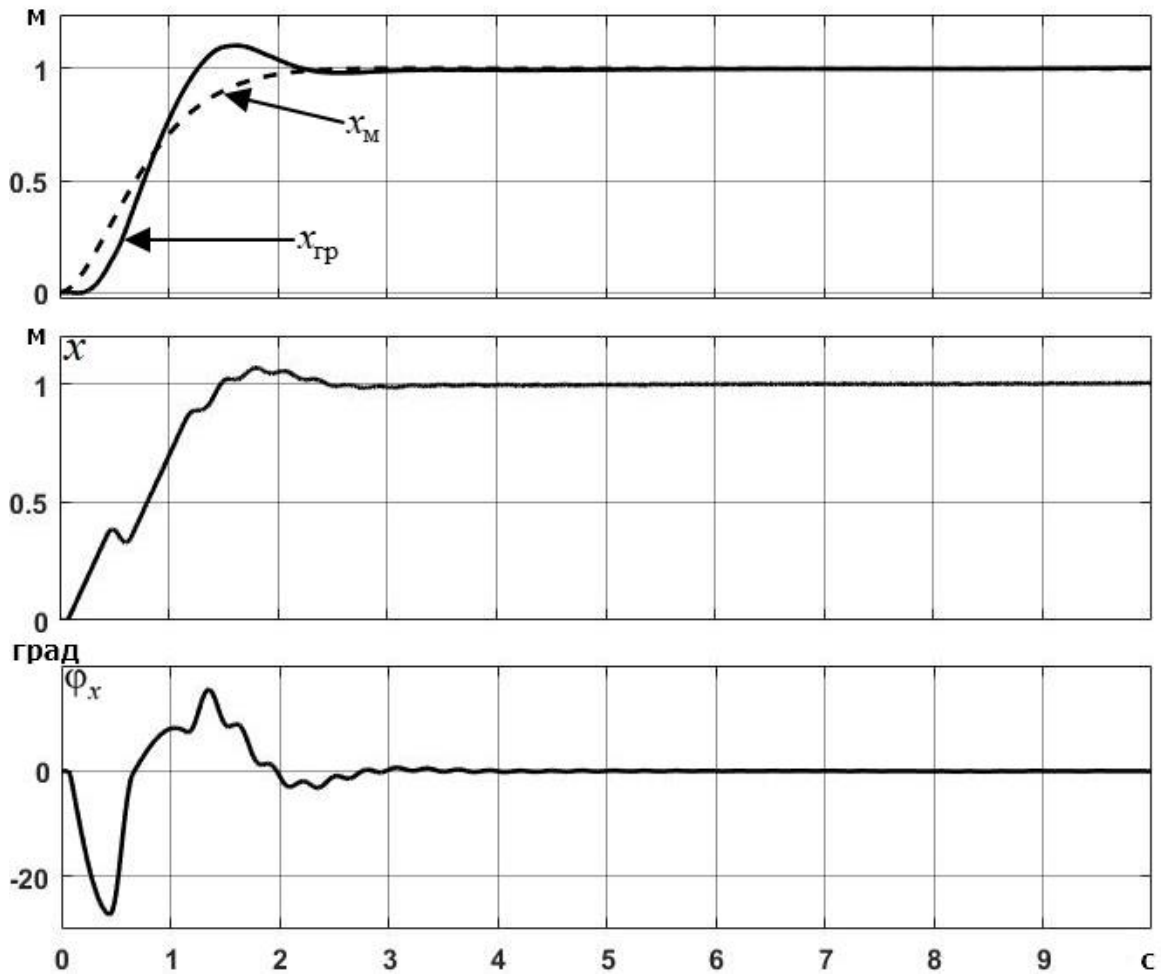


Рисунок 4.16 – График переходного процесса при задержке управляющего сигнала 0,057 с

4.5 Анализ факторов, влияющих на качество системы управления (имитационные исследования грузоподъемного крана)

Определим допустимый уровень зашумленности сигналов ОС для СУ полноразмерного грузоподъемного крана. Его необходимо знать для подбора датчиков при внедрении предлагаемой СУ на промышленные объекты.

В качестве имитируемого ОУ для исследования системы принят кран с параметрами реальной промышленной грузоподъемной системы. Его параметры выбирались согласно ГОСТ 3332-54 [176]: масса тележки $m_T = 4000$ кг, груз массой $m_G = 3000$ кг, момент инерции груза $J_y = 300$ кг·м², длина троса $l = 10$ м, ход перемещения тележки – 6,3 м.

Параметры эталонной модели принимаем: $\xi_m = 0,95$ и $\omega_m = 0,4 \text{ с}^{-1}$. Параметры алгоритма идентификации: $\Delta t = 0,01 \text{ с}$, $\vartheta = 10$, $\beta = 0,99$. Рассчитанный закон управления перед подачей на ОУ фильтруется на апериодическом звене с постоянной времени $0,05 \text{ с}$, моделирующим привод. Задержка управляющего сигнала $0,01 \text{ с}$, назначаемая оценка $\hat{a}_1^V = 0,3$. Заданное расстояние, на которое необходимо перенести груз 5 м .

Принимаем, что сигналы ОС измеряются с зашумлением, гауссовским центрированным со среднеквадратичным отклонением. Качество системы управления также оцениваем по времени регулирования переходного процесса и максимальному углу отклонения груза. Под временем регулирования принимаем интервал времени, за который груз достигает заданного положения с погрешностью $\pm 5\%$ ($4,75 \text{ м} - 5,25 \text{ м}$) и угол отклонения становится менее 3 градусов. На рисунках 4.17-4.18 изображены графики переходных процессов с вариантами зашумления № 1 и № 8 соответственно. Варианты уровня зашумления и результаты исследования представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Варианты уровня зашумления сигналов ОС и результаты исследования

№	Зашумленность $\dot{\varphi}_x$, град/с	Зашумленность $\ddot{x}_{гр}$, м/с ²	Зашумленность x , м	Время регулирования, с	Максимальный угол отклонения груза, град
1	0,1	0,1	0,01	7,06	4,85
2	0,2	0,2	0,02	7	4,76
3	0,3	0,3	0,03	7	4,9
4	0,4	0,4	0,04	10,96	4,87
5	0,5	0,5	0,05	6,9	5
6	0,6	0,6	0,06	20,5	4,8
7	0,7	0,7	0,07	19,6	5,28
8	0,8	0,8	0,08	20,1	4,9

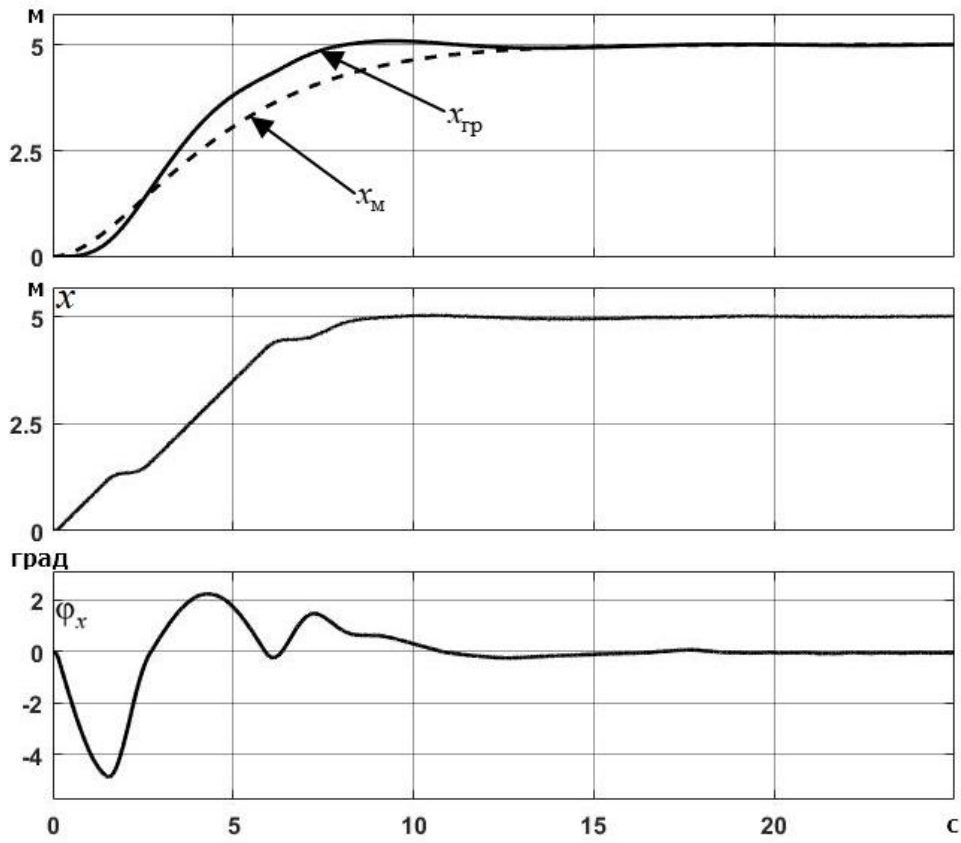


Рисунок 4.17 – График переходного процесса с вариантом зашумления № 1

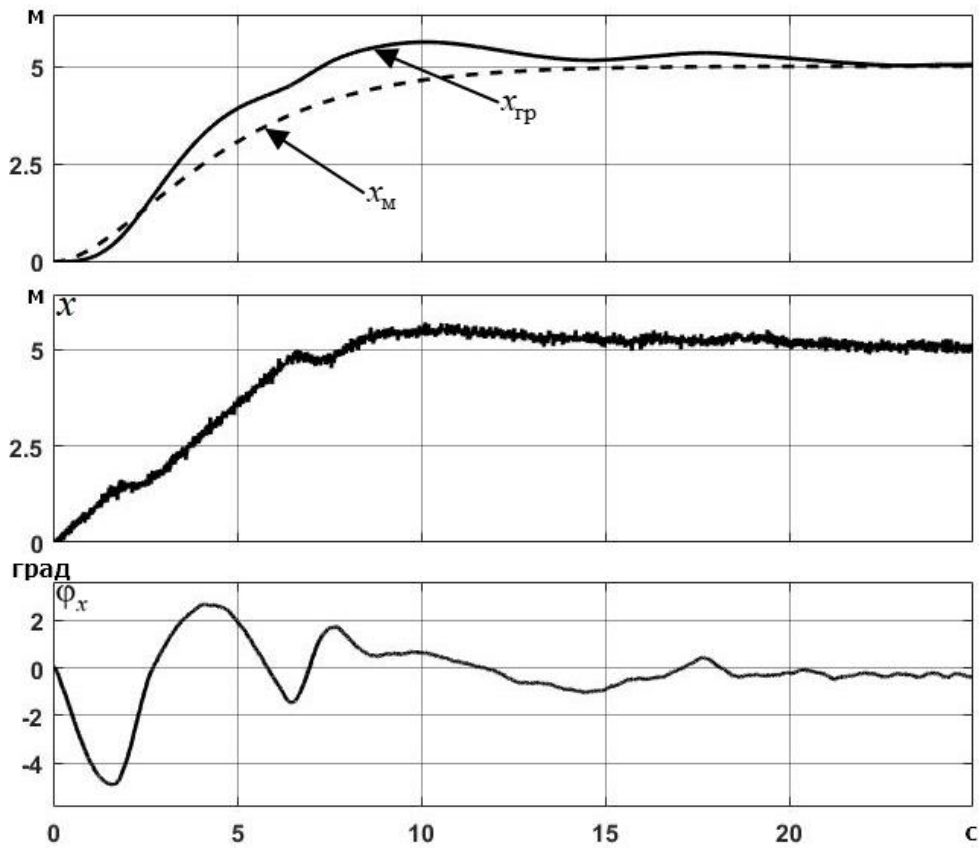


Рисунок 4.18 – График переходного процесса с вариантом зашумления № 8

По результатам исследования можно сделать вывод, что характер переходного процесса от увеличения погрешности сигнала изменяется незначительно. С увеличением шума сигналов увеличивается амплитуда автоколебаний системы в установившемся состоянии, как это наблюдалось при подобном исследовании с имитацией экспериментальной установки в качестве ОУ. Максимально допустимая величина среднеквадратичного отклонения для $\dot{\varphi}_x$, $\ddot{x}_{гр}$ и x составила 0,8 град/с, 0,8 м/с² и 0,08 м соответственно. При большем зашумлении амплитуда автоколебаний переходного процесса выходит за рамки ограничений, по которым определялось время регулирования.

Отсюда можно сделать вывод, что требования к чистоте сигналов ОС достаточно низкое. Для построения системы адаптивного управления на реальном промышленном кране подойдут большинство датчиков, имеющихся на рынке. Например, для измерения угловой скорости и линейного ускорения груза можно использовать инерционный модуль МГ-1 [172].

Далее рассмотрим допустимый диапазон величин назначаемой оценки \hat{a}_1^V . Для проводимых ниже исследований точное значение параметра равно $\hat{a}_1^V = 0,01$.

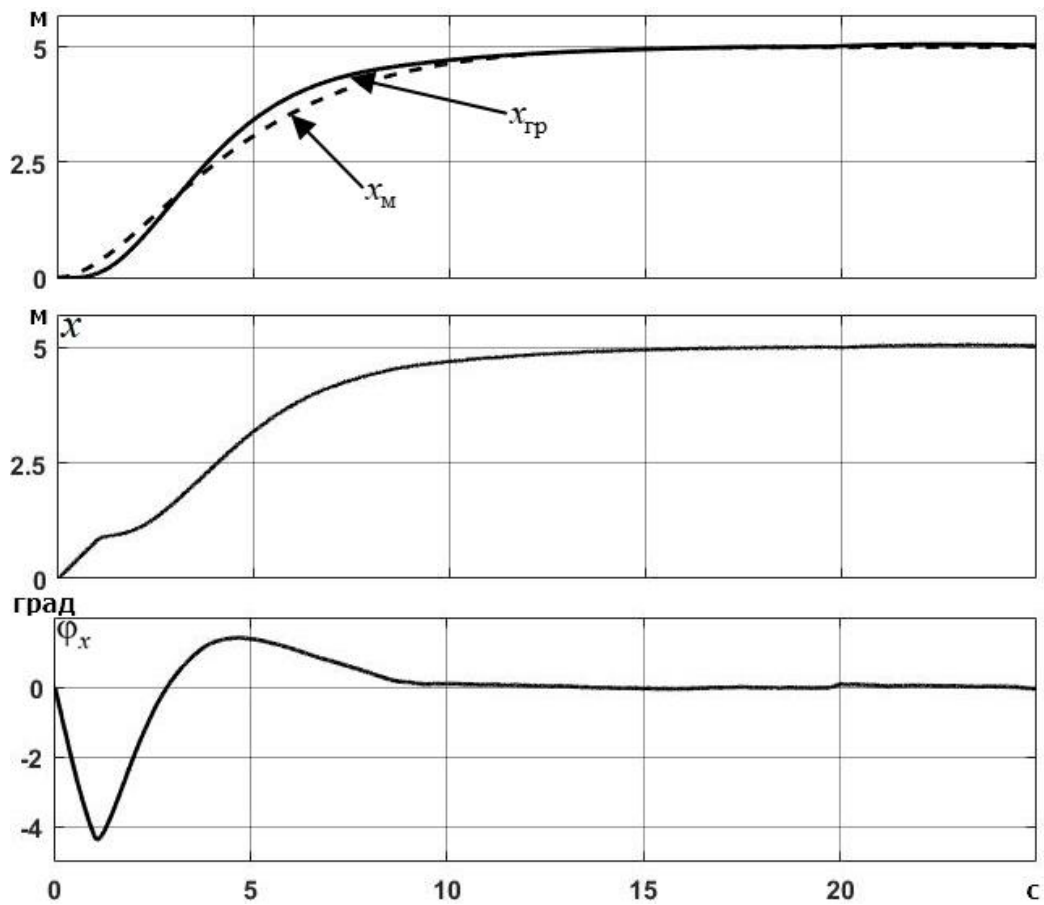
Параметры ОУ, алгоритма идентификации и настройки ЭМ назначаем такие же, что в предыдущем исследовании. Зашумление измеряемых сигналов $\dot{\varphi}_x$, $\ddot{x}_{гр}$, x принимаем следующие: 0,1 град/с, 0,1 м/с² и 0,01 м соответственно.

Во время исследования все параметры ОУ и настройки СУ неизменны, кроме назначаемой оценки \hat{a}_1^V . Все её вариации и полученные результаты испытаний приведены в таблице 8.

На рисунках 4.19-4.20 приведены графики переходных процессов при \hat{a}_1^V равной $5 \hat{a}_1^V$ и $80 \hat{a}_1^V$ соответственно.

Таблица 8 – Результаты исследования СУ при различных значениях оценки \hat{a}_{x1}^V

№	Значение \hat{a}_1^V	Время регулирования, с	Перерегулирование, %	Максимальный угол отклонения груза, град
1	$80 a_1^V$	20,4	20	4,8
2	$60 a_1^V$	13,3	14	4,9
3	$40 a_1^V$	11,7	6,6	4,8
4	$30 a_1^V$	7,1	2	4,86
5	$20 a_1^V$	7,64	-	4,8
6	$15 a_1^V$	9,1	-	4,75
7	$10 a_1^V$	10	-	4,46
8	$5 a_1^V$	10,4	-	4,36

Рисунок 4.19 – График переходного процесса при $\hat{a}_1^V = 5 a_1^V$

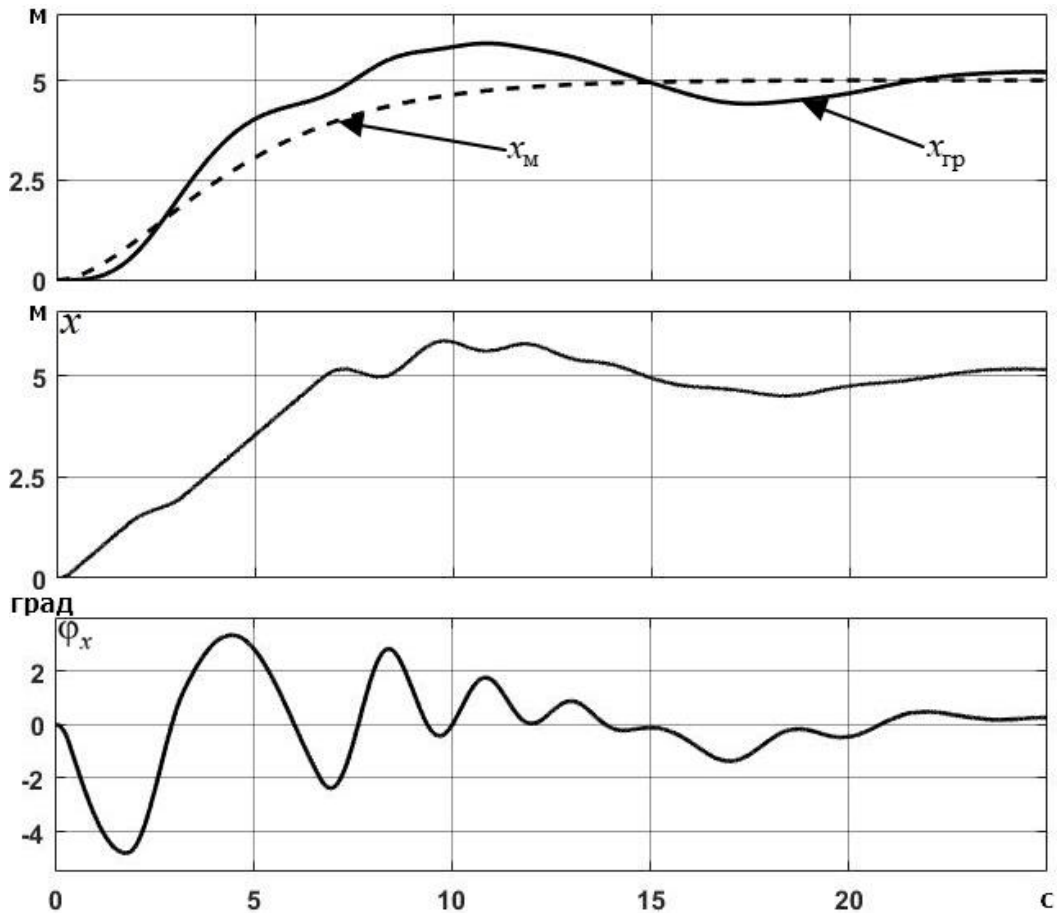


Рисунок 4.20 – График переходного процесса при $\hat{a}_1^V = 80 a_1^V$

По результатам исследования определили, что СУ устойчива, если значение оценки \hat{a}_1^V находится в диапазоне от $5 a_1^V$ до $80 a_1^V$. В иных случаях СУ не способна эффективно демпфировать колебания груза и переносить его в назначенное место. Наилучшие характеристики переходного процесса были получены при $\hat{a}_{x1}^V = 30 a_{x1}^V$. Область значений \hat{a}_1^V , при котором система остается в устойчивом состоянии достаточно велика.

При увеличении оценки \hat{a}_1^V от $30 a_1^V$ до $80 a_1^V$ заметно растет значение перерегулирования переходного процесса, а при $\hat{a}_1^V > 80 a_1^V$ оно достигает более 20% и общее время регулирования значительно увеличивается.

При снижении оценки \hat{a}_1^V от $30 a_1^V$ в меньшую сторону, увеличивается время регулирования переходного процесса. И в итоге, при назначении $\hat{a}_1^V < 5 a_1^V$, СУ перестает быть устойчивой.

Далее исследуем зависимость устойчивости системы от временной задержки управляющего сигнала. Поскольку данный параметр зависит во многом от аппаратной части реализуемой СУ, то он может варьироваться в большую или меньшую сторону.

Поскольку все предыдущие исследования проводились с задержкой управляющего сигнала равным 0,01 с, то настоящие испытания будем проводить с большей задержкой, от 0,01 и выше. Параметры ОУ, алгоритма идентификации и настройки ЭМ назначаем такие же, что в предыдущем исследовании, назначаемая оценка $\hat{a}_1^V = 0,3$. Зашумление измеряемых сигналов $\dot{\varphi}_x$, $\ddot{x}_{гр}$, x принимаем следующие: 0,1 град/с, 0,1 м/с² и 0,01 м соответственно.

Результаты исследования зависимости устойчивости СУ от времени задержки управляющего сигнала представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты исследования СУ при различных значениях задержки управляющего сигнала

№	Задержка управляющего сигнала, с	Время регулирования, с	Максимальный угол отклонения груза, град
1	0,01	7,1	4,86
2	0,03	7,1	4,75
3	0,05	7,16	4,8
4	0,07	10,4	4,75
5	0,09	11,6	4,8
6	0,11	17,6	4,84

На рисунке 4.21 изображен график переходных процессов с временем задержки управляющего сигнала 0,11 с.

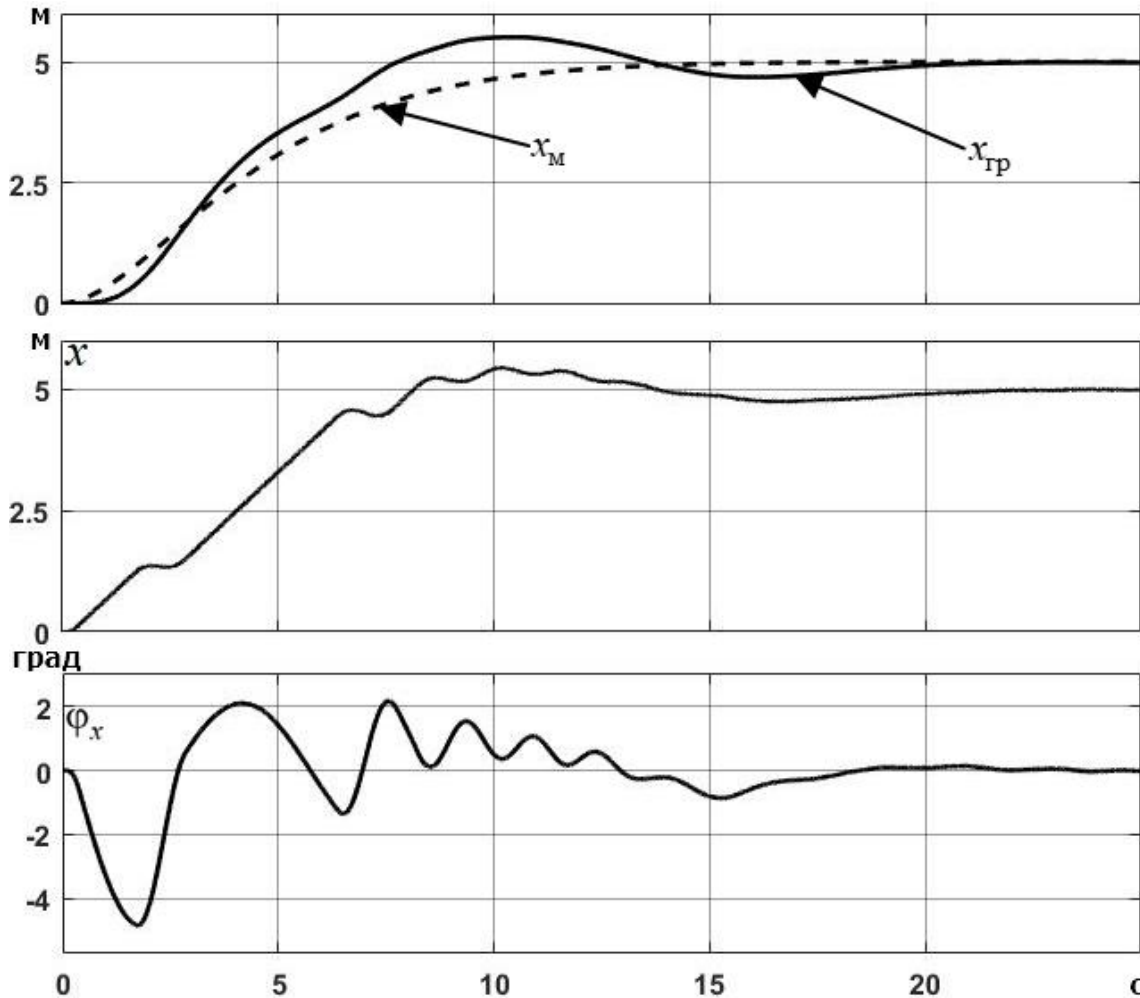


Рисунок 4.21 – График переходного процесса при задержке управляющего сигнала 0,11 с

В результате исследования получили максимальную величину задержки управляющего сигнала 0,11 с при текущих настройках СУ. При увеличении этого времени система не способна гасить колебания и транспортировать груз в назначенную точку. Однако такого диапазона достаточно, поскольку большинство современного оборудования сможет удовлетворить подобным требованиям.

В рамках проведенных исследований опытным путем определили зависимость эффективности адаптивной СУ от изменения назначаемой оценки \hat{a}_{x1}^V , определили ее допустимый диапазон, максимальный уровень зашумленности сигналов ОС и максимально допустимое время задержки управляющего сигнала для полноразмерного грузового крана.

Как и для экспериментальной установки возможный диапазон значений оценки \hat{a}_{x1}^V достаточно велик, и при настройке СУ определить его не составляет большого

труда. Допустимый уровень зашумленности сигналов ОС находится в пределах, который могут удовлетворить большинство контрольно-измерительных приборов, эксплуатируемых на промышленных объектах. Максимальное время задержки управляющего сигнала, при котором СУ способна выполнять свои функции также имеет большой диапазон, которому может соответствовать большинство современного оборудования.

4.6 Исследования адаптивного закона управления на имитационной модели при перемещении груза по двум осям

При разработке систем управления мостовыми кранами, основная цель которых является точное перемещение и снижение маятниковых колебаний подвешенного груза, их исследования часто ограничиваются перемещением только по одной горизонтальной оси. Однако все мостовые и козловые краны имеют возможность транспортировать груз по двум горизонтальным осям, по направлению движения поперечной балки и тележки крана. Перемещение груза одновременно по обоим направлениям также сопряжено с его раскачиванием по двум осям.

В данном исследовании рассматривается задача по перемещению груза на заданное расстояние и демпфирование колебаний при априорной неопределенности о параметрах объекта управления, подобное исследование проводилось в работе [173]. Раскачивание груза возникает при передвижении крана и воздействии на него внешних неконтролируемых возмущений, например, воздействие ветра. Сложность одновременного перемещения груза по двум осям заключается в том, что управляющие воздействия на приводы тележки и поперечной балки крана между собой не согласуются, что, очевидно, может сказаться на качестве управления. Поскольку диагональные колебания, относительно двух горизонтальных осей движения, необходимо устранять посредством одновременного передвижения тележки и балки крана.

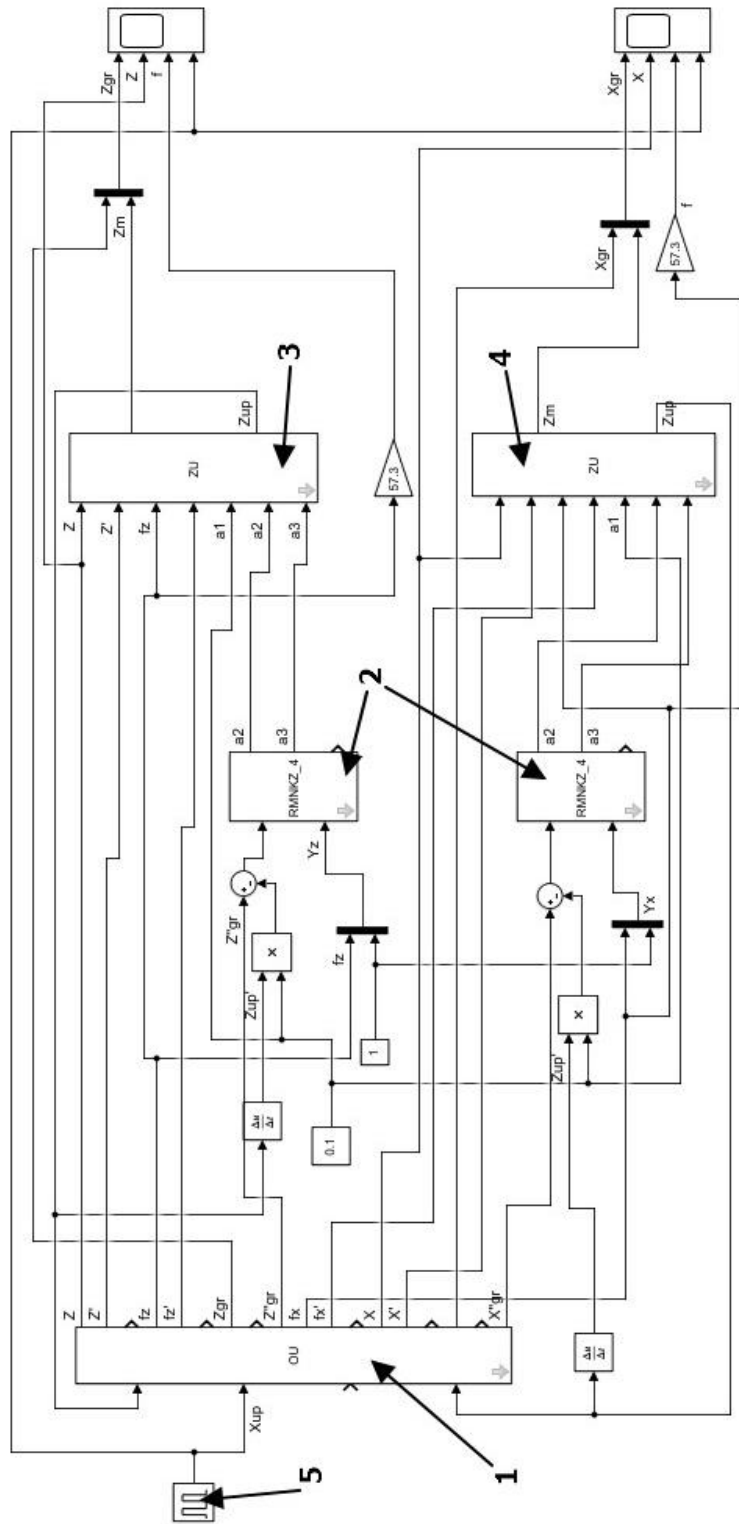
Для исследования поведения ОУ при перемещении груза одновременно по двум осям разработана имитационная модель в программной среде Matlab/Simulink/SimMechanics(MultiBody), представлена на рисунке 4.22.

При исследовании системы управления параметры ОУ были приняты согласно разработанной экспериментальной установки МК [168]. Принято, что переменные угловой скорости троса, линейного ускорения груза и линейного положения тележки измеряются с зашумлением, гауссовским центрированным со среднеквадратичным отклонением соответственно: 0,05 град/с; 0,1 м/с²; 0,1·10⁻³ м.

Параметры эталонной модели для перемещения по двум осям принимаем: $\xi_m = 0,9$ и $\omega_m = 1,28 \text{ с}^{-1}$. Параметры алгоритма идентификации: $\Delta t = 0,01 \text{ с}$, $\vartheta = 10$, $\beta = 0,99$. Рассчитанный закон управления перед подачей управляющего сигнала фильтруется на апериодическом звене с постоянной времени 0,05 с, моделирующим привод. Также была сформирована задержка подачи управляющего воздействия на объект величиной 0,01 с, Назначаемые оценки \hat{a}_1^V и \hat{b}_1^V равны 0,1. Заданное расстояние, на которое необходимо перенести груз: по оси Y – 1 м; по оси X – 0,5 м. Для анализа свойств парирования внешних возмущений, смоделировано воздействие ветра на подвешенный груз по двум осям движения. Это воздействие начинается в момент времени 8 с, имеет импульсный вид и пропорционально массе груза. Сила внешнего возмущения, воздействующая на груз по двум осям, составляет 1,884 Н.

Основное отличие исследуемой имитационной модели от макета мостового крана [168] – одновременное перемещение груза по двум осям в горизонтальной плоскости, движение груза по диагонали рабочей зоны крана. На макете мостового крана представляется возможным имитировать перемещение груза только по одной оси, движение тележки мостового крана вдоль поперечной балки.

На рисунках 4.23 и 4.24 представлены результаты исследования работоспособности системы управления при параметрах ОУ $m_T = 1 \text{ кг}$, $m_r = 1 \text{ кг}$, $m_6 = 2 \text{ кг}$, $J_x = J_y = 0,008 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $l = 0,6 \text{ м}$ и $m_T = 1 \text{ кг}$, $m_r = 0,5 \text{ кг}$, $m_6 = 2 \text{ кг}$, $J_x = J_y = 0,0015 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $l = 0,6 \text{ м}$ соответственно.



1 – модель ОУ; 2 - блоки идентификации параметров ОУ; 3 – блок вычисления заданной скорости перемещения по оси Y; 4 – блок вычисления заданной скорости перемещения по оси X; 5 – блок внешних возмущений
 Рисунок 4.22 – Модель адаптивной СУ мостовым краном.

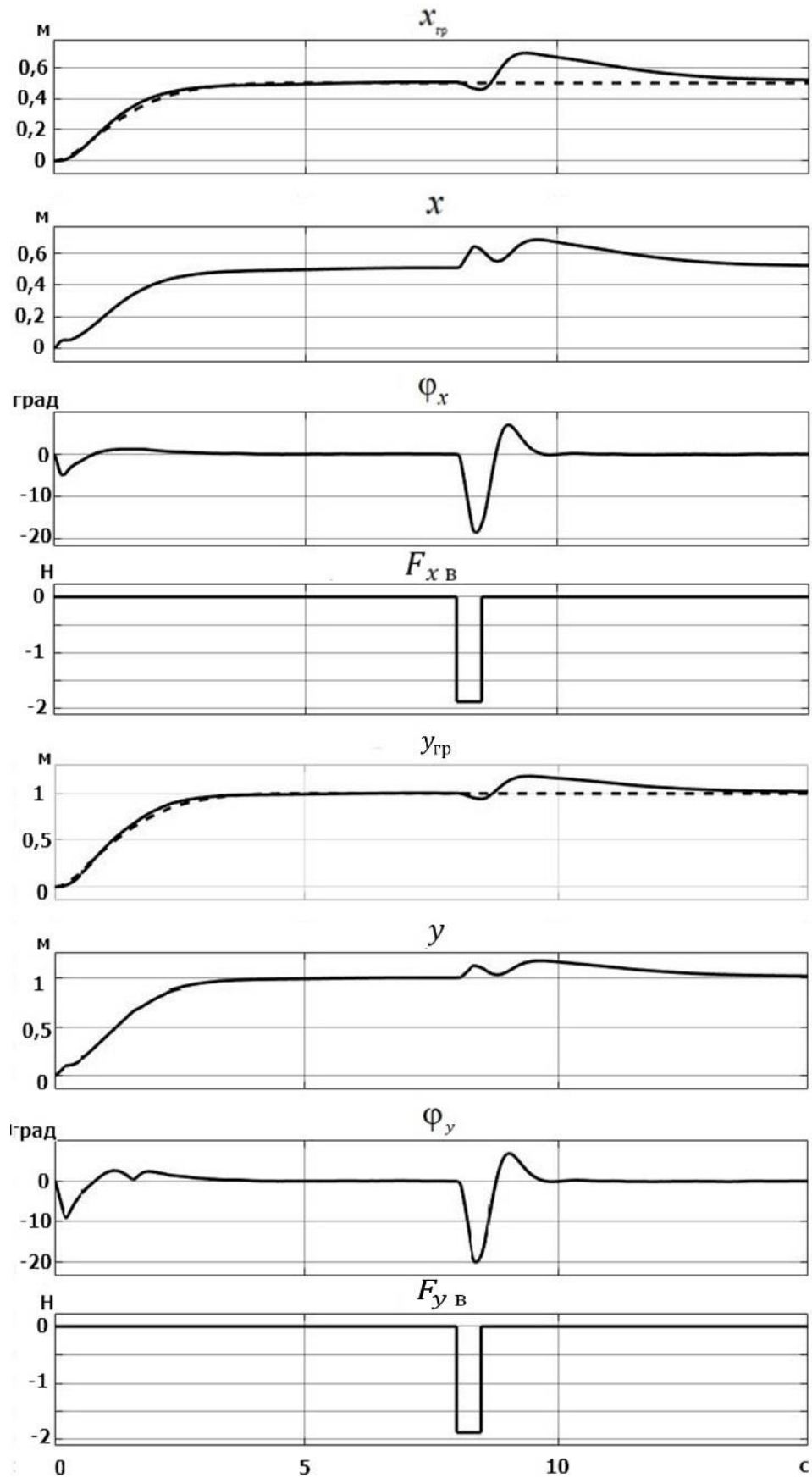


Рисунок 4.23 – Результаты исследования СУ при $m_T = 1$ кг, $m_T = 1$ кг, $m_6 = 2$ кг,
 $J_x = J_y = 0,008$ кг·м², $l = 0,6$ м

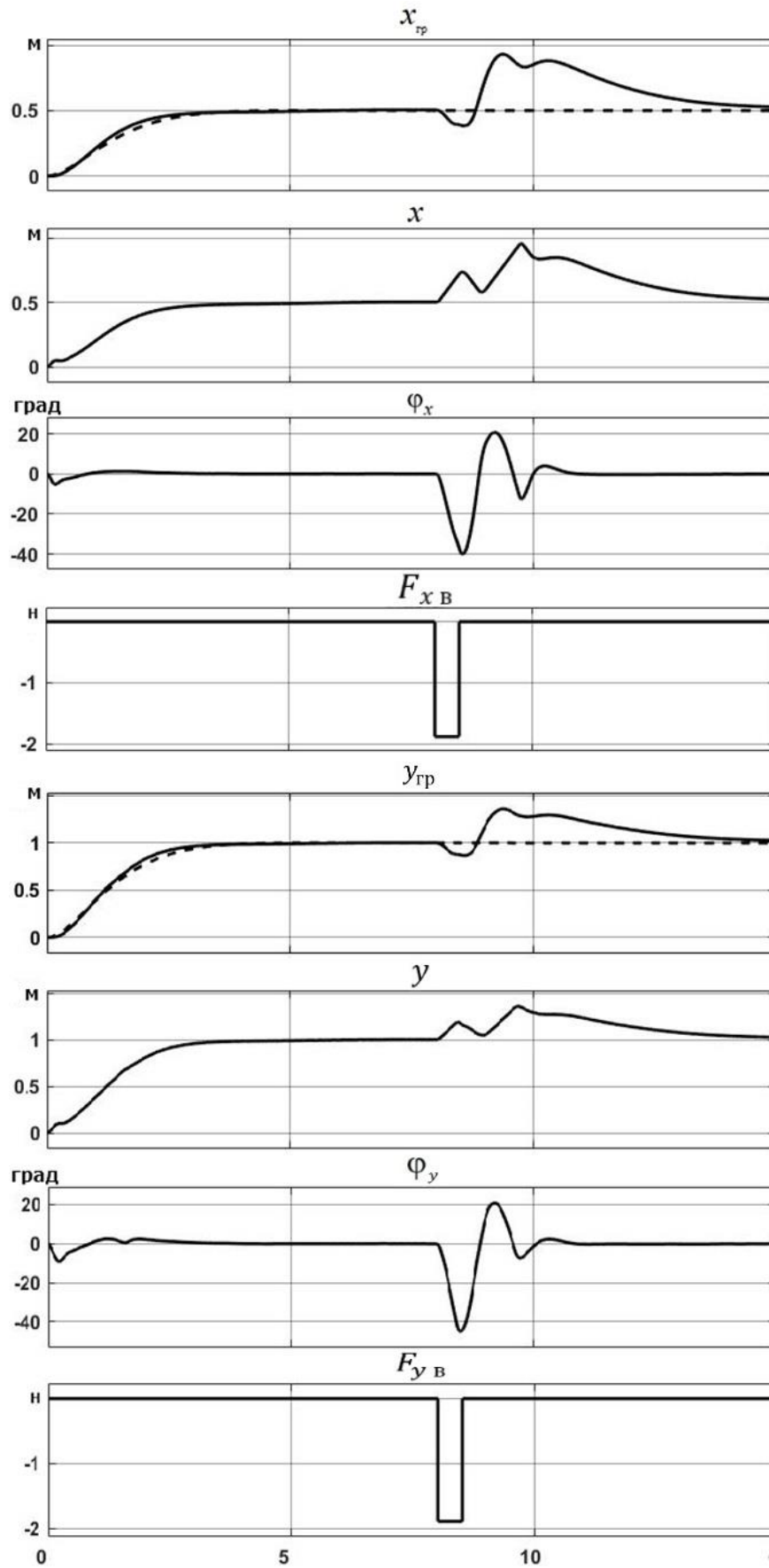


Рисунок 4.24 – Результаты исследования СУ при $m_1 = 1$ кг, $m_2 = 0,5$ кг, $m_3 = 2$ кг,

$$J_x = J_y = 0,0015 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, l = 0,6 \text{ м}$$

Подобные результаты были получены и при других параметрах груза и длине подвеса. Также были исследованы другие внешние возмущения, например, изменение силы трения передвижения тележки крана, система управления успешно парировала и их.

Предлагаемый способ управления обеспечивает точное перемещение груза, гасит диагональные колебания, возникающие от ускорения и торможения тележки, относительно двух взаимно перпендикулярных осей движения. Также парируется внешнее импульсное возмущение, направленное по диагонали осей перемещения. Очевидно, что внедрение данного способа управления способно обеспечить значительное увеличение производительности крана. Поскольку чаще всего при эксплуатации МК, груз перемещают по каждой оси поочередно. Это связано со сложностью гашения диагональных колебаний груза, которые возникают при одновременном движении балки и тележки крана.

4.7 Исследование адаптивного закона управления при подъёме и перемещении груза по двум горизонтальным осям

В данном разделе рассматривается транспортировка груза одновременно по двум осям, посредством тележки и поперечной балки крана, также во время перемещения осуществлялся его подъём и спуск, как это было сделано в [174].

Исследуется эффективность адаптивного закона управления при одновременном подъёме/спуске и перемещении груза по двум горизонтальным осям, ось X – движение груза вдоль поперечной балки крана, ось Y – движение груза поперек балки крана, перемещается сама балка вдоль рабочей зоны мостового крана. Во время перемещения груза производится его подъём на высоту 8,5 м, далее спуск на 7 м. Перемещение груза по осям X и Y осуществляется двумя несогласованными между собой законами управления.

В качестве ОУ для исследования эффективности управления предлагаемой системы принят кран с параметрами реального промышленного грузового крана. Его

параметры выбирались согласно ГОСТ 3332-54 [176]: масса тележки $m_t = 4000$ кг, масса груза $m_r = 4000$ кг, общая масса поперечной балки крана $m_b = 9500$ кг, максимальная высота подъёма груза 16 м, ход перемещения поперечной балки крана 11 м, тележки – 6,3 м.

Принято, что переменные угловой скорости троса, линейного ускорения груза и линейного положения тележки измеряются с зашумлением, гауссовским центрированным со среднеквадратичным отклонением соответственно: 0,05 град/с; 0,1 м/с²; $0,1 \cdot 10^{-3}$ м.

Параметры эталонной модели для обоих законов управления (для перемещения по осям X и Z) принимаем: $\xi_m = 0,95$ и $\omega_m = 0,4$ с⁻¹. Параметры алгоритма идентификации: $\Delta t = 0,01$ с, $\vartheta = 10$, $\beta = 0,99$. Формируемый управляющий сигнал перед подачей на ОУ фильтруется на апериодическом звене с постоянной времени 0,05 с, моделирующим привод. Также была сформирована задержка при подаче управляющего сигнала на объект величиной 0,01 с, назначаемые оценки \hat{a}_1^V и \hat{b}_1^V равны 0,09. Заданное расстояние, на которое необходимо перенести груз, по оси Y – 10 м, по оси X – 5 м.

Для анализа свойств парирования внешних возмущений, смоделировано воздействие ветра на подвешенный груз, оно направлено по диагонали двум горизонтальным осям движения. Это воздействие начинается на 14 с, имеет импульсный вид и пропорционально габаритам груза, сила возмущения рассчитывалась согласно [177].

При исследовании поведения СУ моделировалось перемещение трёх видов груза, различающихся по массе и габаритам. Настройки системы управления при этом не менялись. Моделируемые грузы:

1. Груз сферической формы, диаметр 1 м, $m_r = 1000$ кг, $J_x = 400$ кг·м²; $J_y = 400$ кг·м²;
2. Контейнер размером 4 м на 2 м, $m_r = 1500$ кг, $J_x = 2500$ кг·м²; $J_y = 1250$ кг·м²;
3. Полая труба, длина 5 м, диаметр 0,5 м, $m_r = 350$ кг, $J_x = 773$ кг·м²; $J_y = 486$ кг·м².

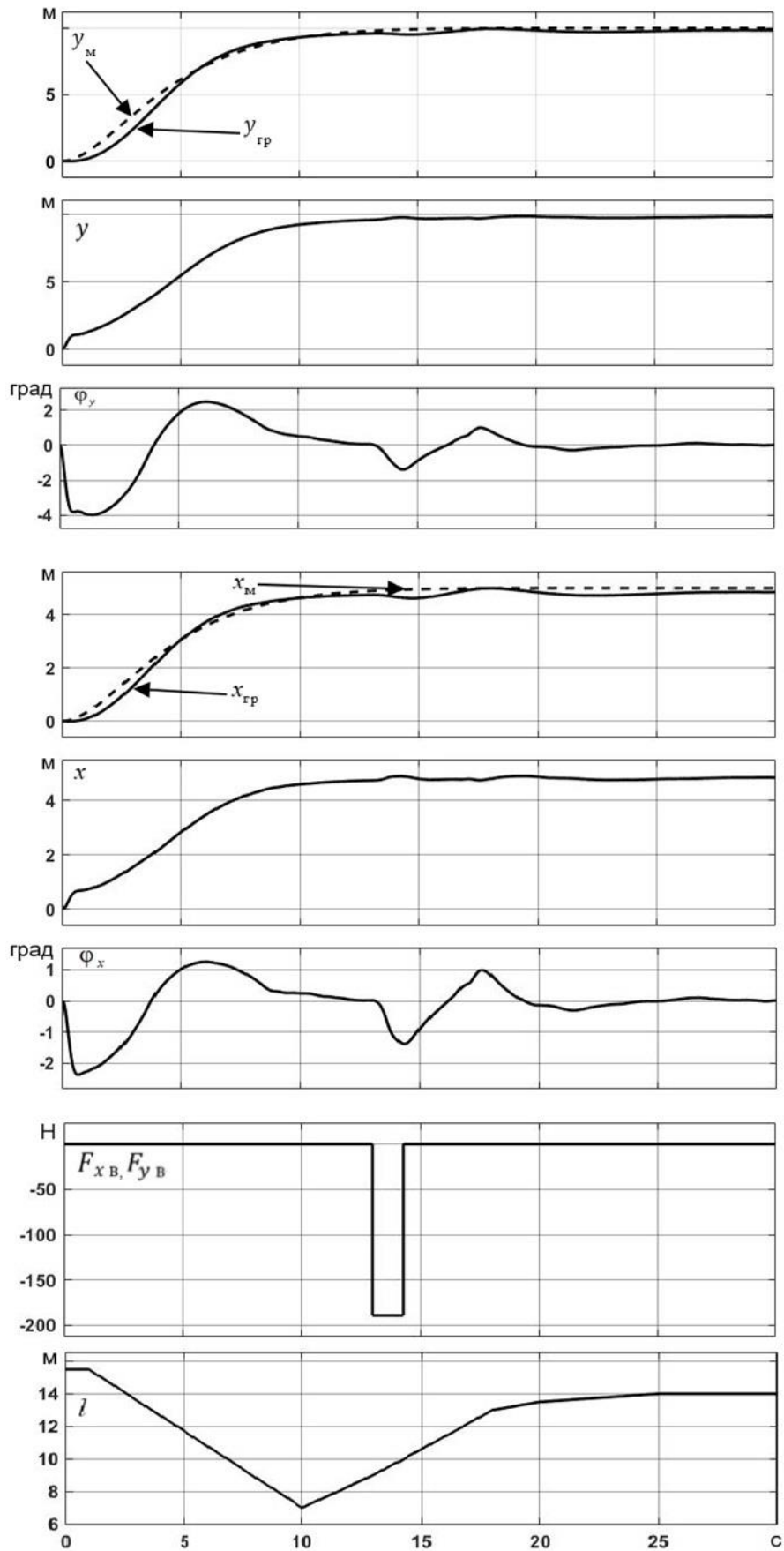


Рисунок 4.25 – Результаты исследования при параметрах: груз сферической формы; диаметр 1 м; $m_{г} = 1000$ кг; $J_x = J_y = 400$ кг·м²

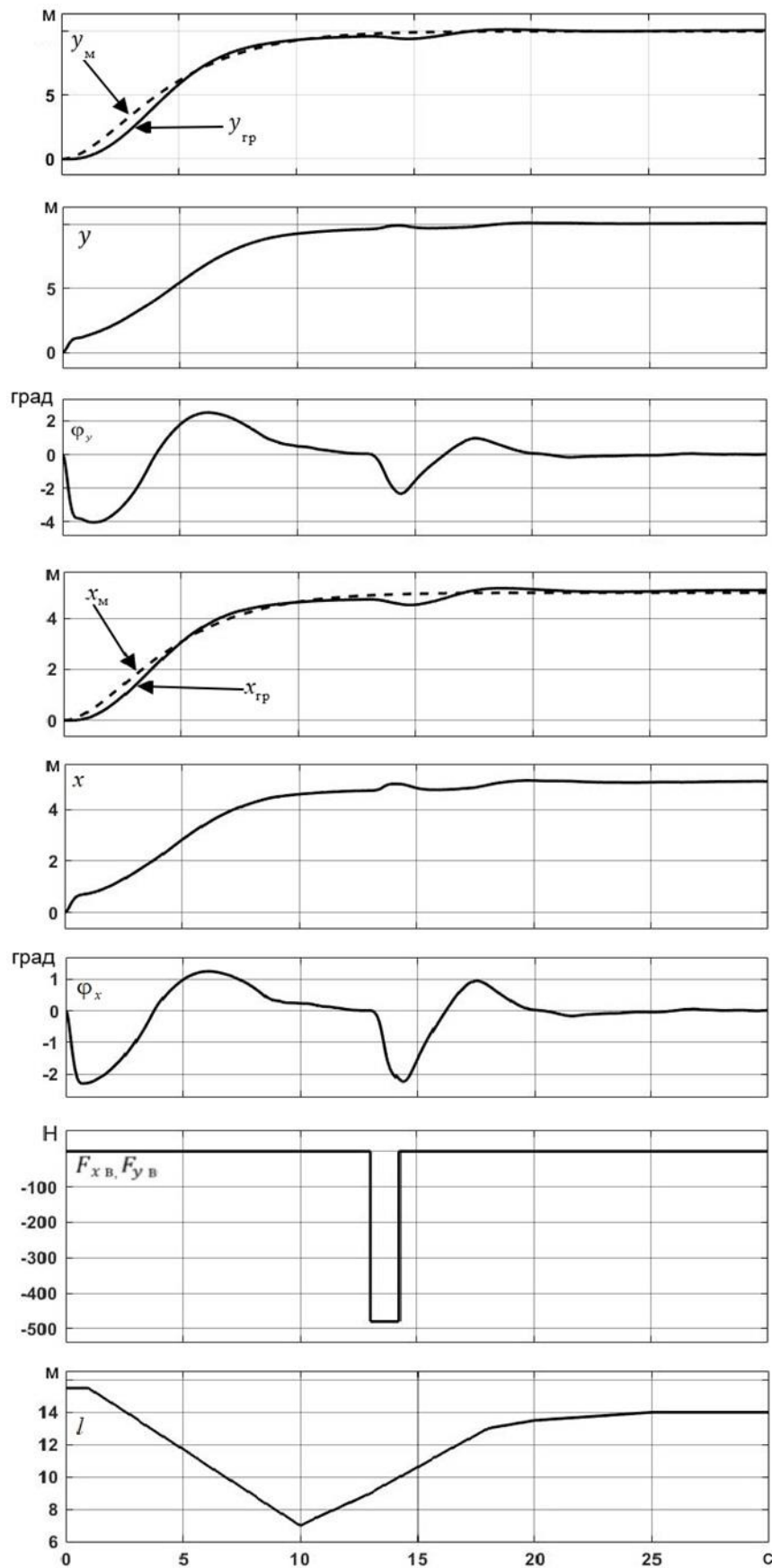


Рисунок 4.26 – Результаты исследования при параметрах: контейнер размером 4 м на 2 м; $m_r = 1500$ кг; $J_x = 2500$ кг·м²; $J_y = 1250$ кг·м²

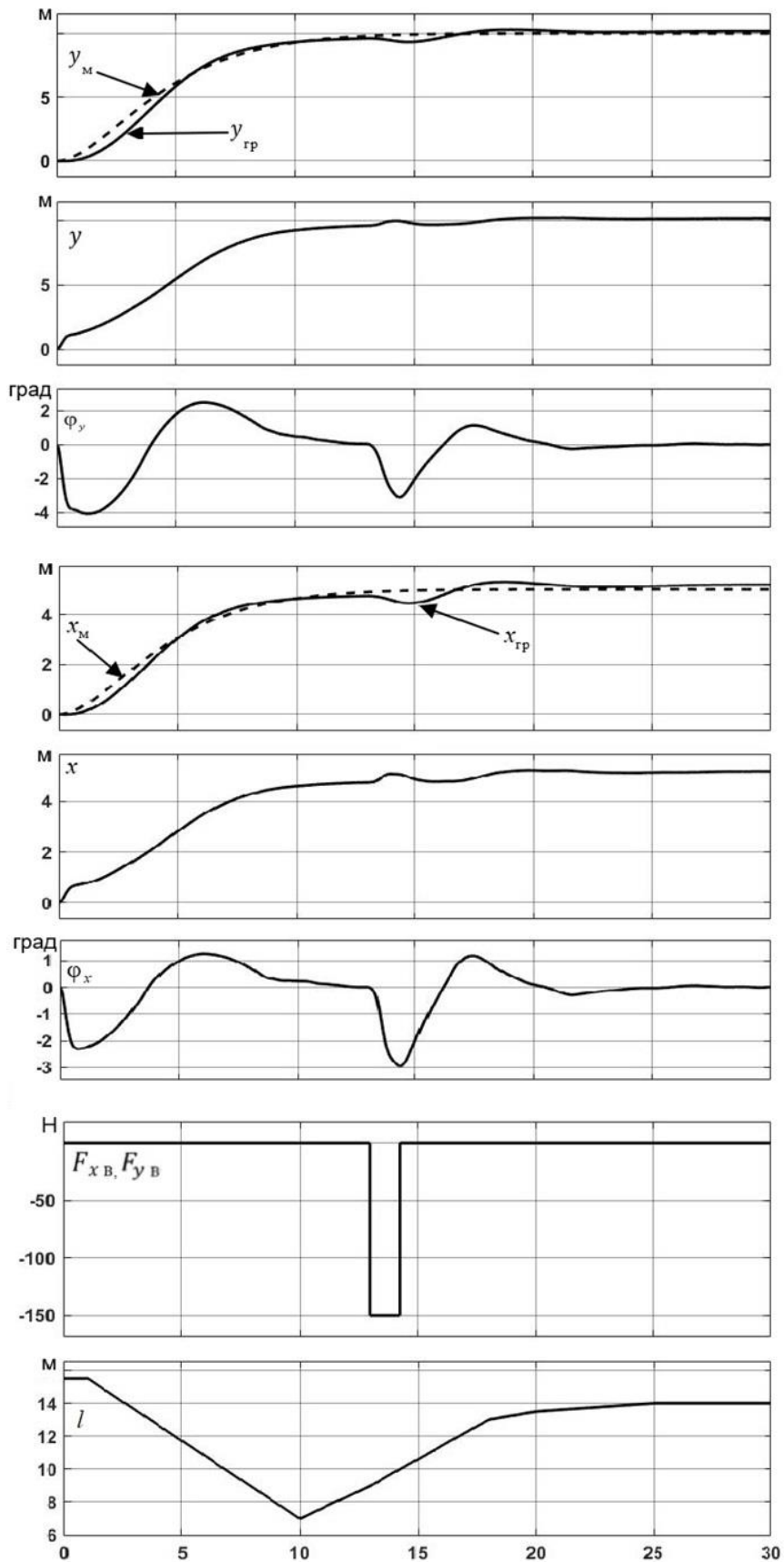


Рисунок 4.27 – Результаты исследования при параметрах: полая труба, длина 5 м; диаметр 0,5 м; $m_r = 350$ кг; $J_x = 773$ кг·м²; $J_y = 486$ кг·м²

Моменты инерции грузов рассчитывались согласно [167]. Исследования проводились в программной среде Matlab/Simulink. Результаты исследования представлены на рисунках 4.25 – 4.27.

Результаты исследования показывают высокую эффективность адаптивного ЗУ, при одновременном перемещении груза по двум осям горизонтальной плоскости и его вертикальном перемещении, подъёме и спуске. За счёт алгоритма текущей идентификации обеспечивается качественное управления в условиях неопределенности о параметрах груза, что позволяет переносить различные грузы без дополнительной настройки системы управления. ЗУ обеспечивает точное перемещение груза за короткий промежуток времени, гасит колебания груза, возникающие от ускорения и торможения тележки, а также парирует внешнее импульсное возмущение, направленное по диагонали относительно двум перпендикулярным осям движения.

4.8 Исследование закона управления двухмаятниковым подвесом мостового крана

В качестве ОУ для имитационного исследования предлагаемого ЗУ использовался разработанный макет мостового крана [168]. Моделирование проводилось в программной среде Matlab/Simulink/SimMechanics(MultiBody). Модель всей системы управления соответствует уравнениям (2.23), (3.25), (3.29 – 3.34).

Параметры объекта управления: $m_T = 0,85$ кг, $m_K = 0,1$ кг, $m_G = 0,1$ кг, $r_K = 0,03$ м, $l_G = 0,1$ м, $x_G^{\text{зад}} = 0,5$ м, $k_{\text{тр}} = 0,3$ Н · с/м. При исследовании изменялись длина подвеса крюка в диапазоне $l_K = 0,15 \div 0,8$ м и момент инерции груза в виде вариации его радиуса инерции: $r_G = 0,05 \div 0,25$ м ($J_G = m_G r_G^2$), – изменение момента инерции груза в 25 раз.

Приняты следующие параметры алгоритма идентификации: $\Delta t = 0,01$ с (с этим же временным шагом формировались дискретные значения сигнала $v_{\text{зад}}$ по (3.30)),

$\vartheta = 10$, $\beta = 0,998$, $\hat{l}_k = l_k$ (умеренные ошибки этой оценки до 20% практически не влияют на качество управления). Параметры эталонной модели (3.25): $\xi_m = 0,9$ и $\omega_m = 1,5 \text{ с}^{-1}$. Параметры уравнения (3.33): функция $f_{\text{фнч}}$ была реализована в виде апериодического звена с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени 2 с, $k_d = 3$. Параметры уравнения (3.34): $k_{\phi 1} = 0,2 \text{ с}^{-2}$, $k_{\phi 2} = 0,6 \text{ с}^{-1}$. Динамика отработки системой управления сигнала $v_{\text{зад}}$ моделировалась апериодическим звеном с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени 0,002 с и звеном задержки величиной 0,003 с, а также ограничением размаха этого сигнала значением 0,35 м/с.

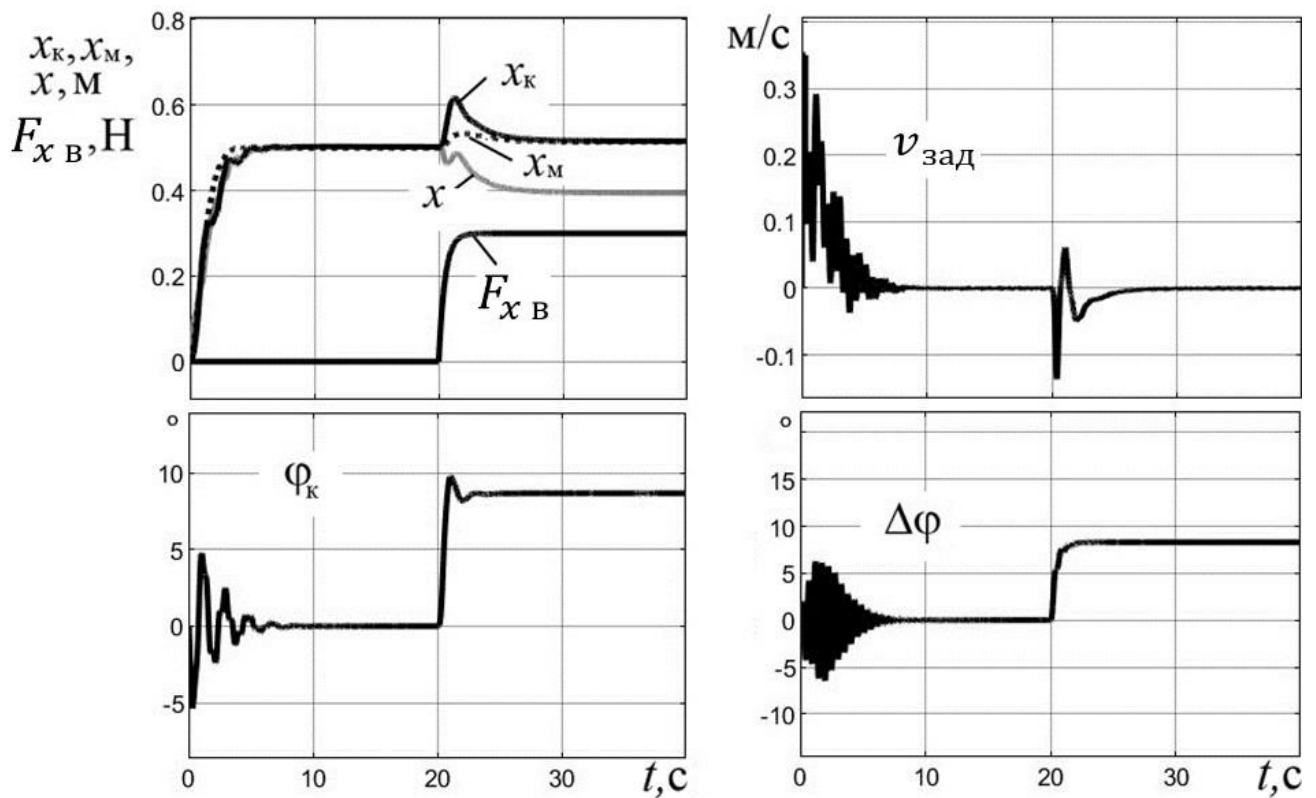


Рисунок 4.28 – Исследование системы управления при $l_k = 0,8 \text{ м}$, $r_\Gamma = 0,05 \text{ м}$

На рисунках 4.28-4.31 представлены результаты исследования СУ краном. На рисунке 4.28: $l_k = 0,8 \text{ м}$, $r_\Gamma = 0,05 \text{ м}$. Этому сочетанию соответствуют собственные частоты по (3.35): $\omega_{k0} = 3,9 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{\Gamma 0} = 11,8 \text{ с}^{-1}$. На рисунке 4.29: $l_k = 0,8 \text{ м}$, $r_\Gamma = 0,25 \text{ м}$, $\omega_{k0} = 3,9 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{\Gamma 0} = 3,93 \text{ с}^{-1}$. На рисунке 4.30: $l_k = 0,15 \text{ м}$, $r_\Gamma = 0,05 \text{ м}$, $\omega_{k0} = 8,8 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{\Gamma 0} = 13,1 \text{ с}^{-1}$. На рисунке 4.31: $l_k = 0,15 \text{ м}$, $r_\Gamma = 0,25 \text{ м}$, $\omega_{k0} = 8,9 \text{ с}^{-1}$,

$\omega_{r0} = 4,4 \text{ с}^{-1}$. При этом варианты груза и длины подвеса крюка к приведенным дают и промежуточное качество управления.

Из проведенного исследования видим, что поставленное требование к качеству управления (2.30) выполняется. При этом 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 ветрового воздействия не превышает 12 с. Следует также отметить, что при малой величине момента инерции груза – варианты по рисунку 4.28 и рисунку 4.30, результаты практически не меняются, если в зависимости (3.34) убрать последнее слагаемое, направленное на дополнительное демпфирование колебаний груза. При больших значениях J_r последнее приводит к значительному затягиванию гашения угловых колебаний. Отсюда следует, что указанное слагаемое можно «подключать» только при значительных моментах инерции груза.

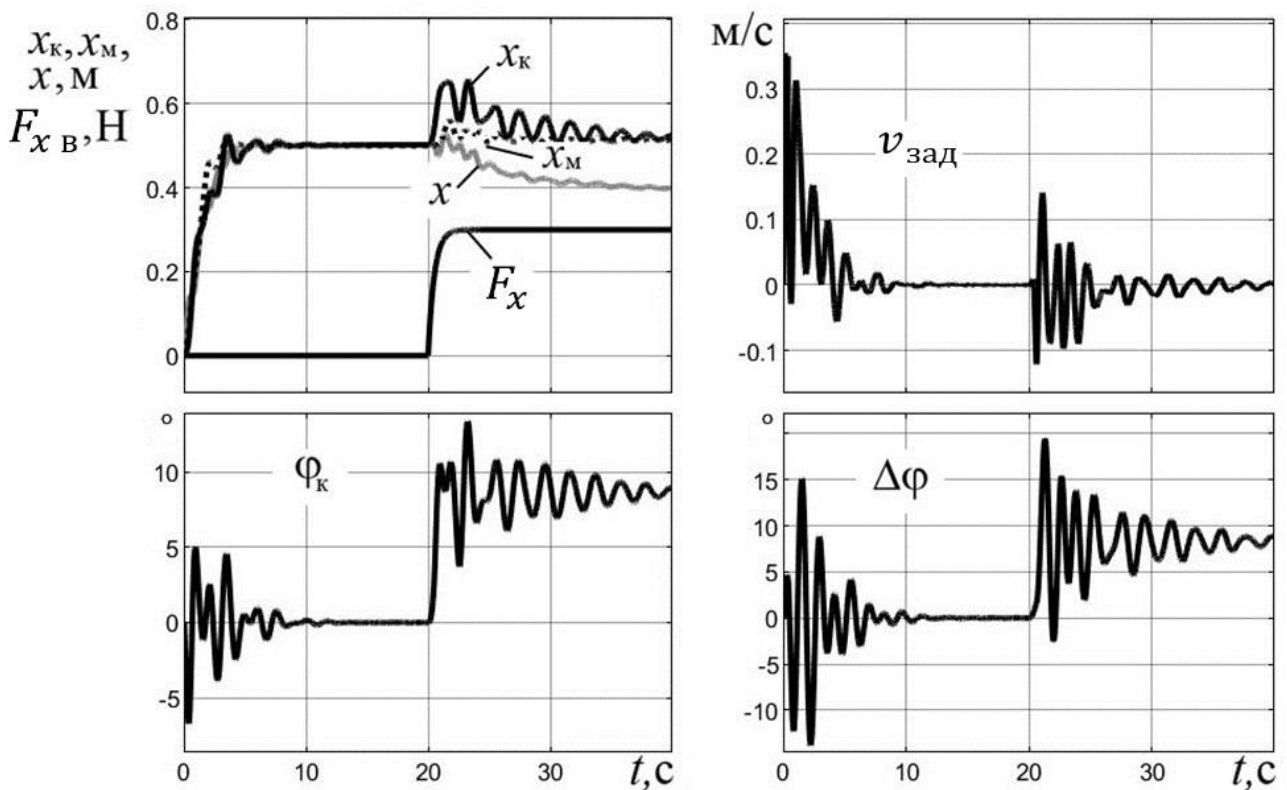


Рисунок 4.29 – Исследование системы управления при $l_k = 0,8 \text{ м}$, $r_r = 0,25 \text{ м}$

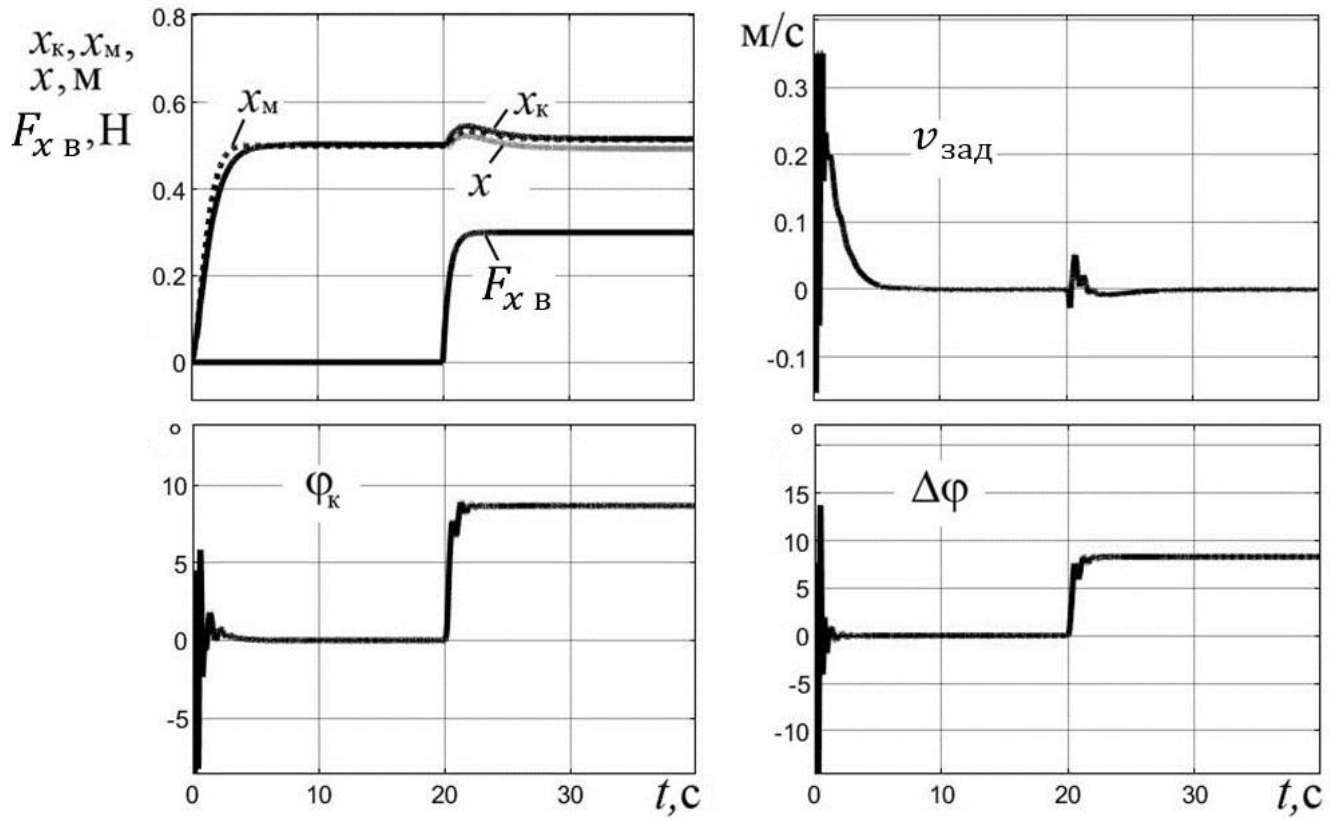


Рисунок 4.30 – Исследование системы управления при $l_k = 0,15$ м, $r_r = 0,05$ м

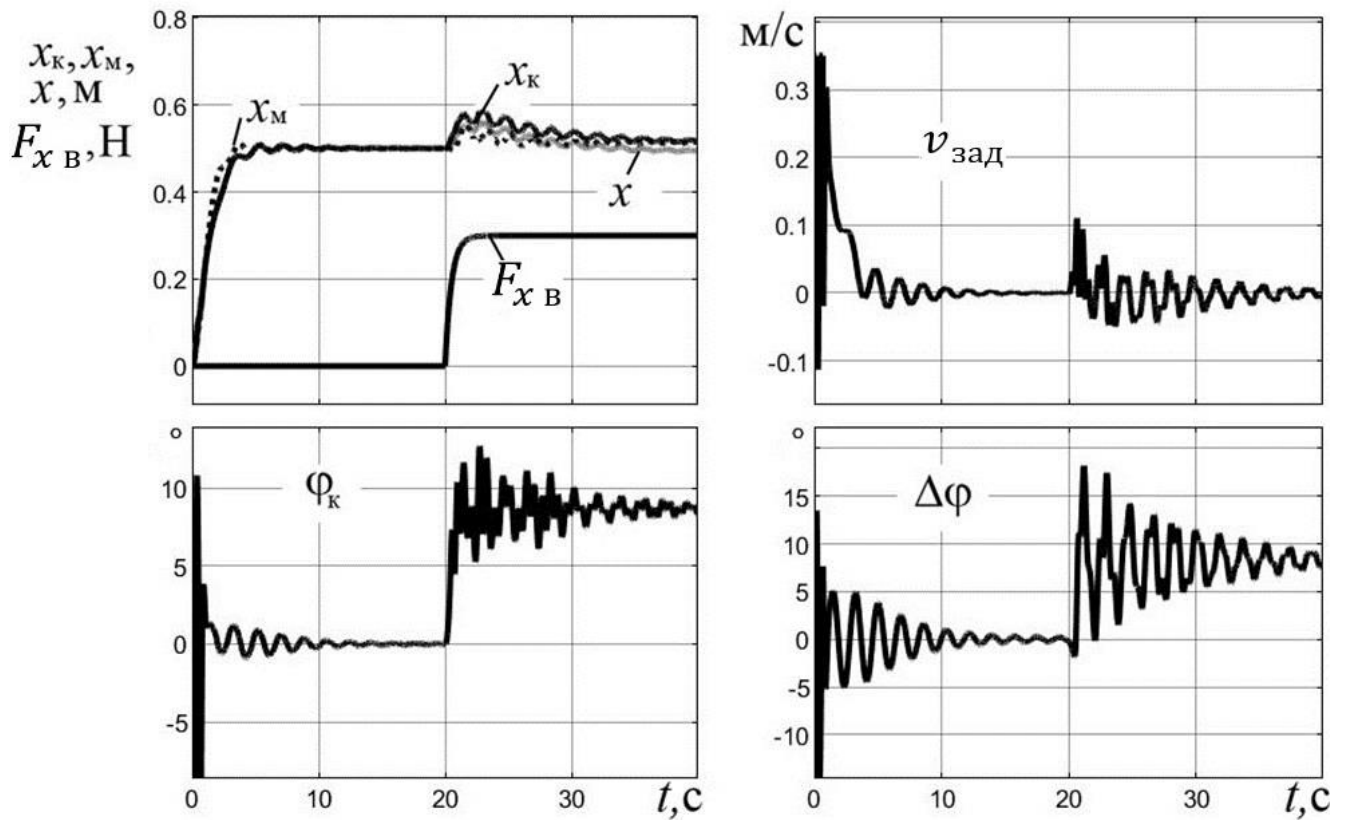


Рисунок 4.31 – Исследование системы управления при $l_k = 0,15$ м, $r_r = 0,25$ м

Результаты исследования показывают, что предлагаемая система управления мостовым краном для случая, когда параметры переносимого груза близки параметрам крюка, решает задачу по быстрому перемещению груза в целевую точку и гашению угловых колебаний, включая парирование ветровых возмущений. Это выполняется при текущей параметрической неопределенности характеристик крана, переносимого груза и внешних возмущений в широкой области их значений.

4.9 Выводы

1. В данной главе приведены результаты имитационных исследований адаптивного способа управления в программной среде Matlab/Simulink/SimMechanics (MultiBody).

2. Представлено исследование закона управления при перемещении груза по одной оси с имитацией ОУ в виде экспериментальной установки. В исследовании также имитировалось внешнее возмущение в виде ветра. Среднее время регулирования составило около 3 с, время гашения колебаний после внешнего возмущения – 2 с.

3. Проведен сравнительный анализ адаптивного способа управления и двух наиболее распространенных методов управления МК (управление с нечёткой логикой и ПИД-регулированием) при большом многообразии параметров ОУ. Лучшие результаты переходных процессов получены при адаптивном способе управления: среднее время регулирования на экспериментальной установке составляет 4,2 с. В то время, как при управлении с нечёткой логикой – 4,7 с, при ПИД-регулировании – 9,2 с. На имитационной модели грузового крана среднее время регулирования при адаптивной системе управления составило 7,63 с, при управлении с нечёткой логикой – 8,58 с, при ПИД-регулировании – 19,97 с. Среднее увеличение производительности при адаптивном способе управления относительно ПИД-регулирования составило 17,8%, и относительно управления с нечёткой логикой – 2,7%.

4. По моделям используемой экспериментальной установки и полноразмерного грузового крана исследована зависимость устойчивости системы от изменения основных факторов (уровень зашумленности сигналов ОС, значение назначаемой оценки \hat{a}_{x1}^V , время задержки управляющего сигнала), влияющих на качество адаптивной СУ. Максимально допустимая величина зашумленности сигналов ОС в виде среднеквадратичного отклонения для $\dot{\varphi}_x$, $\ddot{x}_{гр}$, x для экспериментальной установки составили 0,8 град/с, 0,8 м/с² и 0,01 м, для полноразмерного крана – 0,8 град/с, 0,8 м/с² и 0,08 м соответственно. По результатам исследования определили, что СУ устойчива, если значение оценки \hat{a}_1^V находится в диапазоне от a_1^V до $15 a_1^V$ для макета МК, 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 и 0,11 с при текущих настройках СУ.

5. Представлена эффективность СУ при перемещении груза одновременно по двум горизонтальным осям, параметры ОУ назначались согласно экспериментальной установке МК. Среднее время регулирования по двум осям составило 3 с.

6. Проведено исследование адаптивного закона управления при подъёме и перемещении груза по двум горизонтальным осям. В качестве ОУ имитировался реальный грузовой МК. Среднее время регулирования переходного процесса по двум осям составило 8 с.

7. Представлено исследование ЗУ двухмаятниковым подвесом мостового крана в условиях текущей неопределенности параметров крана, груза и внешних возмущений. Время успокоения угловых колебаний после начала перемещения груза и ветрового воздействия не превышает 12 с.

5 Исследование адаптивного способа управления на макете мостового крана при перемещении груза по одной оси

При разработке большинства систем управления, упомянутых выше, их исследование нередко сводилось только на имитационных математических моделях. Назначались точные параметры груза и крана, учитывалось ограниченное количество переменных, влияющих на динамику системы, и условий работы. Параметры и условия ограничивались только представлением автора о моделируемом ОУ. Однако при данном способе исследования достаточно сложно учесть и предусмотреть все возможные факторы, влияющие на поведение ОУ в реальных условиях, и оценить тонкости дальнейшей апробации СУ на реальном объекте.

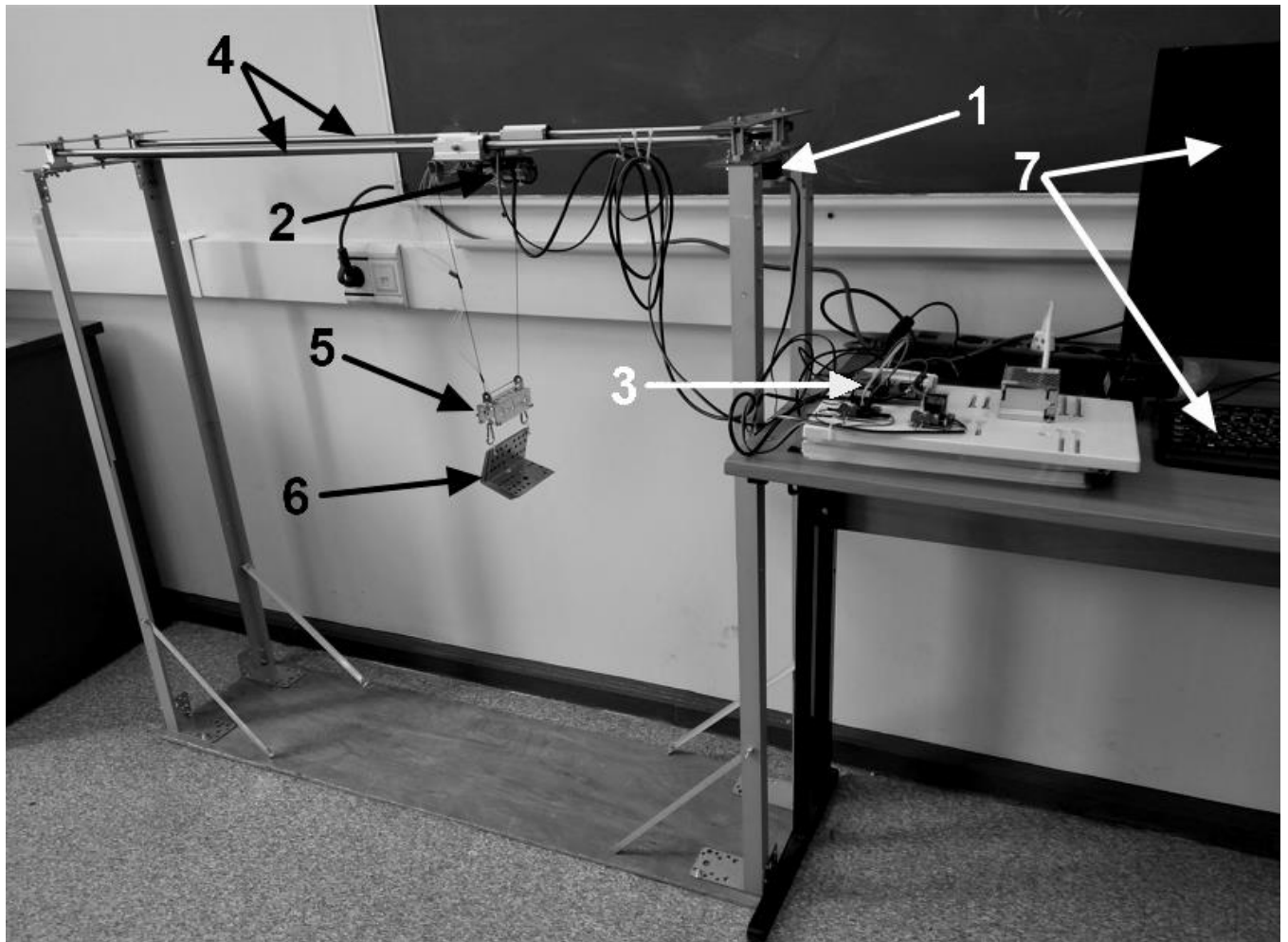
Для возможности исследования существующих и отладки новых способов управления краном на реальном ОУ, был собран макет, полностью повторяющий динамику движения МК [168]. Собранный макет крановой установки представлен на рисунке 5.1.

Испытания системы на экспериментальной установке, как это было сделано в работе [179], позволяет проверить работоспособность системы на реальном ОУ с учетом всех факторов, присущих практической эксплуатации крана, которые достаточно сложно предусмотреть при аналитическом моделировании. Исследования СУ на экспериментальной установке позволит более детально произвести отладку алгоритма управления перед его внедрением на грузовой кран, и в последующем может в значительной мере сократить время на пусконаладочные работы.

Основная конструкция экспериментальной установки выполнена из алюминиевого уголка и металлических цилиндрических направляющих. Размеры установки: длина 1250 мм, ширина 250 мм, высота от 1000 мм до 1400 мм. Высота макета регулируется за счёт раздвижной конструкции ножек. Рабочий ход тележки составляет 1200 мм, максимальная высота подъема груза от пола – 1300 мм.

В качестве привода тележки используется шаговый двигатель NEMA 17 со следующими характеристиками: момент удержания 4,8 кг·см; ток 2,5 А; угловой шаг

1,8 град/импульс. Двигатель расположен на неподвижной раме крановой установки. Поступательное движение от двигателя к тележке передается за счёт зубчатого ремня, который натягивается с разных сторон макета с помощью зубчатых колес. С одной стороны зубчатое колесо расположено на валу шагового двигателя, с другой стороны – на неподвижной оси.



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.

Рисунок 5.1 - Макет мостового крана

Тележка крана передвигается по двум стальным цилиндрическим осям диаметром 12 мм, посредством линейных подшипников качения серии SCL.

Мотор редуктор, используемый для поднятия и опускания груза, закреплён на нижней части тележки. На его валу расположено колесо, которое наматывает леску с

грузом. Мотор редуктор включает в себя электродвигатель постоянного тока с напряжением питания 12 В и планетарный редуктор, все узлы собраны в едином корпусе.

В качестве контроллера используется одноплатный компьютер Raspberry Pi 3 Model B+ с установленной операционной системой Raspbian. Для определения угла отклонения троса от вертикальной оси и линейного ускорения используется датчик GY-521 [169], построенный на микромеханическом чипе MPU-6000/MPU-6050, измеряющем угловые скорости и линейные ускорения по трем осям. В качестве значения линейного ускорения $\ddot{x}_{гр}$ по оси x принимаем равенство $\ddot{x}_{гр} \approx a_{x \text{ акс}} - g\varphi_x$, где $a_{x \text{ акс}}$ – линейное ускорение крюка по оси x , измеренное датчик GY-521. Угол φ_x определяется путем интегрирования значения угловой скорости, полученного с датчика гироскопа. При включении контроллера предусмотрен алгоритм определения дрейфа сигнала и выставление нулевого положения датчика. Датчик GY-521 установлен на 3 см выше места крепления груза.

Структурная схема системы управления представлена на рисунке 5.2. На ней изображены все основные компоненты управления. Контроллер осуществляет сбор данных с датчика GY-521 и принимает команды оператора, которые задаются с компьютера. Далее, после обработки полученной информации формируется управляющие сигналы на модули управления двигателями постоянного тока L298N, с которых, в свою очередь, осуществляется управление приводами тележки и подъёмного механизма. Персональный компьютер необходим для удаленного подключения к Raspberry Pi. Программный код алгоритма управления написан на языках высокого уровня Python и C. Упрощенная блок-схема разработанного алгоритма управления тележкой крана представлена на рисунке 5.3. На рисунке используются следующие обозначения: $t_{тек}$ – период времени работы системы; $t_{зад}$ – заданное время работы алгоритма. В среднем за один цикл работы алгоритма производится 75 простых операций (сложение умножение и т.д.).

В процессе управления крановой установкой производится запись необходимых переменных СУ для анализа эффективности ее работы: расстояние, пройденное

тележкой; расстояние, пройденное подвешенным грузом; значение угла отклонения троса от вертикальной оси; управляющий сигнал. Запись значений производится в виде вектора состояний (например, $x = (x_1, x_2, \dots, x_i)$). Для удобства анализа результатов работы системы, на основе полученных векторов состояний строятся графики их значений от времени с помощью библиотеки Matplotlib [175].

В рамках опытных испытаний и отладочных работ для улучшения качества управления в алгоритм было добавлено дополнительное условие, при котором будет производиться текущая идентификация оценок параметров ОУ, и комплементарный фильтр первого порядка, предназначенный для определения $\ddot{x}_{гр}$ по показаниям акселерометра и датчика угловой скорости. Ввиду того, что при приближении груза к заданной точке, поведение ОУ становится близко к линейному, текущая идентификация в этот момент отключается. А при вычислении $v_{x\text{ зад}}$ используются оценки, полученные на предыдущих итерациях. Ранее, при исследовании СУ на имитационной модели, подобного рода изменения алгоритма управления не требовались.

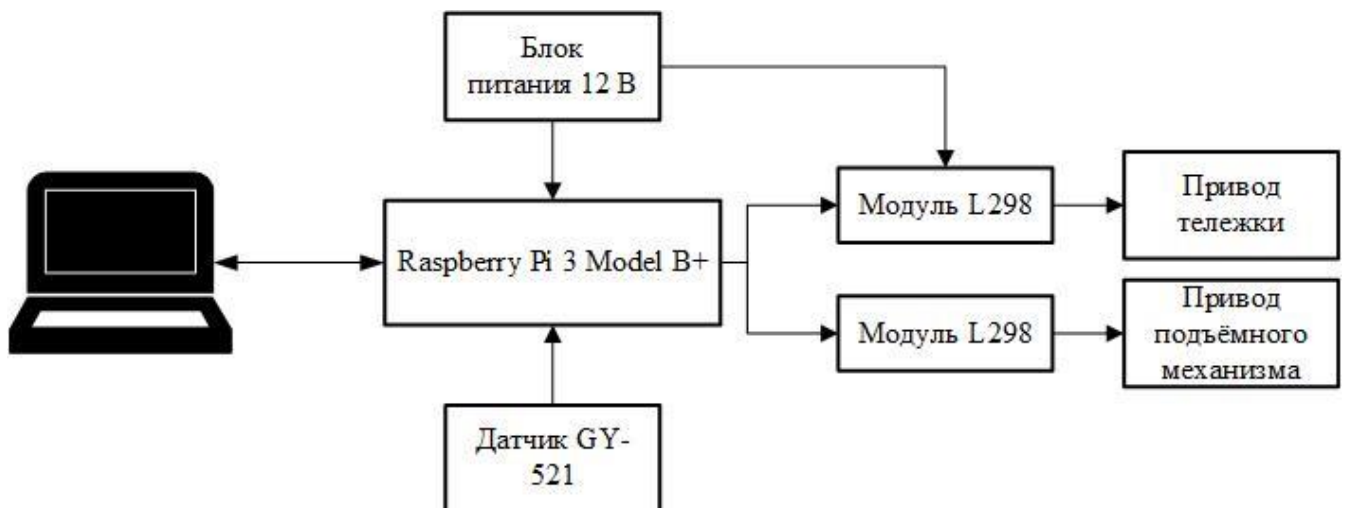


Рисунок 5.2 - Структурная схема СУ макетом мостового крана

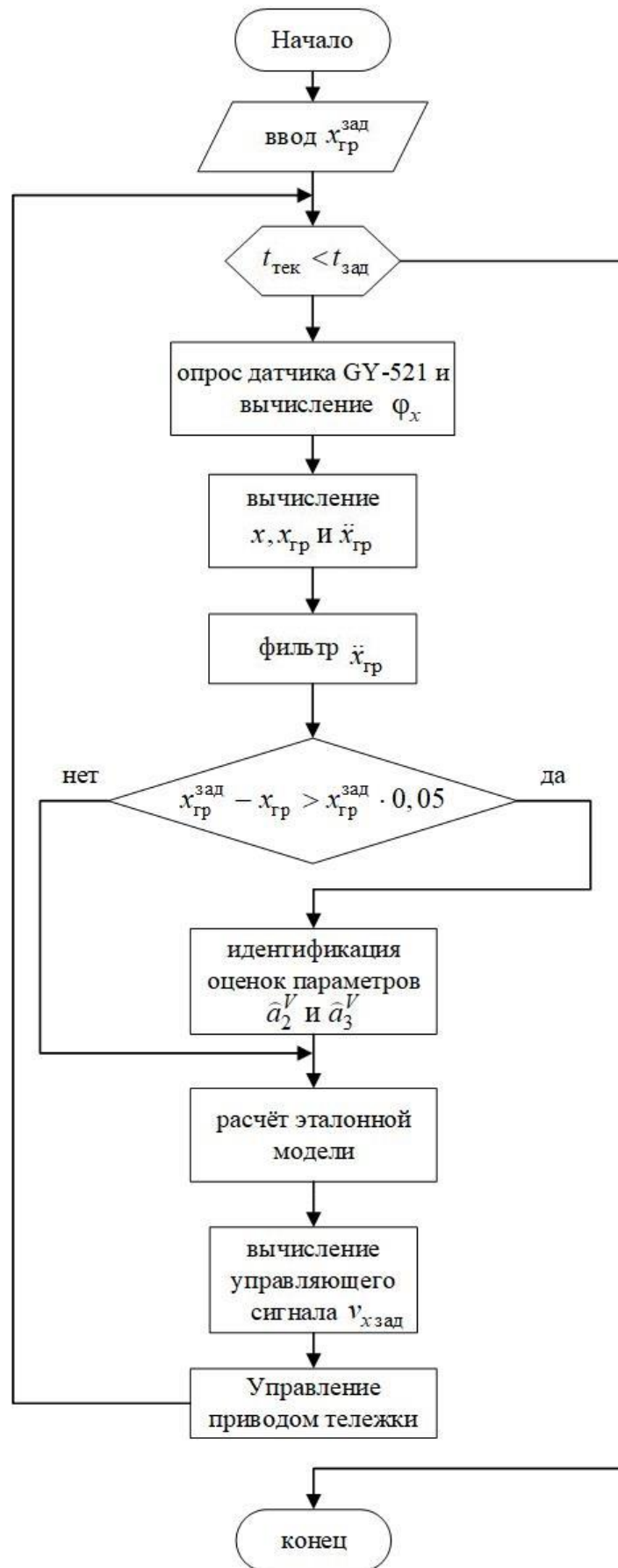


Рисунок 5.3 – Блок-схема алгоритма адаптивного управления экспериментальной установкой

Исследования СУ на макете МК производилось с различными вариантами параметров груза и длины троса: $m_r = 1,05$ кг, $m_r = 0,7$ кг, $l = 0,61$ м и $l = 0,3$ м. Длина троса в течение одного исследования постоянна. Масса тележки $m_r = 1,05$ кг. Значение φ_x – определялся интегрированием измеренного $\dot{\varphi}_x$. Определение переменной x осуществляется по количеству сформированных управляющих импульсов шагового двигателя (привода тележки). Момент инерции грузов рассчитывался согласно предложенному способу в работе [167].

Параметры ЭМ (5): $\xi_m = 0,95$ и $\omega_m = 1,92\text{с}^{-1}$. Заданное расстояние $x_{\text{гр}}^{\text{зад}} = 0,5$ м. Параметры алгоритма идентификации и ЗУ: дискретный момент времени зависит от времени прохождения одного цикла программы контроллера, среднее значения составляет $\Delta t = 0,01$ с, $\vartheta = 100$, $\beta = 0,993$; $\hat{a}_1^V = 0,0334$.

Параметры ЭМ и алгоритма идентификации во время всех исследований не изменялись.

Для анализа свойств парирования внешних возмущений в каждом исследовании по завершению переходного процесса, кратковременным импульсным воздействием вновь раскачивали груз, имитируя воздействие ветра.

На рисунке 5.4 представлен результат исследования адаптивной СУ при следующих параметрах: $m_r = 1,05$ кг, $J_y = 0,011655$ кг · м², $l = 0,61$ м.

Для анализа результатов исследования, полученных на макете мостового крана и в программной среде Matlab/Simulink/SimMechanics(MultiBody), проведены дополнительные испытания СУ. В рамках данных исследований при имитационном моделировании и натурном исследовании на экспериментальной установке параметры груза и длины его подвеса назначались одинаковыми. На рисунке 5.7 приведены графики координат перемещения груза по оси X от времени, полученные при аналитическом и натурном исследовании, также отображается график заданного эталона, задающий требуемые характеристики перемещения груза.

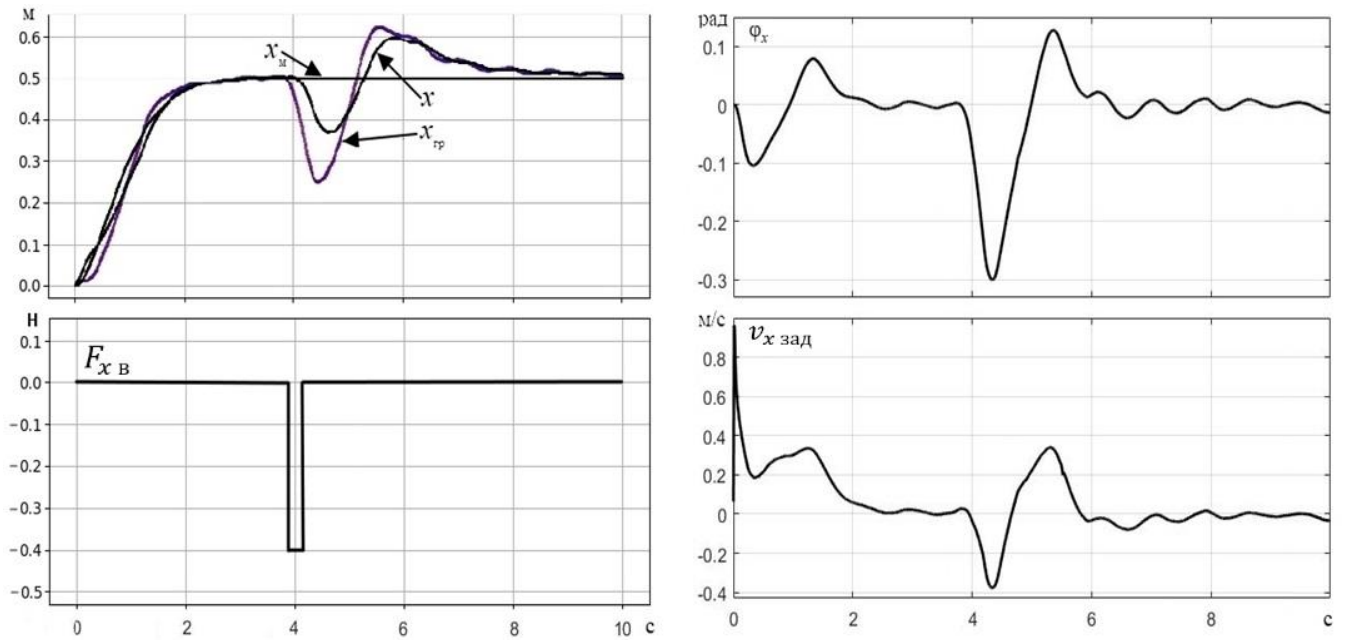


Рисунок 5.4 - Результаты исследования при параметрах: $m_r = 1,05$ кг,
 $J_y = 0,011655$ кг · м², $l = 0,61$ м

На рисунке 5.5 представлен результат исследования адаптивной СУ при следующих параметрах: $m_r = 1,05$ кг, $J_y = 0,011343$ кг · м², $l = 0,3$ м.

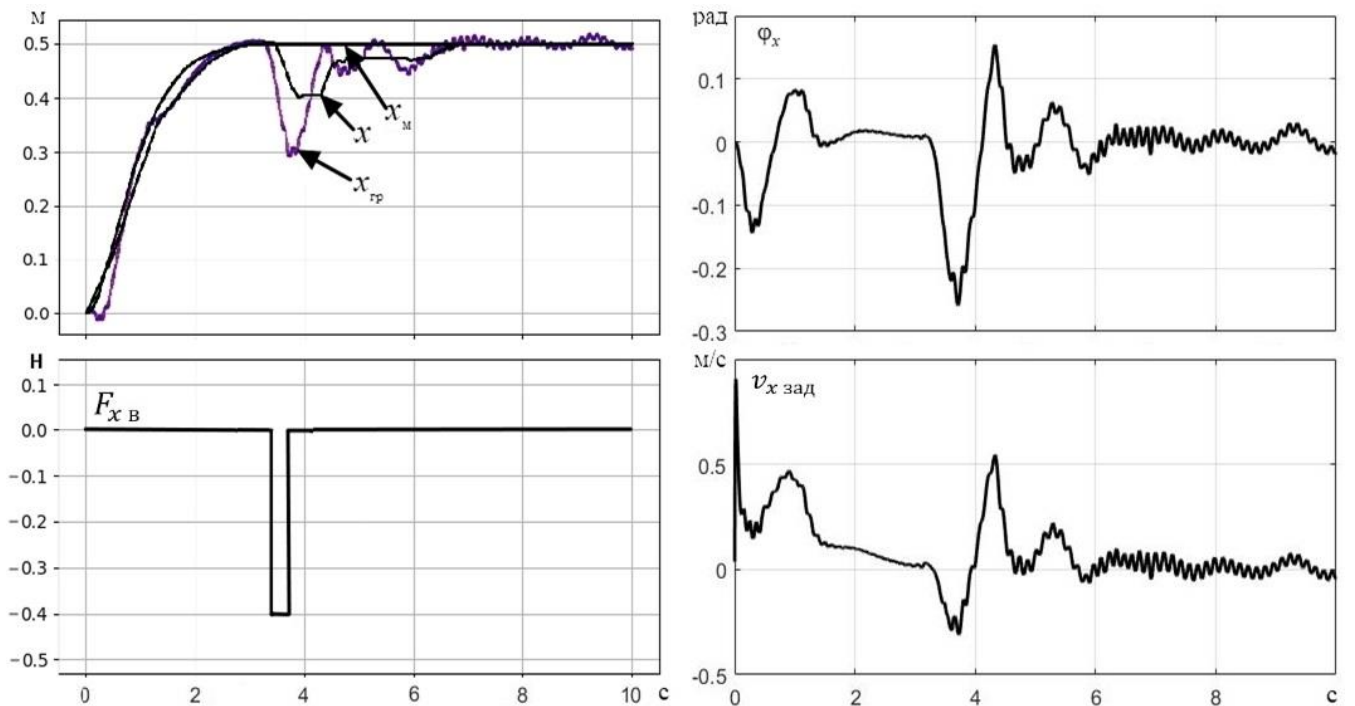


Рисунок 5.5 - Результаты исследования при параметрах: $m_r = 1,05$ кг,
 $J_y = 0,011343$ кг · м², $l = 0,3$ м

На рисунке 5.6 представлен результат исследования адаптивной СУ при следующих параметрах: $m_r = 0,7$ кг, $J_y = 0,000379$ кг · м², $l = 0,3$ м.

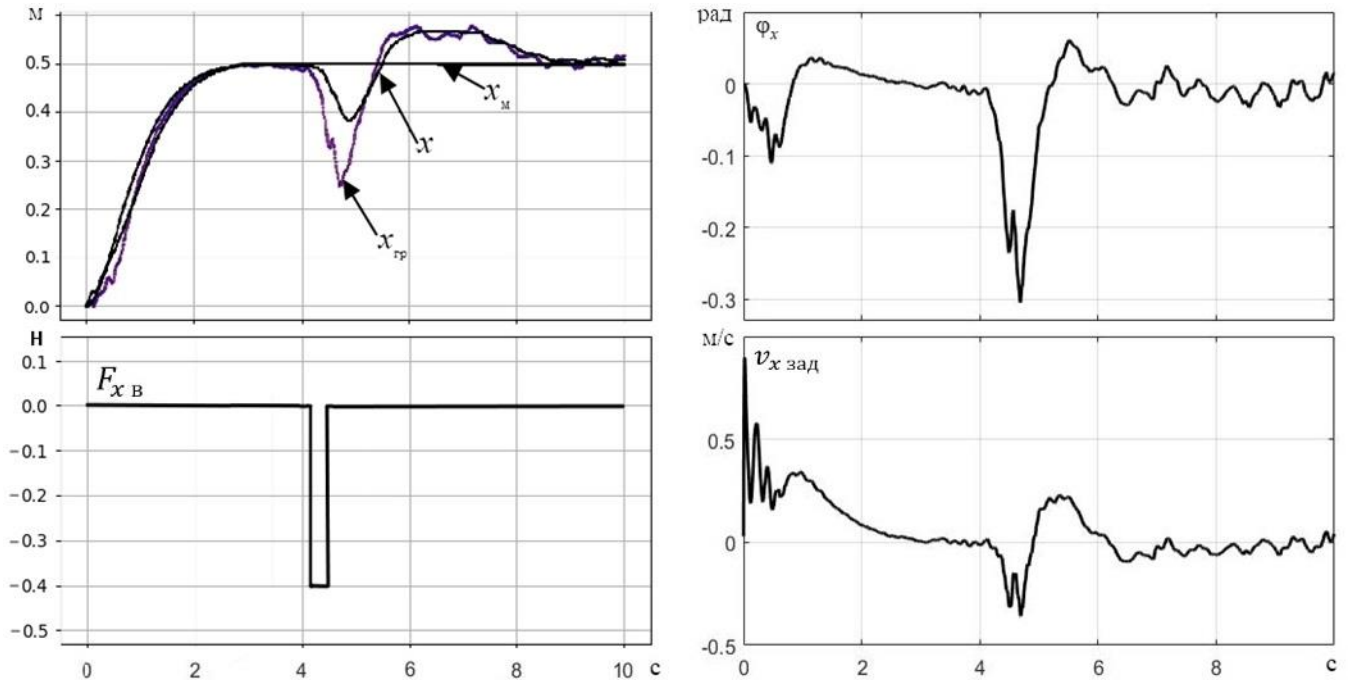


Рисунок 5.6 - Результаты исследования при параметрах: $m_r = 0,7$ кг, $J_y = 0,000379$ кг · м², $l = 0,3$ м

При параметрах ОУ $m_r = 0,7$ кг, $J_y = 0,000379$ кг · м², $l = 0,3$ м (рисунок 5.7) среднеквадратичное отклонение динамики перемещение груза при имитационном моделировании от заданной ЭМ в момент переходного процесса составило 4,1%, в сравнении с результатами экспериментальной установкой и ЭМ – 6,4%.

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 перемещения груза в заданное положение $x_{гр}^{зад} \pm 5\%$).

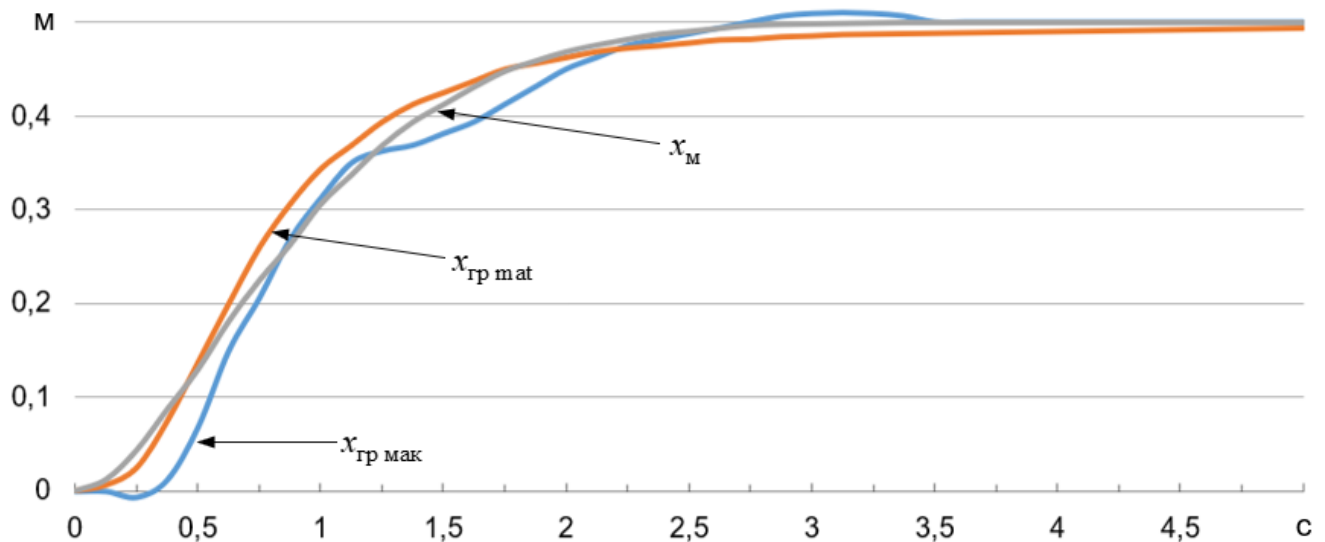


Рисунок 5.7 - Результаты исследования при параметрах: $m_r = 0,7$ кг, $l = 0,3$ м, $J_y = 0,000379$ кг · м²

На рисунке используются следующие обозначения: $x_{гр\ макс}$ – координата перемещения груза по оси X при исследовании СУ на макете мостового крана; $x_{гр\ mat}$ – координата перемещения груза по оси X при исследовании СУ в программной среде Matlab.

Результаты исследования на макете МК подтверждают эффективность адаптивной системы управления с неявной эталонной моделью, идентификационным алгоритмом и «упрощенными» условиями адаптируемости. Транспортировка груза происходит с минимальными колебаниями груза и обеспечивается его точное позиционирование. Время регулирования составило не более 3 с, груз перемещается согласно заданной траектории ЭМ.

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 4,2 с.

В рамках исследования СУ на экспериментальной установке была обнаружена необходимость доработки алгоритма управления для повышения качества работы, добавили дополнительное условие, при котором происходит идентификация оценок

параметров ОУ, и комплементарный фильтр первого порядка, предназначенный для определения $\ddot{x}_{гр}$.

5.1 Выводы

1. В данной главе описывается разработанная экспериментальная установка МК и исследование на ней адаптивного способа управления.

2. Представлены основные компоненты собранного макета МК. Основная конструкция состоит из алюминиевого уголка и стальных направляющих, в качестве исполнительных механизмов используются шаговый двигатель для перемещения тележки крана и двигатель постоянного тока для подъёма/спуска груза, и контроллера – Raspberry Pi.

3. Разработан алгоритм адаптивной СУ и написан программный код на языке C и Python, который обеспечивает сбор данных с датчиков ОС, управление приводами макета и записи данных, описывающих поведение системы для построения графиков переходных процессов. Количество простых операций на цикл программы составляет порядка 75.

4. Был модернизирован алгоритм управления краном посредством добавления комплементарного фильтра первого порядка и условия включения идентификатора для текущей оценки параметров ОУ.

5. Проведены исследования при большом многообразии грузов и длины его подвеса, масса груза использовалась в диапазоне 0,5 – 3 кг, длина подвеса от 0,2 м до 0,9 м. Груз перемещается согласно заданной траектории ЭМ в назначенное место, парируется внешнее возмущение. Время регулирования составило не более 3 с. Что подтверждает работоспособность данного метода.

Заключение

Настоящая диссертационная работа отражает результаты исследований, целью которых является повышение производительности МК на производстве, за счёт адаптивной автоматизации.

Сформулировали основные положения и результаты задачи:

1. Проведен анализ существующих способов управления крановыми системами с подвесным креплением груза. Количество работ, посвященных активным способам гашения маятниковых колебаний груза, в настоящее время достаточно большое, включающее сотни публикаций, из чего можно сделать вывод, что данное направление является актуальным в развитии кранового оборудования. Однако большинство существующих СУ не способны обеспечить качественного управления при практической эксплуатации в условиях текущей неопределенности о параметрах крана и внешних возмущениях. И одним из перспективных направлений является адаптивная СУ с неявной ЭМ, идентификационным алгоритмом с оцениванием параметров крана в текущий момент времени и «упрощенными» условиями адаптируемости.

2. На основании уравнения Эйлера-Лагранжа сформированы математические модели одномаятниковой и двухмаятниковой 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. Математические модели приводятся с учетом воздействия сил трения при перемещении тележки крана и ветрового возмущения, действующего на переносимый груз без учёта массы троса и трения углового движения, а также без учёта начальных значений переменных по положению и скорости груза. Учитывая небольшие углы отклонения груза, малую скорость углового перемещения и физику движения, вывели линеаризованную систему уравнений. Данное упрощение обосновано использованием последующей аппроксимации за счёт оценок параметров, доставляемых алгоритмом текущей

идентификации. Определены собственные частоты колебаний маятниковых систем крана, необходимых для синтеза закона управления.

3. На основе полученных моделей одномаятниковой и двухмаятниковой системы обоснован способ адаптивного управления. Строится закон адаптивного управления с использованием схемы, включающей алгоритм текущей параметрической идентификации, неявную эталонную модель, «упрощенные» условия адаптируемости с непосредственным отслеживанием за перемещением крюка (груза) по свойствам назначенного эталона. Этот закон управления позволяет строить управление краном при текущей параметрической неопределенности свойств крана, переносимого груза и внешних возмущений. Определена ЭМ, задающая требуемые характеристики перемещения груза, в виде колебательного звена со значениями переменных в начальный момент времени, равными соответствующим для исходного объекта. Используя второй метод Ляпунова, определены условия устойчивости замкнутой системы управления и параметры ЭМ.

Предложен к использованию в системе управления алгоритм идентификации, в текущем времени определяющий оценки неизвестных параметров ОУ – рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания. В соответствии с «упрощенными» условиями адаптируемости, требования к качеству функционирования алгоритма идентификации сводятся к требованию сходимости невязки идентификации при функционировании алгоритма текущей идентификации и выбору в определенном диапазоне постоянной оценки коэффициента \hat{a}_1^V .

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 предложенного способа управления с тремя разными задачами управления: управления по одной оси, по двум и двухмаятниковое движение подвеса груза с различными массо-инерционными свойствами груза, длины его подвеса и возмущениями в программной

среде Matlab/Simulink/SimMechanics(MultiBody). Исследовали перемещение груза как по одной оси, так и одновременно по двум осям в горизонтальной плоскости (имитировалось одновременное движение тележки и поперечной балки МК). Результаты показали высокую эффективность предложенной адаптивной СУ. Она обеспечивает точное перемещение груза за короткий промежуток времени, для экспериментальной установки порядка 3 с, для полноразмерного крана 8 с, предотвращает раскачивание груза во время ускорения и торможения тележки, а также способна парировать внешнее возмущение, например, воздействие ветра. При этом система требует минимальных начальных настроек. Исследования показали, что экспериментальная установка способна работать с уровнем помех датчиков по ускорению до $0,8 \text{ м/с}^2$, по угловой скорости до $0,8 \text{ град/с}$, по линейному перемещению до $0,01 \text{ м}$, задержкой в формировании управления до $0,057 \text{ с}$. СУ полноразмерного грузового крана способна работать с уровнем помех датчиков по ускорению до $0,8 \text{ м/с}^2$, по угловой скорости до $0,8 \text{ град/с}$, по линейному перемещению до $0,08 \text{ м}$, задержкой в формировании управления до $0,11 \text{ с}$. Рекомендуемый шаг дискретности управления $0,01 \text{ с}$. Повышение производительности погрузочно-разгрузочных работ относительно исследуемых общеизвестных способов управления составило до 20%.

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 нечеткой логикой – 2,7%. Разность в производительности исследуемых способов управления может возрасти при установке на кран более скоростного привода.

6. Разработана экспериментальная установка МК, позволяющая оценить функциональность предлагаемой системы управления краном в условиях реального оборудования, а также для дальнейшей апробации СУ на реальном объекте. Подобраны и настроены необходимые датчики ОС. Разработан программный код алгоритма адаптивного ЗУ, фильтрации и обработки данных с датчиков ОС на языках

Python и С. Результаты исследования на макете МК подтвердили его работоспособность. Время регулирования составило не более 3 с. Груз перемещается согласно заданной траектории эталонной модели. Обеспечивается точное позиционирование груза и демпфирование маятниковых колебаний.

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 при имитационном исследовании, 7% в сравнении ЭМ и результатов, полученных при исследовании на макете мостового крана.

8. Стоит отметить, что СУ можно построить на доступном и сравнительно недорогом оборудовании. Поскольку высокой точности от измерительных приборов для организации ОС не требуется. Предлагаемый метод может являться основой для создания реальных СУ краном любых типов, работающих с подвешенным грузом.

В рамках подготовки диссертационной работы выступил в 8 всероссийских и международных научно-практических конференциях, участвовал в 3 научно-исследовательских и опытно конструкторских работах (НИОКР), опубликовано 13 научных статей (4 из них ВАК уровня) и зарегистрирован патент на изобретение № RU 2744647 C1 [180]. Получено 2 акта о реализации результатов диссертационной работы.

Список используемых источников

1. Щедринов А.В. Автоматическая система успокоения колебаний груза для мостового крана / А.В. Щедринов, С.А. Сериков, В.В. Колмыков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. – №8. – С. 13-17.
2. Neitzel R.L. A review of crane safety in the construction industry / R.L. Neitzel, N.S. Seixas, K.K. Ren. // Appl. Occup. Environ. Hyg. 16 (2001) 1106-1117.
3. Rishmawi S. Tip-Over Stability Analysis of Crawler Cranes in Heavy Lifting Applications Master's Thesis / S. Rishmawi. -Georgia Institute of Technology, 2016. –124 p.
4. Вайнсон А.А. Крановые грузозахватные устройства / А.А. Вайнсон, А.Ф. Андреев. - «Машиностроение». 1982.
5. Yu W. Stable neural PID anti-swing control for an overhead crane / W. Yu, X. Li, F. Panuncio // Intell. Autom. Soft Comput. –20. 2014. pp. 145–158.
6. Лобов, Н.А. Динамика грузоподъемных машин текст / Н.А. Лобов. - М.: Машиностроение, 1987. 160 с.
7. Лобов, Н.А. Динамика передвижения кранов по рельсовому пути текст / Н.А. Лобов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана 2003. - 230 с.
8. Балашов В П. Боковые силы в кранах мостового типа в периоды пуска и торможения / В.П. Балашов // Тр. ВНИИПТмаша. 1970. - Вып. 5 (100). - С. 45-59.
9. Балашов, В.П. Исследование динамических характеристик металлоконструкций мостовых кранов / В.П. Балашов // Тр. ВНИИПТмаша. 1969. - Вып. 7 (94). Исследование крановых металлоконструкций. - С. 91-127.
10. Балашов, В. П. Нагрузки кранов мостового типа при отдельном приводе механизма передвижения / В.П. Балашов // Тр. ВНИИПТмаша. 1970. - Вып. 1 (96). Надежность подъемно-транспортных машин. - С. 96-103.
11. Cheng Liu. Research on application of fuzzy adaptive PID controller in bridge crane control system / Liu Cheng, H. Zhao, Y. Cui // 5th International Conference on

- Software Engineering and Service Science, Jilin Province. China. -2014, pp. 971–974.
12. Ahmad M.A. Comparison of optimal and intelligent sway control for a lab-scale rotary crane system / M.A. Ahmad, R.E. Samin, M.A. Zawawi // Second Int. Conf. Comput. Eng. Appl., IEEE. Bali, Indonesia, 2010, pp. 229–234.
 13. Щербаков В. С. Система гашения пространственных колебаний груза, перемещаемого мостовым краном / В. С. Щербаков, М. С. Корытов, Е. О. Вольф // ТРАНСПОРТ. ТРАНСПОРТНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ. Вестник СибАДИ. -№ 6 (40). -2014, -С. 56-61.
 14. Рыжиков В.А. Демпфирование колебаний груза в механизме подъема крана / В.А. Рыжиков Л.А. Туркеничева // ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. СЕВЕРОКАВКАЗСКИЙ РЕГИОН. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. -2010. -№ 3 -С. 48-50.
 15. Анисимов В.А. Разработка кранов-манипуляторов / В.А. Анисимов, О.Е. Смирнов // Строительные и дорожные машины, 1996. – №8. – С. 12-17.
 16. Бок Т. Роботизация строительных процессов / Т. Бок – М.: ВНИИНТГТИ, Сер. «Технология, механизация и автоматизация в строительстве», 1995. – №4. – 68с.
 17. Вайсон А.А. Подъемно-транспортные машины: учеб. для вузов / А.А. Вайсон. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 536 с.
 18. Вайсон А.А. Крановые захватные устройства: Справочник / А.А. Вайсон, В.Ф. Андреев – М.: Машиностроение, 1982. – 303 с.
 19. Дроздович В.А. Система для ограничения раскачивания груза на гибком подвесе / В.А. Дроздович // Машиностроение, 1985. – №7. – С. 34-38.
 20. Signer N.C., Seering W.P. Preshaping command inputs to reduce system vibration / N.C. Signer, W.P. Seering // ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, 1991. P. 76-82.
 21. Сохадзе А.Г. Мехатронная система грузоподъемного крана для автоматической стабилизации положения груза и управления его движением: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 05.02.05 / А.Г. Сохадзе. –2006. -18с.

22. Патент №2325317 РФ, МПК В66С13/18. Способ управления грузоподъемным краном и устройство для его осуществления / Затравкин М.И., Каминский Л.С., Маш Д.М., Пятницкий И.А., Федоров И.Г., Червяков А.П.; заявитель и патентообладатель ООО «НПП «ЭГО». – N 2006134885/11; заявл. 03.10.2006; опубл. 27.05.2008, Бюл. № 15. – 14 с.
23. Лещев В.А. Электропривод для демпфирования колебаний кранового груза / В.А. Лещев // М.: ОНМА. 2013. С.40-48.
24. Ramli L. Control strategies for crane systems: A comprehensive review / L. Ramli, Z. Mohamed, A. M. Abdullahi, H.I. Jaafar, I. M. Lazim // Mechanical Systems and Signal Processing. – 95, 2017, pp. 1–23.
25. Vaughan J. Control of tower cranes with double-pendulum payload dynamics / J. Vaughan, D. Kim, W. Singhose // IEEE Trans. Control Syst. Technol. – 2010. -pp. 1345-1358.
26. Nayfeh A.H. A delayed position feedback controller for cranes / A.H. Nayfeh, Z.N. Masoud, N.A. Nayfeh // in: Proc. UTAM Symp. Chaotic Dyn. Control Syst. Process. Mech. Rome, Italy, 2005, pp. 385-395.
27. Abdel-Rahman E.M. Dynamics and control of cranes: a review / E.M. Abdel-Rahman, A.H. Nayfeh, Z.N. Masoud, J. Vib. Control. – №9 –2003. pp. 863-908.
28. Ngo Q.H. Sliding-mode antisway control of an offshore container crane / Q.H. Ngo, K.S. Hong. IEEE/ASME Trans. Mechatronics. –№17 –2012. pp. 201-209.
29. Ramli Liyana. Control strategies for crane systems: A comprehensive review / Liyana Ramli, Z. Mohamed, Auwalu M. Abdullahi, H.I. Jaafar, Izzuddin M. Lazim // Mechanical Systems and Signal Processing – №95. –2017. –pp. 1-23.
30. Масандилов Л.Б. Электропривод подъемных кранов / Масандилов Л.Б. М.: МЭИ. 1998. 100с.
31. Смехов А.А., Ерофеев Н.И. Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами / А.А. Смехов – М.: Машиностроение, 1975, 293 с.
32. Капица П. Л. Маятник с вибрирующим подвесом / П.Л.Капица / УФН - М.: - № 44. - 1951. - С.7 -23.

33. Герасимьяк Р.П. Анализ колебаний троса и способов их подавления для грузоподъёмных механизмов / Р.П. Герасимьяк, В.А. Лещёв // Доклады БГУИР, -№7 (85), -2014. -С.83 – 90.
34. Saeidi H. A neural network self tuner based on input shapers behavior for anti sway system of gantry cranes / H. Saeidi, M. Naraghi, A.A. Raie. J. Vib // Control. – №19. –2013. -pp. 1936-1949.
35. Omar H.M., Control of gantry and tower cranes / Omar H.M. Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, –2003. –pp. 234-249.
36. Fujioka D. Robustness analysis of input-shaped model reference control on a double-pendulum crane / D. Fujioka, M. Shah, W. Singhose // Am. Control Conf., IEEE, Chicago, 2015, pp. 2561-2566.
37. Hu Y. Oscillation suppressing for an energy efficient bridge crane using input shaping / Y. Hu, B. Wu, J. Vaughan, W. Singhose // 9th Asian Control Conf., IEEE, Sabah, Malaysia, –2013. –pp. 178-201.
38. Fujioka D. Input-shaped model reference control of a nonlinear time-varying double-pendulum crane / D. Fujioka, W. Singhose // 10th Asian Control Conf., IEEE, Sabah, Malaysia, –2015. –pp. 142-161.
39. Garrido S. Anti-swinging input shaping control of an automatic construction crane / S. Garrido, M. Abderrahim, A. Gimenez, R. Diez, C. Balaguer // IEEE Trans. Autom. Sci. Eng. 5. –2008. –pp. 549-557.
40. Vaughan J. Multi-input shaping control for multi-hoist cranes / J. Vaughan, J. Yoo, N. Knight, W. Singhose // Am. Control Conf., Washington, USA. –2013. –pp. 3455-3460.
41. Vaughan J. A study of crane operator performance comparing PD-control and input shaping / J. Vaughan, A. Karajgikar, W. Singhose // Control Conf., San Francisco, USA, –2011, –pp. 545-550.
42. Singhose W. Reducing vibration by digital filtering and input shaping / W. Singhose, J. Vaughan // IEEE Trans. Control Syst. Technol. –№19. –2011. –pp. 1410-1420.

43. Rangunathan S. Filtering effects on input-shaped command signals for effective crane control / S. Rangunathan, D. Frakes, K. Peng, W. Singhose // IEEE Int. Conf. Control Autom. ICCA, Santiago, Chile, –2011, –pp. 1097-1101.
44. Masoud Z.N. A graphical approach to input-shaping control design for container cranes with hoist / Z.N. Masoud, M.F. Daqaq // IEEE Trans. Control Syst. Technol. –№14. –2006 –pp. 1070-1077.
45. Singhose W. Effects of hoisting on the input shaping control of gantry cranes / W. Singhose, L. Porter, M. Kenison, E. Kriikku // Control Eng. Pract. –№8. –2000. – pp. 1159-1165.
46. Sorensen K. A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes / K. Sorensen, W. Singhose, S. Dickerson // Control Eng. Pract. – №15. –2007. –pp. 825-837.
47. Omar H.M. Gantry cranes gain scheduling feedback control with friction compensation / H.M. Omar, A.H. Nayfeh. J. Sound // Vib. –2005. –pp. 1-20.
48. Mohd Tumari M.Z. Active sway control of a gantry crane using hybrid input shaping and PID control schemes / M.Z. Mohd Tumari, L. Shabudin, M. a Zawawi, L.H. Ahmad Shah // 2nd Int. Conf. Mech. Eng. Res. (ICMER 2013), Kuantan, –2013, – pp. 1-10.
49. Thalapil Jeslin. Input shaping for sway control in gantry cranes / Jeslin Thalapil. J. Mech. Civ. Eng. –№1 –2012. –pp 36-46.
50. Masoud Z.N. Frequency-modulation input shaping control of double-pendulum overhead cranes / Z.N. Masoud, K.A. Alhazza. J. Dyn // Syst. Meas. Control. – №136. –2014. –pp. 248-265.
51. Xie X. Vibration reduction for flexible systems by command smoothing / X. Xie, J. Huang, Z. Liang // Mech. Syst. Signal Process. –39 –2013. –pp. 461-470.
52. Ишматов З.Ш. Электропривод крановых механизмов перемещения с функцией предотвращения раскачивания груза / З.Ш. Ишматов, С.А. Бахматов // Электроприводы переменного тока. АСЕД -2018, -С. 53–57.

53. Кoryтов М.С. Аналитическое решение задачи разгона груза мостовым краном с постоянным ускорением при гашении колебаний грузового каната / М.С. Кoryтов, В.С. Щербаков, В.В. Титенко // Динамика систем, механизмов и машин. –2017. –Том 5, –№ 4. –С. 132-136.
54. Федорещенко Н.В. Управление колебаниями подъемно транспортных механизмов / Н.В. Федорещенко // Оптимизация режимов работы систем электроприводов. Межвузовский сборник. Красноярск: КрПИ, -1992. -С. 53-57.
55. Герасимьяк Р.П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р.П. Герасимьяк, В.А. Лещёв СМИЛ, -2008. – 192 с.
56. Кузнецов А.В. Интеллектуальные алгоритмы управления подъемно-транспортными механизмами / А. П. Кузнецов, А. В. Марков, М. К. Хаджинов, А. С. Шмарловский, Т. В. Гаврилик // Тр. конф. «Open Semantic Technologies for Intelligent Systems». Минск, -2011. -С. 493–504.
57. Raubar E., Vrančić D. Anti-Sway System for Shipto-Shore Cranes / E. Raubar, D. Vrančić // Strojniški vestnik. -2012. -№ 5. -pp. 338–344
58. Blackburn D. Shaping for Nonlinear Crane Dynamics / D. Blackburn, W. Singhose, J. Kitchen, V. Patrangenaru, J. Lawrence // Journal of Vibration and Control. – 2010. – № 16. –pp 477-501.
59. Huang J. Dynamics and swing control of mobile boom cranes subject to wind disturbances / J. Huang, E. Maleki, W. Singhose // IET Control Theory Appl. 7 - 2013 -pp 1187-1195.
60. Maghsoudi M.J. An optimal performance control scheme for a 3D crane / M.J. Maghsoudi, Z. Mohamed, A.R. Husain, M.O. Tokhi // Mech. Syst. Signal Process. 66-67 -2016 -pp 756-768.
61. Sorensen K. A controller enabling precise positioning and sway reduction in cranes with on-off actuation / K. Sorensen, W. Singhose, S. Dickerson // Control Eng. Pract. 15 -2007 -pp 825-837.

62. Maghsoudi M.J. An experiment for position and sway control of a 3D gantry crane / M.J. Maghsoudi, Z. Mohamed, A.F. Pratiwi, N. Ahmad, A.R. Husain // in: Int. Conference Intell. Adv. Syst., Kuala Lumpur, Malaysia, -2012, -pp. 497-502.
63. Masoud Z. A hybrid command-shaper for double-pendulum overhead cranes / Z. Masoud, K. Alhazza, E. Abu-Nada, M. Majeed // J. Vib. Control. 20 -2014 -pp 24-37.
64. Cutforth C. Adaptive input shaping for maneuvering flexible structures / C. Cutforth, L. Pao // Automatica 40 -2004 -pp 685-693.
65. Cole M.O.T. A discrete time approach to impulse based adaptive input shaping for motion control without residual vibration / M.O.T. Cole // Automatica 47 -2011 -pp 2504-2510.
66. Rhim S., Book W.J., Noise effect on adaptive command shaping methods for flexible manipulator control / S. Rhim, W.J. Book // IEEE Trans. Control Syst. Technol. 9 -2001 -pp 84-92.
67. Ahmad M.A. Analysis of IIR Filter with NCTF-PI control for sway and trajectory motion of a DPTOC System / M.A. Ahmad, R.M.T. Raja Ismail, M.S. Ramli, N. Hambali // in: 2010 Int. Conf. Electron. Devices, Syst. Appl., Kuala Lumpur, Malaysia, -2010, -pp. 54-58.
68. Ahmad M.A. Experimental investigations of low pass Filter techniques for sway control of a gantry crane system / M.A. Ahmad, F.R. Misran, M.S. Ramli, R.M.T. Raja Ismail // in: 2010 Int. Conf. Electron. Comput. Technol., Kuala Lumpur, Malaysia, -2010, -pp. 1-4.
69. Ahmad M.A. Infinite impulse response filter techniques for sway control of a lab-scaled rotary crane system / M.A. Ahmad, M.S. Ramli, R.M.T. Raja Ismail // in: 2010 Int. Conf. Comput. Model. Simul. (ICCMS 2010), Sanya, China, -2010, -pp. 192-196.
70. Glossiotis G. Payload sway suppression in rotary cranes by digital filtering of the commanded inputs / G. Glossiotis, I. Antoniadis // Proc. Inst. Mech. Eng. 217 -2003 -pp 99-109.

71. Economou D. Vibration reduction of gantry crane loads with hoisting using infinite impulse response (FIR) digital filters / D. Economou, I. Antoniadis // in: N.E. Mastorakis, L.A. Pecorelli-Pers (Eds.), *Adv. Syst. Sci. Meas. Circuits Control*, World Scientific and Engineering Academy and Society, -2001, -pp. 22-28.
72. Glossiotis G. Digital filter based motion command preconditioning of time varying suspended loads in boom cranes for sway suppression / G. Glossiotis, I. Antoniadis // *J. Vib. Control*. 13-2007 -pp. 617-656.
73. Huang J. Dynamics and swing control of double-pendulum bridge cranes with distributed-mass beams / J. Huang, Z. Liang, Q. Zang // *Mech. Syst. Signal Process.* 54 -2015 -pp. 357-366.
74. Huang J. Control of bridge cranes with distributed-mass payload dynamics / J. Huang, X. Xie, Z. Liang // *IEEE/ASME Trans. Mechatronics* 20 -2015 -pp. 481-486.
75. Tang R. Control of bridge cranes with distributed-mass payloads under windy conditions / R. Tang, J. Huang // *Mech. Syst. Signal Process.* 72-73 -2016 – pp. 409-419.
76. Omar H.M. Anti-swing control of gantry and tower cranes using fuzzy and time delayed feedback with friction compensation / H.M. Omar, A.H. Nayfeh // *J. Shock Vib.* 12 -2005 -pp. 73-89.
77. Марков А.В. Анализ колебаний троса и способов их подавления для грузоподъемных механизмов / А.В. Марков, А.А. Подковырова, М.К. Хаджинов, О.А. Шведова // *Доклады БГУИР*, -№7 (85), -2014. -С.83 – 90.
78. Manson G. A. Time-optimal control of and overhead crane model / G. A. Manson // *Optimal Control Applications & Methods*. -1982. -Vol. 3. -No. 2. -pp. 115-120.
79. Антипов А.С. Система стабилизации положения тележки крана с использованием сигмоидальной функции / А.С. Антипов, С.А. Краснова // *Мехатроника, автоматизация, управление*. -2019. Т. 20. -№ 10. -С. 609-614.

80. Толочко О.И. Гашение колебаний перемещаемых мостовыми кранами грузов при переменной длине каната / О.И. Толочко, Д.В. Бажутин // Завалишинские чтения. Санкт-Петербург. -2016. -С. 250-255.
81. Solihin M.I. Objective function selection of GA-based PID control optimization for automatic gantry crane / M.I. Solihin, Wahyudi, M.A.S. Kamal, A. Legowo // in: Int. Conf. Comput. Commun. Eng., Kuala Lumpur, Malaysia, -2008, -pp. 883-887.
82. Щербаков В.С. Активный способ гашения колебаний груза после остановки мостового крана / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, Е.О. Шершнева // Мехатроника, автоматизация, управление. -2016. Т. 17. -№ 6. -С. 368-374.
83. Корытов М.С. Обоснование значений коэффициентов регуляторов гашения колебаний груза мостового крана / М.С. Корытов, В.С. Щербаков, Е.О. Шершнева // Транспортное, горное и строительное машиностроение. -С. 12-19.
84. Енин С.С. Совершенствование системы управления электроприводами мостового крана для демпфирования колебаний подвешенного груза: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.09.03 / Енин Сергей Сергеевич. 2020. – 150 с.
85. Рогова Н.С. Разработка алгоритмов управления для перемещения груза порталным краном / Н.С. Рогова, В.Д. Юркевич // Сборник научных трудов НГТУ № 3. -2015. -С. 43-54.
86. Le Tuan Anh. Partial Feedback Linearization Control of Overhead Cranes with Varying Cable Lengths / Le Tuan Anh, Gook-Hwan Kim, Min Young Kim, SoonGeul Lee // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. -2012. Vol. 13, -N. 4. -pp. 501-507.
87. Yang B. Application of LQR techniques to the anti-sway controller of overhead crane / B. Yang, B. Xiong // in: Int. Conf. Manuf. Eng. Autom., Guangzhou, China, -2010, -pp. 1933-1936.

88. Inukai T. Control of a boom crane using installed stereo vision / T. Inukai, Y. Yoshida // in: 6th Int. Conf. Sens. Technol., West Bangal, India, -2012, -pp. 189-194.
89. Ouyang H. Load vibration reduction in rotary cranes using robust two degree of freedom control approach / H. Ouyang, G. Zhang, L. Mei, X. Deng, D. Wang // Adv. Mech. Eng. 8 -2016 -pp. 1-11.
90. Uchiyama N. Robust control of rotary cranes based on pole placement approach / N. Uchiyama, S. Takagi, S. Sano // in: 9th IEEE Int. Work. Adv. Motion Control, Istanbul, Turkey, -2006, -pp. 647-652.
91. Sano S. LMI approach to robust control of rotary cranes under load sway frequency variance / S. Sano, H. Ouyang, H. Yamashita, N. Uchiyama // J. Syst. Des. Dyn. 5 -2011 -pp. 1402-1417.
92. Wu Z. Model predictive control for improving operational efficiency of overhead cranes / Z. Wu, X. Xia, B. Zhu // Nonlinear Dyn. 79 -2015 -pp. 2639-2657.
93. Jolevski D. Model predictive control of gantry/bridge crane with anti-sway algorithm / D. Jolevski, O. Bego // J. Mech. Sci. Technol. 29 (2015) 827-834.
94. Kapernick B. Model predictive control of an overhead crane using constraint substitution / B. Kapernick, K. Graichen // in: 2013 Am. Control Conf., Washington, USA, -2013, -pp. 3973-3978.
95. Khatamianfar A. A new tracking control approach for 3D overhead crane systems using model predictive control / A. Khatamianfar, A.V. Savkin // in: 2014 Eur. Control Conf., Strasbourg, France, -2014, -pp. 796-801.
96. Vukov M. Experimental validation of nonlinear MPC on an overhead crane using automatic code generation / M. Vukov, W. Van, L. Boris, H. Hans, J. Ferreau, J. Swevers, M. Diehl // in: 2012 Am. Control Conf., Montreal, Canada, -2012, -pp. 6264-6269.
97. Arnold E. Anti-sway system for boom cranes based on a model predictive control approach / E. Arnold, O. Sawodny, J. Neupert, K. Schneider // in: IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom., Ontario, Canada, -2005, -pp. 1533-1538.

98. Neupert J. Tracking and anti-sway control for boom cranes / J. Neupert, E. Arnold, K. Schneider, O. Sawodny // *Control Eng. Pract.* 18 -2010 -pp. 31-44.
99. Pannil P. Load swing control of an overhead crane / P. Pannil, K. Smerpitak, V. Lamlao, T. Trisuwannawat // *Int. Conf. Control. Autom. Syst.*, Gyeonggi-Do, Korea, -2010, -pp. 1926-1929.
100. Spathopoulos M.P. Pendulation control of an offshore crane / M.P. Spathopoulos, D. Fragopoulos // *Int. J. Control.* 77 -2004, -pp. 654-670.
101. Spathopoulos M.P. Control design of a crane for offshore lifting operations / M.P. Spathopoulos, D. Fragopoulos // W. Isidori, F. Lamnabhi-Lagarrigue, W. Respondek (Eds.), *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Springer-Verlag, London Ltd, -2001, -pp. 469-486.
102. Smoczek J. Experimental verification of a GPC-LPV method with RLS and P1-TS fuzzy-based estimation for limiting the transient and residual vibration of a crane system / J. Smoczek // *Mech. Syst. Signal Process.* 62-63 -2015 -pp. 324-340.
103. Лещев В.А. Динамическая стабилизация подвешенного на гибкой нити груза / В.А. Лещев // *Электротехнічні та комп'ютерні системи - №3(79)*, -2011, С. 172-174.
104. Строганова А.И. Изучение вынужденных колебаний маятника с движущейся точкой подвеса / А.И. Строганова, В.И. Хаустова // М.: МВТУ -1981, С. 57-61.
105. Duong S.C. A hybrid evolutionary algorithm for recurrent neural network control of a three-dimensional tower crane / S.C. Duong, E. Uezato, H. Kinjo, T. Yamamoto // *J. Autom. Constr.* 23 -2012, -pp. 55-63.
106. Lee L. Parallel neural network combined with sliding mode control in overhead crane control system / L. Lee, P. Huang, Y. Shih, T. Chiang, C. Chang // *J. Vib. Control.* 20 -2014 -pp. 749-760.
107. Burananda A. Neural network based self-tuning control for overhead crane systems / A. Burananda, J. Ngamwiwit, S. Panaudomsup, T. Benjanarasuth, N. Komine // *Proc. 41st SICE Annu. Conf.*, Osaka, Japan, -2002, -pp. 1944-1947.

108. Abe A. Anti-sway control for overhead cranes using neural networks / A. Abe // *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control.* 7 -2011 -pp. 4251-4262.
109. Аксаментов Д.Н. Автоматизация демпфирования колебаний груза на крановых установках / Д.Н. Аксаментов // Всероссийская научно-практическая конференция. ЗаБИЖТ, 2018, Том 2. С. 132-136.
110. Аксаментов Д.Н. Анализ подходов к автоматизации парирования раскочки 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.
111. 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.
112. Diantong L. Passivity-based-control for a class of underactuated mechanical systems / L. Diantong, G. Weiping, Y. Jianqiang, Z. Dongbin 2004 // *International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation, 2004. Proceedings.*, Chengdu, China, 2004, pp. 50-54.
113. 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.
114. Щербаков В.С. Активный способ гашения колебаний груза после остановки мостового крана / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, Е.О. Шершнева // *Мехатроника, автоматизация, управление* -2016, №17(6), С. 368-374.
115. Елисеев А.В. Проблема гашения колебаний в механических системах: системный анализ, моделирование, управление / А.В. Елисеев, А.П. Хоменко // *Мехатроника, автоматизация, управление* -2022, №23(5), С. 236-245.
116. Голдобина Л.А. Пути обеспечения надежности, безопасности и эффективности строительно-монтажных работ при возведении зданий и

- сооружений путем стабилизации процесса раскачивания грузового подвеса / Л.А. Голдобина, П.С. Орлов // Записки горного института – 2016, С. 322–330.
117. Голдобина Л.А., Власов А.В., Бочков А.Л. Теоретическое обоснование снижения раскачивания груза на канате строительного крана / Л.А. Голдобина, А.В. Власов, А.Л. Бочков // Техничко-технологические проблемы сервиса: науч.-техн. журнал НИИТТ, – 2011, С. 52–60.
118. Толочко О.И. Сравнительный анализ методов гашения колебаний груза, подвешенного к механизму поступательного движения мостового крана / О.И. Толочко, Д.В. Бажутин // Электромашиностроение и электрооборудование. - 2010, № 75, С. 22–28.
119. Черноусько Ф. Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов // М.: Наука, 1980, 383 с.
120. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Физматлит, 1994, 400 с.
121. Петренко Ю.Н. Исследование работы крана с контроллером нечёткой логики на основе трехмерной имитационной модели / Ю.Н. Петренко, С.Э. Алави, С.В. Александровский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. -2011. -№ 3. -С. 20-25.
122. Ухоботов В.И. Стабилизация математического маятника с основанием на колесе с помощью нечёткого алгоритма управления / В.И. Ухоботов, В.С. Величко // Вестник ЮУрГУ. -2014. Т. 14. -№2. -С. 18-23.
123. Алави, С. Э. Контроллер нечеткой логики на основе генетических алгоритмов для электропривода тележки подъемного крана / С. Э. Алави, Ю. Н. Петренко // Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2009, – № 2, С. 17–22.
124. Алави, С. Э. Имитационная модель электропривода с контроллером нечеткой логики / С. Э. Алави, С. В. Александровский // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф., -2009, – С. 230–232.

125. Шведова О.А. Алгоритмы подавления колебаний грузов подъёмно-транспортных механизмов с использованием нечёткой логики функционирования / О.А. Шведова, А.С. Шмарловский, А.В. Марков, Т.В. Тарасевич // Доклады БГУИР, №1 (79), 2014. С.65 – 71.
126. Кузнецов А.П. Математические модели порталных кранов / А.П. Кузнецов, А.В. Марков, А.С. Шарламовский // Доклады БГУИР, Минск, -2009. -№8. – С. 93-100.
127. Щедринов А.В. Исследование работы систем ограничения перекоса моста и систем демпфирования колебаний груза мостового крана / А.В. Щедринов, А.А. Коврыжкин // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2010, -№ 3. -С.53-55.
128. Хижняков Ю.Н. Адаптивное нечеткое управление следящих электромеханических систем / Ю.Н. Хижняков, А.А. Южаков, И.И. Безукладников, Д.Н. Трушников // Электротехника, -2018, -№11. -С. 32-35.
129. Шмарловский А.С. Эффективные алгоритмы управления подъёмно – транспортными механизмами / А.С. Шмарловский // Доклады БГУИР, -2011. - №5 (59), -С. 26 – 31.
130. Коврыжкин А.А. Система управления мостовым краном, построенная с учетом систем демпфирования колебаний груза и ограничения перекоса моста / Автореферат дисс. канд. техн. наук. Воронеж, 2011. 16 с.
131. Orbisaglia M. A comparative analysis of sliding mode controllers for overhead cranes / M. Orbisaglia, G. Orlando, S. Longhi // 16th Mediterranean Conference on Control and Automation Congress Centre. Ajaccio. France. -2008. -pp. 670-675.
132. Ngo Q.H. Fuzzy sliding mode control of container cranes / Q.H. Ngo, N.P. Nguyen, C.N. Nguyen, T.H. Tran, K.S. Hong // International Journal of Control, Automation and Systems. -2015. -Vol. 13, -N. 2. -pp. 419-425.
133. Chen Z.M. Intelligent anti-swing control for bridge crane / Z.M. Chen, W.J. Meng, J.G. Zhang // Journal of Central South University. -2012. Vol. 19, -N. 10. -pp. 2774-2781.

134. Hilhorst G. Reduced-order multi-objective H-infinity control of an overhead crane test setup / G. Hilhorst, G. Pipeleers, J. Swevers // 52nd IEEE Conf. Decis. Control, Florence, Italy, -2013, -pp. 770-775.
135. Mohd Tumari M.Z. H-infinity controller with graphical LMI region proble for gantry crane system / M.Z. Mohd Tumari, M.S. Saealal, M.R. Ghazali, Y. Abdul Wahab // 13th Int. Symp. Adv. Intell. Syst., Kobe, Japan, -2012, -pp. 1397-1402.
136. Omar H.M. Gain scheduling feedback control for tower cranes / H.M. Omar, A.H. Nayfeh // J. Vib. Control. 9 -2003, -pp. 399-418.
137. Ma B. Adaptive tracking control for an overhead crane system / B. Ma, Y. Fang, X. Zhang // Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul. Korea. -2008. -pp. 12194-12199.
138. Fang Y. A Motion planning-based adaptive control method for an underactuated crane system / Y. Fang, B. Ma, P. Wang, X. Zhang // IEEE Transactions on control systems technology. -2012. 20 (1), -pp. 241-248.
139. Sun N. Adaptive antishwing control for cranes in the presence of rail length constraints and uncertainties / N. Sun, Y. Fang, H. Chen. // Nonlinear Dyn. 81. - 2015. -pp. 41-51.
140. Boustany F. Adaptive Control of an Overhead Crane using Dynamic Feedback Linearization and Estimation Desig / F. Boustany, B. d'Andrea- Novel // Centre Automatique et Systemes, Ecole des Mines de Paris. -1992. -pp. 1963-1968.
141. Siemens, SIMOCRANE sway control. <<http://w3.siemens.com/mcms/mc-solutions/en/mechanical-engineering/crane-solutions/simocrane/advanced-technology/sway-control-systems/pages/sway-control-systems.aspx>>, 2016 (accessed 01.12.16).
142. Magnetek Material Handling, Crane anti sway control system. <<https://www.magnetekmh.com/Material>>, 2016 (accessed 01.12.16).
143. ABB drives, Crane control and safety with the ACS880 industrial drives. <<https://library.e.abb.com/public/9f4ec89f17334805938b6851896a5119/>>

- Crane_control_and_safety_with_the_ACS880_industrial_drives.pdf>, 2015 (accessed 01.12.16).
144. Руководство по эксплуатации Altivar 71 V.2. – Schneider Electric, 2008. – 48 с.
145. Konecranes, Dynapilot sway control system [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.konecranes.com/resources/video-library/dynapilot-sway-control-system>, 2016 (accessed 01.12.16).
146. RISI Technology Channels, Konecranes introduces new sway control system for overhead lifting equipment [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://technology.risiinfo.com/logistics/north-america/konecranes-introduces-new-sway-control-system-overhead-lifting-equipment>, 2010 (accessed 01.12.16).
147. Вешеневский, С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С.Н. Вешеневский. - М.: Энергия, 1977, -431 с.
148. Певзнер, Е.М. Современные тенденции и перспективы развития кранового электропривода переменного тока / Е.М. Певзнер, Е.В. Попов // Сборник трудов двенадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» ЭППТ-01, -2001.
149. Проектирование электроприводов крановых механизмов. Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск №12. 2009.
150. Черноусько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. М.: Физматлит, 2006. 328 с.
151. Абовский Н.П., Палагушкин В.И. Активное управление колебаниями конструкций. Учебное пособие, КрасГАСА 1997, 100 с.
152. Александров, М.П. Грузоподъемные машины: Учебник для вузов / М.П. Александров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана – Высшая школа, 2000. – 552 с.
153. Александров, М.П. Справочник по кранам. В 2-х томах / М.П. Александров, М.М. Гохберг, А.А. Ковин. - М.: Машиностроение, 1988. - 536 с.
154. Буйвис, Е.Д. Совершенствование адаптивной системы управления электроприводами механизмов передвижения подъемно-транспортных

- машин: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.09.03 / Буйвис Евгений Дмитриевич. - Воронеж, 2001. – 206 с.
155. Елисеев С.В. Управление колебаниями роботов / С.В. Елисеев, Н.К. Кузнецов, А.В. Лукьянов // Наука, Сибирское отделение, 1990. – 320 с.
156. Кузнецов Н.К. Экспериментальные исследования упругих колебаний электромеханического робота / Н.К. Кузнецов, А.В. Стрелов // Вестник ИрГТУ №3-4, - 2003, С. 36-40.
157. Герасимьяк, Р. П. Тиристорный электропривод для кранов / Р.П. Герасимьяк. - М.: Энергия, 1978. — 111 с.
158. Додонов, Б.П. Грузоподъемные и транспортные устройства / Б.П. Додонов, В.А. Лифанов. – Москва: «Машиностроение», 1990.
159. Енин, С.С. Описание движения механизмов мостового крана уравнениями Лагранжа II рода / С.С. Енин, Е.Я. Омельченко, А.В. Белый, Н.В. Фомин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им Г.И. Носова. Т.15. - №3. - 2017.
160. Мещеряков, В.Н. Динамика электромеханических систем подъемно-транспортных механизмов с асинхронным электроприводом. Монография текст / В.Н. Мещеряков. - Липецк. ЛГТУ, 2002. - 120 с.
161. Лукьянов А.А. Математическое моделирование в проблеме обеспечения точности движения и позиционирования мобильных манипуляционных роботов // диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. 05.13.18 / Лукьянов Андрей Анатольевич. -2005, 429 с.
162. Круглов С.П. Условия адаптируемости систем управления с идентификатором и эталоном. – Saarbuckten, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2012. – 125 с.
163. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления: учеб. пособие для вузов. – СПб: Лань, 2015. – 624 с.
164. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 432 с.

165. 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.
166. 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.
167. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Наука, Механика. - 1979. - Т. 1. 3-е изд. - 520 с.
168. 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.
169. MPU-6000/MPU-6050 Product Specification. InvenSense, 2013, 54 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.invensense.com>, свободный (дата обращения: 14.11.2019).
170. Круглов С.П. Адаптивное управление мостовым краном по скорости перемещения тележки / С.П. Круглов, Д.Н. Аксаментов // Доклады ТУСУР – 2022. – Том 25, № 1 – С. 86-92.
171. 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.
172. Руководство по эксплуатации. МОДУЛЬ ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ МГ-1 ЛМАП.402131.043РЭ 28 с.
173. Аксаментов Д.Н. Исследование адаптивной системы управления мостовым краном при перемещении груза по двум осям / Д.Н. Аксаментов // Молодая наука Сибири. – 2022. – 2(16).

174. 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.
175. https://jhub2.jinr.ru/user/anikina/notebooks/Project_School_Matplotlib_original.ipynb#.
176. ГОСТ 3332-54. Краны мостовые электрические общего назначения грузоподъемностью от 5 до 50 т среднего и тяжелого режимов работы. Государственный стандарт союза ССР. 1955. – 8 с.
177. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. 1972. 111 с.
178. Abdel-Rahman, E.M. Dynamics and control of cranes: a review / E.M. Abdel-Rahman, A.H. Nayfeh, Z.N. Masoud // J Vib Control 9(7), -2003. -pp. 863–908
179. Аксаментов Д.Н. Исследование адаптивного закона управления мостовым краном на его макете / Д.Н. Аксаментов // Вестник ИГЭУ. – 2022 – 2, – С. 47-57.
180. 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.

Приложение А

Листинг программы микроконтроллера экспериментальной установки мостового крана

```
import smbus
import math
import time
import matplotlib.pyplot as plt
import RPi.GPIO as GPIO
import multiprocessing
import numpy as np
```

```
Em = 0.9
Wm = 1.92
Q = 100
B = 0.993
Z_i = 0
T = 0
a1_parametr = 0.0334
x_position = 0
x_load_position = 0
x_load_preset_position = 0
a_1_et_model = 0
a_0_et_model = 0
V_usk = 0
y_i = np.array([[1], [1]])
e_max = 0.01
x_ustanoviv = 0.04
angle_ustanoviv = (5+2)/57.3
integral_oshib = 0
k_integral = 0.1
speed_max = 0.3
t_new = 0
t_old = 0
t = 0
x1 = []
```

```
y = []
y_2 = []

t_while = 5
i_step = 0.00136
step = 0

steps = int(x_load_preset_position // i_step)
print('steps: ', steps)

step_8 = ((True,False,False,False),
          (False,False,True,False),
          (False,True,False,False),
          (False,False,False,True))
step_8_rev = ((False,False,False,True),
              (False,True,False,False),
              (False,False,True,False),
              (True,False,False,False))

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setwarnings(False)

coil_A_1_pin = 20
coil_A_2_pin = 21
coil_B_1_pin = 12
coil_B_2_pin = 16

in_3_ln298n = 13
in_4_ln298n = 6
load_down = 4
load_up = 17
load_right = 27
load_left = 22

GPIO.setup(coil_A_1_pin, GPIO.OUT)
GPIO.setup(coil_A_2_pin, GPIO.OUT)
GPIO.setup(coil_B_1_pin, GPIO.OUT)
GPIO.setup(coil_B_2_pin, GPIO.OUT)
```

```

GPIO.setup(in_3_ln298n, GPIO.OUT)
GPIO.setup(in_4_ln298n, GPIO.OUT)
GPIO.setup(load_down, GPIO.IN)
GPIO.setup(load_up, GPIO.IN)
GPIO.setup(load_right, GPIO.IN)
GPIO.setup(load_left, GPIO.IN)

```

```

GPIO.output(coil_A_1_pin, GPIO.LOW)
GPIO.output(coil_A_2_pin, GPIO.LOW)
GPIO.output(coil_B_1_pin, GPIO.LOW)
GPIO.output(coil_B_2_pin, GPIO.LOW)
GPIO.output(in_3_ln298n, GPIO.LOW)
GPIO.output(in_4_ln298n, GPIO.LOW)

```

```
def setStep(w):
```

```

    GPIO.output(coil_A_1_pin, w[0])
    GPIO.output(coil_A_2_pin, w[1])
    GPIO.output(coil_B_1_pin, w[2])
    GPIO.output(coil_B_2_pin, w[3])

```

```
def x_load_pos_model(a_0_et_model, a_1_et_model, x_load_preset_position, integr_1m,
integr_2m, dt):
```

```

    slog1 = integr_1m * a_1_et_model
    slog2 = (integr_2m - x_load_preset_position) * a_0_et_model
    summa = slog1 + slog2
    integr_1m += summa * dt
    integr_2m += integr_1m * dt
    return integr_2m, integr_1m

```

```
def control_law(x_load_position, f_angle, x_load_preset_position, a1_parameter,
a2_parameter, a3_parameter, a_1_et_model, a_0_et_model, e_max, dt, V_upr):
```

```

    e = x_load_position - x_load_preset_position
    if abs(e) < e_max:
        e=0
    elif e > e_max:
        e = e - e_max
    elif e < -e_max:

```

```
e = e + e_max
```

```
slag1 = ((a_0_et_model * e) - (a2_parameter * f_angle) - a3_parameter) / a1_parameter
```

```
slag2 = a_1_et_model * V_upr / a1_parameter
```

```
V_usk = slag1 + slag2
```

```
V_upr += V_usk * dt
```

```
return V_usk, V_upr
```

```
def filtr_div(u_i, x_i_old, T, dt):
```

```
    x_i = (T * x_i_old) / (T + dt) + (dt * u_i / T)
```

```
    return x_i
```

```
def filtr_div_N_CH(u_i, u_i_old, x_i_old, T, dt):
```

```
    x_i = (T * (x_i_old + u_i - u_i_old)) / (T + dt)
```

```
    return x_i
```

```
def finc_Pi(y_i, p_i_old, B):
```

```
    y_i_transp = y_i.transpose()
```

```
    umn_1 = p_i_old.dot(y_i)
```

```
    umn_2 = umn_1.dot(y_i_transp)
```

```
    umn_3 = umn_2.dot(p_i_old)
```

```
    umn_2_1 = y_i_transp.dot(p_i_old)
```

```
    umn_2_2 = umn_2_1.dot(y_i)
```

```
    umn_2_3 = 1 + umn_2_2
```

```
    umn_div = umn_3/umn_2_3
```

```
    umn_sum = p_i_old - umn_div
```

```
    result = umn_sum/B
```

```
    return result
```

```
def func_E_i(y_i, O_i_old, Z_i):
```

```
    y_i_transp = y_i.transpose()
```

```
    result = Z_i - y_i_transp.dot(O_i_old)
```

```
    return result[0][0]
```

```
def func_O_i(O_i_old, P_i, y_i, E_i):
```



```
result = O_i_old + (P_i.dot(y_i)) * E_i
```

```
def func_RMNK(y_i, Z_i, B, p_i_old, O_i_old):
```

```
    P_i = func_Pi(y_i, p_i_old, B)
```

```
    P_i[0][0] = abs(P_i[0][0])
```

```
    P_i[1][1] = abs(P_i[1][1])
```

```
    if P_i[0][0] > Q:
```

```
        P_i[0][0] = Q
```

```
    if P_i[1][1] > Q:
```

```
        P_i[1][1] = Q
```

```
    k = abs(P_i[0][1]) / P_i[0][0]
```

```
    if k > 1:
```

```
        P_i[0][1] = P_i[0][1] / k
```

```
        P_i[1][0] = P_i[0][1]
```

```
    k = abs(P_i[0][1]) / P_i[1][1]
```

```
    if k > 1:
```

```
        P_i[0][1] = P_i[0][1] / k
```

```
        P_i[1][0] = P_i[0][1]
```

```
    E_i = func_E_i(y_i, O_i_old, Z_i)
```

```
    O_i = func_O_i(O_i_old, P_i, y_i, E_i)
```

```
    p_i_old = P_i
```

```
    O_i_old = O_i
```

```
    return O_i, p_i_old, O_i_old, E_i
```

```
class MPU6050:
```

```
    MPU6050_ADDRESS_AD0_LOW    = 0x68
```

```
    MPU6050_ADDRESS_AD0_HIGH  = 0x69
```

```
    MPU6050_DEFAULT_ADDRESS    = MPU6050_ADDRESS_AD0_LOW
```

```
    MPU6050_RA_CONFIG          = 0x1A
```

```
    MPU6050_RA_GYRO_CONFIG     = 0x1B
```

```
    MPU6050_RA_ACCEL_CONFIG    = 0x1C
```

```
    MPU6050_RA_ACCEL_XOUT_H    = 0x3B
```

```

MPU6050_RA_ACCEL_XOUT_L    = 0x3C
MPU6050_RA_ACCEL_YOUT_H    = 0x3D
MPU6050_RA_ACCEL_YOUT_L    = 0x3E
MPU6050_RA_ACCEL_ZOUT_H    = 0x3F
MPU6050_RA_ACCEL_ZOUT_L    = 0x40
MPU6050_RA_GYRO_XOUT_H     = 0x43
MPU6050_RA_GYRO_XOUT_L     = 0x44
MPU6050_RA_GYRO_YOUT_H     = 0x45
MPU6050_RA_GYRO_YOUT_L     = 0x46
MPU6050_RA_GYRO_ZOUT_H     = 0x47
MPU6050_RA_GYRO_ZOUT_L     = 0x48
MPU6050_RA_USER_CTRL       = 0x6A
MPU6050_RA_PWR_MGMT_1      = 0x6B

```

```

gyro_offs = {'x': 0, 'y': 0, 'z': 0}
accel_offs = {'y': 0, 'x': 0, 'z': 0}

```

```

def __init__(self, address = MPU6050_DEFAULT_ADDRESS):
    self.bus = smbus.SMBus(1)
    self.address = address

```

```

def initialize(self):
    self.write_byte(self.MPU6050_RA_PWR_MGMT_1, 0)
    self.write_byte(self.MPU6050_RA_ACCEL_CONFIG, 0)
    self.accel_scale=16384.0 / 9.80665
    self.write_byte(self.MPU6050_RA_GYRO_CONFIG, 0)
    self.gyro_scale=131
    self.write_byte(self.MPU6050_RA_CONFIG, 5)

```

```

def get_gyro_raw(self):
    data = {
        'x': self.read_word_2c(self.MPU6050_RA_GYRO_XOUT_H),
        'y': self.read_word_2c(self.MPU6050_RA_GYRO_YOUT_H),
        'z': self.read_word_2c(self.MPU6050_RA_GYRO_ZOUT_H) }
    return data

```

```

def get_gyro(self):
    data = self.get_gyro_raw();

```

```

data['x']=(data['x']-self.gyro_offs['x'])/self.gyro_scale
data['y']=(data['y']-self.gyro_offs['y'])/self.gyro_scale
data['z']=(data['z']-self.gyro_offs['z'])/self.gyro_scale
return data

```

```
def get_gyro_offs(self):
```

```
    data_offs = {'x':0, 'y':0, 'z':0}
```

```
    for num in range(0,5000):
```

```
        data = self.get_gyro_raw();
```

```
        data_offs['x']+=data['x'];
```

```
        data_offs['y']+=data['y'];
```

```
        data_offs['z']+=data['z'];
```

```
        time.sleep(0.001);
```

```
    data_offs['x']/=5000;
```

```
    data_offs['y']/=5000;
```

```
    data_offs['z']/=5000;
```

```
    return data_offs
```

```
def get_accel_raw(self):
```

```
    data = {
```

```
        'x' : self.read_word_2c(self.MPU6050_RA_ACCEL_XOUT_H),
```

```
        'y' : self.read_word_2c(self.MPU6050_RA_ACCEL_YOUT_H),
```

```
        'z' : self.read_word_2c(self.MPU6050_RA_ACCEL_ZOUT_H) }
```

```
    return data
```

```
def get_accel(self):
```

```
    data = self.get_accel_raw();
```

```
    data['x']=(data['x']-self.accel_offs['x'])/self.accel_scale
```

```
    data['y']=(data['y']-self.accel_offs['y'])/self.accel_scale
```

```
    data['z']=(data['z']-self.accel_offs['z'])/self.accel_scale
```

```
    return data
```

```
def get_accel_offs(self):
```

```
    data_offs = {'x':0, 'y':0, 'z':0}
```

```
    for num in range(0,5000):
```

```
        data = self.get_accel_raw()
```

```
        data_offs['x']+=data['x']
```

```
        data_offs['y']+=data['y']
```

```

    data_offs['z']+=data['z']
    time.sleep(0.001)

    data_offs['x']/=5000.0
    data_offs['y']/=5000.0
    data_offs['z']/=5000.0
    return data_offs

def calibration(self):
    print ("Please twirl the MPU-6050 around a minute")
    self.accel_offs = self.get_accel_offs()
    self.gyro_offs = self.get_gyro_offs()
    print ("\"gyro_offs\" and \"accel_offs\"")
    print ("gyro_offs = ", self.gyro_offs)
    print ("accel_offs = ", self.accel_offs)

def read_byte(self, adr):
    return self.bus.read_byte_data(self.address, adr)

def read_word(self, adr):
    high = self.bus.read_byte_data(self.address, adr)
    low = self.bus.read_byte_data(self.address, adr+1)
    val = (high << 8) + low
    return val

def read_word_2c(self, adr):
    val = self.read_word(adr)
    if (val >= 0x8000):
        return -((65535 - val) + 1)
    else:
        return val

def write_byte(self, adr, byte):
    self.bus.write_byte_data(self.address, adr, byte)

def dist(self, a,b):
    return math.sqrt((a*a)+(b*b))

```

```
def get_x_rotation(self, data):
    return data['y']
```

```
mpu = MPU6050()
mpu.initialize()
```

```
mpu_acc = MPU6050(0x69)
mpu_acc.initialize()
```

```
mpu.gyro_offs = {'x': -343.8354, 'y': -323.3674, 'z': -209.2804}
mpu.accel_offs = {'x': -1094.0948, 'y': 158.9684, 'z': 15527.8484}
print('Start')
```

```
def worker(f_angle, y0, y, y_2, t_graph, a, x_load_preset_position, step, x_position, Em,
Wm, Q, B, T, V_upr_graf, Ugol_graf):
```

```
    while t.value <= 10:
        if y0.value == 0:
            t_old = time.time()
            t_old_dt = time.time()
            t_old_dt_x = t_old_dt
            a_1_et_model = -2 * Em * Wm
            a_0_et_model = -Wm * Wm
            V_usk = 0
            V_upr = 0
            V_upr_old = 0
            V_upr_force_old = 0
            p_i_old = np.array([[Q, 0], [0, Q]])
            O_i_old = np.array([[ -9.744], [0.1]])
            x_load_model = 0.0
            integr_1m = 0.0
            integral_oshib_old = 0
            O_i = O_i_old
```

```
    if GPIO.input(load_right):
        x_load_preset_position.value -= 0.0016
    elif GPIO.input(load_left):
        x_load_preset_position.value += 0.0016
```

```

if GPIO.input(load_down):
    GPIO.output(in_3_ln298n, GPIO.LOW)
    GPIO.output(in_4_ln298n, GPIO.HIGH)
elif GPIO.input(load_up):
    GPIO.output(in_3_ln298n, GPIO.HIGH)
    GPIO.output(in_4_ln298n, GPIO.LOW)
else:
    GPIO.output(in_3_ln298n, GPIO.LOW)
    GPIO.output(in_4_ln298n, GPIO.LOW)

```

```

t_new = time.time()
t.value = t_new - t_old

```

```

dt = t_new - t_old_dt
t_old_dt = t_new

```

```

gyro_data = mpu.get_gyro()
f_speed = mpu.get_x_rotation(gyro_data) / 57.2958
f_angle.value += f_speed * dt
f_angle_i = f_angle.value

```

```

x_load_usk22 = mpu.get_accel()
x_load_usk2 = -x_load_usk22['x']
x_load_usk222 = x_load_usk2

```

```

x_load_model, integr_1m = x_load_pos_model(a_0_et_model, a_1_et_model,
x_load_preset_position.value, integr_1m, x_load_model, dt)

```

```

x_position.value = step.value * 0.00136
x_load_position = x_position.value + 0.55 * math.sin(f_angle_i)
oshibka = x_load_preset_position.value - x_load_position
if abs(oshibka) > 0.1:
    oshibka = 0
integral_oshib = integral_oshib_old + oshibka * dt
integral_oshib_old = integral_oshib

```

```

if (abs(x_load_preset_position.value - x_position.value) > x_ustanoviv) or
abs(f_angle_i) > angle_ustanoviv:

```

```
Z_i = x_load_usk222 - a1_parameter * V_usk
```

```
y_i[0][0] = f_angle_i
```

```
O_i, p_i_old, O_i_old, E_i = func_RMNK(y_i, Z_i, B, p_i_old, O_i_old)
```

```
a2_parameter = O_i[0][0]
```

```
a3_parameter = O_i[1][0]
```

```
V_usk, V_upr = control_law(x_load_position, f_angle_i,
x_load_preset_position.value, a1_parameter, a2_parameter, a3_parameter, a_1_et_model,
a_0_et_model, e_max, dt, V_upr)
```

```
V_upr = V_upr + integral_oshib * k_integral
```

```
V_upr_force = filtr_div_N_CH(V_upr, V_upr_old, V_upr_force_old, 0.001, dt)
```

```
V_upr_old = V_upr
```

```
V_upr_force_old = V_upr_force
```

```
Vi = V_upr_force * 30
```

```
upr.value = Vi + V_upr
```

```
if upr.value < -speed_max:
```

```
    upr.value = -speed_max
```

```
elif upr.value > speed_max:
```

```
    upr.value = speed_max
```

```
y[y0.value] = upr.value
```

```
y_2[y0.value] = x_load_preset_position.value
```

```
y_3[y0.value] = x_position.value
```

```
t_graph[y0.value] = t.value
```

```
V_upr_graf[y0.value] = V_upr
```

```
Ugol_graf[y0.value] = f_angle.value
```

```
y0.value += 1
```

```
def worker_2():
```

```
    while t.value <= 10:
```

```
        up = upr.value
```

```
        if abs(up) > 0.005:
```

```
            up = 0.000150 * 1.8/ up
```

```
        if up > 0:
```

```

    orien = 0
else:
    orien = 1
    up = -up

delay.value = up
if orien == 1:
    step.value -= 1
    for st in step_8:
        setStep(st)
        time.sleep(delay.value)
if orien == 0:
    step.value += 1
    for st in step_8_rev:
        setStep(st)
        time.sleep(delay.value)

else:
    GPIO.output(coil_A_1_pin, GPIO.LOW)
    GPIO.output(coil_A_2_pin, GPIO.LOW)
    GPIO.output(coil_B_1_pin, GPIO.LOW)
    GPIO.output(coil_B_2_pin, GPIO.LOW)

if __name__ == '__main__':
    t = multiprocessing.Value('d', 0.0)
    f_angle = multiprocessing.Value('d', 0.0)
    x_position = multiprocessing.Value('d', 0.0)
    a = multiprocessing.Value('d', 1.5)
    y0 = multiprocessing.Value('i', 0)
    x_load_preset_position = multiprocessing.Value('d', x_load_preset_position)
    upr = multiprocessing.Value('d', 0.0)
    delay = multiprocessing.Value('d', 0.0)
    step = multiprocessing.Value('d', 0)
    y = multiprocessing.Array('d', range(2000))
    y_2 = multiprocessing.Array('d', range(2000))
    y_3 = multiprocessing.Array('d', range(2000))
    V_upr_graf = multiprocessing.Array('d', range(2000))
    Ugol_graf = multiprocessing.Array('d', range(2000))

```



```

t_graph = multiprocessing.Array('d', range(2000))
p = multiprocessing.Process(target=worker, args=(f_angle, y0, y, y_2, t_graph, a,
x_load_preset_position, step, x_position, Em, Wm, Q, B, T, V_upr_graf, Ugol_graf))
p_2 = multiprocessing.Process(target=worker_2, args=())

p.start()
p_2.start()
p.join()
p_2.join()
print('end')
print('t:', t.value)
y = y[:y0.value]
y_2 = y_2[:y0.value]
y_3 = y_3[:y0.value]
V_upr_graf = V_upr_graf[:y0.value]
Ugol_graf = Ugol_graf[:y0.value]
t_graph = t_graph[:y0.value]
print('y= ', y)
print('y0= ', y0.value)
print('t_graph[y0.value - 1]= ', t_graph[y0.value - 1])
print('V_upr_graf= ', V_upr_graf)
print('Ugol_graf= ', Ugol_graf)
print('t_graph= ', t_graph)
x = t_graph

GPIO.output(coil_A_1_pin, GPIO.LOW)
GPIO.output(coil_A_2_pin, GPIO.LOW)
GPIO.output(coil_B_1_pin, GPIO.LOW)
GPIO.output(coil_B_2_pin, GPIO.LOW)
GPIO.cleanup()

print('end')
print('t:', t.value)
print(len(y_2))
print(len(x))
plt.figure(figsize=(8, 10))
plt.plot(x, y, 'o-r', alpha=0.7, lw=0.5, mec='b', mew=0.5, ms=2)
plt.plot(x, y_2, 'o-r', color='black', lw=1, mec='b', mew=0, ms=2)

```

```
plt.plot(x, y_3, 'o-r', color='black', lw=0.5, mec='b', mew=0, ms=2)
plt.xlabel("x")
plt.ylabel("y")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

Приложение Б

Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-технический центр

«АльтерЭнерго»

664005, г. Иркутск, ул. Гоголя, 30/5, т.(3952) 611-011, 725-715, 8-902-5117014

e-mail: ae38@ist.ru

«17» июня 2022 г.

Иск. № 226-17.1Д

Акт

об использовании результатов диссертационной работы
Аксаментова Дмитрий Николаевича

Настоящий акт подтверждает использование результатов диссертационной работы аспиранта Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» Аксаментова Дмитрий Николаевича при разработке плана модернизации системы управления краном мостовым на предприятии заказчика. Предлагается использовать структуру системы управления и алгоритмическое обеспечение для формирования отдельных режимов управления краном при многообразии переносимых грузов и при воздействии ветра с реализацией эффективного подавления маятниковых колебаний.

Предполагается, что использование результатов диссертации Аксаментова Дмитрий Николаевича позволит повысить производительность работы мостового крана, сократить время подготовки операторов и повысить безопасность эксплуатации кранов. Работы планируются выполнять подрядным способом компанией ООО «АльтерЭнерго»

Генеральный директор



М.В. Донцов

Приложение В



Техно
Автоматика

ООО «ТехноАвтоматика»
ИНН: 3812148341
КПП: 031401001
ОГРН: 1133850020116

Телефон/факс:
+7 (395-2) 767 542
+7 (395-2) 767-543
+7 (395-2) 767-544

E-mail: info@ec38.ru
www.ec38.ru

Исх.: 149 от 21 июня 2022 г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы
Аксаментова Дмитрий Николаевича

Настоящий акт подтверждает использования результатов диссертационной работы аспиранта Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» Аксаментова Дмитрий Николаевича при модернизации крана ККС-32/10, реализуемого на Тугнуйской обогатительной фабрике. Предполагается использовать разработанные алгоритмы управления краном для отдельных режимов работы грузоподъемного мостового крана.

Полагаем, что использование результатов диссертации Аксаментова Дмитрий Николаевича позволит повысить скорость выполнения погрузочно-разгрузочных работ и безопасность эксплуатации крана.

Директор ООО «ТехноАвтоматика»



П.А.Степанов