

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

БОУШЕВ ВИКТОР ЮРЬЕВИЧ

**МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
БАШЕННЫХ КРАНОВ, ОБОРУДОВАННЫХ РЕГИСТРАТОРАМИ
ПАРАМЕТРОВ**

Специальность **2.5.11. Наземные транспортно-технологические
средства и комплексы**

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, профессор
Репин Сергей Васильевич

Санкт-Петербург – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ БАШЕННЫХ КРАНОВ.....	11
1.1. Анализ аварийности башенных кранов	11
1.2. Структурный анализ парка башенных кранов, оборудованных системами (приборами) безопасности с регистрацией параметров.....	13
1.3. Обзор конструкций систем (приборов) безопасности с регистрацией параметров	15
1.4. Развитие систем (приборов) безопасности башенного крана: анализ теоретических исследований и оценка перспектив развития.....	36
Выводы по главе 1	43
Цель и задачи исследования.....	44
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ БАШЕННЫХ КРАНОВ.....	46
2.1. Использование одной оси акселерометра.....	48
2.2. Использование двух осей акселерометра	50
2.3. Использование трех осей акселерометра.....	52
2.4. Существующие алгоритмы регистраторов параметров башенных кранов	57
2.5. Аппаратная реализация датчика угла отклонения груза.....	67
2.6. Адаптация существующих алгоритмов регистраторов параметров грузоподъемных кранов.....	73
Выводы по главе 2.....	77
ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА	78
3.1. Степень проработанности научных трудов по процессам развития колебаний груза крана	78
3.2. Исследование причин возникновения и развития колебаний груза	79
3.3. Процесс развития колебаний при повороте стрелы	86
3.4. Процесс развития колебаний при движении грузовой тележки	88
3.5. Расчет угла отклонения груза при вращении башни крана	89
3.6. Отклонение груза при торможении грузовой тележки на стреле крана	91
3.7. Отклонение груза при торможении грузовой тележки на стреле крана при двойной запасовке каната	95

3.8. Процесс развития колебаний груза при его перемещении с учетом податливости конструкции крана и значений скорости подъёма груза	100
3.9. Отклонение груза от ветровой нагрузки.....	109
Выводы по главе 3.....	114
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОНИТОРИНГА ПОЛОЖЕНИЙ ГРУЗОВЫХ КАНАТОВ И ГРУЗА С РЕГИСТРАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ.....	115
4.1. Достоверность алгоритмов регистраторов параметров при раскачивании груза	115
4.2. Экспериментальное исследование процесса колебания груза	119
при торможении грузовой тележки на стреле крана	119
и двойной запасовке каната.....	119
4.3. Адаптация существующих алгоритмов регистраторов параметров.....	123
4.3.1. Экспериментальное исследование торможении грузовой тележки на стреле крана при двойной запасовке каната и затухания колебаний	124
4.3.2. Экспериментальное исследование отклонения груза при вращении башни крана	127
4.3.3. Экспериментальное исследование отклонения груза от действия ветра	130
Выводы по главе 4.....	133
ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМЫХ РЕШЕНИЙ.....	135
5.1. Экономическое обоснование эффективности применения технического решения при перемещении груза на примере башенного крана КБ503	135
5.2. Экономический эффект использования прибора безопасности в контексте потенциальных нештатных ситуаций	140
Выводы по главе 5.....	143
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	144
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	147
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	161

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современное развитие строительной отрасли характеризуется ростом жилищного и промышленного строительства, в том числе строительства зданий сложной конфигурации и высотных зданий более 25 этажей, что обуславливает наращивание количества применяемой грузоподъемной строительной техники – высотных башенных кранов.

Вместе с тем недостатком всех башенных кранов является высокий риск раскачивания груза. Такое раскачивание влечет за собой не только снижение производительности определенных видов строительных работ, но и увеличение вероятности нештатных ситуаций, в отдельных случаях вплоть до потери устойчивости башенного крана, связанных с угрозой жизни и здоровью рабочих, повреждением дорогостоящего оборудования башенного крана. В условиях, когда машинисту башенного крана ограничена видимость при перемещении груза и (или) при возведении сложных конструктивных элементов зданий и сооружений, риски указанных нештатных ситуаций существенно возрастают.

В то же время современный этап развития функциональных возможностей систем (приборов) безопасности, используемых на башенных кранах, характеризуется отсутствием полноты охвата контроля и регистрации всех параметров рабочих циклов (например, отклонения груза или каната), которые позволят повысить безопасность эксплуатации башенных кранов и уменьшить риски повреждения дорогостоящего оборудования.

Ни в одной из существующих систем безопасности возможность мониторинга (контроля) за перемещаемым грузом, с фиксацией указанных выше параметров, до настоящего времени не реализована.

При этом в должном объеме отсутствуют и теоретические исследования, описывающие процесс развития колебаний груза на башенном кране с учетом воздействия на него внешних факторов, а также процесс гашения указанных колебаний в определенных моментах.

В данных условиях важной проблемой, определяющей актуальность исследования процессов колебаний груза на башенном кране при воздействии комплекса внешних факторов, является поиск более совершенных и эффективных способов текущего мониторинга и регистрации таких параметров, как положение в пространстве грузового каната и крюковой подвески (как с грузом, так и без груза), в том числе в условиях ограниченной видимости.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам исследования проектирования грузоподъёмных машин и текущего состояния в области систем (приборов) безопасности, а также ограничения колебаний посвящены труды: Вайнсона А.А., Гаранина Н.П., Дроздовича В.А., Зарецкого А.А., Каминского Л.С., Комарова М.С., Кoryтова М.С., Рабиновича А.А., Терехова А.М., Щедринова А.В., Щербакова В.С., а также в работах зарубежных ученых Blackburn D., Singhose, W., Manson G., Masoud, Z. N., Ridout A.J.

Цель и задачи исследования.

Целью исследования является повышение безопасности и экономической эффективности эксплуатации башенных кранов посредством разработки способов мониторинга и регистрации положения грузового каната и груза, перемещаемого башенным краном, а также контроля и сигнализации за опасными отклонениями каната, в т.ч. в условиях ограниченной видимости с учётом влияния внешних факторов на колебания груза.

Задачи исследования. Для достижения цели данного диссертационного исследования необходимо решить ряд последовательных задач, а именно:

1. Выявить закономерности в конструктивном исполнении, а также тенденции в развитии существующих устройств (систем) безопасности, обеспечивающих безопасность башенных кранов, оснащённых регистраторами параметров их работы.

2. Разработать математические модели динамических процессов отклонения угла грузового каната на башенном кране на разных стадиях рабочего процесса:

поворот башни, торможение грузовой тележки с двойной запасовкой каната, а также при влиянии ветровой нагрузки.

3. Разработать методику контроля точного позиционирования перемещаемого груза, позволяющую максимально снизить его колебания.

4. Обосновать критерии безопасности и эффективности процесса перемещения груза и позиционирования его башенным краном с учётом контроля за колебаниями груза.

5. Разработать методику регистрации и последующей записи параметров отклонения груза с дальнейшей их обработкой и использованием.

6. Разработать технические решения по контролю колебаний груза в реальном времени с возможностью производить запись параметров отклонения груза.

Объектом исследования является процесс перемещения груза башенным краном.

Предметом исследования являются колебания груза при его перемещении башенным краном, оснащённым системами (приборами) безопасности, в т.ч. в зоне ограниченной видимости («слепой» зоне) для машиниста (оператора) башенного крана.

Рабочая гипотеза состоит в том, что предотвращение раскачивания груза на башенном кране возможно путём разработки и установки на кране новых приборов безопасности, которые будут контролировать процесс развития отклонения грузового каната и способны подавать управляющий сигнал об опасности нарастания такого угла отклонения каната, при котором машинист крана должен применить соответствующие меры.

Научная новизна заключается в:

1. Обосновании критериев безопасности и эффективности процесса перемещения груза и позиционирования его башенным краном с учётом контроля колебаний груза.

2. Разработке математических моделей динамики угла отклонения грузового каната при выполнении рабочих процессов башенного крана.

3. Установлении экспериментальных зависимостей изменения угла отклонения грузового каната от действия внешних и внутренних факторов (силы инерции при вращении башни и торможении грузовой тележки, силы ветра, схемы запасовки каната).

Методология и методы исследования. В исследовании использовалась методология системного анализа, включающая в себя теоретические и экспериментальные исследования, методы математического и имитационного моделирования, теории управления, теории оптимизации.

Область исследования соответствуют требованиям паспорта научной специальности ВАК 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы по пунктам: п. 2 «Методы расчета и проектирования, направленные на создание новых и совершенствование существующих транспортно-технологических средств и их комплексов с учетом полного жизненного цикла изделий, обладающих высоким качеством, в том числе повышенными показателями экономичности, надежности, производительности, экологичности и эргономичности, обеспечивающих энергоэффективность и безопасность эксплуатации»; п. 3. «Экспериментальные исследования и испытания транспортно-технологических средств и их комплексов, а также отдельных систем, агрегатов, узлов, деталей и технологического оборудования».

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель зависимости между основными факторами, влияющими на позиционирование груза в процессе его перемещения башенным краном.

2. Математические модели динамики отклонения каната при действии основных факторов, влияющих на груз, таких как ветровая нагрузка, торможение грузовой тележки, схема запасовки каната и поворот башни башенного крана.

3. Метод и способ безопасного и эффективного процесса перемещения груза и позиционирования его башенным краном с учётом контроля колебаний груза в зоне ограниченной видимости («слепой» зоне) для машиниста (оператора) башенного крана, подтверждённый натурным экспериментом.

4. Технические решения и устройство мониторинга положений грузовых канатов и груза грузоподъемного крана, позволяющие определять угол наклона грузового каната башенного крана (патенты RU 197689 U1, RU 196670 U1, автор Боушев В.Ю.).

Степень достоверности результатов проведенных исследований обоснована применением общепринятых методов и методик выполнения теоретических и экспериментальных исследований, использованием стандартизованных методик измерения и последующего анализа результатов; подтверждена сопоставимостью теоретических и экспериментальных результатов, их практическим использованием; обеспечена применением сертифицированных средств измерения, обеспечивающих надлежащую точность, и согласованностью полученных результатов теоретических исследований и эксперимента.

Практическая ценность и реализация результатов исследований

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложены устройства, обеспечивающие безопасную работу с грузом в зоне ограниченной видимости для машиниста (оператора) башенного крана (патенты RU 197689 U1, RU 196670 U1).

С применением технического решения RU 196670 U1 осуществлен этап внедрения методики определения положения грузовых канатов, обеспечивающей контроль за колебанием груза в реальном времени (в т.ч. при отсутствии возможности визуального определения положения груза), с возможностью записи параметров отклонения каната от вертикальной оси.

Кроме того, устройство, разработанное на базе технического решения RU 196670 U1, может быть использовано также и в образовательных целях, при обучении машинистов башенных кранов, поскольку не требует специальных подготовительных условий для его размещения на крюковой подвеске башенного крана и сложных мероприятий по техническому обслуживанию.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии положений теории безопасной эксплуатации башенных кранов, а именно: обосновании критериев безопасности и эффективности процесса перемещения груза башенным краном; математическом и компьютерном моделировании динамики угла отклонения грузового каната при действии различных факторов; установлении экспериментальных зависимостей изменения угла отклонения грузового каната от действия внешних и внутренних факторов (силы инерции при вращении башни и торможении грузовой тележки, силы ветра, схемы запасовки каната).

Практическая значимость заключается в:

1. В разработке конструкций и методов применения новых приборов мониторинга о приближении к предельным углам отклонения грузового каната.

2. В возможности применения предложенных соискателем методов и технических решений в системе управления грузоподъемных кранов для предупреждения о вероятном нарастании раскачивания и выполнения действий по уменьшению раскачивания груза.

3. В возможности внедрения в учебный процесс подготовки машинистов башенных кранов обучающего алгоритма обеспечения точности перемещения груза в условиях недостаточной видимости посредством мониторинга положений канатов и груза и компенсации неуправляемых пространственных колебаний груза на башенном кране.

Практические результаты исследования могут быть использованы строительными предприятиями в целях повышения безопасности эксплуатации башенных кранов.

Практическая значимость диссертационной работы подтверждена актами внедрения в АО «ЛСР. Краны-СЗ», г. Санкт-Петербург и использованием в учебном процессе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Апробация работы Основные положения работы были представлены на научных конференциях 71-ой, 72-ой, 73-ой и 74-ой межвузовских научно-практических конференций студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (СПб ГАСУ, СПб 2018, 2019, 2020, 2021).

Основные результаты диссертационного исследования апробированы в 2023 году на базе производственной площадки АО «ЛСР.Краны-СЗ» (Санкт-Петербург), что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Публикации. Основные положения диссертационного исследования получили отражение в 9 печатных работах 4,68 п.л., в том числе: в 4 статьях в рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, в 2 патентах на полезные модели, в 3 статьях в сборниках тезисов и докладов научных конференций.

Структура и объём диссертационного исследования

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объём диссертации составляет 170 страниц. Материалы диссертации содержат 63 рисунков, 11 таблиц, 10 страниц приложений. Библиографический список включает 110 наименований.

Личный вклад автора заключается в обосновании критериев безопасности и эффективности процесса перемещения груза башенным краном, компьютерном моделировании развития и динамики изменения угла отклонения грузового каната при различных видах запасовки каната, разработке конструкций новых приборов безопасности башенных кранов и методики их применения. Разработка, сборка опытного образца и проведение полного цикла мероприятий по организации и осуществлению экспериментов на базе производственного предприятия были реализованы автором самостоятельно

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ БАШЕННЫХ КРАНОВ

1.1. Анализ аварийности башенных кранов

Башенные краны являются разновидностью подъемных сооружений и относятся к опасным производственным объектам (далее – ОПО). Порядок обеспечения безопасности работы на таких объектах в настоящее время регулируется Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения», утвержденными приказом Ростехнадзора от 26.11.2020 № 461 и вступившими в силу с 01.01.2021 (далее – ФНП).

Аварийность при эксплуатации башенных кранов (по данным Ростехнадзора, с 2017 по 2021) [1] (статистика приведена на рисунке 1.1.) по сравнению с другими грузоподъемными кранами остаётся на высоком уровне (40% от общего количества аварий за рассматриваемый период времени). При этом аварийность при эксплуатации иных видов кранов составила соответственно: автомобильных кранов (16%), гусеничных кранов (8%), козловых кранов (5%), кранов-манипуляторов (7%), порталных кранов (3%). Согласно анализу данных официальной статистики Ростехнадзора основными причинами аварий и несчастных случаев при производстве работ с применением башенных кранов являются [1]: повышение максимальных динамических нагрузок, эксплуатация грузоподъемных машин с неисправными приборами безопасности; производство строительных и монтажных работ с нарушением требований проекта производства работ; несоблюдение габаритов и схем складирования грузов вблизи крановых путей; отсутствие или некачественный технический надзор за безопасной эксплуатацией башенных кранов; обрыв канатов; угон башенных кранов ветром; неисправность тупиковых упоров

и крановых путей; низкий уровень трудовой дисциплины; иные нарушения требований промышленной безопасности.

Также уровень смертельного травматизма связанных с башенными кранами характеризуется более высокими значениями по сравнению с аналогичными показателями в отношении других групп грузоподъемных кранов [1].

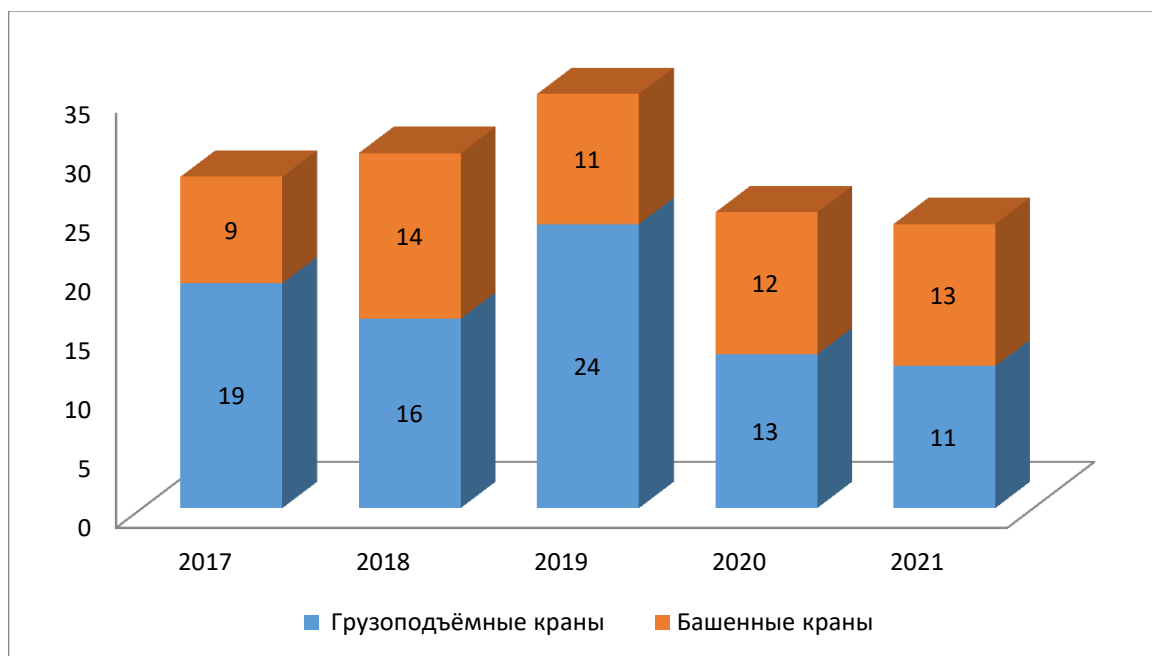


Рисунок 1.1 – Динамика аварий башенных кранов в 2017-2021 по отношению к другим грузоподъемным кранам

Высокая аварийность башенных кранов обусловлена не только их конструктивными особенностями, но и спецификой режима работы в каждом отдельном случае, так как интенсивность эксплуатации башенного крана, частые перебазирования его на новые строительные площадки повышают риск возникновения аварий и несчастных случаев.

В связи с тем, что башенные краны относятся к объектам повышенной опасности, то в целях обеспечения надежности и долговечности узлов и механизмов, для предотвращения и (или) минимизации последствий аварий, инцидентов на опасных производственных объектах (далее – ОПО) с учётом возможной потери жизни и (или) здоровья людей в процессах, грузоподъемные

машины должны оснащаться приборами и устройствами безопасности согласно требованиям правил, ГОСТов и других нормативных документов.

1.2. Структурный анализ парка башенных кранов, оборудованных системами (приборами) безопасности с регистрацией параметров

Башенные краны являются одним из самых востребованных видов строительной техники. Российский парк башенных кранов представлен широким модельным рядом, как отечественного, так и иностранного производства. При этом, большая часть новых башенных кранов импортируется в Россию. Башенные краны отечественного производства представлены меньшей долей на рынке

В составе эксплуатируемого в России парка башенных кранов по совокупности признаков географического происхождения рассматриваемого вида техники и ее доли на рынке, можно выделить четыре основные группы:

- 1) импортная техника ведущих европейских производителей;
- 2) башенные краны российских производителей;
- 3) башенные краны, произведенные в КНР;
- 4) прочие, представленные в минимальных количествах, необходимых для занятия доли рынка: корейские Everdigm, турецкие TGM KULE VINC, произведённые в Европе по лицензии США TEREX, небольшие европейские бренды Comansa (Испания), Rokra (Италия), SOIMA (Португалия), Comedil (Италия).

В настоящее время значительное место в сфере технологической и количественной составляющей на российском рынке башенных кранов занимает производитель Liebherr (Германия). При этом иные европейские производители: Potain (Франция), Comansa (Испания), Raimondi (Италия), SOIMA (Португалия), TEREX CRANES (производства Италия) и Rokra (Италия) предпринимают удачные попытки медленного и планомерного вытеснения бренда Liebherr с передовых позиций рынка России.

Среди отечественных башенных кранов следует выделить башенные краны производства Одинцовского машиностроительного завода (модели КБ-415, КБ-415.07, КБ-515, КБ-515.05, КБ-585, КБ-420); Ржевского Краностроительного Завода (модели КБ-473, КБ-474, КБМ-401, КБ-311, КБ-405), Нязепетровского краностроительного завода (GIRAFFE) (серии TDK, SMK, TDKZ).

Отличительной чертой российского парка башенных кранов, особенно в условиях возросших экономических санкций в отношении Российской Федерации, является наращивание доли присутствия кранов, произведенных в КНР, которые успешно вытесняют башенные краны иных производителей.

Среди китайских производителей кранов можно выделить такие, как Zoomlion (более 50 моделей грузоподъемностью от 4 т до 240 т); XCMG (самый известный и крупный китайский производитель и поставщик строительной техники в Россию (серии QTZ); Fangyan Group (серии QTZ (TC) и PT). Также многочисленные китайские предприятия изготавливают краны по лицензиям таких европейских производителей, как Comedil (Италия), Potain (Франция).

Все башенные краны комплектуются приборами (системами) безопасности, и регистраторами параметров, но по желанию заказчика могут также предоставляться как в минимальной, так и в максимальной комплектации.

При этом в расширенной (максимальной) комплектации будут предусмотрены дополнительные возможности систем и приборов безопасности, которые могут передавать данные напрямую в бортовую электронную систему управления крана, где они должны обрабатываться, исключая длительные и повторяющиеся преобразования на разных этапах передачи данных. При наличии доступа в интернет (с помощью телеметрической аппаратуры), обработанные данные могут получать в офисе строительной компании, вдали от строительной площадки. Таким образом, оператор башенного крана и руководители строительства могут оперировать одними и теми же данными, вне зависимости от своей географической локации [2].

Также в расширенной комплектации приборов (систем) безопасности может предлагаться техническое решение, реализованное в виде подключения систем безопасности к серверу (так называемому облачному хранилищу). В результате у систем безопасности всегда имеется резервная копия базы данных на сервере, что обеспечивает такие преимущества как: возможность сохранения массива данных, неограниченного объемом памяти бортовой электронной системы; повышение надежности сохранения информации. Если данные, поступившие от системы безопасности, будут утрачены, полностью или временно недоступны, их можно будет получить из резервной копии, хранящейся на сервере; при этом теряет актуальность необходимость регулярно скачивать собранные данные, в результате уменьшается объем необходимой работы и исключается вероятность ошибки (влияние человеческого фактора).

1.3. Обзор конструкций систем (приборов) безопасности с регистрацией параметров

Согласно указанным выше ФНП, для предотвращения и (или) минимизации последствий аварий и инцидентов башенные краны в обязательном порядке должны быть оснащены регистраторами, ограничителями, обеспечивающими безопасность технологического процесса обслуживаемого подъемного сооружения (пп. «г» п.9 ФНП) [3].

В Российской Федерации законодатель дал следующее определение системе (прибору) безопасности: «прибор безопасности представляет собой техническое устройство электрического, механического, гидравлического или иного (неэлектронного) типа, устанавливаемое на кране и предназначенное для отключения механизмов в аварийных ситуациях или для предупреждения крановщика (машиниста) об аварийной ситуации» [3].

Для обеспечения безопасной эксплуатации башенных кранов могут применяться различные типы приборов и устройств, способствующие своевременно отключать механизмы крана, тем самым предотвращая опасные

ситуации и столкновения, в большинстве случаев объединённые в единую систему, с возможностью записи параметров работы.

Для башенных кранов, эксплуатируемых на территории Российской Федерации, системы (приборы) безопасности с регистрируемыми параметрами представлены широким модельным рядом:

- российского производства (ООО «Арзамасский электромеханический завод», ОНК-160Б), ООО НПП «Резонанс», ОГМ-240);

- иностранного производства (Liebherr (EMS-1,2,3) (Германия), MANITOWOC POTAIN (Dialog Visu) (Франция), SMIE (DLZ342, AC-246) (Франция), ASCOREL (MC 602) (Франция), CHENGDU HI-TECH CRANE SAFETY (CXT/9011-C) (Китай), CARLO RAIMONDI (Sistema centralizzato RAIMONDI) (Италия), LINDEN COMANSA (DLZ341) (Испания), EVERDIGM (SH-3000) (Корея); Fosow (PM530-I) (Китай) и др [4,5,6].

Устанавливаемые на башенные краны современные системы (приборы) безопасности с регистрируемыми параметрами должны выполнять следующие основные функции:

- защита от перегрузок (ограничение грузоподъёмности), которые могут привести к авариям и инцидентам;
- ограничение движений грузовой тележки, поворота и самого башенного крана на путях;
- защита от случайных воздействий, то есть обеспечивать безопасность работы, обслуживающего персонала;
- контроль за параметрами работы;
- регистрация параметров работы.

Развитие микропроцессорной техники позволило производителям приборов (систем) безопасности значительно расширить свои функциональные возможности, а также увеличить точность измерений, повысить надёжность, обеспечить компактность устройств, гибкость и простоту настройки.

Современные системы (приборы) безопасности различных производителей выполнены по одним и тем же фундаментальным основам и из однотипных

по функциональным возможностям электронных блоков и датчиков. При этом электромеханические компоненты у всех производителей оригинальны и могут отличаться по типу использования физических процессов.

Анализ технических решений показывает, что выбор основ внутреннего наполнения систем (приборов) безопасности в части определения тех или иных фактических условий и требований к эксплуатации и управлению (например, определения веса груза) обусловлен выбором производителями конкретных подходов (способов) к фиксации и количественному измерению параметров эксплуатации, которые можно объединить в следующие группы:

1. Способы определения веса груза;
2. Способы определения длины подвеса груза (поворота стрелы, движения (местоположения) грузовой тележки);
3. Способы определения ветровой нагрузки.

Каждый из указанных способов реализуется посредством отдельного технического решения.

Способы определения веса груза.

На данный момент одним из основных приборов безопасности является ограничитель грузоподъёмности (далее – ОГП), предназначенный для защиты башенных кранов от перегруза. Самыми востребованными и распространёнными являются внешние датчики силы на основе тензометрических датчиков. Применяются также датчики с контакторным управлением (потенциометр линейного перемещения). Также существуют запатентованные разработки (RU 2145701 C1 [7], SU 279093 A [8], SU 158693 A1 [9], SU 120318 A1 [10], RU 2306535 C1 [11] и др.), позволяющие определить вес груза косвенно, по показаниям нагрузки на электродвигатель грузовой лебёдки:

- по потребляемой мощности двигателя;
- по току статора;
- по рассчитанному значению момента двигателя.

Последний тип технических решений не внедрен в массовое производство по причине низкой экономической эффективности, а также сложности исполнения.

В таблице 1.1 приведены большинство типов датчиков используемых у разных производителей, эксплуатирующих системы (приборы) безопасности в Российской Федерации.

Таблица 1.1 – Используемые датчики ОГП по производителям приборов (систем) безопасности

Производитель	Potain	Liebherr	Everdigm	FOSOW	ASCOREL	Резонанс	АЭМЗ
Модель	Dialog Visu + +Top tracing	Likas	SH 3000	PM530-I	MC602	ОГМ240	ОНК-160Б
Тензоось		+	+	+	+		
Датчик силы на растяжение	+					+	+
Электро-механический	+	+			+		

Способ определения длины подвеса груза (поворота стрелы, движения (местоположения) грузовой тележки).

Данный способ реализуется посредством использования датчиков угла поворота, выбор которых обусловлен их назначением. По принципу действия указанные датчики могут быть: оптические (наиболее часто встречающиеся), резистивные, магнитные, индуктивные, механические. В таблице 1.2 представлена классификация датчиков в разрезе производителей приборов (систем) безопасности и особенностей их конструктивного исполнения (по принципу действия).

Таблица 1.2 – Классификация датчиков в разрезе производителей приборов безопасности и по принципу действия

Производитель	Potain	Liebherr	Everdigm	FOSOW	ASCOREL	Резонанс	АЭМЗ
Модель	Dialog Visu + + Top tracing	Likas	SH 3000	PM530-I	MC602	ОГМ240	ОНК-160Б
Оптические	+	+	+	+	+		
Магнитные						+	+
Резистивные	+	+	+	+	+	+	+

Способ определения ветровой нагрузки

Ветровая нагрузка, действующая на башенный кран, определяется с помощью установленного на нем анемометра. Различают следующие типы анемометров: крыльчатые, термоанемометры, ультразвуковые и лазерные.

На большинстве башенных кранов используют крыльчатые анемометры, у которых в основу положен принцип измерения частоты вращения оси с чашками (полусферами), пропорциональной скорости ветра, и технически реализован в основном на оптических датчиках.

Как следует из описанного выше, конструктивное исполнение датчиков и технологическое решения разных производителей схожи между собой.

Подход к серийным производствам датчиков не отличается особыми инновациями. Производители не спешат развивать новые технологии, поскольку затраты на их внедрение ведут к удорожанию конечного продукта. Специфика потребительского спроса на башенные краны заключается в стремлении покупателей к сокращению производственных издержек, в связи с чем покупатели башенных кранов с приборами (системами) безопасности, как правило, делают выбор в пользу дешевого изделия, не учитывая при этом риски, связанные с неправильной эксплуатацией, которые могли бы быть нивелированы более дорогим и передовым техническим решением.

При анализе структурных схем и технических характеристик различных, наиболее используемых в Российской Федерации приборов (систем) безопасности (ОНК-160Б (ООО «Арзамасский электромеханический завод»), ОГМ-240 (ООО НПП «Резонанс»); EMS-3 (Liebherr) (Германия); Dialog Visu (MANITOWOC POTAIN) (Франция); SH-3000 (EVERDIGM) (Корея), PM530-I (Fosow) (Китай)) легко устанавливается сходство таких приборов в части компоновки элементов и внутреннему техническому исполнению устройства. При этом различия проявляются, как правило, в схемотехнике микропроцессорного управления. Если проанализировать программное обеспечение для обработки и получения информации с прибора (системы)

безопасности, то можно увидеть, как схожи визуальные интерфейсы программ расшифровки информации, записанной в регистратор параметров и как аналогичен перенос данных на персональный компьютер для дальнейшей обработки и преобразования в воспринимаемый вид пользователем.

Рассмотрим ниже более подробно конкретные примеры различных приборов (системы) безопасности, сравнивая их в части конструктивного исполнения, программного обеспечения, реализации координатной защиты и защиты от столкновений (при ее наличии).

ОНК-160Б (ООО «Арзамасский электромеханический завод»).

Принцип действия системы (прибора) безопасности, представленного на рисунке 1.2 в виде блок-схемы, основан на логическом сборе данных с датчиков, расчете вылета стрелы, массы поднимаемого груза и степени загрузки башенного крана.



Рисунок 1.2 – Блок-схема ОНК-160Б

«Блоки ОНК объединяются между собой с помощью с помощью последовательного CAN интерфейса, каждый из них имеет свой адрес. Датчики, подключенные к блоку питания (далее – БП), обладают выходом на последовательную линию связи через этот блок.» [12]. Работа системы (прибора) безопасности выполняется под управлением программы, записанной в память микроконтроллера БОИ. Программное обеспечение состоит из: подпрограммы тестирования, подпрограммы настройки, а также и рабочей программы. Управление программами осуществляется с помощью главного меню и подменю [12].

В ОНК-160Б реализованы следующие два типа координатной защиты «Ломаная стена» показанной на рисунке 1.3.

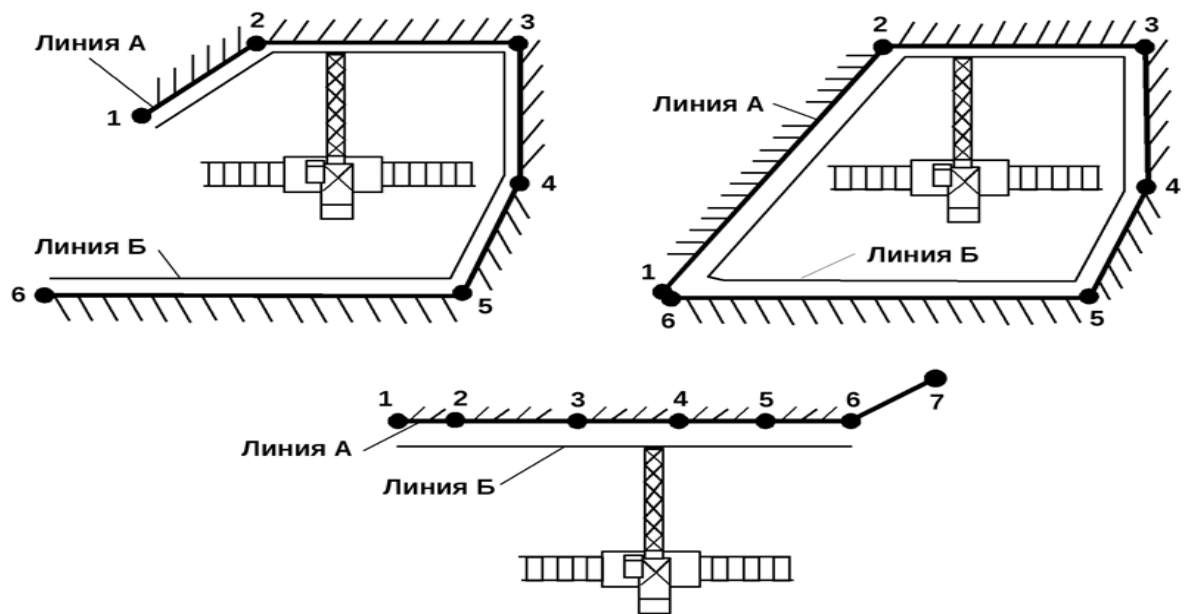


Рисунок 1.3 – Схематическое изображение координатной защиты, реализованной в ОНК-160Б

При использовании ограничителя грузоподъёмности ОНК-160Б и информации, записанной в регистратор параметров, для дальнейшей обработки такой информации, проведения экспертизы башенного крана или при нештатной ситуации, произошедшей на строительной площадке можно

произвести считку и воспользоваться программой ООО НПП «ЭГО» «Анализ регистратора параметров ОНК-160Б», позволяющей осуществлять просмотр данных на персональном компьютере (далее – ПК) под управлением операционной системы Windows [13].

Система (прибор) безопасности (ООО НПП «Резонанс») ОГМ240-40.4 и ОГМ240-41.4 представлена на общей схеме на рисунке 1.4. Данная система (прибор) безопасности выполняет функции: ограничителя грузоподъемности, ограничителя движений крана, координатной защиты, а также регистратора параметров работы башенного крана.

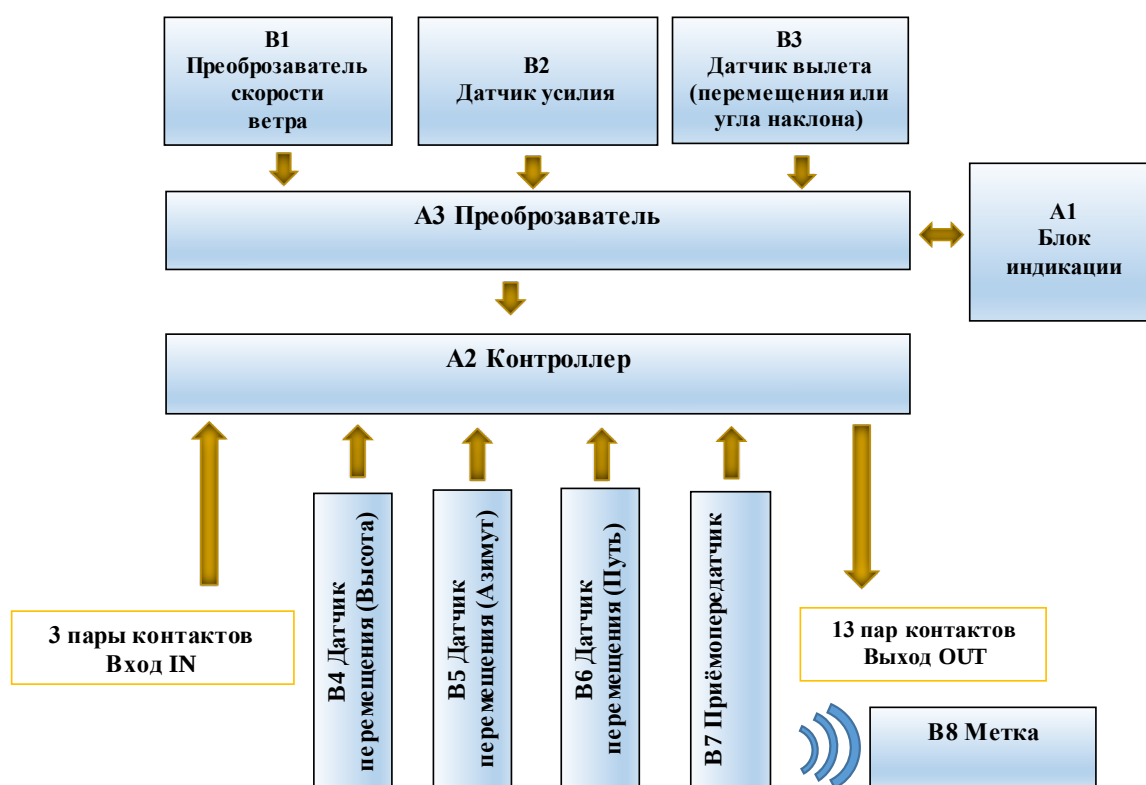


Рисунок 1.4 – Схема электрическая общая ОГМ240

С помощью указанной системы можно определять: «грузовые параметры башенного крана: грузоподъёмность нетто (т), максимальную грузоподъёмность для текущего вылета (т), максимальный вылет с текущим весом груза (м), степень загрузки крана (%); линейные параметры крана: вылет (м) и высоту крюковой подвески (м); дополнительные параметры: положение крана на крановых путях

(м), угол поворота стрелы крана (α), скорость ветрового потока (м/с); наработку крана и механизмов в отдельности в моточасах; количество рабочих циклов; класс использования, группу режима работы крана, коэффициент распределения нагрузок по ИСО 4301/1» [14].

В ОГМ240 реализованы такие виды координатной защиты, как: воображаемая вертикальная бесконечная плоскость, перпендикулярная проекции стрелы и крюковой подвески на землю и построенная по срезу оголовка стрелы и крюковой подвески. Графический интерфейс ОГМ240 координатной защиты представлен на рисунке 1.5 [14].

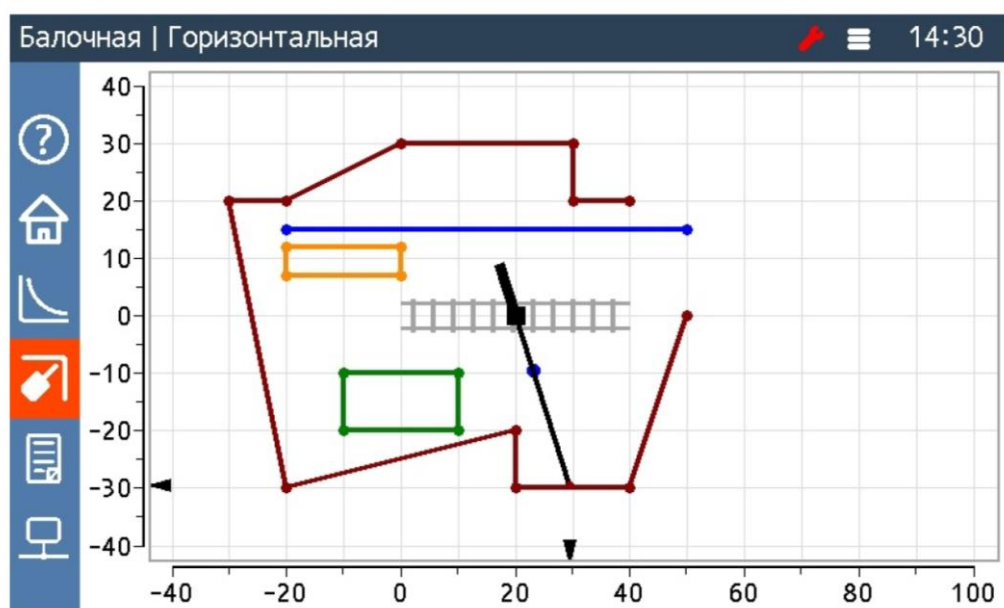


Рисунок 1.5 – Графический интерфейс координатной защиты ОГМ240

«Регистратор параметров состоит из трёх областей памяти, предназначенных для хранения: оперативной информации; о перегрузках крана и долговременной информации» [14].

«Оперативная информация и информация о перегрузках состоит из набора записей и включает в себя: дату и время; степени загрузки крана; значение массы груза и максимально допустимой массы груза для текущего вылета; значение вылета, высоты подъема крюка, угла поворота стрелы крана, скорости ветрового потока и с датчиков; положение крана на рельсовом пути; информацию

о дискретных входах и выходах, о сработавших ограничениях, о принудительном снятии блокировки с механизмов крана» [14].

Обработка и печать данных регистратора параметров производится на ПК под управлением операционной системы Windows с помощью программы LogSystem. Данные на ПК сохраняются в файлах с расширением «LGK».

Передача данных на ПК осуществляется с помощью USB флешкарты. Для считывания регистратора параметров (далее – РП) необходимо: вставить USB флешкарту в блок индикации и считать информацию после этого «запустить файл считанного РП с расширением «LGK», автоматически запустится программа преобразования LogConverter, результатом работы программы станет файл с расширением «lgs» и после запустится программа LogSystem с открытым файлом считанного РП. Обработка и распечатка данных регистратора производится согласно руководству пользователя программы LogSystem» [15].

В целях объективного анализа приборов (систем) безопасности рассмотрим далее конструктивное исполнение аналогичных по задачам устройств, предлагаемых иностранными производителями, имеющими в настоящее время конкурентное преимущество перед отечественными системами за счет внедрения в производство и эксплуатацию более технологичных решений.

Например, в башенных кранах Liebherr на практике реализованы два типа управления кранами: «FR.Tronic» (контакторное управление) и «Litronic» (система электронного управления на программном уровне, хранящегося в электронных блоках АВВ) отличающихся между собой внедрением в систему управления более сложного, с точки зрения технической реализации, прибора (системы) безопасности.

На башенные краны Liebherr устанавливается электронная мониторинговая система EMS, которая является центральным элементом управления и индикации среди оборудования для управления краном, выпускаемого фирмой Liebherr Biberach (компоненты системы LIKAS). Существует три поколения мониторинговой системы: EMS 1, EMS 2, EMS 3.

В зависимости от конструкции крана система EMS может быть подключена одна или в комбинации с другими компонентами LIKAS.

Этими компонентами могут быть:

ABB – электронный модуль ограничения рабочей зоны;

LMB – электронный модуль ограничения грузоподъемности;

MDE – модуль сбора данных о работе машины;

AKS – электронный модуль предотвращения аварий.

Принцип работы EMS 1, EMS 2 (для «FR Tronic») показан на рисунке 1.6 и основан на системе кранов с контакторным управлением фирмы Liebherr.

Модуль MDE собирает основные сигналы управления краном, которые в свою очередь логически обрабатывает и хранит, определяет и регистрирует данные о нагрузке крана, продолжительности включений, циклах включений и циклах нагрузки. После регистрации указанных данных их индикация производится соответствующей подключенной консолью управления (EMS, дисплей). Машинные данные хранятся в двух областях: данные кратковременного хранения (M1 – M3). Эти данные могут храниться, например, в течение 2400 часов, после чего удаляются. Время их регистрации отображается на дисплее. Данные длительного хранения (ML11 – ML4) хранятся в течение всего срока службы консоли управления и не могут быть удалены. ML4 регистрирует время работы в посменном режиме.

Электронный модуль (ABB) обеспечивает защиту крановщику на рабочей площадке, позволяя перемещения стрелы или грузового крюка только в разрешенной зоне. Перед выходом их из разрешенной зоны приводы сразу же снижают скорость и затем полностью останавливаются. Сигналы датчиков непрерывно обрабатываются центральным блоком (ABB/MDE). При этом он сравнивает мгновенные значения положения механизма поворота и тележечной лебедки с максимально допустимыми значениями рабочей зоны, хранящимися в памяти этого блока. Если кран и, следовательно, актуальные значения угла поворота и вылета приближаются к запрограммированным

граничным значениям, то при достижении этих значений для соответствующего передвижения, привод плавно затормаживает в режиме торможения, специального разработанного для механизмов поворота фирмой Liebherr.

Когда кран находится в допустимой зоне работы, сигналы управления с команд контроллера подаются далее только через модуль ограничения рабочей зоны [16].

Принцип работы EMS 2, EMS 3 (Litronic) представлен на рисунке 1.7. В распорядительном шкафу S1 (расположенном в кабине) находятся центральные электронные блоки (ABB) KT98-S и KT98 с управлением крана. Модули программного обеспечения LMB, ABB и MDE встроены в указанные центральные блоки (флеш-стираемые программируемые постоянные запоминающие устройства).

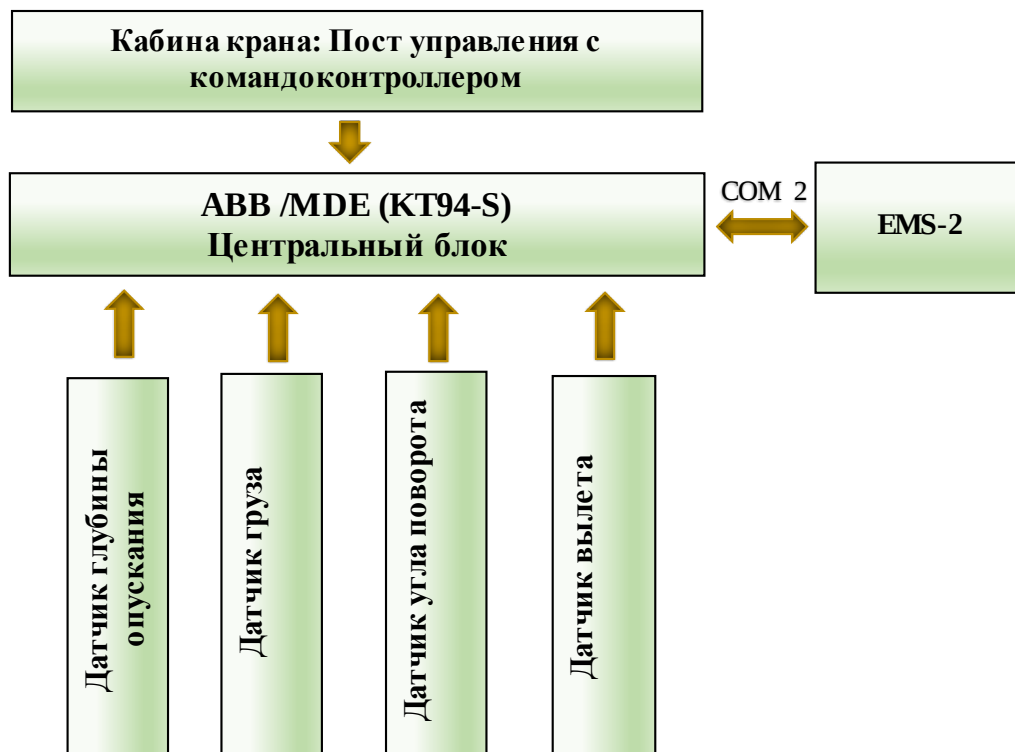


Рисунок 1.6 – Функциональная схема EMS 2

Шина CS31-BUS (полевая шина) соединяет программируемый логический контроллер (далее – ПЛК) (ABB) (KT98-S) и (KT98) со всеми децентрализованными, обеспечивающими безопасность местными модулями.

Следующее поколение системы безопасности в Liebherr и новейшая разработка компании Liebherr, представлена в виде электронной мониторинговой системы EMS-3 (Litronic3 AC500-S) и подробно описана автором в статье «Современные приборы безопасности башенных кранов, оснащённые регистраторами параметров и их перспективное развитие» [17].

Модуль АВВ (ограничение рабочих зон) схож в функциональных возможностях с разными поколениями EMS 1,2,3 и является защитным устройством, позволяющим крановщику при повороте крана перемещать грузовой крюк или стрелу только в строго отведенной рабочей зоне. Перед выходом из допустимой рабочей зоны все приводы сначала сокращают скорость и затем полностью останавливаются [17].

Ограничение рабочих зон (АВВ) применяется там, где внутри рабочей зоны крана имеются препятствия (здания, высоковольтные линии электропередач, железнодорожные пути и т.д.), которые не должны попасть в зону досягаемости грузового крюка или стрелы крана.

Рабочая зона свободностоящего крана представляет кругообразную площадь, которая составляется из максимального вылета и зоны поворота (360°), показанной на рисунке 1.8. Запрещенные зоны – это запрограммированные в рабочей зоне площади (фигура ограничения), в которые грузовому крюку крана запрещено заходить.

Фигуры ограничения могут быть настроены в любое время и для любой строительной площадки.

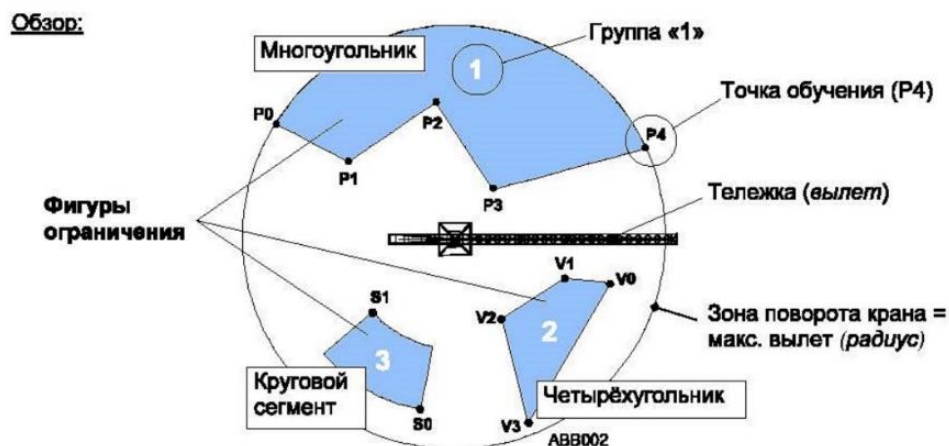


Рисунок 1.8 – Рабочие зоны координатной защиты АВВ

Для управления системой ограничения рабочих зон (ABB) имеются два рабочих режима:

- Режим обучения «teach-in», обеспечивающий программирование фигур ограничения. Программирование фигур ограничения выполняется в процессе наезда на допустимые точки ограничения. При наезде на такие точки, их координаты сохраняются в центральном блоке SPS. Запрограммированные точки связываются системой ABB друг с другом, образуя, таким образом, фигуру ограничения. Окончательно запрограммированные и действительные фигуры ограничения обозначаются определенной цифрой [17].

- Рабочий режим, в котором постоянно определяется актуальное положение стрелы и тележки и сравнивается с сохраненными данными обучения. Как только кран приближается к запрещенной зоне, то автоматически запускается процесс торможения механизма поворота или тележечной лебедки.

Принцип действия системы ABB построен на комбинации ручного управления и автоматизации. С одной стороны, система ABB управляется автоматически работающими компонентами (датчиками), с другой – при помощи ручного вмешательства машиниста (оператора) крана. Управляющие сигналы, поступающие от пульта управления и джойстиков, передаются через шину (PROFINET) в центральный блок-системы SPS и обрабатываются.

Устанавливаемые посредством ABB ограничения рабочей зоны позволяют успешно предотвращать столкновения с препятствиями. Но это справедливо только для случаев, когда такие препятствия заранее программируются [17].

Система защиты от столкновений (AKS) является устройством защиты, которое должно предотвратить возможное столкновение стрелы с соседними кранами. Эта система применяется там, где несколько кранов стоят очень близко друг к другу и их радиусы поворота (рабочие зоны) пересекаются. Система защиты от столкновений (AKS) является внешней «Системой поддержки крановщиков» и поэтому она не интегрирована в систему управления крана. Индикация «AKS» открывается в окне параметров LMB и служит только для визуализации сигналов от AKS.

При использовании системы защиты от столкновений (AKS), показанной на рисунке 1.9, в рабочей зоне крана появляются несколько секторов. Зеленый сектор – это свободная рабочая зона без ограничения. Оранжевые сектора – пограничные зоны с заблокированными зонами (красный цвет). Внутри этих пограничных зон приводы крана затормаживаются и перед достижением заблокированной зоны (красный цвет) останавливаются. Красный сектор заблокирован, если тележка следующего крана находится в этой зоне столкновения. Здесь кран может поворачиваться только в том случае, если при имеющейся монтажной высоте и высоте под крюком не существует опасность столкновения.

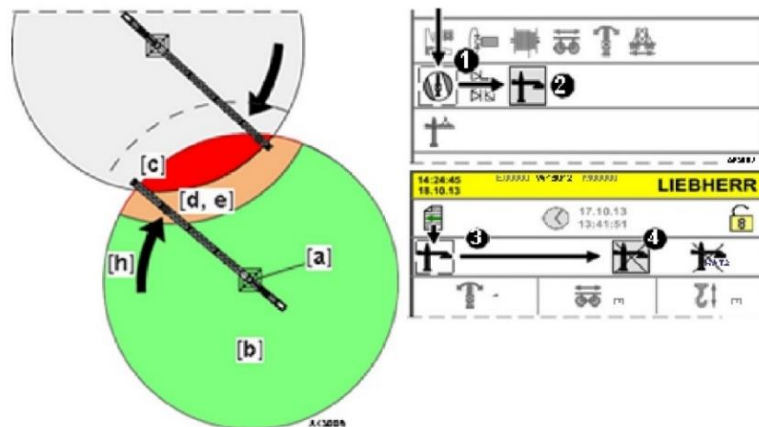


Рисунок 1.9 – Система защиты от столкновений (AKS)

Индикация направления системы защиты от столкновений (AKS) должна показать крановщику, в каком из этих секторов кран находится в настоящий момент [18]. Производителем Liebherr разработана программа LIKOM, которая представляет собой вид телекоммуникационного сервиса и обеспечивает возможность создания связи с башенными кранами компании Liebherr по всему миру.

Система телекоммуникационного сервиса включает в себя следующие подсистемы, являющиеся компонентами программы LIKOM:

- Регистратор параметров рабочих механизмов (MDE)
- Систему дистанционной передачи данных (RDT) и анализатор параметров рабочих механизмов (MDA). Модули RDT и MDA.

Необходимыми условиями дистанционной передачи данных (далее RDT) по телефонной линии или беспроводной связи (мобильный телефон) является оснащение выбранного крана компании Liebherr соответствующим интерфейсом (интерфейсный модуль RDT), а также наличие соответствующего установленного модемного соединения для программы LIKOM.

Существует несколько способов подключения программы LIKOM к системе управления краном:

прямое соединение ПК с системой управления краном (PLC) через последовательный кабель. Кабель является компонентом офисного оборудования (для кранов с PLC, Litronic);

прямое соединение ПК с монитором крана (EMS) через последовательный кабель. Кабель является компонентом офисного оборудования (для кранов с контакторным управлением);

подключение внешнего аналогового модема к COM-интерфейсу. Модем является компонентом офисного оборудования;

через внутренний аналоговый модем;

через мобильный телефон, подключенный с использованием кабеля, ИК-порта или технологии Bluetooth;

через внешний аналоговый модем, подключенный через USB.

Оперативные данные с крана (т.е. данные о текущем рабочем состоянии крана) обновляются приблизительно каждую секунду и, при необходимости, в памяти могут быть сохранены общие технические параметры крана. Кроме этого, для новых кранов с версией системы управления не ниже «АС31-S», дополнительные данные, такие как график нагрузки при колебании каната также сохраняются в памяти.

Файл технических параметров служит источником данных для анализа технических параметров. Он выполняет синхронизацию всех окон анализа общих

технических параметров, таких как: весовые данные, статистические данные (например, период активации), отчеты (сообщения об ошибках, предупредительные сообщения, и т.п.), данные системы АВВ (система ограничения рабочей зоны).

Краны с управлением AC31-S совместимы с обновленными техническими параметрами: размерные диаграммы, диаграммы нагрузки, диаграммы системы АВВ, SWP-данные.

В отличие от файла технических параметров, который соответствует специальным требованиям источника данных, эти данные могут сохраняться в виде текстового файла и выводиться на печать.

Для расшифровки, записанной в регистраторе параметров Liebherr информации используется программа «Likom-Cran» Communication software for Liebherr Tower Crane [19].

Система безопасности китайского производителя PM530-I (Fosow) используется не только на башенных кранах ZOOMLION, поскольку имеет возможность устанавливаться на башенные краны других производителей. PM530-I представляет собой систему контроля безопасности, которая осуществляет, защиту от перегрузок по массе и грузовому моменту, защиту безопасных зон, предотвращение столкновений и запись данных в черный ящик. Система безопасности PM530-I включает в себя следующие основные компоненты: дисплей, главный контроллер, датчик перемещения грузовой тележки (датчик угла наклона стрелы), датчик высоты, датчик поворота (датчик абсолютного положения, многооборотный энкодер), датчик подъемной массы, модуль связи, анемометр, соединительные линии управления представленной на рисунке.1.10.

В системе безопасности PM530-I (Fosow) реализована функция защиты безопасной зоны, когда на месте проведения строительных работ для башенного крана определена зона, в которой запрещено находиться стреле и грузовой тележке, что не дает башенному крану нарушить заданные границы.

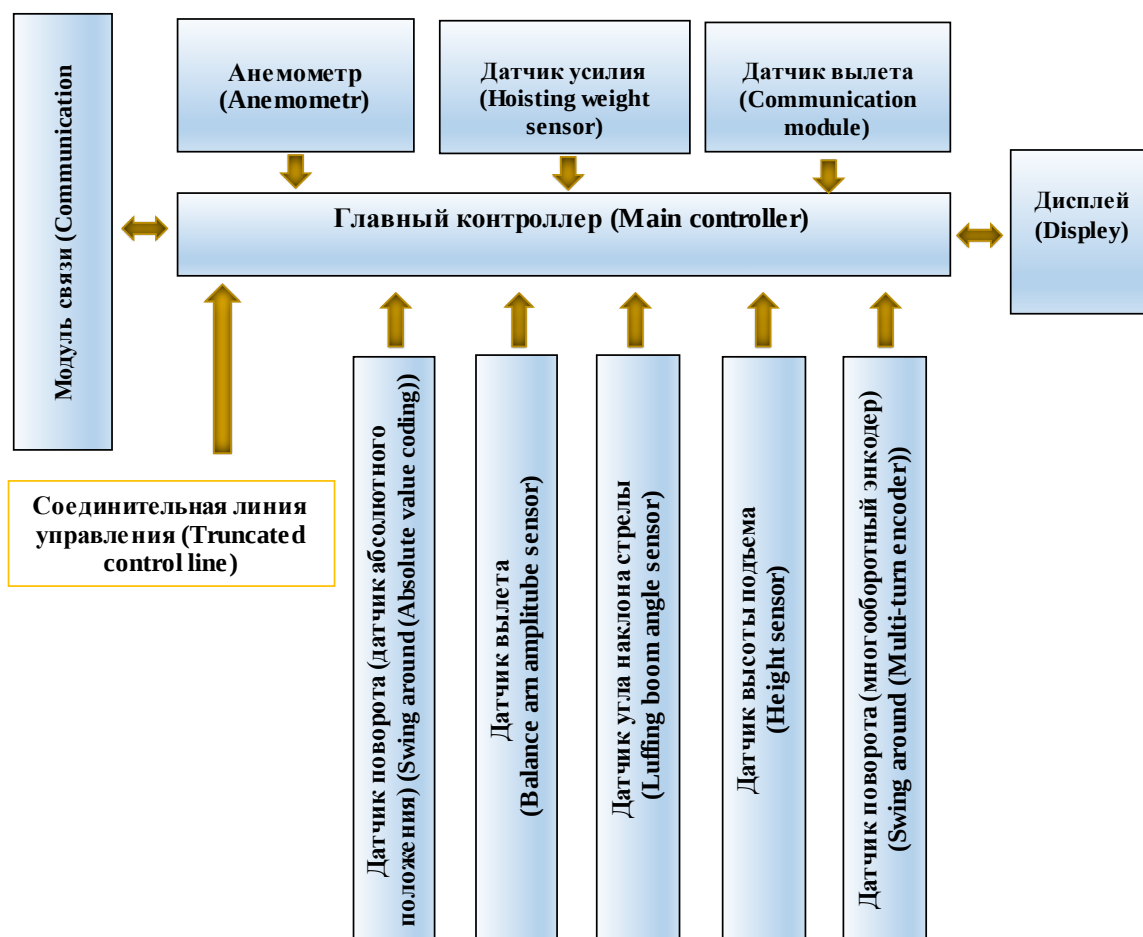


Рисунок 1.10 – Система безопасности PM530-I (Fosow)

Данная функция реализуется в несколько этапов:

Первый этап, выбор типа безопасной зоны: внутренней/внешней с учетом фактических рабочих условий.

Второй этап, задание опорных точек: крюковая подвеска подводится к границе зоны и добавляется точка. Устройство запишет угол и расстояние в текущем положении. Для определения безопасной зоны задаётся не меньше 3 точек. Можно задать не более 10 безопасных зон, для определения каждой зоны можно использовать не более 10 точек. Также можно задать параметры сигнализации безопасной зоны.

В системе безопасности PM530-I (Fosow) реализована функция предотвращения столкновений: если в рабочем радиусе башенного крана находится другой башенный кран и возможно их столкновение, для ограничения защиты крана применяется функция предотвращения столкновений. Когда

включена функция предотвращения столкновений, в главном окне вместо схематичного изображения башенного крана отображается только его текущее положение на виде сверху. Верно и обратное: когда функция предотвращения столкновений отключена, в главном окне отображается схематичное изображение башенного крана с элементами для пуско-наладки и текущее положение крана на виде сверху.

Если требуется просмотреть журнал башенного крана, необходимо подключить к USB-порту главного контроллера внешний накопитель и загрузить интересующие записи для просмотра на ПК с помощью операционной системы Windows.

С использованием диалоговых окон возможно отобразить на экране различные журналы записей:

- о рабочих циклах (Work Record): содержит записи о рабочих циклах с подробными сведениями о башенном кране, в т.ч о крюке, максимальной грузоподъемности, желобе шкива, данных о работе трех узлов. При заполнении памяти, записи отображаются на красном фоне;

- о реальном времени (Realtime record): отображает записи в режиме реального времени, они содержат подробные сведения о рабочем состоянии башенного крана в реальном времени;

- о скорости ветра (Wind speed record): отображает предупреждения о скорости ветра с подробным указанием значения скорости ветра, режима определения скорости ветра и времени срабатывания сигнализации во время работы башенного крана;

- о состоянии датчиков (Sensor state record): отображает записи о состоянии датчиков, находящихся в работе, а также подробные сведения о времени и значениях срабатывания реле;

- о рабочих записях (Operation record): отображает записи о работе устройства, которое фиксирует обход системы, выбор длины стрелы, значение и время и переключения скорости;

- о калибровке (Calibration record): отображает записи о калибровке диапазона перемещения, высоты, подъемной массы с подробными сведениями о различных параметрах башенного крана и с указанием времени;

- о времени работы (Run time record): отображает записи счетчика времени, который фиксирует дату и время включения, и продолжительность работы системы;

- о срабатывании сигнализации (Alarm record): отображает записи о срабатывании сигнализации безопасной зоны и предотвращения столкновений с указанием типа опасной ситуации и времени ее возникновения [20].

Для сводного анализа приборов безопасности, эксплуатируемых на башенных кранах в отечественном строительном сегменте данные по их конструктивным особенностям можно свести в сравнительную таблицу представленной в таблице 1.3. Из указанной таблицы видно, что более современный и конструктивно совершенный, но при этом и сложный в эксплуатации и обслуживании прибор (система) безопасности представлен производителем Liebherr.

В тоже время технически удобные и менее проблемные в эксплуатации, конструктивно упрощённые, и имеющие функции настроек параметров с помощью графического сенсорного дисплея – это приборы (системы) безопасности таких производителей, как: EVERDIGM (SH-3000) и Fosow (PM530-I). При этом автор обращает внимание, что за основу технических решений и технической базы этих производителей взяты лучшие разработки Liebherr, POTAIN, SMIE, ASCOREL.

Таблица 1.3 – Сравнительная таблица основных приборов безопасности

Производитель	Potain	Liebherr	Everdigm	FOSOW	ASCOREL	SMIE		Резонанс	АЭМЗ
Модель	Dialog Visu + + Top tracing	Likas	SH 3000	PM530-I	MC602	АС 246	DLZ342	ОГМ 240	ОНК-160Б
Дисплей	Графический	Графический	Графический, сенсорный	Графический, сенсорный	Графический	Матричный с индикаторами	Графический	ЖК (графический - опция)	ЖК
Взаимодействие с системой	Кнопки лампы и зуммер	Кнопки	Сенсорный дисплей	Сенсорный дисплей	Кнопки	Контрольные лампы, зуммер	Кнопки и зуммер	Кнопки, индикаторы, контрольные лампы	Кнопки, индикаторы, контрольные лампы
Программиро- вание	Дисплей и кнопки	Дисплей и кнопки	Дисплей	Дисплей	Дисплей и кнопки	Программа- тор	Дисплей и кнопки	Дисплей и кнопки	Дисплей и кнопки
Защита от столкновений	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет	Нет
Ограничение рабочей зоны	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть
Ограничение по высоте подъема	Нет	Есть	Есть	Есть	Нет	Да	Да	Есть	Да
Система дистанционной передачи данных	Нет	Есть	Нет	Есть	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет

1.4. Развитие систем (приборов) безопасности башенного крана: анализ теоретических исследований и оценка перспектив развития

Условия эксплуатации башенного крана имеют свою специфику и отличаются от иных типов грузоподъемных машин, в том числе, высокой опасностью раскачивания груза. Данное явление обусловлено конструктивными особенностями башенного крана, габаритно-массовыми характеристиками опорной конструкции (башни) и стрелы.

Исследованиям в области колебаний груза и предотвращения или уменьшения такового на грузоподъемных машинах посвящены разработки отечественных и иностранных авторов таких как: Гаранин Н.П. [21], Дроздович В.А. [22], Зарецкий А.А. [23,24,25,26]; Каминский Л.С. [27,28], Корытов М.С. [29,30,31,32]; Либерман Я.Л. [33,34]; Сохадзе А.Г. [35]; Терехов А.М. [36,37]; Щедринов, А.В. [38]; Щербаков В.С. [39,40,41,42]; а также в работах зарубежных ученых Blackburn D. [43], Manson G. [44], Ridout A.J [45].

Анализируя технические решения и разработки, внедрённые в производство и эксплуатацию на грузоподъёмных машинах, а также технические решения в виде перспективных разработок на стадии патентного решения, можно выделить основных лидеров процесса контроля колебаний груза, таких как: Magnetek Inc. (США) Electromotive Systems antiSwing Control (ASC) [46]; CAMotion (США), EXPERTOPERATOR [47]; Konecranes (Финляндия) Sway Control System [48,49]; AntiswayComplete [50].

Также, по мнению автора, необходимо выделить разработку компании Siemens (Германия), которая предлагает систему управления SIMOCRANE с функцией контроля раскачивания груза [51]. У данного производителя имеются две системы: SIMOCRANE CeSAR автономная система контроля раскачивания и SIMOCRANE SC, как встроенная система в привод SIMOTION D. Система может дополняться измерительный оптической камерой в сочетании с рефлектором.

Система контроля раскачивания SIMOCRANE основана на математической модели подвешенного груза, как маятника. При использовании камеры параметры высоты подъема, угла отклонения и поворота груза измеряются в режиме реального времени и передаются в математическую модель. В варианте без камеры используются только результаты расчета модели.

Для башенных кранов можно выделить технические решения в виде существующих видео опций к системам безопасности, которые косвенно относятся к мониторингу за раскачиванием груза и функционально представляют опции по контролю за соблюдением техники безопасности работниками на строительной площадке, и лишь в незначительной степени могут быть полезны машинисту (оператору) при работе грузом.

Например, производитель башенных кранов Potain может устанавливать видеокамеры на каретке башенных кранов. Также свою систему видеонаблюдения VG3 предлагает компания AGS (Франция). Производителем Pacific Systems Solutions (США) разработана система HookCam [52], которая передает в кабину

машиниста (оператора) крана изображение с беспроводной камеры, установленной на крюковом повесе.

Недостатком технических решений, предусматривающих установку видеокамер, является низкая детализация передаваемого изображения, вследствие чего теряется информативность восприятия объектов. Установление же камер более высокого разрешения повлечет за собой использование соответствующего средства визуализации – монитора с большими габаритами, обеспечивающего изображение высокого разрешения. При этом установка такого монитора в стеснённых условиях кабины башенного крана без нарушения обзорности будет весьма затруднена.

Также на изображение могут влиять такие факторы, как: блики от объектов в солнечную погоду, блики в кабине на мониторе, освещённость строительной площадки, погодные условия, затрудняющие видимость. Кроме того, имеет место немаловажная проблема, связанная с обеспечением электропитанием работы указанного оборудования.

Анализ результатов патентного поиска по разработкам в области приборов (систем) безопасности всех видов грузоподъёмных машин выявил группы основных патентообладателей заявленных разработок: ООО «Научно-производственное предприятие «Резонанс», ООО «Научно-производственное предприятие «ЭГО» (RU); КОУНКРЭЙНС ПЛК (FI); ХУНАНЬ САНИ ИНТЕЛЛИДЖЕНТ КОНТРОЛ ЭКВИПМЕНТ КО. ЛТД. (CN); ЛИБХЕРР-ВЕРК БИБЕРАХ ГМБХ (DE); ВИНАТИ С.Р.Л. (IT); КИТАЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГОРНОГО ДЕЛА И ТЕХНОЛОГИИ (CN).

Разработки, связанные с повышением уровня техники безопасности при работе грузоподъёмных кранов с грузом, позволяющие своевременно выявлять опасное раскачивание груза (при перемещении или нарушении установленной технологии погрузки-разгрузки, или допущенное работниками, обслуживающими работу грузоподъёмного крана) представлены во многих технических решениях, запатентованных в Российской Федерации и за рубежом.

Их анализ за период 2006 – 2022 свидетельствует о высоком перспективном научно-техническом потенциале в данной сфере.

Среди указанных актуальных разработок на данный момент можно выделить целый ряд изобретений систем безопасности грузоподъемных кранов: Способ повышения безопасности и система безопасности стрелового грузоподъемного крана (патент RU 2700312 C1) [53], Устройство и способ управления раскачиванием груза, подвешенного на подъёмном устройстве (патент RU 2676210 C1) [54], Систему, устройство и способ текущего контроля положения и ориентации транспортного средства, погрузочного устройства и груза при работе погрузочного устройства (патент RU 2623295 C2) [55], Систему безопасности и управления грузоподъёмной машины (патент RU 189103 U1) [56] и т.д.

При этом, по мнению автора следует выделить наиболее значимые разработки:

- Патент RU 2 676 210 C1 Устройство управления раскачиванием груза, подвешенного на снабженном двигателем подвижном элементе, который может перемещаться вдоль горизонтальной оси. Устройство управления содержит блок управления и инерциальную платформу. Инерциальная платформа способна определять характерные значения угла наклона троса, который поддерживает груз, относительно вертикали и снабжена средством передачи этих значений в блок управления. Блок управления снабжен средством измерения и управления скоростью снабженного двигателем подвижного элемента и способен так обработать эти значения, характеризующие угол наклона троса относительно вертикали, чтобы рассчитать и передать управляющие действия, направленные на динамическое изменение скорости снабженного двигателем подвижного элемента в зависимости от желаемого угла наклона троса относительно вертикали.

Блок управления содержит пропорциональный контроллер с изменением коэффициента усиления, снабженный средством вычисления переменного коэффициента усиления, применяемого для управления скоростью снабженного двигателем подвижного элемента в зависимости от расстояния от груза до снабженного двигателем подвижного элемента. Предложены также способ управления раскачиванием груза и устройство управления для подъемного устройства. Достигается стабилизация колебаний груза, как во время обычных операций, так и из-за этапов резкого торможения или ускорения [54].

Недостатки данного устройства и способа заключаются в сложности (многокомпонентности) конструкции с большим количеством технических элементов, снижающей экономическую эффективность от использования такого устройства. Кроме того, непосредственно само место расположения датчиков акселерометра и гироскопа в конструкции (на инерциальной платформе, расположенной на неподвижной оконечной муфте каната, поддерживающего захватывающий груз элемент) негативным образом сказывается на надежности указанного устройства, а также обуславливает трудоемкость процесса его монтажа и обслуживания.

«Система мониторинга грузоподъемной машины, содержащая: устройство регистрации параметров грузоподъемной машины, включающее в себя цифровой вычислительный блок, периферийные устройства регистрации параметров грузоподъемной машины и встроенное запоминающее устройство, связанное с цифровым вычислительным блоком цифровой линией связи; и блок архивации и трансляции параметров грузоподъемной машины, включающий в себя контроллер, к которому подключены энергонезависимое запоминающее устройство и порт для связи с внешним компьютером. Блок архивации и трансляции параметров подключен к цифровой линии связи и снабжен соединенным с контроллером портом для подключения к цифровой линии связи и устройством индикации.

В качестве энергонезависимого запоминающего устройства использован твердотельный легкоъемный накопитель информации, а цифровая линия связи выполнена в виде интерфейсной шины обмена информацией между составными частями устройства регистрации рабочих параметров и блоком архивации и трансляции параметров» [57] (патент RU 172 638 U1).

Недостатком указанного устройства является отсутствие у него возможности учета положения углов грузовых канатов, являющейся второй по значимости задачей (после оценки определения массы груза) приборов безопасности, установленных на грузоподъемных кранах.

«Устройство определения положения крюка, содержащее: инструмент для измерения угла, выполненный с возможностью измерения угла между осью координат второй системы координат и соответствующей осью координат первой системы координат в режиме реального времени; измеритель ускорения, выполненный с возможностью измерения ускорения крюка в заданном направлении в режиме реального времени; процессор, выполненный с возможностью создания первой системы координат и второй системы координат, причем первая система координат установлена относительно заданного положения, и вторая система координат установлена относительно крюка, при этом ось координат первой системы координат соответствует оси координат второй системы координат; и параметры положения крюка в первой системе координат получают на основе угла, измеренного инструментом для измерения угла, и ускорения, измеренного измерителем ускорения; и устройство вывода, выполненное с возможностью выдачи параметров положения» [58] (патент RU 2 516 812 C2).

Недостатком данного устройства является отсутствие системного подхода к обеспечению возможностей его фактического использования (отсутствуют возможности подключения его к приборам безопасности грузоподъемного крана, осуществления записи, и последующих обработки и анализа параметров работы с грузом).

По результатам анализа большинства вышеуказанных разработок выявлено, что они характеризуются недостаточной точностью измерений, и как следствие, выделяется общий недостаток указанных устройств, заключающийся в отсутствии системного подхода к их использованию: не предусмотрена возможность подключения к приборам безопасности крана или совместной работы, а также записи и последующей обработкой и анализа параметров работы с пространственным положением груза [17].

Выводы по главе 1

1. Проведен анализ аварий башенных кранов за период 2017 – 2021. Исходя из данных Ростехнадзора следует, что по отношению к другим грузоподъемным машинам башенные краны характеризуются повышенной аварийностью.

2. Проведён структурный анализ российского парка башенных кранов, оборудованных системами (приборами) безопасности с регистрацией параметров. Выявлено преобладание широкого модельного ряда башенных кранов иностранного производства (сертифицированных в Российской Федерации). Башенные краны отечественного производства представлены всего лишь несколькими производителями. Поэтому, на данном этапе в целях настоящего исследования, по мнению автора, при разработке технических решений, связанных с приборами (системами) безопасности, целесообразно ориентироваться на башенные краны иностранного производства.

3. Проведён сравнительный анализ и обзор конструкций систем (приборов) безопасности с регистрацией параметров, а также возможные способы определения параметра того и или иного устройства, установленного на башенном кране. Сделан вывод, что более современный и конструктивно совершенный, но при этом и сложный в эксплуатации и обслуживании это вид системы безопасности немецкого производства Liebherr EMS-3 (Litronic3 AC500-S). В тоже время более удобные и менее проблематичные в эксплуатации, конструктивно упрощённые, технически удобные и имеющие функции настроек параметров с помощью графического сенсорного дисплея – это приборы (системы) безопасности таких фирм как: EVERDIGM (SH-3000) (Корея) и Fosow (PM530-I) (Китай).

4. Сделан обзор теоретических исследований, связанных с усовершенствованием систем приборов безопасностей. На основе анализа запатентованных систем приборов безопасности дана оценка перспективам имеющихся разработок. Среди немногочисленных отечественных производителей

выделяется ООО НПП «Резонанс», которое старается совершенствовать свою продукцию и не отставать от зарубежных конкурентов. Но с учетом вышеизложенного и выявленных недостатков существующих систем безопасности башенных кранов обоснована необходимость разработки нового подхода к созданию систем, обеспечивающих максимальную результативность и точность получаемых измерений перспективное развитие.

5. При всём научно-техническом прогрессе и перспективных разработках, реализованных как в приборах безопасности, так и в системах управления башенными кранами, остаётся актуальной проблема обеспечения мониторинга угла отклонения канатов, а также возможность технической реализации предотвращения раскачивания (колебания) груза или предупреждения (сигнализации) при этом учитывая все составляющие, влияющие на него.

Цель и задачи исследования

Цель работы заключается в повышении безопасности и эффективности эксплуатации башенных кранов посредством разработки способов мониторинга и регистрации положения грузового каната и груза, перемещаемым башенным краном и контроля за опасными отклонениями каната от вертикальной оси, в т.ч. в условиях ограниченной видимости.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Смоделировать процессы развития колебаний грузового каната при: вращении башни крана; движении грузовой тележки и отклонение груза от ветровой нагрузки.

2. Разработать математическую модель затухающих колебаний при торможении грузовой тележки на стреле крана, при двойной запасовке каната и разным расстояниями нитями каната.

3. Провести экспериментальные исследования процесса затухания колебаний при двойной запасовке каната.

4. Провести натурные экспериментальные исследования процессов колебаний грузового каната.

5. Предложить инженерное техническое решения для фиксации и мониторинга колебаний грузового каната.

6. Смоделировать во время экспериментальных исследований меры по предотвращению раскачивания груза и выбора оптимальных параметров для процессов таких как: вращения башни крана; движения грузовой тележки и отклонения груза от ветровой нагрузки.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ БАШЕННЫХ КРАНОВ

2.1. Особенности конструкций параметров работы крана

Из поставленных в главе 1 задач требуется найти оптимальное техническое решение, позволяющее осуществить возможность фиксации и мониторинга колебаний груза, для чего следует:

1. Разработать теоретическую схему связи между машинистом (оператором) крана, выполняющим задание по перемещению груза, и требуемыми функциональными возможностями разрабатываемого устройства, позволяющего минимизировать риски, связанные с колебанием (раскачиванием) груза.

2. Теоретически описать измерения раскачивания груза с помощью средств акселерометра и гироскопа.

3. Предложить инженерное техническое решение для фиксации и мониторинга колебаний грузового каната с возможностью установки на действующие краны.

Теоретическая схема связи между машинистом (оператором) крана и требуемыми функциональными возможностями разрабатываемого устройства может быть представлена в виде модели обеспечения безопасности башенного крана, описываемая процессами, связанными с действием на груз различных групп факторов, выявлением последствий действия таких факторов (мониторинга колебания груза) и управлением колебанием груза посредством соответствующего устройства (прибора безопасности) (рисунок 2.1).

Для реализации возможностей совершенных и эффективных способов текущего мониторинга положения в пространстве грузового каната и крюковой подвески (как с грузом, так и без), а также контроля за положением груза, целесообразно использовать прибор безопасности, который может определять колебания груза, и имеет обратную связь с машинистом (оператором), выводя визуальную информацию на монитор для дальнейших действий по уменьшению или предотвращению раскачивания груза, либо связь

с системой управления башенным краном. Такой прибор при определённых параметрах отклонения груза способен предпринимать заложенные в программу управления действия для предотвращения раскачивания груза.



Рисунок 2.1 – Модель обеспечения безопасности башенного крана

Схему работы прибора безопасности и порядок действий машиниста (оператора) крана можно описать следующим образом.

При получении задания по перемещению крановщик (оператор) должен переместить груз безопасно. Вместе с тем внешние факторы (такие как ветровая нагрузка, длина подвеса подъёма или опускания, движение грузовой тележки, поворот стрелы, вес и объем груза, а также податливость крана) влияют на раскачивание груза. Прибор, определяя угол отклонения в основе акселерометра и гироскопа, даёт обратную связь машинисту (оператору) для осуществления безопасного перемещения.

При отлаженной работе и правильных действиях машиниста (оператора) с прибором безопасности достигается: повышение безопасности при эксплуатации, сокращается длительность рабочих циклов и снижается износ компонентов крана.

С учётом всего приведённого остановимся подробно на теоретическом описании измерения раскачивания груза с помощью средств акселерометра и гироскопа.

Для измерения угла наклона с помощью акселерометра следует произвести определение проекции вектора силы тяжести на ось измерения. Вследствие чего акселерометр будет измерять как ускорение свободного падения, так и другие параметры, такие как постоянное ускорение устройства, центростремительное ускорение при вращении устройства и вибрации. «Эти дополнительные ускорения будут проецироваться на оси датчиков акселерометра и не смогут быть легко отделены от ускорения свободного падения, что впоследствии приведёт к ошибке измерения. Поэтому для получения более точных результатов необходимо проводить измерения только в статических или квазистатических условиях. Для других применений требуется использование динамических инклинометров и других методов измерений. В статических или квазистатических условиях можно использовать три метода определения наклона в зависимости от количества осей измерения.» [59].

2.1. Использование одной оси акселерометра

Используя одну ось акселерометра датчик будет вращается вокруг одной определённой оси, ортогональной вектору силы тяжести, представленной на рисунке 2.2.

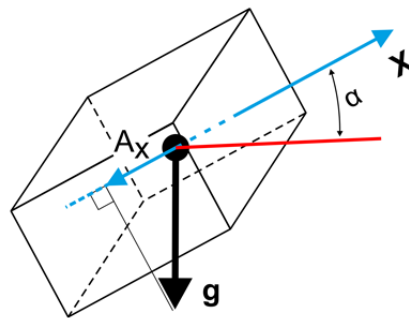


Рисунок 2.2 – Вращение датчика вокруг одной оси

Сигнал с датчика акселерометра будет равен синусу угла наклона, где α – угол между горизонтальной плоскостью и осью измерения. «В результате, угол наклона можно рассчитать по формуле:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{A_x}{g}\right) [rad], \quad (2.1)$$

где A_x – выходное значение акселерометра (проекция ускорения на ось измерения), g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$)» [60].

При измерении угла таким методом появятся два недостатка: чувствительность не будет являться постоянной во всем диапазоне углов, а также будет нельзя задействовать угол в 360° . Представленной на рисунке 2.3 где изменение чувствительности появляется при изменении наклона. На рисунке 2.3, можно увидеть, что чувствительность максимальна при наклоне около 0° и уменьшается с его увеличением [60].

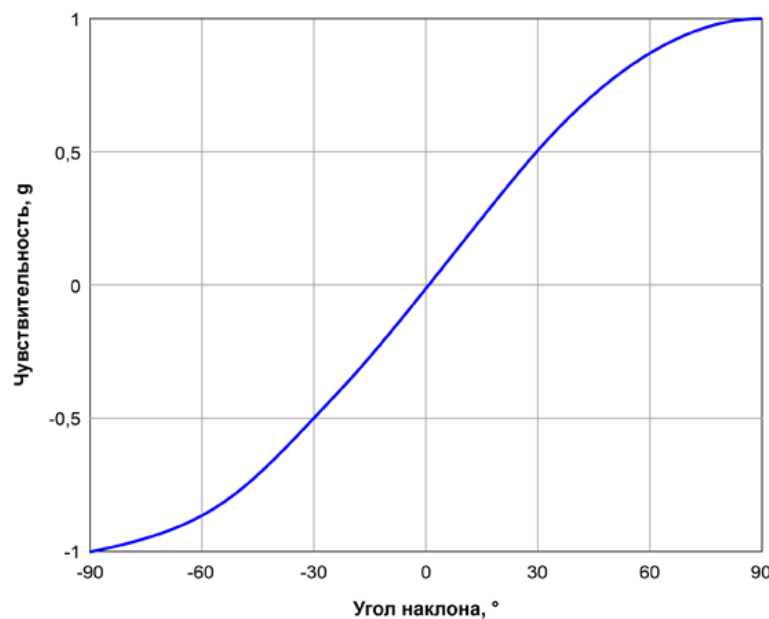


Рисунок 2.3 – Изменение данных с акселерометра при изменении угла наклона

Также возникает проблема с охватом угла в 360° при измерении по одной оси и вызвана тем, что сигнал с акселерометра одинаков для угла α

и угла $\pi - \alpha$, как показано на рисунке 2.4, из чего следует, что диапазон измерения будет составлять от 90° до -90° [60].

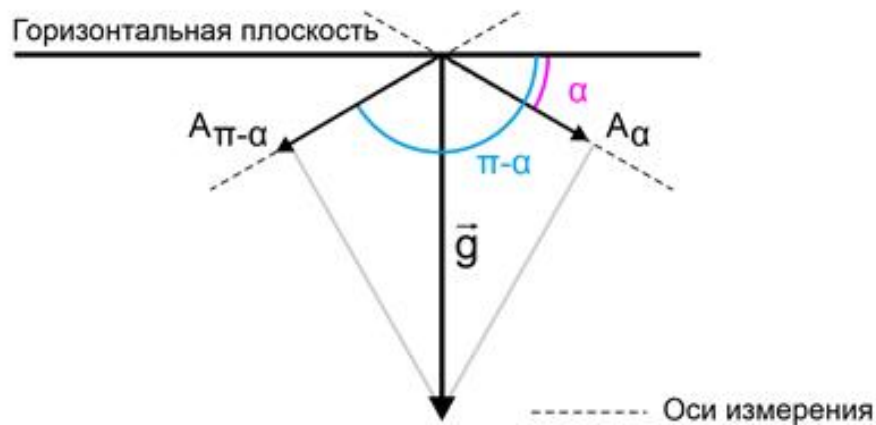


Рисунок 2.4 – Измерение углов α и $\pi - \alpha$ при методе по одной оси

2.2. Использование двух осей акселерометра

Метод измерения по двум осям представлен на рисунке 2.5:

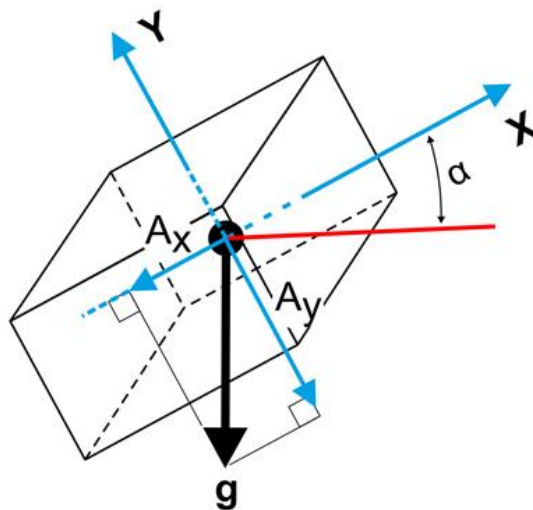


Рисунок 2.5 – Измерение угла наклона по двум осям

При измерении угла наклона по двум осям «значения по осям X и Y будут равны: $A_x = g \times \sin(\alpha)$ и $A_y = g \times \cos(\alpha)$. Сравнивая с первым методом, можно вычислить обратный синус и обратный косинус, чтобы получить угол наклона, но следует лучше использовать соотношение обоих показаний акселерометра,

что будет соответствовать тангенсу угла» [60], и угол наклона можно вычислить с помощью арктангенса:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{A_x}{A_y}\right)[pad], \quad (2.2)$$

$$A_x = g \times \sin(\alpha) \Rightarrow \alpha = \arcsin\left(\frac{A_x}{g}\right)[pad], \quad (2.3)$$

Преимущество такого расчета будет состоять в том, что чувствительность при всём диапазоне углов останется постоянной (рисунок 2.6).

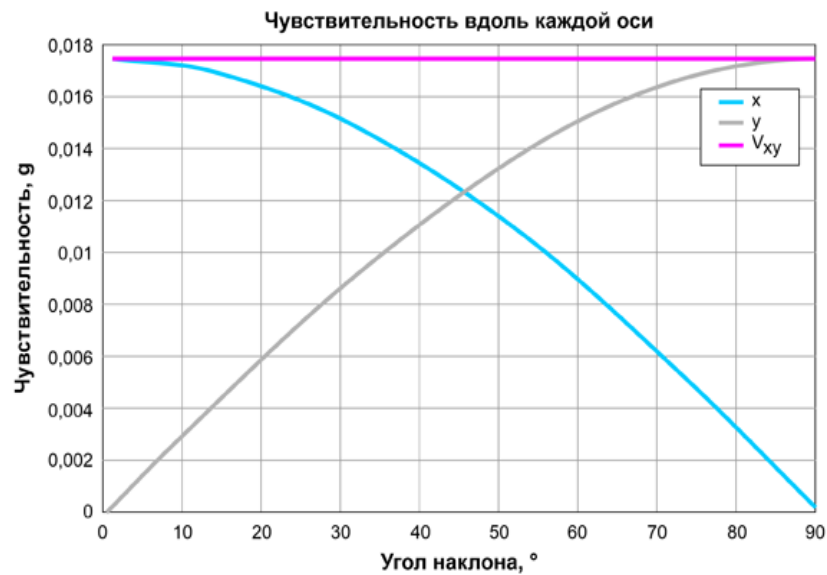


Рисунок 2.6 – Чувствительность при измерении по двум осям

Таким образом, представляется возможность провести измерения в диапазоне до 360°, так как ориентацию датчика можно определить по полярности двух осей измерения, как представленного на рисунке 2.7.

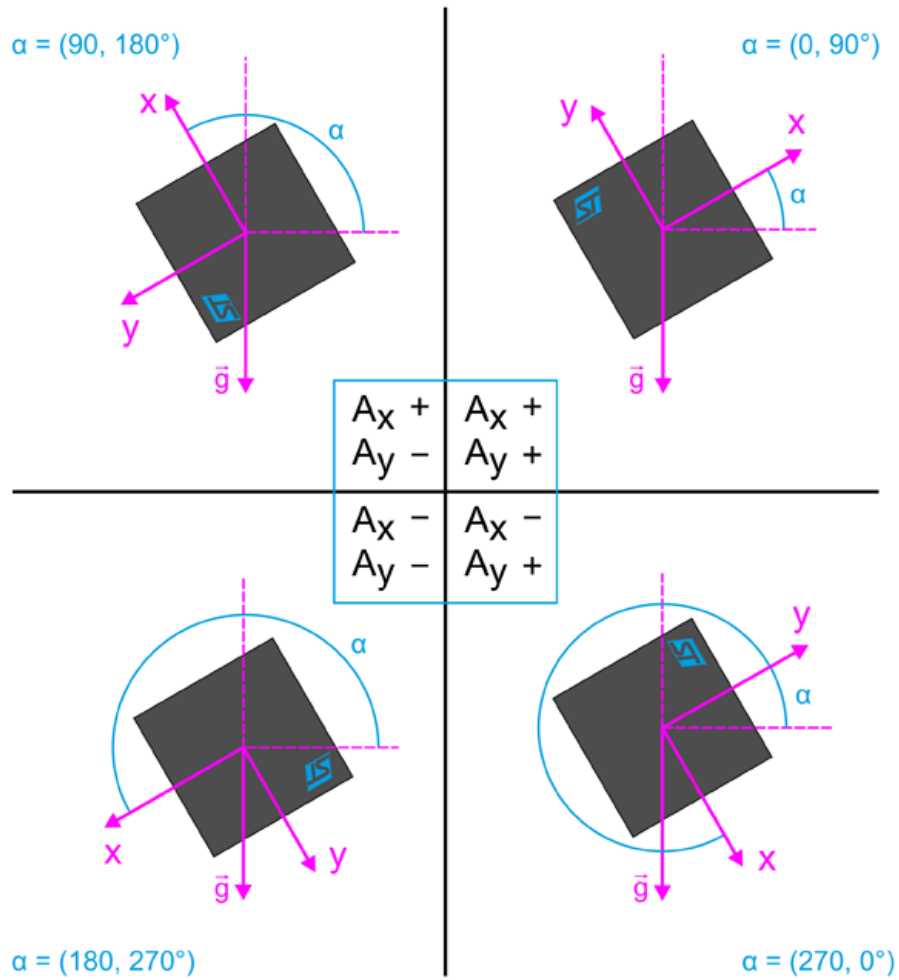


Рисунок 2.7 – Определение квадранта угла по двум осям

В результате можно сделать вывод, что двухосный метод позволяет преодолеть недостатки первого метода измерений.

2.3. Использование трех осей акселерометра

Трехосное измерение наклона даёт возможность использовать для измерения как тангажа, так и крена в диапазоне 360° , представленного на рисунке 2.8.

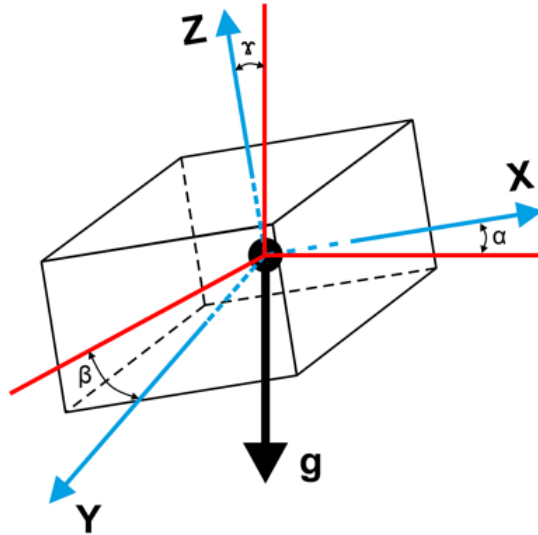


Рисунок 2.8 – Измерение угла наклона по трём осям

Соотношения сигналов с датчика трех осевого акселерометра и углов наклона α , β и γ предложены ниже:

$$A_x = g \times \sin(\alpha) \Rightarrow \alpha = \arcsin\left(\frac{A_x}{g}\right)[\text{рад}], \quad (2.4)$$

$$A_y = g \times \sin(\beta) \Rightarrow \beta = \arcsin\left(\frac{A_y}{g}\right)[\text{рад}], \quad (2.5)$$

$$A_z = g \times \sin(\gamma) \Rightarrow \gamma = \arcsin\left(\frac{A_z}{g}\right)[\text{рад}], \quad (2.6)$$

При использовании указанных формул возникнут те же недостатки, что и при измерении методом по одной оси, таким образом, необходимо использовать при расчёте функцию арктангенса:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right) \quad (2.7)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right) \quad (2.8)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{A_z}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}\right) \quad (2.9)$$

Необходимо отметить, что как и в любой электромеханической системе, на качество измерений датчиков влияют такие факторы, как шум, вибрация, смещение, изменение температуры и т.д.

Шум самого акселерометра возникает вследствие шума электроники, колебаний напряжения, ошибок аналогового цифрового преобразователя и прочего. Естественный шум представляется плотностью шума в спецификации датчика. «Даже при отсутствии собственного шума датчик может испытывать внешнюю вибрацию, которая влияет на сигнал. Точность измерений возможно повысить посредством усреднения выходных данных по «N выборкам», но увеличение количества выборок также увеличит незначительную задержку измерений» [60].

«От температуры и времени так же может меняться чувствительность датчика, поэтому ошибки чувствительности датчика указывают в спецификации в процентах от младшего значащего разряда (LSB). В следствии чего, чувствительность при отклонении характеризуется нелинейностью датчика, которая указывается в спецификации, как процент по отношению к полной шкале измерений: например, шкала $\pm 2g$ и нелинейность 0,5% означают, что максимальная ошибка составляет 0,5% от 4g, то есть 2mg. В случае неортогональных осей измерения может быть существенной ошибка кросс-осевой или поперечной чувствительности, которая может возникнуть при ускорении по одной оси, датчик измеряет некоторую часть ускорения и на другой оси. Погрешность измерения наклона может также проявиться при некорректном расположении датчика, например, при повороте корпуса акселерометра относительно печатной платы, т.е. несоосности датчика в устройстве» [60].

«При эксплуатации акселерометра происходит смещение, это когда присутствует постоянный уровень сигнала акселерометра при отсутствии ускорения. Оно может возникать по причине термических напряжений во время монтажа на плате, изменения температуры, старения изделия и других факторов. С увеличением смещения неточность измерений хотя бы по одной оси при разных углах будет возрастать, что приведет к увеличению общей неточности измерений, поэтому следует выполнять перед работой калибровку акселерометра» [60].

«При выпуске изделия в спецификациях должно указывается отклонение и смещение при изменении температуры. Например, MEMS-датчики производителя ST выпускаются со стабильными характеристиками при изменении температуры, и обычно не требуются температурной компенсации и стабильно откалиброваны при комнатной температуре (25°C). В отдельных случаях следует применить несложную процедуру компенсации смещения: для этого нужно измерить сигнал с датчика в зафиксированном положении при двух разных температурах, отличающихся в диапазоне не более 10°C , вычислить коэффициент наклона прямой, полученной по двум значениям, и использовать вычисленное значение как поправочный коэффициент» [59].

При эксплуатации датчика следует выполнять заводскую калибровку с использованием программных библиотек. Но в системах контроля или в ответственных системах, где требуется погрешность не выше 1° , производители рекомендуют калибровать датчики акселерометра после его сборки в устройстве.

Калибровка датчика так же может осуществляться двумя методами: компенсацией смещения и усиления, и методом наименьших квадратов. Первый метод наиболее лёгкий и основан на установке датчика в нескольких положениях, как показано на рисунке 2.9.

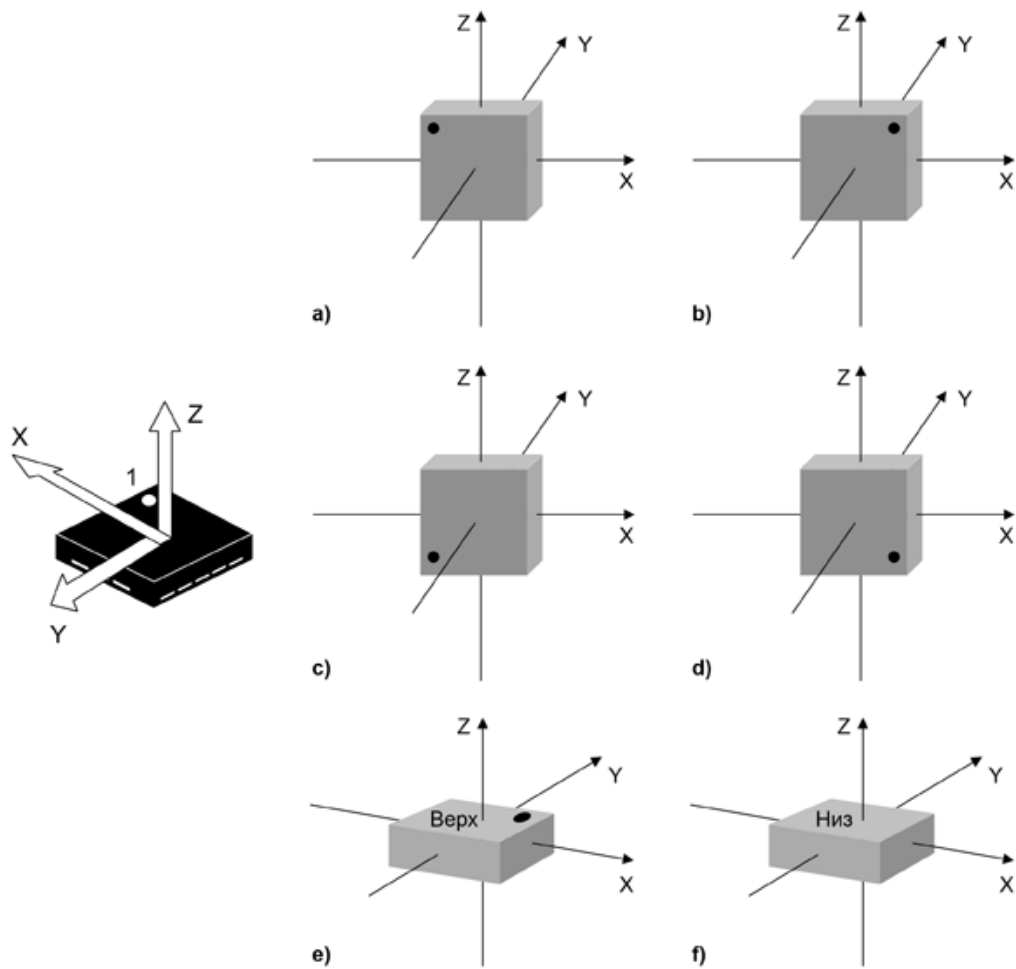


Рисунок 2.9 – Калибровка датчика

При эксплуатации датчик необходимо разместить таким образом, чтобы вектор силы тяжести проецировался одновременно на одну измерительную ось. В последующем это надо повторить для всех осей в положительной и отрицательной ориентации. По показаниям датчика во время такого процесса можно вычислить ошибки и учесть их в виде поправочных коэффициентов.

«Гироскоп основан на вращении вокруг X-, Y-, Z- осей и состоит из трёх независимых одноосных вибрационных датчиков угловой скорости (MEMS гироскопов). Две подвешенные массы совершают колебания по противоположным осям. С появлением угловой скорости эффект Кориолиса вызывает изменение направления вибрации:

$$\vec{F}_K = -2m[\vec{\omega} \times \vec{v}_r] \quad (2.10)$$

которое фиксируется емкостным датчиком. Измеряемая дифференциальная емкостная составляющая пропорциональна углу перемещения. Появившийся сигнал усиливается, демодулируется и фильтруется, давая в итоге напряжение, пропорциональное угловой скорости вращения. Данный сигнал оцифровывается с помощью встроенного в плату 16-битного АЦП. Скорость оцифровки (sample rate) программно может варьироваться от 3.9 до 8000 выборок в секунду (samples per second, SPS), а задаваемые пользователем фильтры низких частот (LPF) предоставляют широкий диапазон возможных частот среза. Фильтр низких частот (ФНЧ) нужен, в том числе, чтобы убирать вибрации от оборудования на котором эксплуатируется и как правило это выше 20 – 25 Гц» [60].

Таким образом, за основу инженерного решения, позволяющего определять угол отклонения канатов, целесообразно взять датчики акселерометра и гироскопа, используя их в трёх осях наклона, как наиболее подходящие к заданным задачам и возможной реализации в прототипе прибора безопасности.

2.4. Существующие алгоритмы регистраторов параметров башенных кранов

Для планирования натурных экспериментов на действующих башенных кранах была осуществлена разработка прототипа прибора безопасности (опытного образца) с учётом смоделированной подсистемы прибора безопасности мониторинга колебания груза и на основе технических решений (полезных моделей) автора «Устройство мониторинга положений канатов и груза грузоподъёмного крана» (патент RU 196670) [61] и «Устройство мониторинга положений канатов грузовой тележки башенного крана» (патент RU 197689) [62].

Для проведения экспериментального исследования был выбран опытный образец (прототип) на основе технического решения (полезной модели) RU 196670 «Устройство мониторинга положений канатов и груза грузоподъёмного крана». Полезная модель характеризуется

простотой исполнения и структурной эффективностью, достигнутой за счет минимизации (по сравнению с устройствами аналогичного назначения) количества используемых в ней электронных компонентов. Данный прибор представляет собой новое универсальное устройство, расширяющие функциональные возможности приборов безопасности, устанавливаемых на грузоподъемных кранах посредством мониторинга положений грузовых канатов и груза, подвешенного на крюковой подвеске грузоподъемного крана.

Техническим результатом полезной модели является недопущение косого положения канатов и контроль колебаний груза, подвешенного на канатах грузоподъемного крана, а также обеспечение возможности записи данных, учитывающих колебания груза и положения его в пространстве, следствием чего является повышение уровня техники безопасности грузоподъемного крана при работе с грузом, а также улучшение условий эксплуатации и технического обслуживания грузоподъемного крана. Кроме того, разработанный в рамках полезной модели прототип прибора безопасности даёт возможность записи и анализа записанных данных, что позволит создавать на программном уровне алгоритмы оптимизации рабочего процесса (погрузки/разгрузки), повышающие экономическую эффективность эксплуатации грузоподъемного крана, а также возможность обработать данные при проведении натурного эксперимента [61].

Осуществляется полезная модель в виде дополнительно устанавливаемых на грузоподъемном кране последовательно функционально связанных между собой беспроводной связью следующих блоков:

- блок регистрации параметров груза и положений угла канатов (включающий в себя: датчики акселерометра и гироскопа, цифровой вычислительный блок, встроенное запоминающее устройство и модуль беспроводной связи), установленный непосредственно на крюковой подвеске грузоподъемного крана;

- блок хранения и трансляции отображения параметров грузоподъемного крана (включающий в себя микроконтроллер, к которому подключены

модуль беспроводной связи, устройство отображения информации в виде дисплея для визуализации параметров, энергонезависимое запоминающее устройство и универсальный порт для связи с внешним компьютером), установленный непосредственно в кабине грузоподъемного крана или выполненный в виде переносного устройства (для моделей грузоподъемных кранов, необорудованных кабиной машиниста (оператора)). У блока хранения и трансляции отображения параметров грузоподъемного крана предусмотрена возможность подключения к прибору безопасности (как иностранного, так и российского производства) посредством универсального порта.

На рисунке 2.10 представлена структурная блок-схема полезной модели, содержащая последовательно функционально связанные между собой беспроводной связью:

- блок регистрации параметров груза и положений угла канатов (1) (включающий в себя подключенные к цифровому вычислительному блоку (4) датчик акселерометра (2), датчик гироскопа (3), который, в свою очередь, имеет двухстороннюю связь с встроенным запоминающим устройством (5) и модулем беспроводной связи (6));

- блок хранения и трансляции отображения параметров грузоподъемного крана (7) (включающий в себя модуль беспроводной связи (8), соединенный двухсторонней связью с контроллером (9), к которому подключено устройство отображения информации (10), универсальный порт (11), и энергонезависимое запоминающее устройство легкоъемного накопителя (12)), который, в свою очередь, имеет возможность подключения к внешнему компьютеру (13) через универсальный порт (11).



Рисунок 2.10 – Структурная схема устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана (патент RU 196670)

На рисунке 2.11 представлен вариант структурной блок-схемы полезной модели, содержащей последовательно функционально связанные между собой беспроводной связью и описанные выше: блок регистрации параметров груза и положений угла канатов (1) и блок хранения и трансляции отображения параметров грузоподъемного крана (7), у которого, в свою очередь, установлена связь через универсальный порт (11) с прибором безопасности (14).

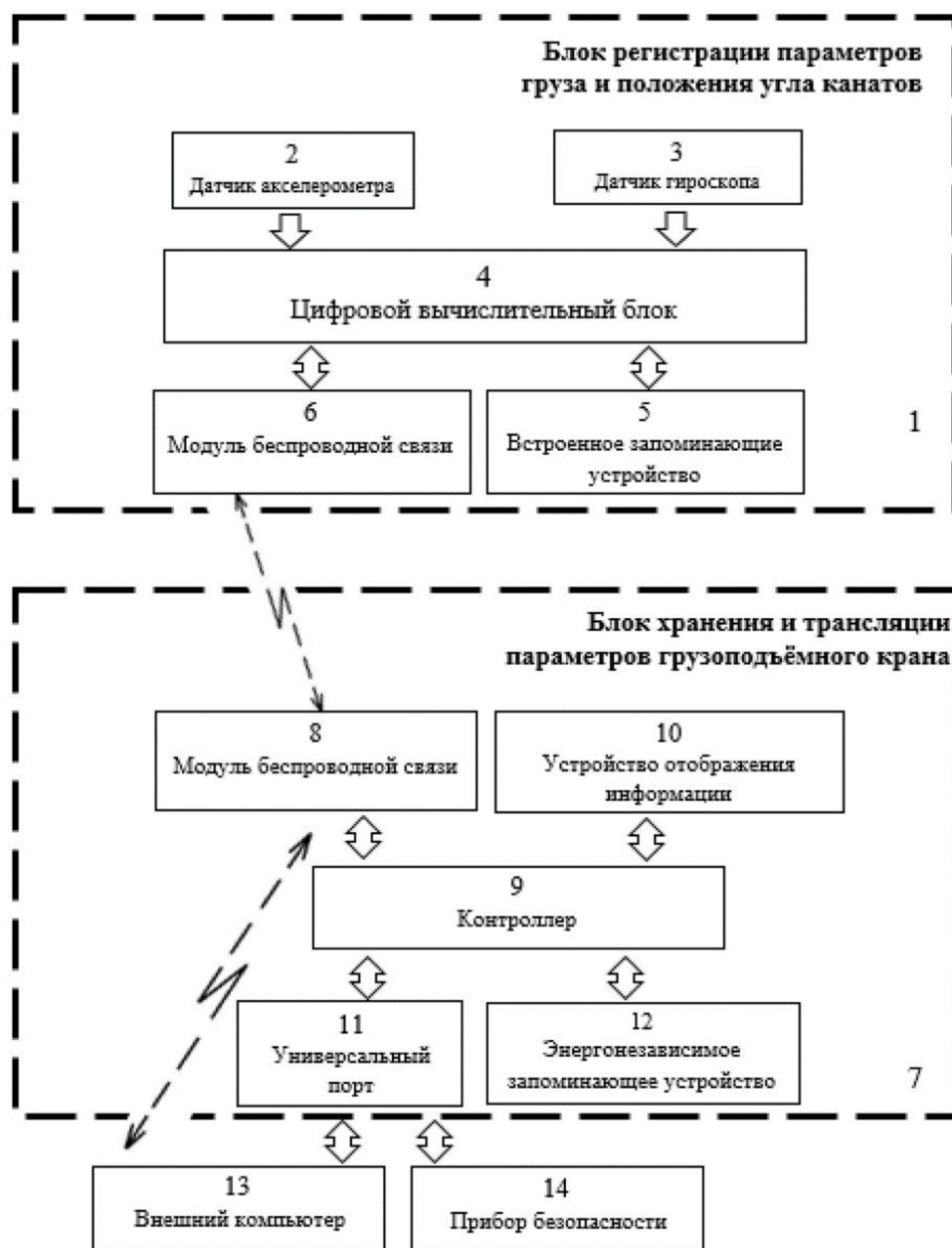


Рисунок 2.11 – Структурная схема устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъёмного крана (патент RU 196670) с подключением прибора безопасности

На рисунке. 2.12 схематично представлено расположение полезной модели (в составе, описанном на структурной блок-схеме согласно рисунку 2.11) относительно грузоподъёмного крана, где блок регистрации параметров груза и положений угла канатов (1) установлен на крюковой подвеске грузоподъёмного крана (15), а блок хранения и трансляции отображения параметров грузоподъёмного крана (7), соединённый беспроводной связью с прибором

безопасности грузоподъемного крана (14), расположен в кабине машиниста (оператора) крана (16).

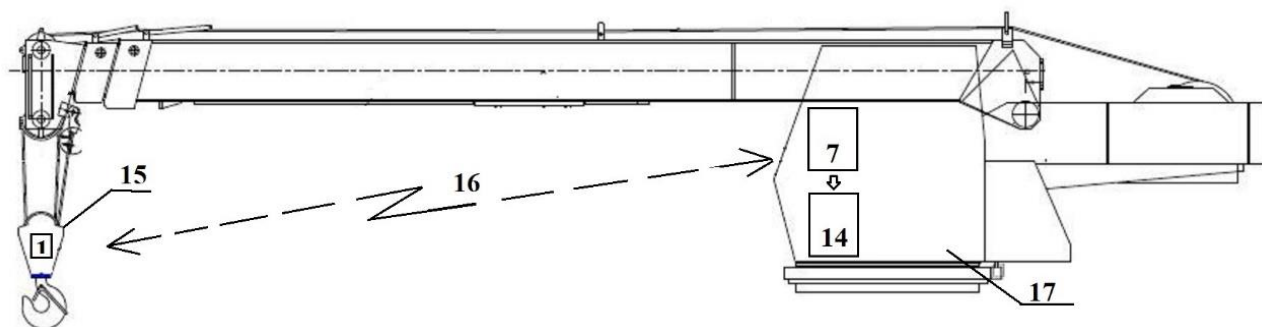


Рисунок 2.12 – Устройство мониторинга положений канатов и груза грузоподъёмного крана (патент RU 196670) с расположением блоков на кране

В случае возникновения: косого положения грузовых канатов, неустойчивости груза (при ненадлежащим образом выполненной строповке), раскачивания груза (при ветровых нагрузках и (или) при перемещении груза), соударения груза со встречными предметами, самопроизвольной расстроповки груза, обрыва грузовых канатов, закручивания груза, – датчики акселерометра (2) и гироскопа (3) фиксируют смещение крюковой подвески с грузом относительно центра в трёх плоскостях, по координатным осям x , y , z . Поданные сигналы с датчиков (2) и (3) обрабатываются цифровым вычислительным блоком (4), передающим далее обработанные данные на встроенное запоминающее устройство (5) и модуль беспроводной связи (6), который, в свою очередь, передаёт сигнал на модуль беспроводной связи (8) в составе блока хранения и трансляции и отображения параметров грузоподъёмного крана (7). С модуля беспроводной связи (8) сигнал передаётся на контроллер (9), который, в свою очередь, передаёт сигнал на устройство отображения информации (10), с помощью которого машинист (оператор) грузоподъёмного крана может отслеживать в трех плоскостях (по осям x , y , z) состояние и положение подвешенного груза, при этом посредством контроллера (9) осуществляется запись полученной информации о состоянии

и положении груза на энергонезависимое запоминающее устройство легкоъемного накопителя (12), что позволяет, даже при отсутствии беспроводной связи обеспечить удобный перенос информации, сохраненной в блоке хранения и трансляции отображения параметров грузоподъемного крана (7), для последующей ее обработки во внешнем компьютере без демонтажа указанного блока. При этом, что крайне важно, блок хранения и трансляции отображения параметров грузоподъемного крана (7) остается устойчивым к обычным уровням вибрации и ударных нагрузок, характерных для грузоподъемных машин [61].

Подключение к контроллеру блока хранения и трансляции отображения параметров грузоподъемного крана (9) модуля беспроводной связи (8), приспособленного для обмена информацией как с модулем беспроводной связи внешнего компьютера (13), так и с модулем беспроводной связи модуля регистрации параметров груза и положений угла канатов (6), позволяет упростить передачу на внешний компьютер информации о регистрируемых параметрах для дальнейшей ее обработки [61].

При подключении прибора безопасности грузоподъемного крана (14) посредством универсального порта (11) к блоку хранения, трансляции и отображения параметров грузоподъемного крана (7), в зависимости от значений переданных данных, обеспечиваются необходимые для конкретной ситуации действия, имеющие целью предотвратить возникновение аварийной ситуации (в соответствии с запрограммированными в приборе безопасности грузоподъемного крана (14) значениями недопустимых параметров): гашение колебаний груза, подвешенного на канатах грузоподъемного крана; недопущение косого положения канатов, остановка работ [61].

Среди имеющихся у автора разработок также следует указать патент RU 197689 на полезную модель «Устройство мониторинга положений канатов грузовой тележки башенного крана», представляющее собой универсальное устройство, расширяющие функциональные возможности устанавливаемых на башенных кранах приборов безопасности посредством мониторинга

положений каната грузовой тележки башенного крана, с возможностью настройки на программном уровне высокочувствительной точности измерений.

Полезная модель характеризуется простотой исполнения и структурной оптимизацией конструкции (достигнутой за счет минимизации количества технических компонентов, с исключением из конструкции каких-либо подвижных и работающих в условиях трения механических элементов).

Техническим результатом полезной модели является недопущение косого положения каната и контроль колебаний груза, подвешенного на крюке башенного крана, следствием чего является повышение уровня техники безопасности башенных кранов при работе с грузом [62].

Осуществляется полезная модель в виде дополнительно устанавливаемых на башенном кране следующих элементов: тензометрических датчиков, расположенных с обеих сторон рамы грузовой тележки подъема груза башенного крана, в непосредственной близости соединения ее с осями блоков грузового каната, и микроконтроллера [62].

На рисунке 2.13 схематично представлены последовательно функционально связанные между собой:

- две группы тензометрических датчиков (1) и (2) соответственно, и
- микроконтроллер (3), предусматривающий вывод его на прибор безопасности, установленный на башенном кране.

При возникновении косого положения грузовых канатов или раскачивания груза (при ветровых нагрузках и (или) при перемещении груза) на раме грузовой тележки – в районе соединения блоков такой тележки возникает напряженно-деформированное состояние металлоконструкции рамы, позволяющее измерить тензометрическими датчиками нагруженность блоков (грузового каната) грузовой тележки.

Полученные сигналы с первой группы (1) и со второй группы (2) тензометрических датчиков подаются на микроконтроллер (3), который, в свою очередь, обрабатывает сигналы, выявляя отклонения от записанных в его память допустимых значений, относящихся к характеру раскачивания груза

или положения грузового каната. По результатам обработанных микроконтроллером (3) данных, по заданной программе передается сигнал на прибор безопасности башенного крана или иной прибор, которым (в зависимости от значений переданных данных) обеспечиваются необходимые для конкретной задачи действия (гашение колебаний груза, подвешенного на крюке башенного крана или недопущение косого положения каната)[62].

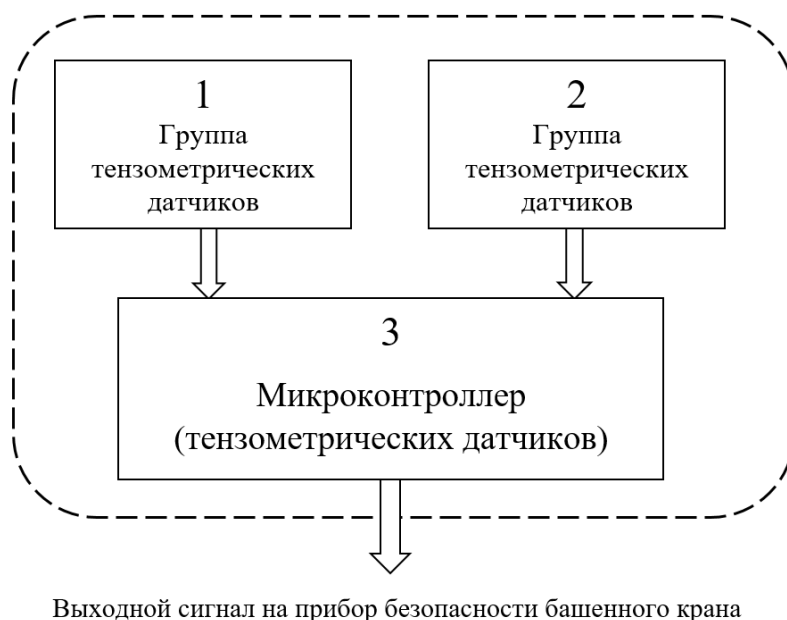


Рисунок 2.13 – Устройство мониторинга положений канатов грузовой тележки башенного крана (патент RU 197689).

Между тем для эксперимента в реальных условиях автором сделан выбор в пользу технического решения на основе патента RU 196670, что обусловлено наличием у него неоспоримых технических преимуществ, упрощающих организацию такого эксперимента, по сравнению с вторым техническим решением (патент RU 197689). Указанные преимущества выражаются в простоте монтажа, и дальнейшем облуживании прототипа технического устройства. Также опытный образец, разработанный на основе технического решения (патент RU 196670) является универсальным для различных типов грузоподъемных машин, как отечественного, так и иностранного производства:

башенных кранов, мостовых кранов, автокранов и иных грузоподъемных механизмов, обеспечивающих подъем и перемещение груза на крюковой подвеске.

Кроме того, при использовании технического решения на основе устройства мониторинга положений канатов грузовой тележки башенного крана (патент RU 197689), организация эксперимента была бы сложнее, поскольку пришлось бы решать ряд сложных задач:

- Крепление тензометрических датчиков на грузовой тележке (обработка поверхности металлоконструкции с последующим приклеиванием датчиков);
- Протягивание кабелей по стреле башенного крана для связи, как с исполнительным устройством, так и между датчиками;
- Изменение электрической схемы крана, сопряженной с соответствующим изменением технической документации по крану;
- Разработка более сложного программного обеспечения;
- Компенсация трудозатрат, связанных с привлечением специалистов организации, имеющих допуск работы на высоте.
- Компенсация затрат, связанных с простоем башенного крана по причинам, изложенным выше.

Таким образом, ввиду наличия ряда технических преимуществ у устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана (патент RU 196670) по сравнению с устройством мониторинга положений канатов грузовой тележки башенного крана (патент RU 197689), оно было выбрано в качестве опытного образца при проведении экспериментальных исследований.

Результатом работы опытного образца (прототипа) технического устройства является недопущение косо́го положения канатов и контроль колебаний груза, подвешенного на канатах грузоподъемного крана, а также обеспечение возможности записи данных, учитывающих колебания груза и положения его в пространстве с ограниченной видимостью.

Опытный образец (прототип) исполнен в виде двух частей: аппаратной части и ответной части. Аппаратная часть, включает в себя блок с регистрацией

параметров груза и положений угла канатов содержащего: датчики акселерометра и гироскопа, цифровой вычислительный блок, встроенное запоминающие устройство, модуль беспроводной связи и элементом питания, расположенный на крюковой подвеске грузоподъемного крана с возможностью подключения к нему посредством беспроводной связи. Ответная часть рассматриваемого устройства с функцией отображения информации может располагаться, например, в кабине машиниста башенного крана. Для нее может использоваться любой планшетный компьютер с любой операционной системой, с возможностью подключения к беспроводной локальной сети на основе стандартов IEEE 802.11 и любым браузером для просмотра интернет страниц.

Для реализации всей системы, в т.ч. программной части, необходимо наличие программируемого промышленного контроллера, который реализуется на основе рассмотренного ниже модуля «ESP-32S ESP-WROOM-32» [63].

2.5. Аппаратная реализация датчика угла отклонения груза

Задача мониторинга положений грузовых канатов и груза при работе башенного крана включает две подзадачи: разработка системы мониторинга положений грузовых канатов и разработка методики записи параметров положения груза. Основой датчика отклонения груза является гироскоп MPU6050 (InvenSense Inc., США), представленный на рисунке 2.14.

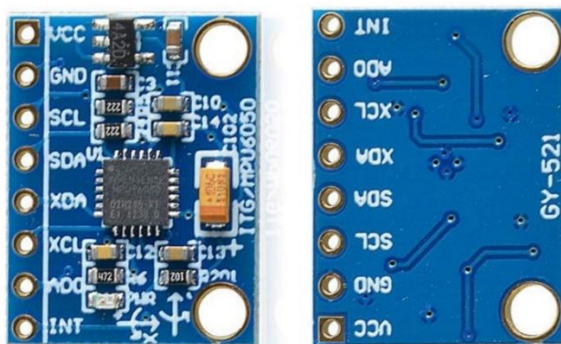


Рисунок 2.14 – Общий вид MPU6050

MPU6050 – это интегрированное 6-осевое устройство MotionTracking, которое объединяет 3-осевой гироскоп, 3-осевой акселерометр и цифровой процессор движения (DMP), его технические характеристики представлены в таблице 2.1 [64].

Таблица 2.1 – Технические характеристики гироскопа MPU6050

Параметр	Единицы измерения	Значения
Программно устанавливаемая чувствительность гироскопа	%	± 250
		± 500
		± 1000
		± 2000
Разрядность встроенного АЦП	бит	16
Программный встроенный фильтр	Гц	5 – 250
Потребляемый ток в рабочем режиме	мА	3,2
Потребляемый ток в режиме энергосбережения	мкА	8
Напряжение питания	В	2,4 – 3,6
Программируемым пользователем акселерометром в полном масштабе диапазон	g	$\pm 2, \pm 4, \pm 8 \pm 16$
Размеры корпуса	мм	3x3x1

Для записи параметров измерений значений гироскопа применяется Модуль Micro SD Card Reader[65], представленный на рисунке 2.15. Его технические характеристики представлены ниже в Таблице 2.2.

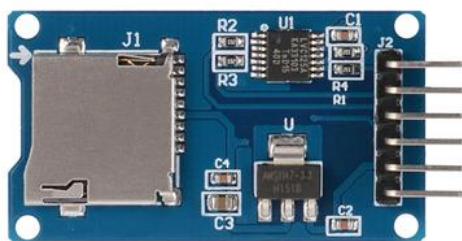


Рисунок 2.15 – Модуль Micro SD Card Reader

Таблица 2.2 – Технические характеристики модуля Micro SD Card Reader

Параметр	Единицы измерения	Значения
Напряжение питания:	В	5
Ток:	мА	минимальный 0,2 мА
		номинальный 80 мА
		максимальный 200 мА
Уровни напряжения интерфейса	В	3,3 или 5
Поддерживаемы типы карт памяти Micro SD	ГБ	SDHC до 32 или SD до 2
Интерфейс:		SPI
Размеры корпуса	мм	42 x 24 x 12 мм

Обработка измерений значений гироскопа осуществляется модулем ESP-32S ESP-WROOM-32 NodeMCU Wi-Fi, представленным на рисунке 2.16.



Рисунок 2.16 – Общий вид ESP-32S ESP-WROOM-32 Wi-Fi

Для обработки измеренных значений гироскопа применяется модуль ESP-32S ESP-WROOM-32 с отладочной платой, содержащим микросхему ESP8266 ESP-32S с микропроцессором Xtensa® 32-bit LX6 Dual-core. Указанный микропроцессор работает с регулируемой тактовой частотой с тактовой частотой до 240 МГц . Также данный модуль имеет 520 КБ ОЗУ и 4 МБ флеш-памяти (для хранения программ и данных), достаточных, чтобы справиться с большими строками, которые составляют веб-страницы, данными в JSON/XML, ESP-32S содержит встроенный приемопередатчик

Wi-Fi 802.11b/g/n HT40, поэтому он способен не только взаимодействовать с интернетом, но и устанавливать собственную сеть, позволяя другим устройствам подключаться напрямую к нему. Также на плате установлен контроллер USB-UART CP2102 (Silicon Labs), который преобразует USB сигнал в сигнал последовательного порта и позволяет компьютеру программировать и взаимодействовать с микросхемой ESP-32S, показанной на рисунке 2.16, краткие технические характеристики модуля 32S ESP-WROOM-32 приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Технические характеристики ESP-32S ESP-WROOM-32

Параметр	Единицы измерения	Значения
Разрядность	бит	32
Тактовая частота	МГц	160 до 240
Кол-во программируемых входов/выходов	шт.	30
Объем Flash памяти	МБт	4
Объем ОЗУ	кбайт	520
Разрядность АЦП/ЦАП	бит	12
Напряжение питания	В	от 2,2 до 3,6
Стандарт Wi-Fi связи		802.11b/g/n
Диапазон рабочих температур	°С	-40 - +85

При помощи микропроцессора настраивается цифровой канал обмена информацией последовательного интерфейса SPI, устанавливается чувствительность гироскопа путем записи определенных битов в регистры гироскопа и настраивается встроенный высокочастотный фильтр. Микропроцессор инициирует обмен по последовательному интерфейсу, масштабирует считываемые значения углов по двум горизонтальным осям и записывает эти значения для отправки через беспроводной интерфейс передачи данных [63].

Принципиальная схема опытного образца (прототипа) устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана представлена ниже на рисунке 2.17.

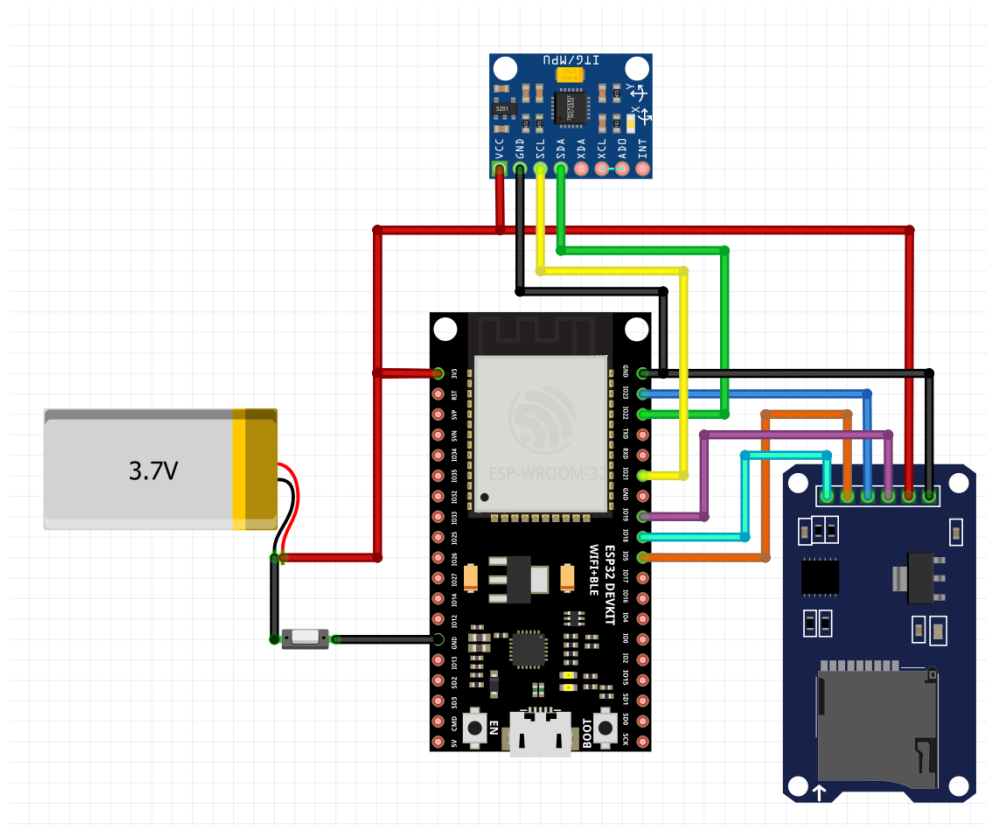


Рисунок 2.17 – Принципиальная схема опытного образца (прототипа) устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана

Общий вид опытного образца (прототипа) устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана, в корпусе с элементом питания представлен на рисунке 2.18.



Рисунок 2.18 – Опытный образец (прототип) устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана в корпусе

Графический результат сигнала с опытного образца (прототипа) устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана отображается в виде 3D объекта в интернет-браузере и представлен на рисунке 2.19.

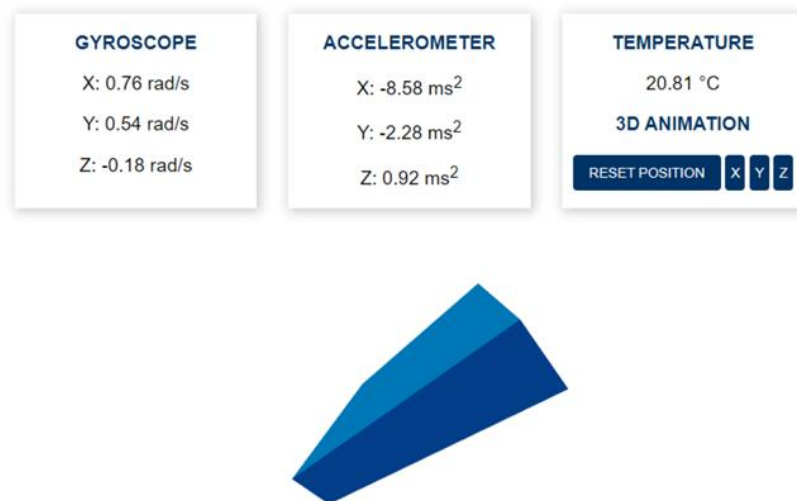


Рисунок 2.19 – Графическое отображение в интернет-браузере

2.6. Адаптация существующих алгоритмов регистраторов параметров грузоподъёмных кранов

Исследование и техническая реализация устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъёмного крана выполнены на базе производственной площадки АО «ЛСР.Краны-СЗ» (Санкт-Петербург).

Для решения поставленных задач в реальных условиях проведен эксперимент с использованием следующих моделей башенных кранов:

- 1) КБ-503Б (заводской номер №553 регистрационный номер №86956), оснащённом прибором безопасности ОНК-160Б (Версия РП 6.15 №6090035). На рисунке 2.20 представлены общие технические характеристики КБ-503Б;
- 2) КБ-674 (заводской номер №760 регистрационный номер №89200), оснащённом прибором безопасности ОНК-М-29 с регистратором параметров. На рисунке 2.21 представлены общие технические характеристики КБ-674.

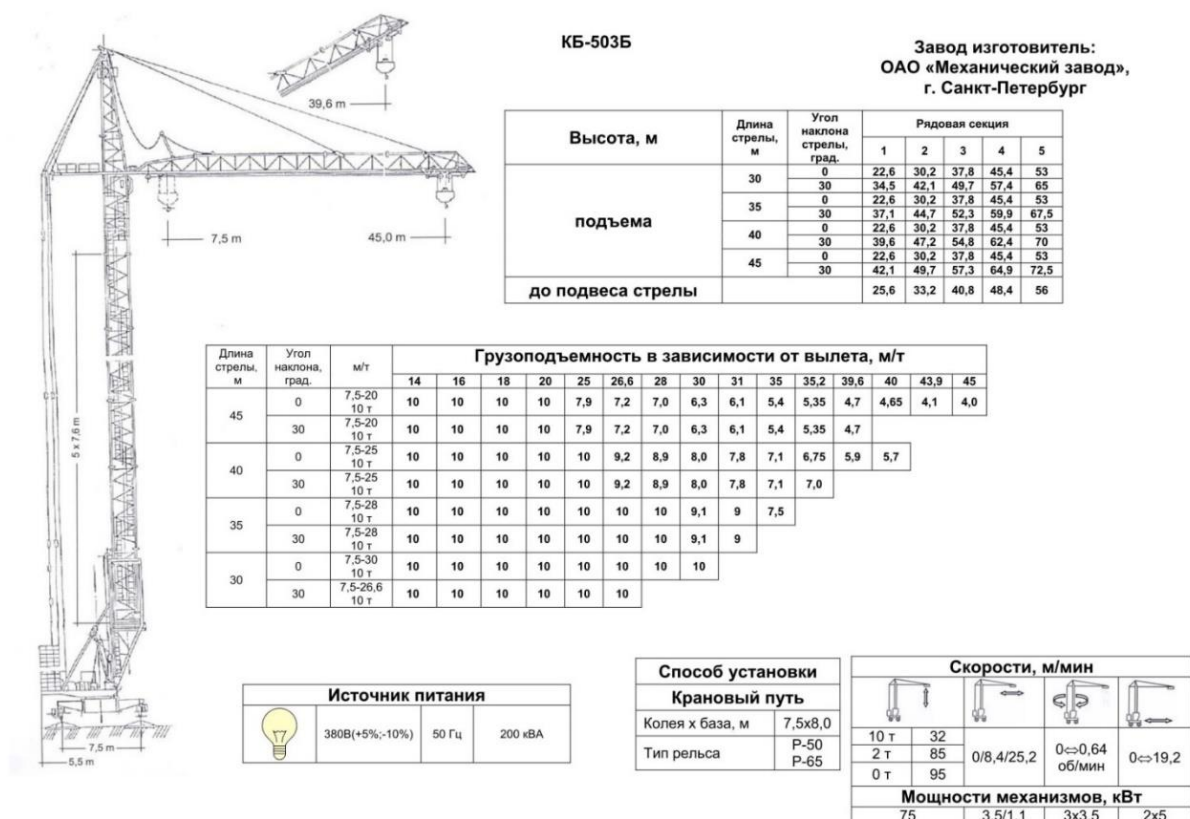


Рисунок 2.20 – Технические характеристики башенного крана КБ 503Б

Несмотря на то, что как указанная выше методика эксперимента может быть применена к любым моделям кранов, выбор объектов для проведения исследования обусловлен тем, что автор по месту работы является ответственным за техническое состояние и эксплуатацию данных видов башенных кранов, имея на складской площадке неограниченный по времени доступ к рассматриваемым строительным машинам.

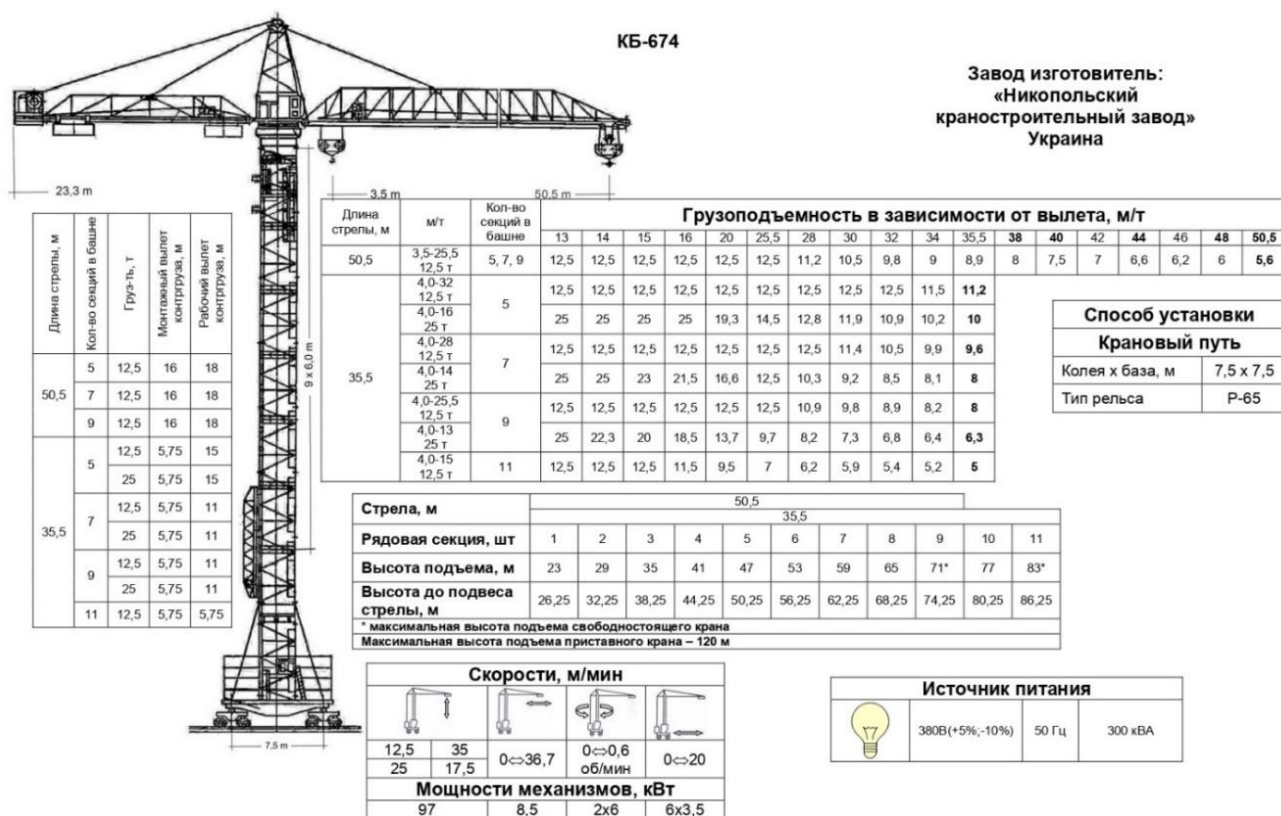


Рисунок 2.21 – Технические характеристики башенного крана КБ 674

2.7. Интеграция в существующий алгоритм регистрации параметров

Совместное применение усовершенствованной системы (устройства) безопасности, оснащённого устройством мониторинга положений канатов и груза грузоподъёмного крана с существующим устройством (системой) безопасности, технически реализовано в виде закрепления на крюковую подвеску с помощью

клеящей двухсторонней основы (или иного клеящего средства). Ниже показаны примеры крепления опытного образца: на рисунке 2.22 Башенный кран КБ 503Б №553 и на рисунке 2.23 Башенный кран КБ 674 №760.



Рисунок 2.22 – Крюковая подвеска с устройством мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана на башенном кране КБ 503Б №553



Рисунок 2.23 – Крюковая подвеска с устройством мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана на башенном кране КБ 674 №760

Ответная часть для визуального отображения крепится в кабине машиниста в удобном и доступном месте для визуального определения раскачивания груза в реальном времени. На рисунке 2.24 показано крепление планшетного компьютера в кабине башенного крана КБ 503Б №553, рядом с прибором безопасности ОНК-160Б, и на рисунке 2.25 расположение компьютера на башенном кране КБ 674 №760.



Рисунок 2.24 – Крепление планшетного компьютера в кабине башенного крана
КБ 503Б №553

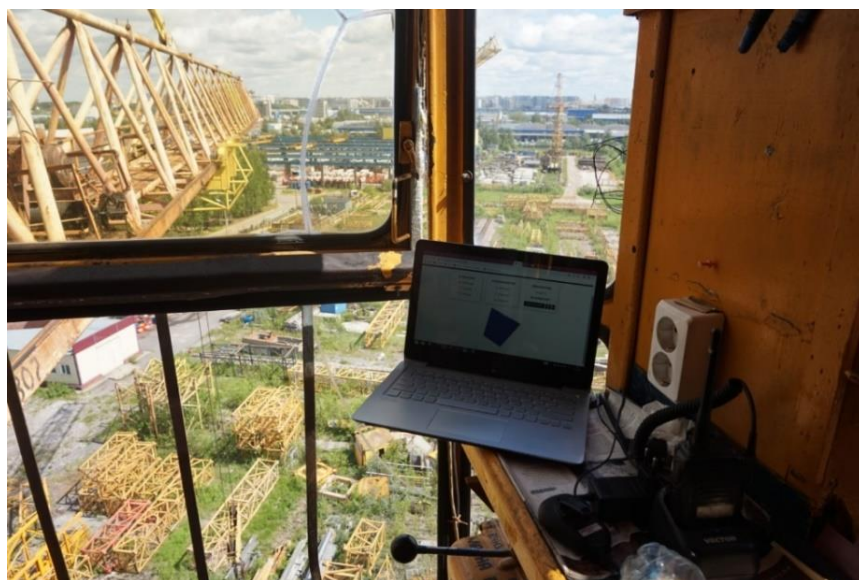


Рисунок 2.25 – Расположение компьютера в кабине башенного крана
КБ 674 №760

Выводы по главе 2

1. С учетом влияния внешних факторов, действующих на положение каната, обоснована теоретическая схема связи машинист – прибор безопасности, при возникновении колебаний (раскачиваний) перемещаемого груза.

2. Обоснован алгоритм измерения угла отклонения канатов при помощи датчиков акселерометра и гироскопа по трём осям измерения.

3. Для целей проведения натурного эксперимента по мониторингу колебаний грузового каната с дальнейшей обработкой данных о развитии процесса колебания груза, было предложено инженерное техническое решение основе полезной модели автора RU 196670 «Устройство мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана». Собранный автором опытный образец (прототип) устройства был установлен на действующие башенные краны, база производственной площадки АО «ЛСР.Краны-СЗ» (Санкт-Петербург).

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА

3.1. Степень проработанности научных трудов по процессам развития колебаний груза крана

В ходе изучения многочисленных публикаций и диссертационных исследований, посвящённых раскачиванию груза или ограничениям колебаний такого груза при работе грузоподъёмных машин (в том числе у таких авторов, как Колмыков В.В. [66]; Енин С.С. [67]; Шершнева Е.О. [68]; Флюгель Ф. [69]), автору не удалось в достаточном количестве обнаружить данных по исследованиям процессов перемещения груза именно башенным краном, и учитывающих комплекс факторов, влияющих при этом на груз.

В большинстве диссертационных работ, в которых затрагивается тема колебания (раскачивания) груза, исследование осуществлено в отношении мостового крана. Вместе с тем мостовые краны по сравнению с башенными обладают не только относительно наименьшей высотой подвеса груза, но и другими отличительными характеристиками. Несмотря на сходство принципа действия моста мостового крана и стрелы башенного крана, длина последней достигает 55 метров и более. Указанные краны отличаются также и погодно-атмосферные условия работы: башенные краны работают на улице, а мостовые краны – в помещениях, где ветровая нагрузка минимальна. Также жёсткость конструкции (т.е. податливость) мостового крана не сопоставима с башенным краном.

В части ветровой нагрузки, воздействующей на башенный кран, следует выделить диссертационные исследования таких авторов, как: Мишин А.В. [70]; Обыденов В.А. [71]; Чан Д.Х. [72], Подобед В.А. [73]; Подобед Н.Е. [74]. Работы указанных авторов посвящены не только проблеме устойчивости башенных кранов при порывах ветра, но и влиянию ветровой нагрузки

на (раскачивание) колебания груза, также затрагивается и вопрос о влиянии ветровой нагрузки на непосредственно сам груз.

Таким образом, несмотря на многообразие соответствующих исследований и публикаций, в должном объеме остается нераскрытой проблема изучения колебания (раскачивания) груза на башенных кранах, при котором может быть учтена совокупность факторов (угол отклонения груза при вращении башни крана, угол отклонения груза при торможении грузовой тележки, раскачивание груза при торможении грузовой тележки на стреле крана при двойной за пасовке каната), являющихся причинами возникновения такого раскачивания груза. При этом представляет актуальность исследование зависимости между такими факторами, а также способы их устранения или минимизации.

3.2. Исследование причин возникновения и развития колебаний груза

Совокупный метод исследований в настоящей главе включает в себя проведение как теоретических, так и экспериментальных исследований.

Основу теоретических исследований настоящей главы составили выявление и анализ взаимосвязанных процессов, обозначенных как факторы, вызывающие раскачивания груза на башенном кране, а также описание зависимости между такими факторами. Наряду с этим получено имитационное математическое моделирование причин возникновения колебаний под влиянием отдельных факторов и происходящие взаимосвязанные процессы между ними, которые отражают с достаточной степенью точности исследуемые свойства факторов.

Для проведения теоретических исследований использовались ПЭВМ и система автоматизированного проектирования Mathcad с функциями для решения технических задач, а также математическая среда Excel с функцией регрессии [75,76,77].

При разработке математической модели возникновения колебаний в настоящей главе рассматривались расчёты угла отклонения груза при вращении башни крана, угла отклонения (град) груза при торможении грузовой тележки при величине ускорений 1 м/с и 2 м/с и полупериода колебаний

груза на канате определённой длины, а также амплитуда раскачивания груза при торможении грузовой тележки на стреле крана при двойной запасовке каната с разными разнесёнными точками крепления.

Высокая опасность раскачивания (колебания) груза обусловлена конструктивными особенностями башенного крана, а именно: габаритными характеристиками опорной конструкции (башни), которая может достигать в высоту более 100 метров, а также габаритами стрелы – более 50 метров, податливостью крана (включающей в себя: податливость как самой стрелы с противовесом, башни, так и иных упругих элементов крана, опорно-поворотного круга, оголовка, смещение ходовых тележек с рабочим контактом колеса и рельса, установленных на путях, податливость и просадку наземного кранового пути), меняющейся длиной подвеса груза и ветровой нагрузкой, действующей на груз (зависящей, в свою очередь, от высоты подъёма, габаритных и весовых характеристик груза).

Таким образом, следует сгруппировать основные факторы, влияющие на раскачивание груза при работе башенного крана:

- Вес и объём груза ($\text{м}^3/\text{т}$);
- Длина подвеса груза (м);
- Скорость подъёма или опускания груза (м/мин);
- Движение и остановка (пуск) грузовой тележки (м/мин);
- Поворот стрелы (об./мин);
- Ветровая нагрузка (м/с).
- Податливость конструкции крана (град)

При этом представляется очевидным, что все факторы раскачивания груза связаны между собой. Схема взаимосвязи указанных факторов показана на рисунке 3.1



Рисунок 3.1 – Взаимодействие факторов, влияющих на раскачивание груза

Детально анализируя влияние факторов на раскачивание груза можно установить, что ветровая нагрузка (1) будет влиять на скорость подъема груза (2), на которую не в меньшей степени будет влиять вес и объем груза (3). В свою очередь, длина подвеса груза (5), наряду с ветровой нагрузкой (1), будет оказывать влияние на скорость движения грузовой тележки (4) и поворот стрелы (6). Целесообразно выделить влияние такого фактора, как податливость конструкции крана (7) (состоящей из: податливости стрелы, башни, так и иных упругих элементов крана), которая оказывает влияние на движение грузовой тележки (4), длину подвеса груза (5), поворот стрелы (6) и скорость подъема груза (2), при этом ветровая нагрузка (1) в зависимости от своей интенсивности имеет влияние на податливость конструкции крана (7).

Рабочими операциями башенного крана являются подъем и перемещение груза, включающие в себя передвижения грузовой тележки (или изменение вылета), поворота стрелы, а также опускание груза, и которые могут осуществляться как по направлению ветра, так и против ветра.

Ветровая нагрузка (1) является одной из составляющих общих сил, действующих как на башенный кран, так и на груз, так как башенный кран

относятся к плохообтекаемым телам, вследствие чего проявляются некоторые особенности поведения груза и самого башенного крана в набегающем воздушном потоке.

Необходимо отметить, что иные, действующие на башенный кран силы, безусловно зависят от условий рельефа местности, в которой установлен башенный кран, поэтому для минимизации их влияния следует учитывать особенности ветровой нагрузки в конкретном месте установки такого крана.

При эксплуатации башенных кранов, в смешанном воздушном потоке возникающих от других объектов таких как: здания, сооружения или другие башенные краны, набегающий поток будет турбулентным и соответственно, появляются колебания, вызванные аэродинамическими импульсами.

«Отличительной особенностью является отрыв воздушного потока с подветренной стороны металлоконструкции башенного крана с образованием вихрей, что дополнительно ее нагружает» [71].

Характер воздействия ветра, может быть, как динамическим с ярко выраженными порывами так и статическим, т.е. без характерных изменений скорости ветра. В следствии чего динамическое воздействие ветра характеризуется амплитудой порывов, их длительностью и частотой следования. По многочисленным наблюдениям, проведённым в России и за рубежом, в среднем длительность порыва составляет 0,5 – 5 с [71].

В инструкции по эксплуатации крана производитель указывает максимальную скорость ветра, выше которой работа крана не допускается. Например, согласно Инструкции для крановщиков по безопасной эксплуатации башенных кранов РД 10-93-95: «Крановщик обязан прекратить работу крана, если скорость ветра превышает допустимую величину, указанную в паспорте крана» [78].

В действующих СНиП 12-04-2002 «Безопасность труда в строительстве» (Часть 2. Строительное производство, п 8.3.9) запрещается выполнять монтажные работы на высоте в открытых местах при скорости ветра 15 м/с и более, при гололеде, грозе или тумане, исключаяющих видимость в пределах

фронта работ, а работы по перемещению и установке вертикальных панелей и подобных им конструкций с большой парусностью необходимо прекращать при скорости ветра 10 м/с и более [79].

В таблице 3.1 автором приведены технические характеристики башенных кранов, такие как подъем и опускание груза, поворот стрелы (башни), движение грузовой тележки по стреле, перемещение по рельсовому пути и допустимая ветровая нагрузка, до которой производитель разрешает работу. Для наиболее популярных в Российской Федерации марок башенных кранов указаны скорости ветра, при которых запрещается работа с грузом, где средняя скорость ветра приравнивается к 20 м/с на высоте до 10 м [78].

Таблица 3.1 – Технические характеристики башенных кранов

Тип и марка Башенного крана	Подъем груза мин /макс	Поворот	Движение грузовой тележки	Перемещение	Ветер
	(м/мин)	(об./мин)	(м/мин)	(м/мин)	(м/с)
КБ-503Б	30/140	0,64	25,2	19	21
КБ-515	30/60	0,7	36	19	15
КБ-674А	17,5/100	0,6	36,7	20	17
Liebherr 110EC-B6	26/126	0,8	36	—	20
Liebherr 132 EC-H 8 Litronic	25/130	0,8	42	—	20
Liebherr 132EC-H8 FR-tronic	24/140	0,8	100	—	20
Liebherr 180EC-B10 FR-tronic	33/195	0,8	40	—	20
Liebherr 280EC-H12 FR-tronic	16/96	0,8	110	25	20
Potain-MC85B	34/69	0,8	58	—	20
Potain-MDT178	56/112	0,8	79	—	20
Potain-MDT218J10	50/100	0,8	79	—	20
Everdigm KH-310	90/90	0,67	70	—	18
ZOOMLION WA6515- 10	40/100	0,8	100	25	20

Совместный анализ приведенной автором схемы взаимодействия факторов, влияющих на раскачивание груза (рисунок 3.1), и данных, указанных в таблице 3.1, позволяет сделать следующие выводы:

1) К движению грузовой тележки (м/мин) (4) с соответствующей скоростью (м/мин), в направлении по ее ходу будет действовать ветровая нагрузка (м/с) (1) определённой силы, зависящая от силы ветра, которая, в свою очередь, будет зависеть от объёма и веса груза ($\text{м}^3/\text{т}$) (3) и длины подвеса груза (м) (5), а также окажет важнейшее влияние на податливость конструкции крана (7).

2) При повороте стрелы тележки (об/мин) (6) будет оказывать влияние податливость конструкции крана (7), а в направлении по ходу стрелы будет действовать ветровая нагрузка (м/с) (1) определённой силы, зависящая от силы ветра, которая, в свою очередь, будет зависеть от объёма и веса груза ($\text{м}^3/\text{т}$); (3).

3) Скорость подъёма или опускания груза (2) (об/мин) будет увеличивать или уменьшать раскачивание такого груза, на который будет влиять объём веса или груза ($\text{м}^3/\text{т}$) (3), а также окажет важнейшее влияние на податливость конструкции крана (7) при отрыве груза с земли.

4) Влияние ветровой нагрузки (м/с) (1) на податливость конструкции крана (7) будет зависеть от интенсивности и нагруженности воздушного потока.

В контексте развития предельного угла отклонения грузового каната от вертикали для башенного крана наиболее опасно сочетание одновременного поворота стрелы на максимальном вылете груза, торможения грузовой тележки при движении от оси крана и давления на груз от ветра, действующего вдоль стрелы в направлении от башни.

Для поиска эффективных путей решения проблемы требуется математическое описание процесса отклонения грузового каната под отдельным и совместным воздействием сил инерции при вращении стрелы, торможении грузовой тележки и давлении ветра.

Раскачивания груза на канатах возникают при разгонах и торможениях механизмов передвижения, вращения и изменения вылета крана; давлении ветра

на груз; при наезде на концевые упоры (буферы). Последний случай не рассматривается, т.к. движение крана с грузом запрещено. В поворотных кранах главную роль играет механизм вращения [80].

Опасным углом отклонения грузового каната от вертикали принято считать значения более 6^0 [11,81,82]. Поэтому при достижении такого отклонения каната следует предпринимать действия по его снижению или подавать сигнал об опасности.

Для проведения теоретических исследований и для полного раскрытия взаимодействия факторов влияющих на колебания груза автором предложено:

- описать процесс развития колебаний при повороте стрелы, движении грузовой тележки, при подъёме груза, а также при его перемещении с учетом податливости конструкции крана, давлении ветра;
- описать процесс отклонения груза при торможении грузовой тележки на стреле крана и при двойной запасовке каната;
- обосновать выбор наиболее опасного случая одновременно действующих нагрузок.

При математическом моделировании автором приняты следующие допущения:

- начало движения грузовой тележки и вращения стрелы происходит плавно, не вызывая раскачивания груза в процессе движения;
- давление ветра также не вызывает раскачивания груза в движении, а создает дополнительное отклонение грузового каната при остановке движения груза;
- вследствие незначительности величины углов отклонения грузового каната от действия каждого фактора (до 15^0) принято за начальное положение вертикальное расположение грузового каната для расчета влияния каждого фактора.

3.3. Процесс развития колебаний при повороте стрелы

При повороте стрелы башенного крана всегда возникают колебания груза, являющиеся неотъемлемой частью данной рабочей операции, что объясняется действием комплекса факторов показанной на рисунке 3.1.

Рассмотрим подробнее развитие данного процесса, для чего возьмём груз весом G , висящий на канате длиной L на расстоянии R от оси вращения крана. На рисунке 3.2 представлена схема развития угла $\varphi_{\text{п}}$ отклонения грузового каната при вращении башни крана с угловой скоростью ω на угол поворота стрелы 90° . В исходном положении горизонтальная стрела находится в положении CO_1 , а грузовой канат в положении O_1A (вертикален). Груз находится в состоянии равновесия под действием силы тяжести G и равного ей усилия F в канате.

С началом вращательного движения стрела двигается определенное время с ускорением до угла поворота β_p (угол разгона), а в дальнейшем – с установившейся скоростью ω . На участке разгона A_1A_2 траектории движения груза появляются силы: инерции – центробежная $P_{\text{иц}}$ и касательная $P_{\text{ик}}$; сопротивления ветра $P_{\text{св}}$. На участке установившегося движения сила $P_{\text{ик}}$ не действует, т.к. исчезает касательное ускорение.

При вращении груз двигается с некоторым отставанием от стрелы за счет действия сил $P_{\text{ик}}$ и $P_{\text{св}}$. В момент остановки стрелы в точке O_2 груз будет находиться в точке B , отставая от стрелы на угол β_o (угол отставания) (рисунок 3.2 (б)). После остановки стрелы груз двигается по инерции, описывая окружность радиусом O_2A_3 на первом витке с последующим движением по конусной спирали с вершиной в точке A_4 . Величина радиуса O_2A_3 и определяет максимальное значение угла $\varphi_{\text{п}}$. Угол ψ показывает величину подъема груза по отношению к точке A_1 на высоту BB' показанной на рисунке 3.2 (а).

Считаем, что угловая скорость установившегося движения груза и стрелы одинаковая и равна ω , и в процессе торможения стрелы (за 2...3 с) скорость груза не уменьшится на значимую для данного расчета величину.

Тогда скорость груза от вращения стрелы будет равна, показанной на рисунке 3.2 (б):

$$v_{\text{гв}} = \omega \cdot (R + S) \quad (3.1)$$

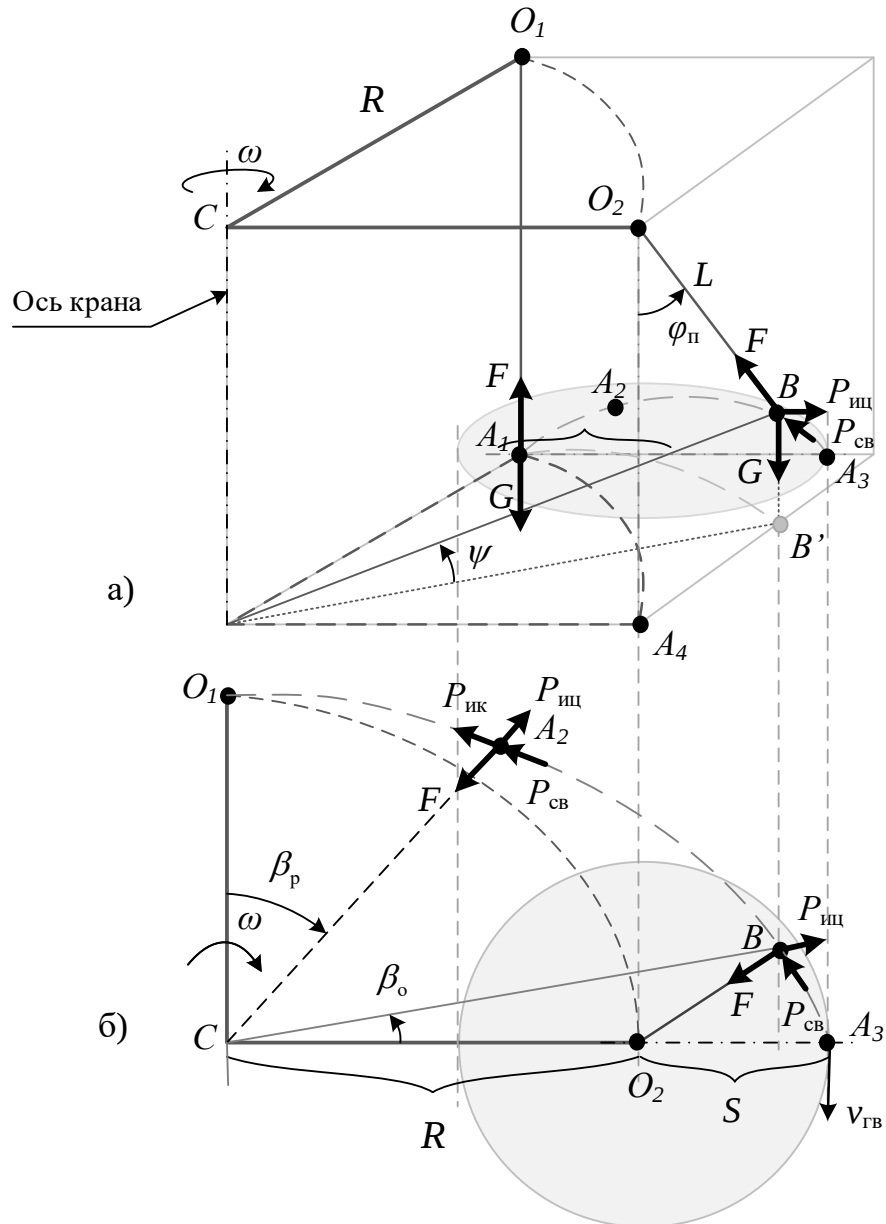


Рисунок 3.2 – Схема расчета угла отклонения груза при вращении башни крана:

а – объемный вид; б – вид сверху

3.4. Процесс развития колебаний при движении грузовой тележки

При движении грузовой тележки по стреле в установившемся режиме со скоростью v действуют силы: тяговое усилие P_T (со стороны тягового каната); сила сопротивления движению тележки P_c ; кориолисова сила P_K (в случае вращения стрелы) [83,84]; сила сопротивления ветра движению на груз показанной на рисунке 3.3. При ускоренном движении добавляются силы инерции тележки и груза, при торможении – силы инерции торможения груза. Именно торможение тележки дает наибольшее отклонение грузового каната, причем в сторону, противоположную от башни крана.

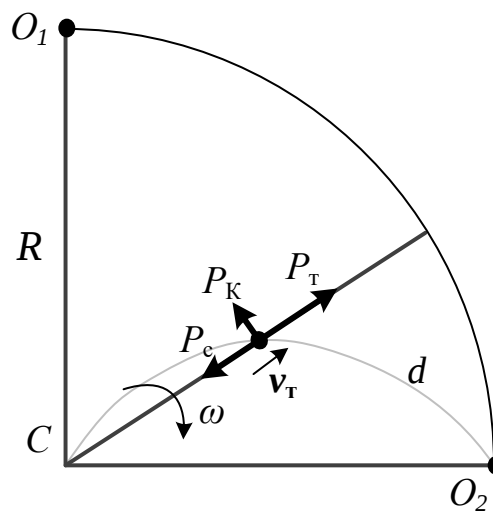


Рисунок 3.3 – Действующие силы при движении грузовой тележки по стреле в установившемся режиме

В процессе движения со скоростью v_T по вращающейся вокруг точки C стрелы с угловой скоростью ω , тележка перемещается по траектории d . Считаем, что скорость установившегося движения груза и тележки одинаковая и равна $v_{гт}$ (индекс «гт» – скорость груза от действия тележки), и в процессе торможения тележки (за 2...3 с) скорость груза не уменьшится на значимую для данного расчета величину.

После торможения груз под действием силы инерции $P_{ит}$ (индекс «ит» – сила инерции от тележки) отклонит канат в сторону движения, и круговая траектория, показанная на рисунке 3.4, превратится в эллиптическую.

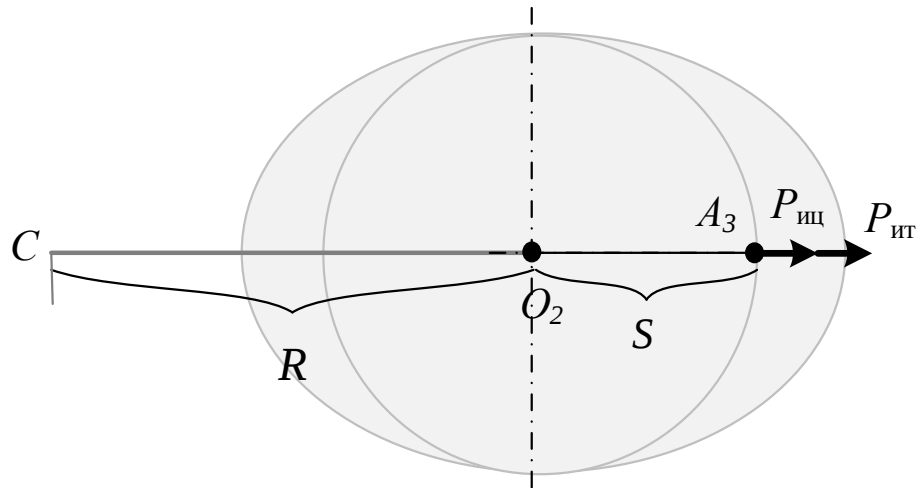


Рисунок 3.4 – Траектория колебаний груза от действия сил $P_{иц}$ и $P_{ит}$

3.5 Расчет угла отклонения груза при вращении башни крана

Существующие аналитические модели, основанные на дифференциальном исчислении [32,70,85,86,87,88], не дают приемлемого для рассматриваемого случая решения для расчета угла отклонения груза при вращении башни крана. Поэтому автором предлагается более простая модель, базирующаяся на законах классической механики.

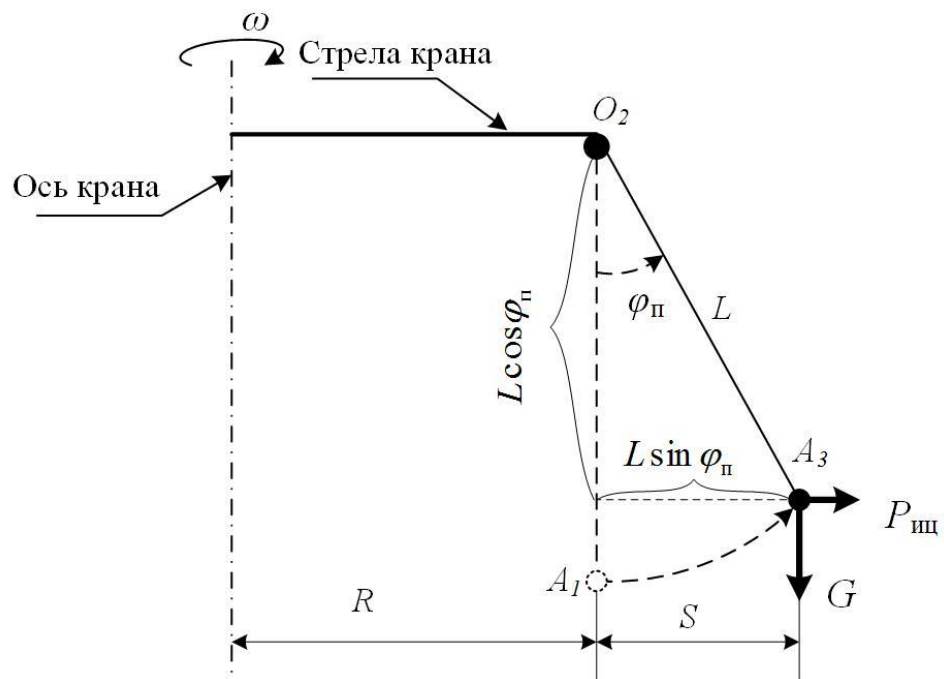


Рисунок 3.5 – Схема расчета угла отклонения груза при вращении башни крана

Как было показано выше, при установившемся движении условие равновесия в плоскости стрелы крана определяется из $\sum M_o = 0$ (рисунок 3.5):

$$m \cdot g \cdot L \sin \varphi - m \cdot \omega^2 \cdot (R + L \sin \varphi) \cdot L \cos \varphi = 0 \quad (3.2)$$

После преобразований выражения (3.2) с учетом, что при малых углах (до 15°) синус угла равен его тангенсу, получаем:

$$\varphi_n = \arctg\left(\frac{R\omega^2}{g - L\omega^2}\right) \quad (3.3)$$

Результаты моделирования в Mathcad представлены в виде графика (рисунок 3.6).

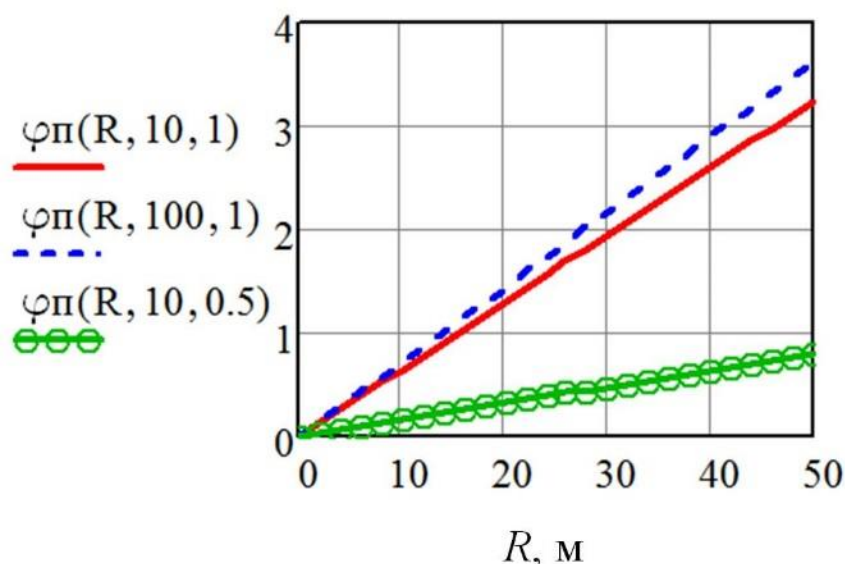


Рисунок 3.6 – Результаты расчета в Mathcad угла φ_n (а)

(в скобках: R – радиус точки подвеса грузового каната на стреловой тележке, м; вторая цифра – длина каната L , м; третья цифра – частота вращения башни, об./мин)

Из результатов расчета угла отклонения грузового каната в Mathcad можно сделать вывод, что обусловленный вылетом стрелы угол отклонения каната при длине подвеса от 10 до 100 метров не превышает четырех градусов показано на рисунке 3.6. Такое значение угла отклонения может быть допустимым в определённых случаях производства работ на строительной площадке. Для предотвращения раскачивания груза в особых случаях, когда требуется минимальное отклонение угла каната, машинист (оператор) крана может

предпринять действия по предотвращению запредельного нарастания угла отклонения каната, имея соответствующую квалификацию (опыт), или обладая техническим решением, информирующим о нарастании угла отклонения каната при любых погодных условиях.

Таким образом, машинисту (оператору) нужно предпринять действия для предотвращения раскачивания груза согласно следующим расчетам: при возрастании угла отклонения больше 2° и частоте вращения башни, 0,5 – 1 об./мин. следует уменьшить частоту вращения на 50%, а длину подвеса уменьшить на 20% после предпринятых мер как в следствии произойдёт уменьшение раскачивания груза.

Указанные результаты расчетов в Mathcad автор далее проверит в натурных экспериментах на действующих башенных кранах.

3.6. Отклонение груза при торможении грузовой тележки на стреле крана

Наибольшие углы отклонения груза при движении грузовой тележки на стреле крана возникают при торможении тележки. Расчетный случай – движущаяся по стреле крана грузовая тележка резко останавливается с ускорением торможения a_T при времени торможения t_T . Из всех возможных вариантов расчёта угла отклонения грузового каната, на котором подвешен груз, при торможении тележки, рассмотрим два варианта показанных на рисунке 3.7(а),(б), позволяющих в наиболее наглядном виде представить нарастание угла φ_T во временном промежутке. Первый вариант: переход кинетической энергии движения груза в потенциальную энергию его подъёма на высоту h показанных на рисунке 3.7(а). Второй вариант: отклонение грузового каната под действием силы инерции движения груза и силы его тяжести показанных на рисунке 3.7(б).

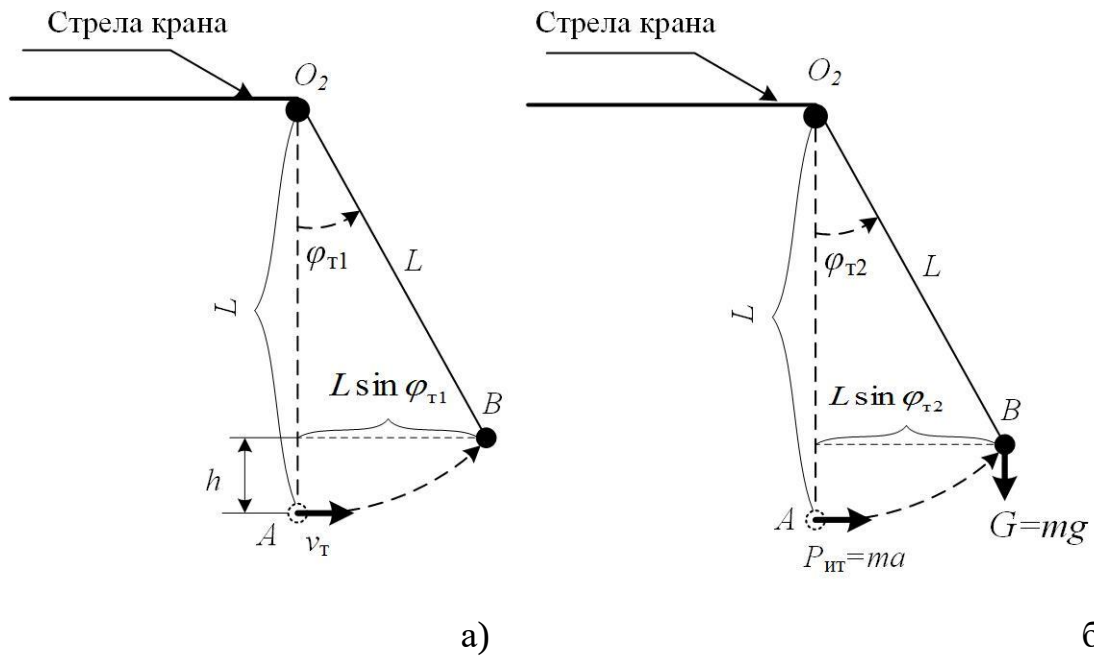


Рисунок 3.7 – Схема к расчету угла отклонения груза при торможении грузовой тележки:

- а – методом перехода кинетической энергии E_k движения груза со скоростью v в потенциальную энергию E_n его подъема на высоту h ;
 б – методом анализа сил $P_{ит}$ инерции движущегося груза и его веса G

Первый вариант расчета. Приравниваем кинетическую и потенциальную энергии:

$$E_k = \frac{mv_T^2}{2}; \quad E_n = mgh, \text{ тогда } \frac{mv_T^2}{2} = mgh, \text{ отсюда } h = \frac{v_T^2}{2g} \quad (3.4)$$

Угол отклонения каната при торможении по первому варианту расчета на рисунке 3.7 (а):

$$\varphi_{T1} = \arccos\left(\frac{L-h}{L}\right) \quad (3.5)$$

Второй вариант расчета. Приравниваем силу $P_{ит}$ инерции движущегося груза и его вес G :

$$P_{ит} = ma_T; \quad G = mg; \quad a_T = \frac{v_T}{t_T}, \text{ тогда } ma_T = mg \quad (3.6)$$

Отсюда угол отклонения каната при торможении по второму варианту расчета из рисунка 3.7(б):

$$\varphi_{т2} = \arctg\left(\frac{a_t}{g}\right) = \arctg\left(\frac{v_t}{gt_t}\right) \quad (3.7)$$

При одинаковом получаемом результате по обоим вариантам расчета при скорости движения грузовой тележки v_t , второй вариант является предпочтительным, т.к. учитывает характеристики процесса торможения, а именно ускорение a_t и время t_t торможения, которые задаются при проектировании крана.

Очевидно, что оба метода расчета дают амплитудное значение угла торможения показанных на рисунке 3.8(а), время достижения которого значительно больше времени торможения t_t и определяется временем T полупериода колебаний груза на канате длиной L показанных на рисунке 3.8(б):

$$T = \pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (3.8)$$

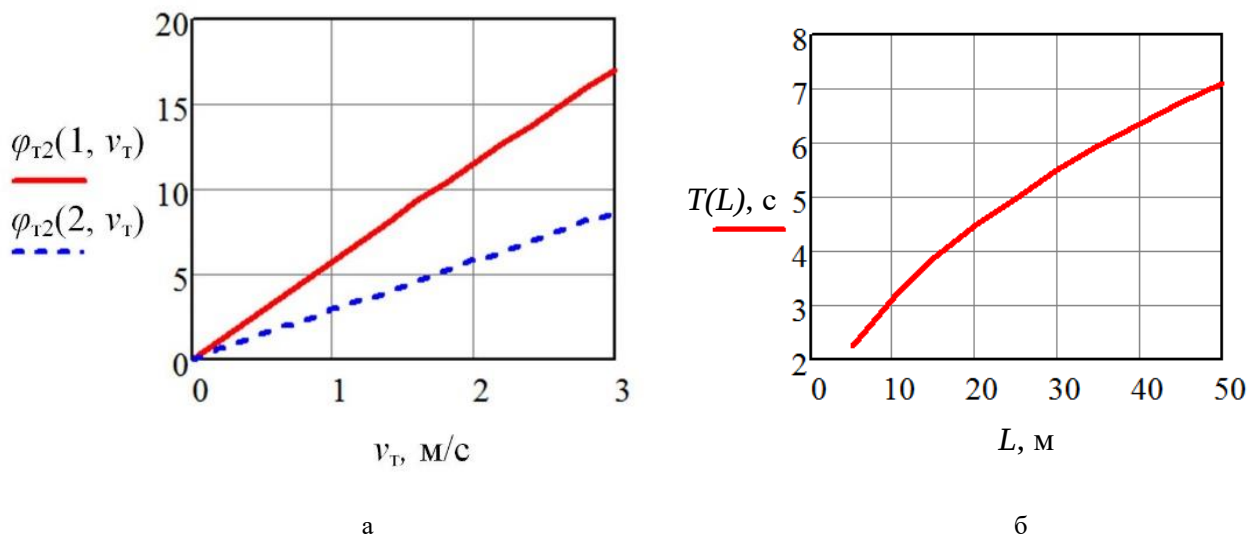


Рисунок 3.8 – Результаты моделирования в Mathcad угла отклонения (град) груза при торможении грузовой тележки при величине ускорений 1 и 2 м/с (а) и полупериода T колебаний груза на канате длиной L (б)

Из результата моделирования в Mathcad угла отклонения (град) груза при торможении грузовой тележки, величине ускорений 1 и 2 м/с (а) и полупериода колебаний груза на канате определённой длины, можно сделать вывод, что углы отклонения каната при торможении грузовой тележки на порядок больше, чем отклонение каната при повороте башни. И на основании моделирования в Mathcad при ускорении в 1 м/с и скорости тележки v_T 3 м/с установится отклонение грузового каната в 17° , что непременно будет оказывать влияние на продолжительное позиционирование груза при погрузке. А также может возникнуть ситуация столкновения груза с препятствием в стеснённых условиях из-за большого угла отклонения.

Для того чтоб исключить такую вероятность и повысить уменьшение времени позиционирование груза, следует спрогнозировать момент наиболее эффективного предотвращения раскачивания груза. Для этого нужно знать увеличение ускорения грузовой тележки или наблюдать (визуально) за увеличением угла отклонения грузового каната (по средствам технического решения), машинисту (оператору) крана следует предпринять действия по предотвращению запредельного нарастания угла отклонения груза: таких как при увеличении отклонения груза в интервале $2^\circ - 3^\circ$ и величине ускорений от 1 м/с до 2 м/с следует произвести по направлению раскачивания груза движение грузовой тележки, и тем самым погасить раскачивание груза и как в результат действий машиниста (оператора) увеличивается производительность крана и повышается безопасность производства работ. Учитывая изложенное предстоит подтвердить расчёты моделирования Mathcad и возможность отработать предотвращения раскачивания груза в натурных экспериментах на действующих башенных кранах.

3.7. Отклонение груза при торможении грузовой тележки на стреле крана при двойной запасовке каната

Основной частью башенного крана являются канатные системы, представленные самими канатами, намотанными на барабан лебедки и блоками. Канаты с блоками представляют собой полиспасты. Запасовка канатов определяется кратностью прохождения троса между блоками. Такой механизм позволяет поднимать груз при пропорционально меньшем усилии лебедки.

В случае двойной запасовки из практики замечено, что раскачивание груза, подвешенного на расположенных рядом одном или двух канатах, несколько больше, чем на канатах, разнесенных на определенное расстояние, друг от друга. И чем больше расстояние между канатами, тем меньше амплитуда раскачивания груза. Однако, ни теоретических, ни экспериментальных исследований о влиянии расстояния между канатами на амплитуду раскачивания груза автору обнаружить в свободном доступе не удалось. В данном разделе предпринята попытка решения этой актуальной задачи.

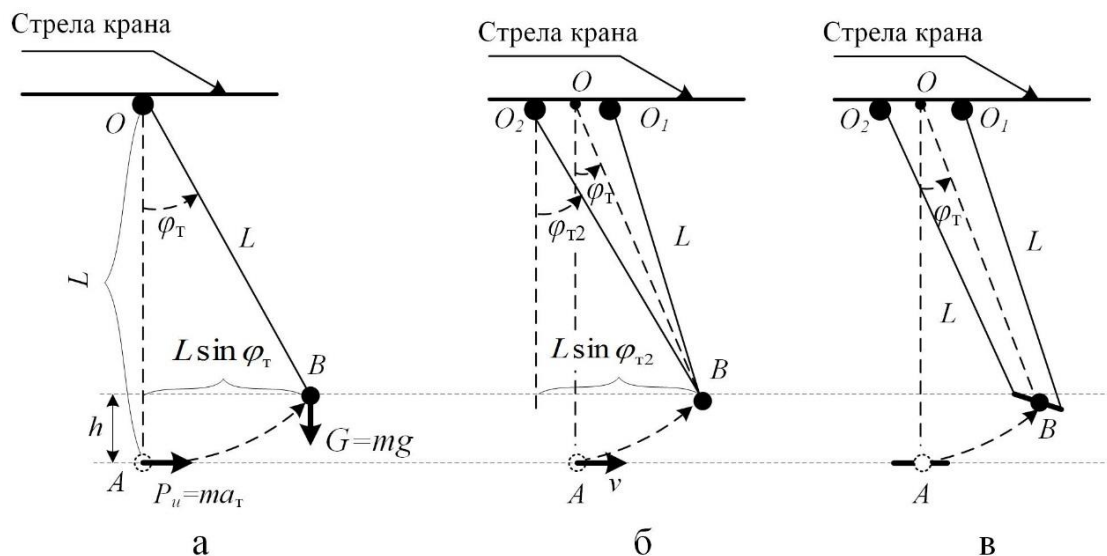


Рисунок 3.9 – Схема к расчету угла отклонения груза при торможении грузовой тележки со скоростью v методом анализа сил $P_{и}$ инерции движущегося груза и его веса G

Варианту запасовки каната с разнесенными верхними точками крепления соответствует схема, показанная на рисунке 3.9(б). При отклонении груза перераспределяется нагрузка между канатами – правый ослабляется, левый нагружается, и в конечной точке B вся нагрузка будет приходиться на левый канат. Естественно предположить, что формула (3.6) применима и для расчета угла $\varphi_{2т}$, который будет равен углу φ_t на схеме a , груз отклонится от вертикальной линии, проходящей через точку O_2 , на величину $L\sin\varphi_{2т}$, а величина подъема h центра тяжести груза, рассчитанная исходя из равенства кинетической энергии в начале торможения и потенциальной энергии в конце, составит:

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad (3.9)$$

И тогда отклонение груза от вертикальной линии, проходящей через точку O , будет меньше на величину половины расстояния между точками O_1 и O_2 . Это и будет ожидаемым уменьшением отклонения груза, подвешенного на одном или двух канатах, расположенных рядом.

Однако, величина отклонения груза, измеренная на практике по схеме показанной на рисунке 3.9 (б), оказывается меньше расчетной. Это может быть объяснено расходом энергии на перераспределение нагрузки между канатами и на их растяжение. Значение величины отклонения груза, которое менее расчетного, замечено и при запасовке канатов по схеме, представленной на рисунке. 3.9 (в). Растяжение канатов частично компенсируется наклоном траверсы крюковой подвески, который возникает при длине траверсы, меньшей, чем расстояние между точками O_1 и O_2 .

Решение поставленной задачи было выполнено на основе проведения экспериментальных исследований.

В рассматриваемом случае, в результате воздействия силы инерции груза при торможении стреловой тележки крана, груз на канате совершает свободные затухающие колебания. Отсюда задача экспериментальных исследований –

определение влияния расстояния между канатами подвески груза на процесс затухания колебаний груза.

Для обработки результатов экспериментов, а именно, определения характеристик процесса затухания колебаний, необходимо рассмотреть теорию колебательного процесса.

Характеристики процесса затухания колебаний могут быть получены из решения дифференциального уравнения процесса [89]:

$$\ddot{x} + 2\beta \dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (3.10)$$

где β – коэффициент затухания колебаний; ω_0 – циклическая частота колебаний системы.

Решение уравнения для рассматриваемого случая может быть представлено в виде:

$$x(t) = A_n \exp(-\beta \cdot t) \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) \quad (3.11)$$

где t – текущее время; ω – собственная частота колебаний системы; φ_0 – начальная фаза колебаний.

Входящие в формулы (3.10) и (3.11) величины могут быть найдены из следующих соотношений:

$$\beta = -\ln(A_k / A_n) / t; \quad t = nT; \quad T = 2\pi\sqrt{L/g}; \quad \omega_0 = 2\pi/T; \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \quad (3.12)$$

где n и t – количество и время колебаний, после которых проводилось измерение A_k ; T – период колебаний.

Для наглядности удобно выразить амплитуду колебаний в функции количества колебаний n :

$$x(n) = A_n \exp[-\beta \cdot t(n)] \cdot \cos[\omega \cdot t(n) + \varphi_0] \quad (3.13)$$

Тогда будет удобно оценивать изменение амплитуды между соседними колебаниями, например, между первым и вторым:

$$\Delta x(1-2) = x(1) - x(2). \quad (3.14)$$

На рисунке 3.10 представлен графически результат решения уравнения (3.11) в Mathcad со значением $\beta = 0,02$.

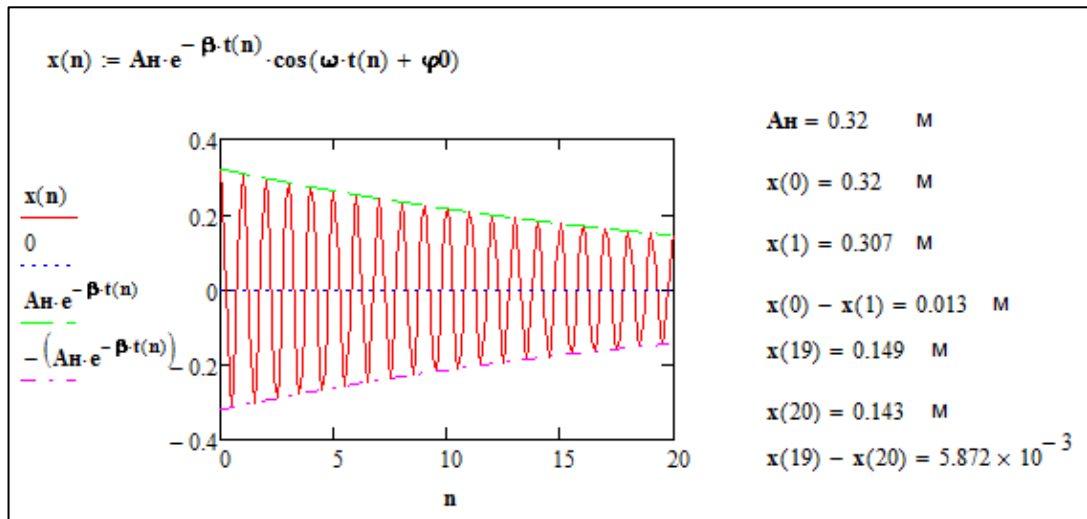


Рисунок 3.10 – Графическое представление в Mathcad затухающих колебаний

Численное решение уравнения (3.10) возможно выполнить средствами математической среды Mathcad представленной на рисунке 3.11, а также рассчитать скорости и ускорения колебаний представленной на рисунке 3.12. Изменение амплитуды x выражено в функции времени t .

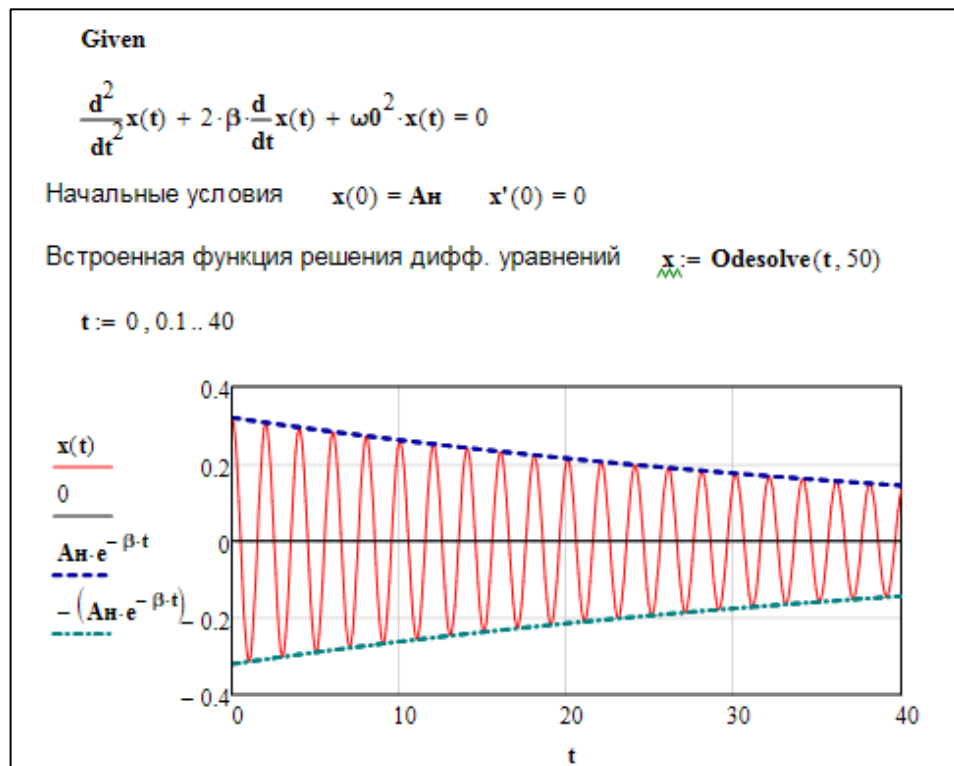


Рисунок 3.11 – Решение дифференциального уравнения колебаний груза крана в Mathcad

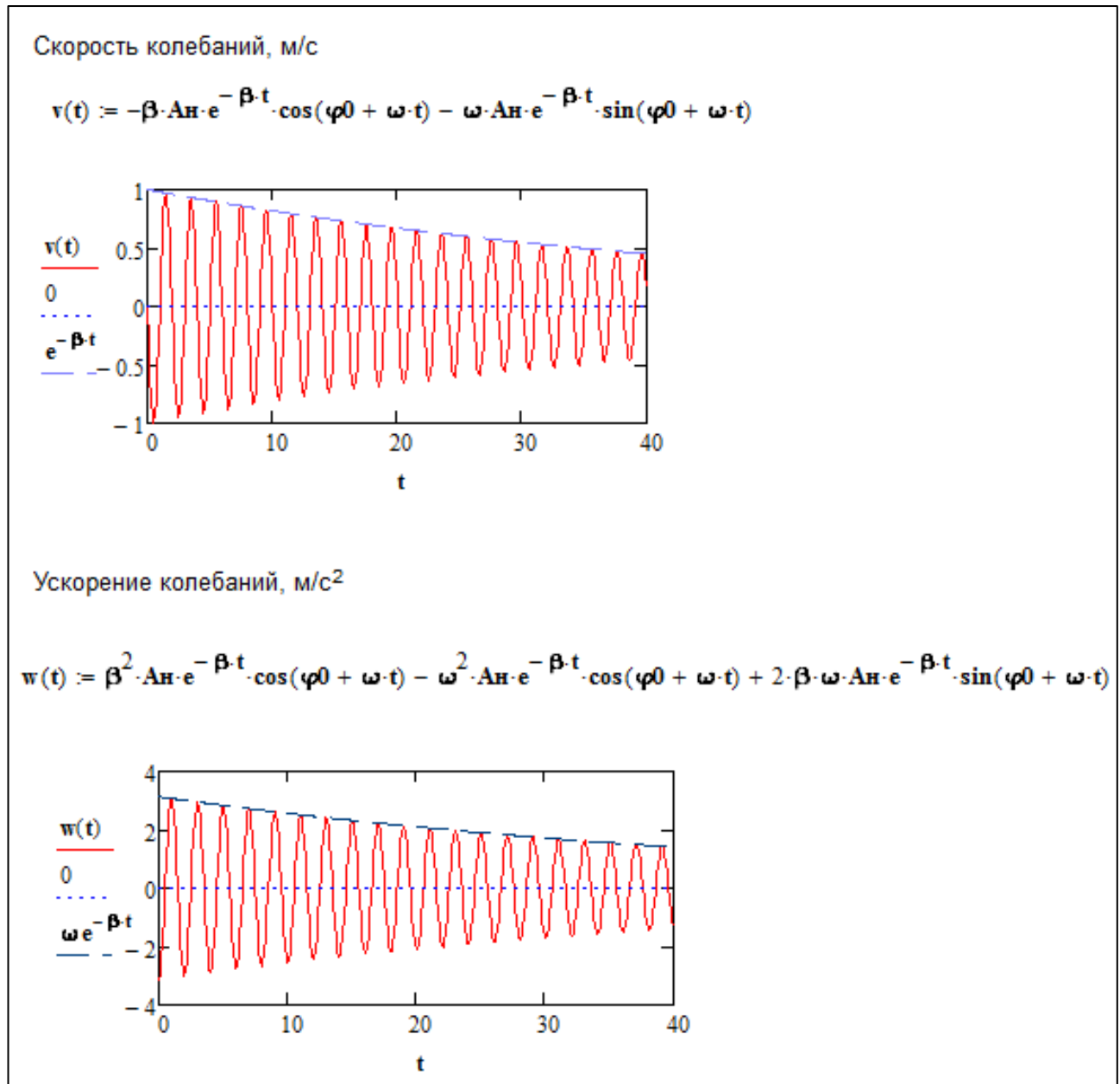


Рисунок 3.12 – Расчет в Mathcad скорости и ускорения колебательного движения

Из результатов расчета скорости и ускорения колебательного движения угла отклонения грузового каната в Mathcad, а именно, определения характеристик процесса затухания колебаний, можно сделать вывод, что расстояние между канатами подвески груза влияют на процесс затухания колебаний груза. Следовательно, целесообразно провести экспериментальные исследования для оценки достоверности полученных результатов в два этапа: первый этап в лабораторных условиях на стенде и второй этап натурный эксперимент

на действующих башенных кранах с разными расстояниями между канатами на крюковой подвеске.

3.8. Процесс развития колебаний груза при его перемещении с учетом податливости конструкции крана и значений скорости подъёма груза

Такой фактор, как податливость конструкции крана играет ключевую роль в развитии раскачивания груза и колебаний его, а также непосредственно оказывает влияние на скорость подъёма такового.

Прежде всего раскачивания груза могут возникать при поднятии груза с земли в зависимости от длины подвеса и вылета стрелы крана, что обусловлено податливостью крана, состоящего из механизмов башенного крана, несущей металлоконструкции (башни), приводов и основания, на котором он установлен. Механизмы, металлоконструкция и поднимаемый груз представляют собой комплекс отдельных масс, связанных между собой упругими звеньями. Отдельными массами являются груз, узлы металлоконструкции крана и вращающиеся элементы механизма и привода. Упругие звенья представлены канатами, стержнями или балками металлоконструкции и валами механизмов привода, соединенными между собой упругими связями и демпфирующими элементами. Эти составляющие приводят к смещению по горизонтали проекции точки подвеса груза относительно самого груза, что при отрыве груза от земли вызывает его колебание [90].

Амплитуда этих колебаний должна учитываться как для оценки колебаний, так и для других движений (например, в случае разгона или торможении грузовой тележки в зависимости от вылета стрелы, или при повороте башни или стрелы крана).

Амплитуда колебаний может быть определена по формуле, учитывающий влияние следующих составляющих показанной на рисунке 3.13, таких как прогиб стрелы с противовесом, прогиб башни, смещение ходовых тележек, установленных на путях (поворот башни или стрелы относительно горизонта),

а также неточность наведения точки подвеса груза учитывая длину строп и центр тяжести груза (погрешность: S_H) [91].

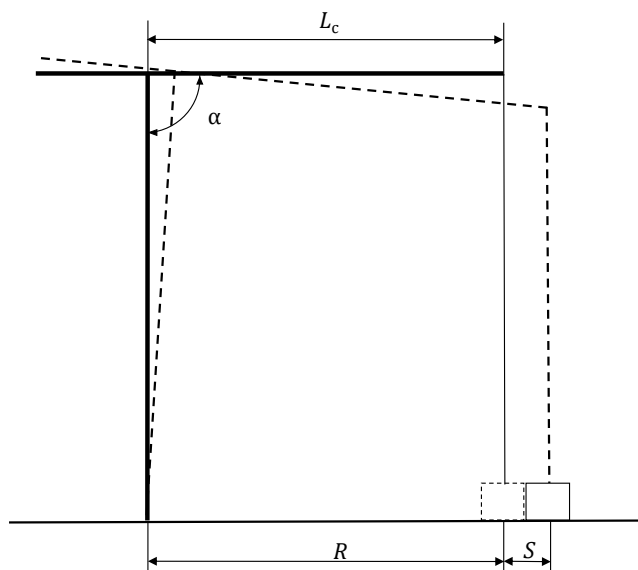


Рисунок 3.13 – Схема податливости крана

Тогда амплитуда горизонтальных колебаний груза после его отрыва от земли будет:

$$S = S_{кр} + \Delta R \pm S_H \quad (3.15)$$

где: $S_{кр}$ определяется как изменение вылета R в результате изменения угла наклона стрелы $\Delta\alpha = \eta$, а ΔR – поправка на предварительное уменьшение вылета и определяется:

$$\Delta R = U \sin \alpha \quad (3.16)$$

где U – прогиб стрелы, а α – угол её наклона к горизонту.

Для более точного расчёта вылета надо учитывать не только прогиб стрелы, но распределённую нагрузку по стреле, а также и зазоры между опорными элементами, опорно поворотного круга и т.д. Однако, для определения уменьшения вылета стрелы при подъёме груза, достаточно воспользоваться упрощённой формулой для определения:

$$\Delta R = Qg L_c \cos \alpha \sin \alpha \quad (3.17)$$

где Q – масса груза; L_c – длина стрелы и угол наклона её к горизонту являются постоянно изменяемым величинами [92],

Тогда угол наклона стрелы определяется по формуле:

$$\delta R = \frac{\delta R}{\delta \alpha} \Delta \alpha \cdot \frac{1}{R} = \operatorname{tg} \alpha \cdot \Delta \alpha \quad (3.18)$$

где δR и ΔR – относительное и абсолютное изменение вылета стрелы крана

В связи с вышеизложенным, схемами и расчётами, учитывая всё многообразие взаимодействующих элементов конструкции крана и составляющих единое целое в факторе податливости крана. Также следует учесть динамическую схему, то есть расчётную схему подъёма груза на башенном кране с начальной точки подъёма (земли). Следовательно, стоит рассматривать динамическую схему башенного крана, также как и расчётные схемы до отрыва груза и после отрыва груза, которые имеют непосредственное влияние на скорость подъёма груза и являются неотъемлемой частью фактора податливости крана.

Рассмотрим ниже расчетную динамическую схему башенного крана до отрыва груза и после отрыва груза, которая оказывают непосредственное влияние на скорость подъёма груза и является характеристикой, описывающей податливость крана.

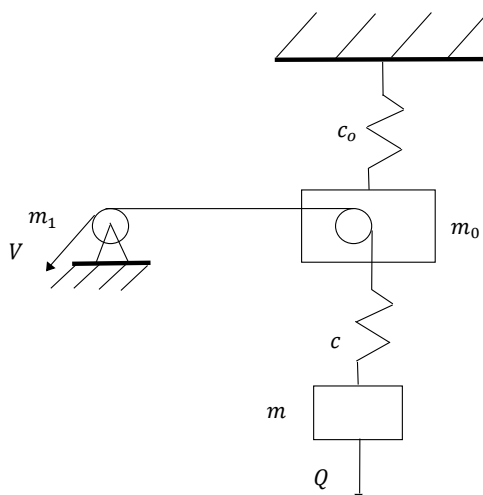


Рисунок 3.14 – Расчётная динамическая схема башенного крана

Где m_0 – масса стрелы; приведенная к поступательному перемещению груза; c_0 – жесткость стрелы, приведенные к поступательному перемещению груза; m_1 – масса вращающихся частей механизма подъема, приведенная к поступательному перемещению груза; V – скорость массы m_1 ; $m_{1г}$ – масса груза; Q – сила тяжести груза; c – жесткость подвеса груза.

При рассмотрении расчётной схемы будут принимаются следующие допущения для технологической операции «подъем с подхватом»:

1. К моменту «подхвата» механизм разгоняется до скорости V ;
2. После отрыва груза от опоры скорость механизма не изменяется;
3. Приведенная масса вращающихся частей механизма подъема во много раз больше остальных приведенных масс (оправдано для тихоходных механизмов).
4. Жесткость канатов в большинстве случаев очень велика, что их деформацией можно пренебречь, так как в канатах колебания затухают достаточно быстро.

С учетом указанных допущений расчетная схема станет универсальной как для башенных кранов, так и для кранов других типов, но при этом будет иметь различный вид для разных этапов рабочего процесса (технологических операций): до отрыва груза и после отрыва груза.

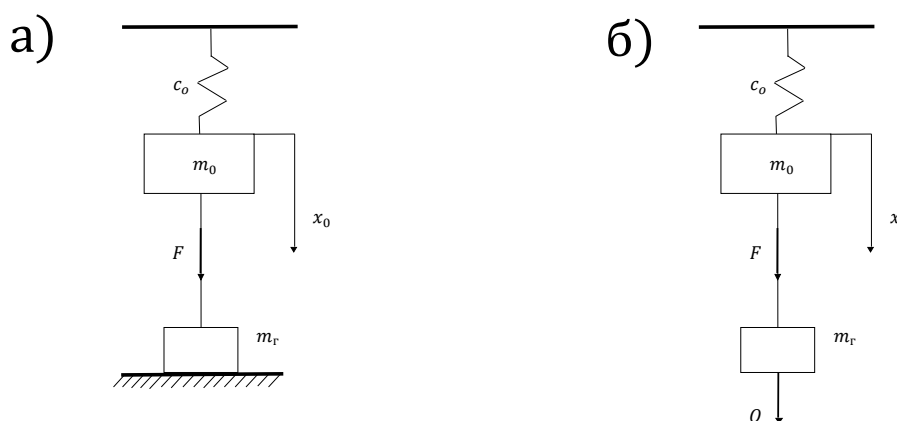


Рисунок 3.15 – Расчётная схема а) до отрыва груза,
б) после отрыва груза башенного крана

а) 1 этап (до отрыва груза от основания): в упругом элементе нарастает усилие (до величины Q) при неподвижной массе m_{Γ} ;

б) 2 этап (после отрыва груза от основания): начинается совместное движение массы металлоконструкции m_0 и массы груза m_{Γ} , оторванной от опоры.

Рассмотрим динамические процессы, протекающие на 1-ом этапе работы механизма (рис 3.15 (а)) до отрыва груза от основания.

Уравнение движения системы до отрыва груза:

$$m_0 \cdot \frac{d^2 x_0}{dt^2} + c_0 x_0 = F \quad (3.19)$$

Где x_0 – динамическая деформация (прогиб) металлоконструкции, отсчитываемая от положения равновесия; F – усилие на крюке; c_0 – приведенная жесткость металлоконструкции; m_0 – приведенная масса металлоконструкции. При установившейся скорости подъема V деформация металлоконструкции равна:

$$x_0 = V \cdot t; \frac{dx_0}{dt} = V; \frac{d^2 x_0}{dt^2} = 0 \quad (3.20)$$

Тогда уравнение движения системы перепишется в виде:

$$F = c_0 \cdot x_0 = c_0 \cdot V \cdot t \quad (3.21)$$

Пусть в момент времени t_1 происходит отрыв груза от основания. При этом сила на крюке:

$$F_1 = c_0 \cdot V \cdot t \quad (3.22)$$

где: $F_1 = m_2 \cdot g = Q$

Из этих уравнений определяется длительность первого этапа подъема:

$$t_1 = \frac{m_2 \cdot g}{c_0 \cdot V} \quad (3.23)$$

Деформация металлоконструкции в конце 1-го этапа равна:

$$x_1 = V \cdot t_1 = \frac{m_2 \cdot g}{c_0} = \frac{Q}{c_0} = \lambda_{CT} \quad (3.24)$$

Теперь следует рассмотреть динамические процессы, протекающие во время второго этапа работы механизма, показанные на рисунке 3.16 (б), после отрыва груза от основания:

На этом этапе на башенном кране металлоконструкция и груз общей массой будет: $m = m_o + m_e$ которые движутся совместно. Уравнение движения системы будет иметь вид

$$m \cdot \frac{d^2 x_o}{dt^2} + c_0 \cdot x_o = m_2 \cdot g \quad \text{или} \quad \frac{d^2 x_o}{dt^2} + p^2 \cdot x_o = q \quad (3.25)$$

Где: $p^2 = \frac{c_0}{m}$; $q = \frac{m_2}{m} \cdot g$

Решение этого уравнения будет иметь вид:

$$x_0 = A \cdot \cos pt + B \cdot \sin pt + \frac{q}{p^2} \quad (3.26)$$

Начальные условия для 2 этапа: при $x_0 = x_1 = \lambda_{CT}$; $\frac{dx_0}{dt} = V$ тогда :

$$A = \lambda_{CT} - \frac{q}{p^2}; B = \frac{V}{p} \quad (3.27)$$

и уравнение движения запишется в виде

$$x_0 = (\lambda_{CT} - \frac{q}{p^2}) \cdot \cos pt + \frac{V}{p} \cdot \sin pt + \frac{q}{q^2} \quad (3.28)$$

Преобразуется последнее выражение

$$x_0 = \lambda_{CT} \cdot \cos pt + \frac{q}{p^2} \cdot (1 - \cos pt) + \frac{V}{p} \cdot \sin pt = \lambda_{CT} \cdot \left[\cos pt + \frac{q}{p^2 \lambda_{CT}} \cdot (1 - \cos pt) \right] + \frac{V}{p} \cdot \sin pt \quad (3.29)$$

Тогда надо учесть, что:

$$\frac{q}{p^2 \lambda_{CT}} = \frac{m_2 \cdot g}{m} \cdot \frac{m}{c_0} \cdot \frac{c_0}{m_2 \cdot g} = 1 \quad (3.30)$$

Следовательно, получим уравнение движения в окончательной форме:

$$x_0 = \lambda_{CT} + \frac{V}{p} \cdot \sin pt \quad (3.31)$$

Нагрузка на крюковую подвеску (после отрыва груза от основания) представляет собой сумму статической и динамической составляющих, полученную путем двукратного дифференцирования уравнения движения

$$F_2 = Q + \frac{Q}{g} \cdot \frac{d^2 x_0}{dt^2} = Q \cdot (1 + \frac{V \cdot p}{g} \sin pt) \quad (3.32)$$

Максимальная динамическая нагрузка на крюке будет при $\sin pt = -1$ и составит:

$$F_{2\max} = Q \cdot (1 + \frac{V \cdot p}{g}) \quad (3.33)$$

или с учетом принятых обозначений:

$$F_{2\max} = Q \cdot \left(1 + \frac{V}{g} \cdot \sqrt{\frac{c_0}{m_0 + m_2}}\right) \quad (2.34)$$

Нагрузка на металлоконструкцию будет:

$$T_2 = c_0 + x_0 = c_0 \cdot \left(\lambda_{CT} + \frac{V}{p} \cdot \sin pt\right) = c_0 \cdot \left(\frac{m_2 \cdot g}{c_0} + \frac{m_2 \cdot m_0}{c_0} \cdot V \cdot p \cdot \sin pt\right) = Q \cdot \left(1 + \frac{m_2 \cdot m_0}{m_2 \cdot g} V \cdot p \cdot \sin pt\right) \quad (3.35)$$

Максимальная динамическая нагрузка на металлоконструкцию (при $\sin pt = 1$) или с учетом ранее введенных обозначений

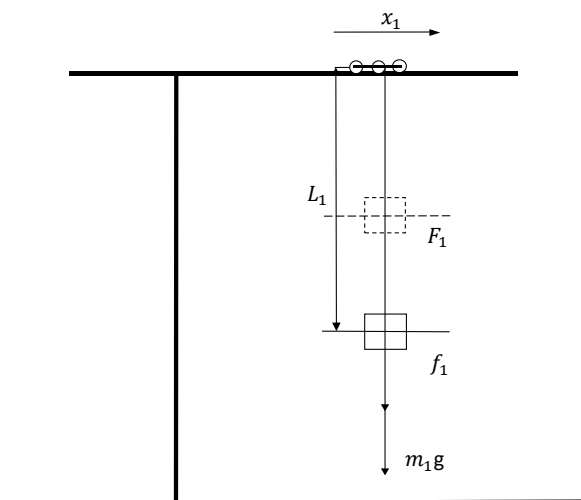
$$T_{2\max} = Q \cdot \left(1 + \frac{m_2 + m_0}{m_2} \cdot \frac{V \cdot p}{g}\right) \quad (3.36)$$

$$T_{2\max} = Q \cdot \left(1 + \frac{m_2 + m_0}{m_2} \cdot \frac{V \cdot p}{g} \cdot \sqrt{\frac{c_0}{m_2 + m_0}}\right) \quad (3.37)$$

В итоге если не учитывать жёсткость стального каната формула (3.37) будет давать завышенный результат в 5% [92].

В результате исследования динамической нагрузки на металлоконструкцию при подъёме груза с земли она будет составлять основную часть фактора податливости башенного крана и целесообразно выделить ее как значимую, поскольку она будет оказывать влияние на высокие значения амплитуды колебаний башенного крана.

Как было установлено выше, влияние на раскачивание (колебания) груза такого фактора, как скорость (подъёма или спуска) требует дальнейшего изучения. Рассмотрим следующий случай получения уравнения движения механизма подъема с помощью уравнения Лагранжа, где необходимо определить обобщенную координату. Для данного механизма обобщенной координатой является длина подвеса L_1 от точки крепления на механизме передвижения тележки показано на рисунке 3.16:



Рисунке 3.16 – Схема координатных сил, действующих на механизм подъема

Формула скорости подъёма груза может быть определена следующим образом:

$$T_L = \frac{1}{2} m_1 V_L^2 = \frac{1}{2} m_1 L_1^2 \quad (3.38)$$

где m_1 – масса груза с подвесом; V_L – скорость подъема груза; L_1 – координата груза.

Обобщенная координата L_1 рассчитывается по формуле

$$L_1 = \int_0^t V_L dt + L_{10} \quad (3.39)$$

где L_{10} – начальное значение длины подвеса груза.

Обобщенная сила механизма подъема Q_1 включает в себя несколько составляющих: сила со стороны системы электропривода F_1 , активная статическая сила (сила тяжести $m_1 g$) и реактивная статическая сила (сила трения f_1).

Обобщённую силу Q_1 можно выразить как:

$$Q_1 = -F_1 g + f_1 \quad (3.40)$$

В уравнении (3.40) сила трения f_1 может быть рассчитана по выражению:

$$f_1 = \begin{cases} \frac{m_1}{h_{\text{подъём}}} \\ m_1 h_{\text{спуск}} \end{cases} \quad (3.41)$$

где $h_{\text{подъём}}$ и $h_{\text{спуск}}$ – коэффициент полезного действия механизма при подъеме и спуске соответственно.

Скорость подъёма или опускания является составляющая фактором и может как усиливать раскачивания (колебания) груза, так и (при определённых действиях машиниста или системы управления башенного крана) уменьшать их, тем самым косвенно воздействовать на другие факторы, такие как: податливость башенного крана, поворот стрелы, движение грузовой тележки и длины подвеса.

3.9. Отклонение груза от ветровой нагрузки

Ветровая нагрузка является одной из составляющих обобщённых сил, действующих на башенный кран. Существует множество работ, посвящённых ветровой нагрузке на башенный кран [70,71,72,74].

По теме ветровых воздействий на башенный кран и на груз выполнены следующие работы таких авторов, как Подобед, Н.Е [74]; Мишин А.В [70]; Обидёнов В.А [71] и другие [93,94,95,96,97,98,99].

Моделирование ветровой нагрузки, учитывающее динамическую составляющую, действующую на башенный кран и на груз, является сложной проблемой, которой посвящены исследования таких авторов как: Вайнсон А.А.[85], Когон И.Я.[100], Подобед В.А.[74], Зарецкий А.А.[26]. Нагрузку, создаваемую ветровым потоком в плоскости качения стрелы на груз с учётом перемещений по всей её длине, рассмотренной в работе[71], можно описать следующим выражением.

$$P_{Pzp} = \frac{P}{2} C_{xzp} A_{zp} (U^2 + 2UV \beta \cos \varphi + V^2 \beta^2 \cos^2 \varphi) \quad (3.42)$$

Где C_{xep} – коэффициент аэродинамического сопротивления груза.

A_{ep} – наветренная площадь груза

U – вылет стрелы

Момент относительно оси вращения крана от действия ветровой нагрузки с учётом его перемещения:

$$M_{Bep} = \frac{P}{2} C_{xep} A_{ep} U (\varphi^2 U^2 + 2\varphi UV \beta \sin \varphi + V^2 \beta^2 \sin^2 \varphi) \quad (3.43)$$

Принимая выше изложенное можно получить усилие от силы ветра:

$$P_B = \frac{P}{2} C_X K A_U V^2 \beta^2 \quad (3.44)$$

Где C_X – аэродинамический коэффициент конструкции стрелового устройства по изменению вылета стрелы

K – коэффициент изменения динамического давления по высоте

V – скорость ветра

A_U – характерная наветренная площадь стрелы при изменении вылета

Вертикальная составляющая ветровой нагрузки на стрелу рассчитывается по формуле:

$$P_{Bh} = \frac{P}{2} C_X K A_U V^2 \beta^2 \times \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{U - r_o}{L} - \operatorname{arctg} \frac{C_{y1}}{C_{x1}} \right) \quad (3.45)$$

Момент от силы ветра, действующий на поворотную часть крана равен:

$$M_B = \frac{P}{2} C_m A_\varphi U (\varphi U \beta \sin \varphi + V^2 \beta^2) \quad (3.46)$$

Ветровая нагрузка на груз:

$$P_{Bep} = \frac{P}{2} C_{xep} A_{ep} V^2 \beta^2 \cos^2 \varphi \quad (3.47)$$

Момент от силы ветра на груз относительно оси вращения крана:

$$P_{Bzp} = \frac{P}{2} C_{Xzp} A_{zp} U (2\varphi UV \beta \sin \varphi + V^2 \beta^2 \sin^2 \varphi) \quad (3.48)$$

Статическая ветровая нагрузка на груз:

$$P_{Bzp} = \frac{P}{2} C_{Xzp} A_{zp} V^2 \beta^2 \cos^2 \varphi \quad (3.49)$$

Момент от статической составляющей ветровой нагрузки на груз относительно оси вращения башенного крана:

$$M_{Bzp} = \frac{P}{2} C_{Xzp} A_{zp} U (2\varphi UV \beta \sin \varphi + V^2 \beta^2 \sin^2 \varphi) \quad (3.50)$$

Ветровая нагрузка характеризуется средней максимальной скоростью ветра, осредненной за определенный интервал времени, порывистостью и шквалистостью. «Изменение динамики ветрового потока, то есть силы ветрового воздействия, приводит к изменению реакции на возмущающее воздействие, выраженное увеличением или уменьшением коэффициента лобового сопротивления. Для описания процессов ветрового нагружения необходимо принимать во внимание изменение коэффициента лобового сопротивления, в зависимости от угла атаки и скорости ветрового потока.

Зависимости влияния ветровой нагрузки, выраженные через коэффициент аэродинамического сопротивления, позволяют определить моментные характеристики крана относительно оси вращения, где получится значение ветрового нагружения в рабочем состоянии» [71].

Расчет ветровой нагрузки, действующей на груз, определяется согласно ГОСТ 1451-77[101] и приводится ниже. Распределенную ветровую нагрузку p на единицу расчётной площади элемента конструкции или груза в данной зоне высоты следует определять по формуле:

$$p = q \cdot k \cdot c \cdot n, \text{ Па}, \quad (3.51)$$

где q – динамическое давление ветра (принимается равным 125...500 Па в зависимости от скорости ветра, формула (3.51)); k – коэффициент,

учитывающий изменение динамического давления по высоте, рассчитывается по формуле (3.52), выведенной автором на основании данных ГОСТ 1451-77; c – коэффициент аэродинамической силы (равен 1,2); n – коэффициент перегрузки (равен 1).

Динамическое давление ветра q связано с плотностью воздуха ρ и его средней скоростью v формулой:

$$q = \frac{\rho v^2}{2}, \text{ Па} \quad (3.52)$$

где $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$; v – средняя скорость ветра (14...28,5 м/с) на высоте 10 м от уровня земли.

$$k = 0,4788H^{0,3192}, \quad (3.53)$$

где H – высота груза над уровнем земли, м

Груз будет отклоняться от вертикального положения под действием статической составляющей ветровой нагрузки F :

$$F = p \cdot A, \text{ Н}, \quad (3.54)$$

где A – расчётная площадь груза рассчитывается по формуле (3.54), выведенной авторами на основании данных ГОСТ 1451-77[101].

$$A = 2,8624m^{0,5682}, \quad (3.55)$$

где m – масса груза, т.

Проведя вычисления отклонения угла каната груза от действия ветра, аналогичные схеме по рисунку 3.17, получим:

$$\varphi_{\text{в}} = \arctg\left(\frac{F}{mg}\right). \quad (3.56)$$

Из результата моделирования в Mathcad угла отклонения (град) канатов с грузом (1т и 10т) при разных показаниях ветровой нагрузки от 0 до 30м/с и длины подвеса 20м и 190м соответственно, можно сделать вывод, что при увеличении длины подвеса груза увеличивается и его угол отклонения под действием ветровой нагрузки. Достигаемые при этом значения угла

отклонения каната более 20° , могут повлиять на безопасность работ по перемещению и позиционирования груза.

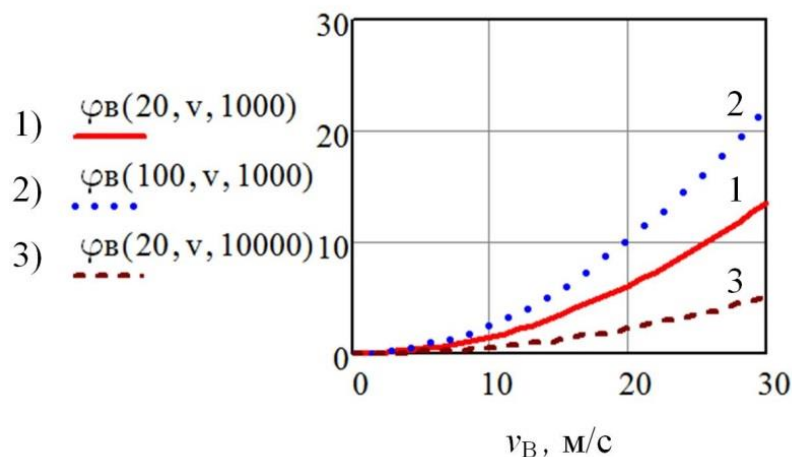


Рисунок 3.17 – Результаты расчета в Mathcad угла $\phi_{\text{в}}$ от давления ветра:

1) $L=20$ м, $m=1000$ кг; 2) $L=190$ м, $m=1000$ кг; 3) $L=20$ м, $m=10000$ кг

В случаях, когда ветровой поток будет выше 5 м/с, для предотвращения раскачивания груза, требующего достижения минимального отклонения угла каната машинист (оператор) крана, имея соответствующую квалификацию (опыт), может предпринять действия по предотвращению запредельного нарастания угла отклонения канатов с грузом. Вместе с тем обладая техническим решением, информирующим о нарастании угла отклонения каната, машинист любого уровня квалификации будет способен предпринять действия, уменьшающие раскачивание груза (например, в соответствии с вышеприведенными расчетами, при силе ветра 5 м/с и углу отклонения каната в интервале $2^\circ - 5^\circ$ уменьшить длину подвеса на 20%).

Правильность выбора сочетания факторов, влияющих на процесс развития угла отклонения грузового каната башенного крана от вертикали, подтверждается анализом исследований в рассматриваемой области науки Abdel-Rahman, E.M [102], Blackburn D [103], Shcherbakov, V [104].

Далее указанные результаты расчетов в Mathcad автор проверит в натурных экспериментах на действующих башенных кранах, а также проведет в рамках разработанного алгоритма мероприятия по предотвращению раскачивания груза.

Выводы по главе 3

1. Теоретически обоснована и определена схема взаимодействия факторов, влияющих на раскачивание груза.

2. На основании численного моделирования по выведенным формулам для расчета углов отклонения грузового каната от вертикали можно сделать вывод, что наибольшие значения углов дают торможение грузовой тележки и ветровое давление. Причем значения таких углов могут двукратно превышать опасные величины.

3. Наибольшие значения величины коэффициента затухания свободных колебаний имеют место при максимальном расстоянии между верхними точками крепления канатов груза крана и минимальном между нижними.

4. Наиболее опасным сочетанием факторов представляется одновременное действие инерционных сил при торможении грузовой тележки в конце стрелы и поворотного механизма стрелы, а также давления ветра со стороны башни крана.

5. Установлено влияние расстояний между верхними и нижними точками крепления канатов груза крана на величину коэффициента затухания свободных колебаний груза. Наибольшие значения величины коэффициента затухания свободных колебаний имеют место при максимальном расстоянии между верхними точками крепления канатов груза крана и минимальном – между нижними.

6. На основе произведенных расчетов сформулированы рекомендации для машинистов (операторов) крана по уменьшению раскачивания груза при повороте стрелы, ветровой нагрузке и торможении грузовой тележки.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОНИТОРИНГА ПОЛОЖЕНИЙ ГРУЗОВЫХ КАНАТОВ И ГРУЗА С РЕГИСТРАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ

4.1. Достоверность алгоритмов регистраторов параметров при раскачивании груза

Для подтверждения теоретических исследований, описанных в главе 3, проведен двухэтапный эксперимент:

1) Эксперимент на специально разработанном стенде – для подтверждения расчётов статистических характеристик оценки адекватности регрессионной модели при отклонении груза с двойной запасовкой каната (описан в разделе 4.2).

2) Натурный эксперимент с использованием разработанного автором прототипа (опытного образца) прибора безопасности на действующих кранах на базе производственной площадки АО «ЛСР.Краны-СЗ» (Санкт-Петербург) (описан в разделе 4.3).

При этом целями натурного эксперимента являлись:

- определение основных характеристик процесса (регистрация) раскачивание груза;
- идентификация параметров разработанной математической модели прибора к реальному объекту;
- определение сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Методика проведения экспериментальных исследований может быть применима ко всем типам грузоподъемным машинам.

Планирование эксперимента на башенных кранах в реальных условиях в настоящей работе проводилось для достижения следующих целей:

- выбора существенных факторов, влияющих на основные параметры процесса раскачивания груза на башенном кране в зоне ограниченной видимости;

- определения значений технологических параметров процесса раскачивания груза при перемещении груза в зоне ограниченной видимости башенного крана (оценки и уточнения констант математических моделей).

В процессе проведения экспериментальных исследований применялись методы как пассивного, так и активного экспериментов. Во время пассивного эксперимента информация об исследуемом объекте накапливалась путем записи данных на опытный образец (прототип) прибора безопасности, когда объект функционирует в рабочем режиме. Активный эксперимент проводился с использованием реальных воздействий на объект согласно специально разработанной программе действий.

В работе при натурных экспериментальных исследованиях на башенном кране в основном использовался пассивный метод эксперимента. А активный метод использовался в той части, насколько это позволяла необходимость соблюдения техники безопасности. При этом опытный образец (прототип) прибора безопасности использовался одновременно и в качестве регистратора экспериментальных данных.

При планировании эксперимента на башенном кране учитывалась совокупность существенных факторов: длина подвеса, длина цепных строп, скорость ветра, габаритные характеристики груза.

Эксперимент проведен на башенных кранах с зарегистрированными действующими приборами безопасности.

Подтверждение адекватности математической модели, проводилось на основе сопоставления полученных данных эксперимента и при математическом моделировании следующих параметров: колебаний при движении грузовой тележки: отклонение груза при вращении башни крана; отклонение груза при торможении грузовой тележки на стреле крана; отклонение груза от ветровой нагрузки, а также было осуществлено определение влияния расстояния между канатами подвески груза на процесс затухания колебаний груза.

Относительные погрешности параметров во всех девяти опытах не превышали: по времени колебаний – 5 %, логарифмическому декременту колебаний 15 %, по коэффициенту затухания 15 %. То есть, математическое моделирование с достаточной степенью адекватности описывает реальную физическую систему на действующих башенных кранах.

Для подтверждения достоверности проведённого эксперимента автором было принято решение совместить показания, считанные с действующего и зарегистрированного прибора безопасности ОНК-160Б (Версия РП 6.15 №6090035) и обработанные программой ООО НПП «ЭГО» «Анализ регистратора параметров ОНК-160». Считка показаний была произведена аттестованным специалистом для подтверждения таких характеристик как: время и дата проведения; вес груза; высота подъёма, скорость ветра и т.п.

Считка с прибора безопасности ОНК-М-29 башенный кран КБ 674 №760 представлена в приложении 1, так как программа «Ридер» ООО Яуза-10 не предоставляет полных данных, как с ОНК-160Б, а только информацию о вылете весе груза.

Натурный эксперимент проводился в 6 этапов (по 3 этапа на каждый из двух башенных кранов) с 26.08.2022 по 30.08.2022:

- 26.08.2022 – установлены два прототипа на КБ 503 № 553 и КБ 674 А № 760. Работа на складской площадке с 9:00 до 15:40.

- 29.08.2022 – установлены два прототипа на КБ 503 № 553 и КБ 674 А № 760. Работа на складской площадке с 9:30 до 14:30.

- 30.08.2022 – установлены два прототипа на КБ 503 № 553 и КБ 674 А № 760. Работа на складской площадке с 9:30 до 14:30.

За время эксперимента машинисты менялись для объективности получаемых данных, чтоб исключить влияние уровня опыта и навыка управления конкретным типом крана. Итого было задействовано 4 машиниста разного уровня квалификации.

Поскольку информация, полученная во время эксперимента с опытного образца (прототипа) прибора безопасности, представляет собой значительный по

объему массив данных, автором решено отметить для большей наглядности наиболее значимые результаты, такие как средние, минимальные и предельные значения по дням проведения эксперимента. В таблице 4.1 представлены данные результата записи параметров по отклонению груза, предельные значения во время проведения эксперимента, записанные карту памяти SD с прототипа прибора безопасности.

Таблица 4.1 – Предельные значения эксперимента снятые с приборов безопасности

п/п	Дата	№ крана	Длина подвеса max (м)	Вес груза max (кг)	gyroX max	gyroY max	gyroZ max	accX max	accY max	accZ max	Ветровая нагрузка max (М/с)
1	26.08.2022	КБ 503 № 553	25	2100	0,44	-0,84	-0,46	3,62	-2,06	-0,12	3
2	29.08.2022	КБ 503 № 553	30	1500	-0,15	0,19	-0,49	4,20	-2,18	-0,09	1
3	30.08.2022	КБ 503 № 553	30	1500	-1,50	-0,88	0,15	3,36	-2,41	-0,16	8
4	26.08.2022	КБ 674 А № 760	19	2500	0,45	0,46	-0,39	2,72	-0,92	-0,07	3
5	29.08.2022	КБ 674 А № 760	20	1500	-0,10	0,19	-0,49	-3,80	-1,32	-0,15	1
6	30.08.2022	КБ 674 А № 760	25	1500	1,01	-0,85	-0,52	3,20	-2,21	-0,13	8

Однако для наибольшей эффективности в обработке данных с прототипа прибора безопасности в эксперименте будут учитываться показания с акселерометра X-и Y, а показания гироскопа по осям X-, Y и Z не будут браться в расчёт, так как акселерометр ось Z – это ускорение вверх (подъем крюковой подвески), а гироскоп оси X, Y и Z – это показания кручения объекта по этим осям. Для эксперимента данные показания не столь значимы, а для прибора безопасности на башенном кране крайне важны, как регистрация, так и мониторинг.

Автор дополнительно отмечает, что эксперимент проводился в реальных производственных условиях, на строительной площадке. При проведении натурного эксперимента на производстве недопустимы критические и аварийные ситуации с грузом на башенном кране, в соответствии с требованиями техники безопасности при производстве работ на предприятии.

Данные, приведенные в таблице 4.1 демонстрируют, что показания гироскопа незначительные, и определяются в пределах погрешности прибора.

4.2. Экспериментальное исследование процесса колебания груза при торможении грузовой тележки на стреле крана и двойной запасовке каната

Задача эксперимента – установить значения коэффициента затухания колебаний, используемые в разработанных теоретических моделях в 3 главе (раздел 3.5)

Экспериментальные исследования проводились на специально разработанном стенде (рисунок 4.1) который конструктивно состоящий из:

- 1) Балки неподвижная закреплённая жёстко с двух сторон
- 2) Прикреплённых к балке двух нитей троса металлического, диаметром 0,5мм
- 3) Располагающейся нижней части конструкции траверсы, с прикреплёнными нитями троса с креплениями для груза..

Схема экспериментального стенда приведена на рисунке 4.1: груз G подвешивался в точке O к траверсе на двух гибких нитях длиной L . Изменяемые в эксперименте расстояния между верхними и нижними точками крепления нитей обозначены буквами a и b .

Перед началом эксперимента точка O подвески груза помещалась в положение O_1 , соответствующее начальной амплитуде колебаний A_n , потом груз отпускался и совершал колебательные движения в количестве n , и его амплитуда принимала конечное значение A_k в точке O_2 . Определенное количество колебательных движений $n = 20$ было выбрано для повышения точности выполнения замеров. Параметры и результаты экспериментов показаны в таблице 4.2.

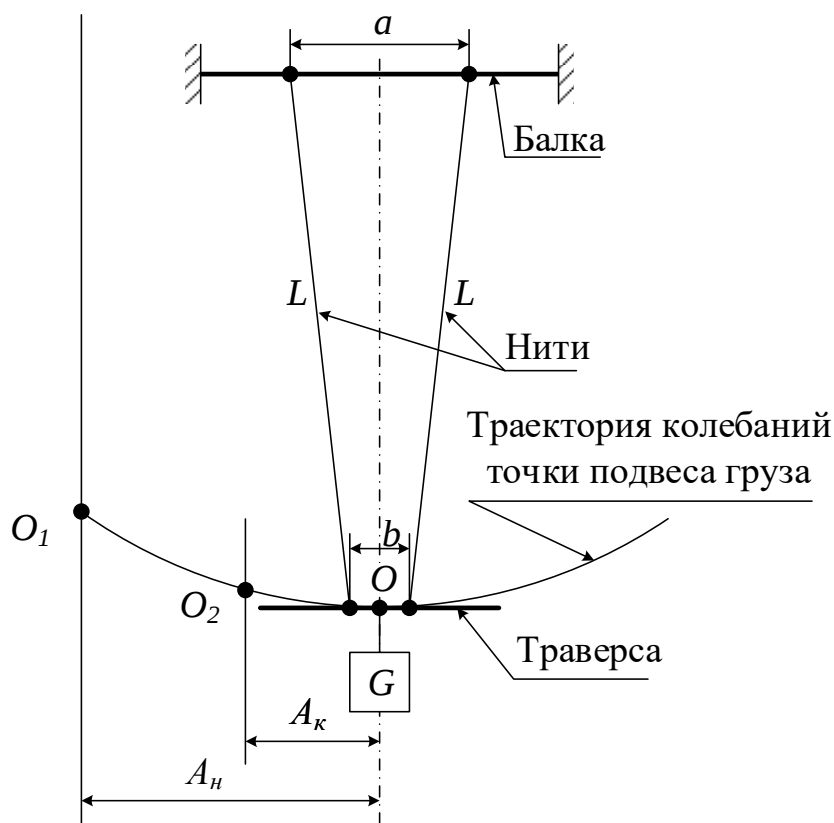


Рисунок 4.1 – Схема экспериментального стенда

Таблица 4.2 – Параметры и результаты эксперимента

№ опыта	a , мм	b , мм	L , мм	A_n , мм	A_k при $n=20$, мм				Средняя величина уменьшения амплитуды за 1 цикл, мм
					1	2	3	среднее	
1	5	5	1000	320	250	255	250	252	3
2	5	50	1000	320	235	240	240	238	4
3	5	100	1000	320	230	235	230	232	4
4	50	5	1000	320	145	140	145	143	9
5	50	50	1000	320	155	150	155	153	8
6	50	100	1000	320	245	240	245	243	4
7	100	5	1000	320	65	70	60	65	13
8	100	50	1000	320	150	155	150	152	8
9	100	100	1000	320	180	175	180	178	7
10	100	20	1000	320	105	105	100	103	11

Даже до обработки результатов эксперимента можно сделать вывод, что наилучшие результаты достигаются при сочетании максимальных значений a и минимальных значений b . Данный факт подтверждает предположение, что уменьшение отклонения каната связано с расходом энергии на перераспределение нагрузки между канатами и на их растяжение, которые будут идти наиболее интенсивно при указанных значениях a и b . При проведении экспериментов было замечено, что перераспределение нагрузки

между канатами вызывает колебания груза, на что тоже расходуется энергия, и что также способствует уменьшению отклонения груза.

В таблице 4.3 представлены результаты обработки экспериментальных данных. Чтобы сделать такие данные применимыми для различных длин канатов, рассматривались отношения величин a и b к длине канатов L . Рассмотренный в эксперименте диапазон отношений a/L и b/L соответствует практически используемому диапазону этих отношений.

Таблица 4.3 – Результаты обработки экспериментальных данных

	О	Р	С	Т	U	V	W	X
3	№ опыта	a/L	b/L	$(a/L)^2$	$(b/L)^2$	$a/L \cdot b/L$	β	$\beta_{\text{расч}}$
4	1	0,005	0,005	0,000025	0,000025	0,000025	0,006	0,008
5	2	0,005	0,05	0,000025	0,0025	0,00025	0,007	0,006
6	3	0,005	0,1	0,000025	0,01	0,0005	0,008	0,008
7	4	0,05	0,005	0,0025	0,000025	0,00025	0,020	0,021
8	5	0,05	0,05	0,0025	0,0025	0,0025	0,018	0,014
9	6	0,05	0,1	0,0025	0,01	0,005	0,007	0,010
10	7	0,1	0,005	0,01	0,000025	0,0005	0,040	0,036
11	8	0,1	0,05	0,01	0,0025	0,005	0,019	0,022
12	9	0,1	0,1	0,01	0,01	0,01	0,015	0,012
13	10	0,1	0,02	0,01	0,0004	0,002	0,028	0,031

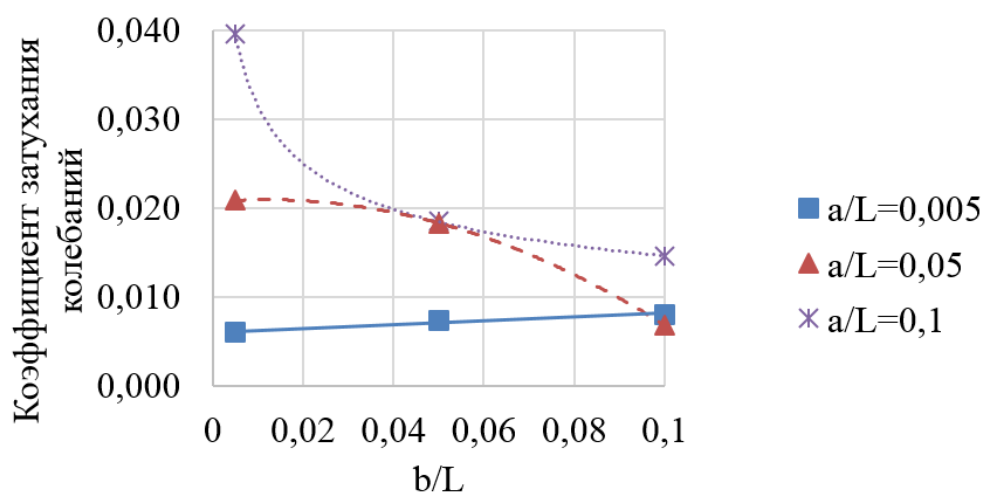


Рисунок 4.2 – Результаты обработки экспериментальных данных по расчету коэффициента затухания колебаний (данные столбца W таблицы 4.3)

На рисунке 4.2 приведены результаты расчета коэффициента затухания колебаний β по данным экспериментов. Наибольшие значения β имеют место для максимальных a и минимальных b .

Математическая среда Excel обладает встроенной функцией «Регрессия», позволяющей строить полиномиальные модели по опытным данным с отображением статистических характеристик модели [7]. Попытка построить линейную регрессионную модель с параметрами a/L и b/L (столбцы R и S в таблице 4.3) показала низкую адекватность экспериментальным данным, поэтому модель была дополнена параметрами для построения полинома второй степени (столбцы T, U, V):

$$\beta_{расч} = 0,006 + 0,337a/L - 0,067b/L - 0,245(a/L)^2 + 0,819(b/L)^2 - 2,74(a/L)(b/L), \quad (4.1)$$

Полученная регрессионная модель (4.1) показала высокую степень сходимости с экспериментальными данными, представленными на рисунке 4.3 и рисунке 4.4. Так, критерий R-квадрат (ячейка B5), отображающий степень сходимости расчетных и опытных данных, равен 0,924. Приемлемым считается результат более 0,83. Дополняет положительную оценку модели критерий Фишера (ячейка F13), равный 0,022, при допустимом значении менее 0,05 для оценки высокой адекватности модели [7].

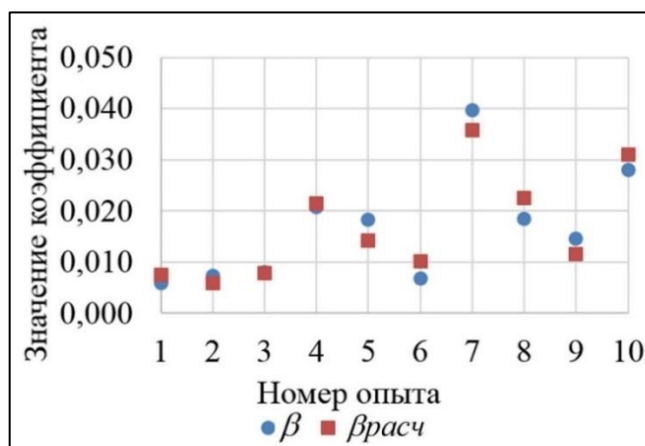


Рисунок 4.3 – Сравнение значений по данным эксперимента (β) и расчетных по регрессионной модели ($\beta_{расч}$)

	A	B	C	D	E	F
1	ВЫВОД ИТОГОВ					
2						
3	<i>Регрессионная статистика</i>					
4	Множественный R	0,961710792				
5	R-квадрат	0,924887648				
6	Нормированный R-квадрат	0,830997208				
7	Стандартная ошибка	0,004461693				
8	Наблюдения	10				
9						
10	<i>Дисперсионный анализ</i>					
11		<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
12	Регрессия	5	0,000980476	0,000196095	9,850711641	0,02285553
13	Остаток	4	7,96268E-05	1,99067E-05		
14	Итого	9	0,001060103			

Рисунок 4.4 – Статистические характеристики оценки адекватности регрессионной модели, рассчитанные в Excel

Таким образом, экспериментальные исследования и анализ данных полученных на специально разработанном стенде показали сходимость с математическим моделированием Mathcad (глава 3, рисунок 3.11 и рисунок 3.12), затухающих колебаний при разных расстояниях между канатами, что предстоит подтвердить в натурных экспериментах на действующих башенных кранах.

4.3. Адаптация существующих алгоритмов регистраторов параметров

1) Цели адаптации существующих алгоритмов регистраторов параметров – подтвердить сходимость результатов в пределах погрешностей из расчётов Mathcad (используя записанные данные с прототипа прибора безопасности при натурном эксперименте) для процессов колебания груза при:

- торможении грузовой тележки на стреле крана при двойной заправке каната и затухания колебаний, описанной в 3 главе (раздел 3.6) а также проведённых экспериментов на лабораторном стенде в 4 главе (раздел 4.2.1),

- вращении башни крана, 3 глава (раздел 3.4)

- торможении грузовой тележки при разных величинах ускорений и полупериодов и при разных длинах каната, 3 глава (раздел 3.5)

– ветровой нагрузке, 3 глава (раздел 3.5)

2) Подтвердить вычисленный момент для принятия мер со стороны машиниста или внедрения в систему управления технического решения по гашению колебаний груза (раскачивания) по определённым параметрам угла отклонения груза и временного промежутка при:

- торможении грузовой тележки при разных величинах ускорений и полупериодов и при разных длинах каната;

- вращении башни крана;

- влиянии ветровой нагрузки при разном весе груза.

4.3.1. Экспериментальное исследование торможения грузовой тележки на стреле крана при двойной запасовке каната и затухания колебаний

Полученные при проведении натурного эксперимента с использованием прототипа прибора безопасности на действующих кранах: КБ 503 № 553 и КБ 674 А № 760 на базе производственной площадки АО «ЛСР.Краны-СЗ» (Санкт-Петербург) были получены в условиях:

- торможения грузовой тележки на стреле крана с существующей двойной запасовкой каната при разном расстоянии между канатами;

- отклонения груза без вмешательства в процесс машиниста башенного крана.

В рамках натурного эксперимента произведена запись и регистрация параметров затухающих колебаний.

Также были смоделированы результаты по контролируемому гашению колебаний из расчётов в главе 3.

Ниже приведены графики полученных результатов и данные сравнительного анализа экспериментальных и смоделированных процессов в Mathcad, в результате исследований получены процессы раскачивания груза при взаимодействии указанные выше факторов, а также сравнение зарегистрированных показаний, считанных с опытного образца (в части датчика

акселерометра) с теоретической, расчетной частью исследования. Результаты представлены на рисунках 4.5 – 4.20.

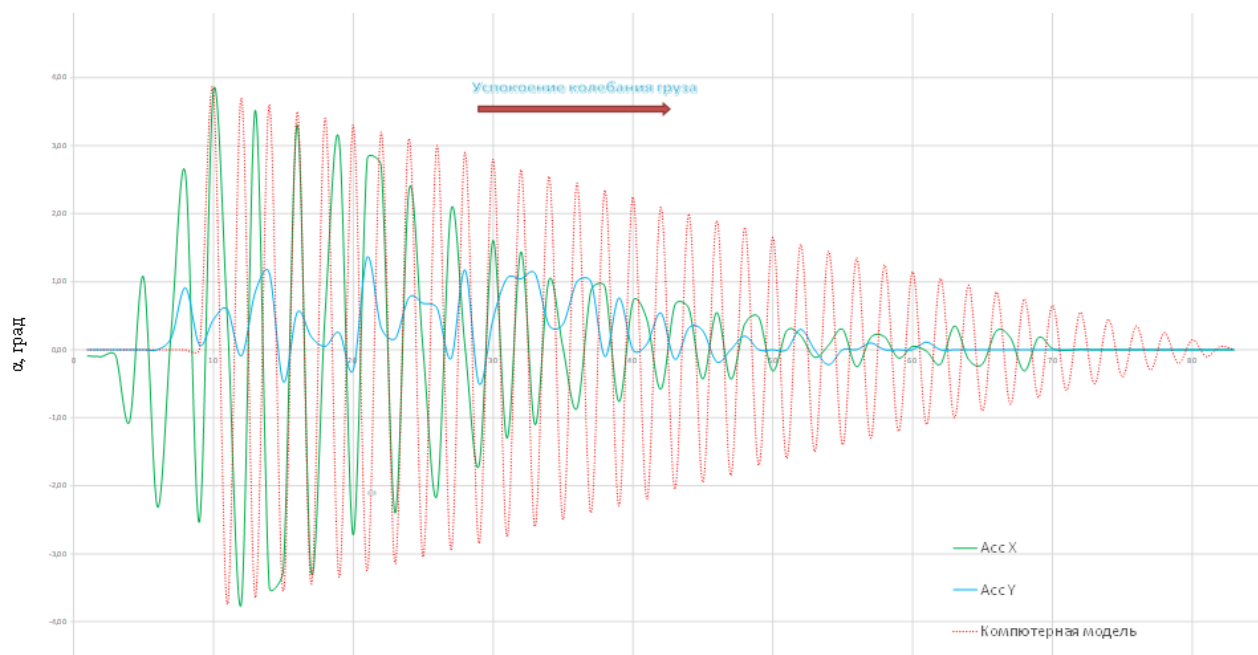


Рисунок 4.5 – Затухающие колебания при торможении грузовой тележки с двойной запасовкой на башенном кране КБ 674 №760 и расчётов в Mathcad

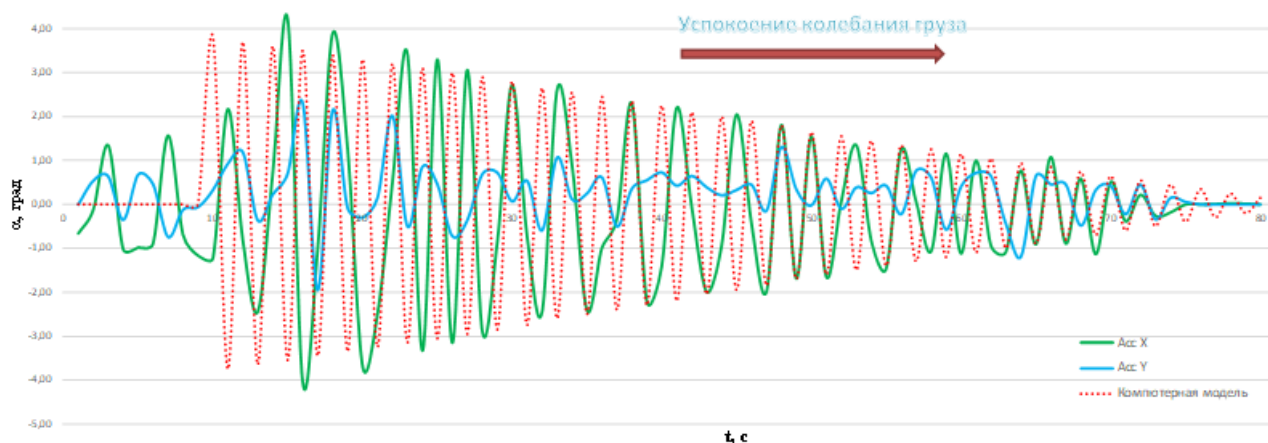


Рисунок 4.6 – Затухающие колебания при торможении грузовой тележки с двойной запасовкой и расчётов в Mathcad, КБ 503Б № 553

Таким образом, сравнивая два типа башенных кранов КБ 674 №760 и КБ 503Б №553, участвующих в эксперименте по отклонению груза при торможении грузовой тележки на стреле крана, при двойной запасовке

каната, но при разных расстояниях между канатами (КБ 674 №760 – 2290 мм; КБ 503Б №553 – 1320 мм), допускается существенность влияния расстояния между канатами на амплитуду раскачивания груза.

Для анализа возьмем результаты показаний с опытного образца при равной ветровой нагрузке 1 м/с, одинаковом направлении ветра, однотипным грузом, и одинаковым весом в 1,5 т (данные с прибора безопасности ОНК-160Б Версия РП 6.15 № 6090035).

При сопоставлении с моделированными процессами, показанными на рисунках 4.5 и 4.6, согласно данным, полученным с опытного образца, кривая изменения угла отклонения груза по оси Асс Х имеет чёткую ярко выраженную гармоничную затухающую составляющую с небольшими погрешностями (так как запись на карту памяти осуществляется с периодичностью в 1 с).

Небольшое несовпадение экспериментальной оси Асс Х обусловлено указанными выше факторами, которые не учитывались в компьютерной модели.

Выполним анализ достоверности компьютерной модели на участке переходных процессов во время отклонения груза при торможении грузовой тележки на стреле крана при двойной запасовки каната, но при разных расстояниях между канатами.

С этой целью выделены два графика (рисунок 4.5 и рисунок 4.6) за промежуток времени в 70 секунд, где происходит разгон и торможение грузовой тележки с учётом гашения колебаний. Из графика видно, что затухание колебаний груза наиболее быстро произошло на КБ 674 №760 – в течение 50 с, на КБ 503Б №553 – в течение 65 сек.

Приведенные результаты подтверждают данные компьютерного моделирования, в котором на процесс затухания колебаний влияет расстояние между канатами, которое составило разницу в 43%. Общая картина (с учётом погрешностей измерений) механических воздействий на объект исследования подтверждает адекватность результатов совпадения компьютерной модели с экспериментальными данными.

4.3.2. Экспериментальное исследование отклонения груза при вращении башни крана

Ниже приведены графики полученных результатов и данные сравнительного анализа экспериментальных и смоделированных процессов в Mathcad, по отклонению груза при вращении башни, а также меры по предотвращению раскачивания.

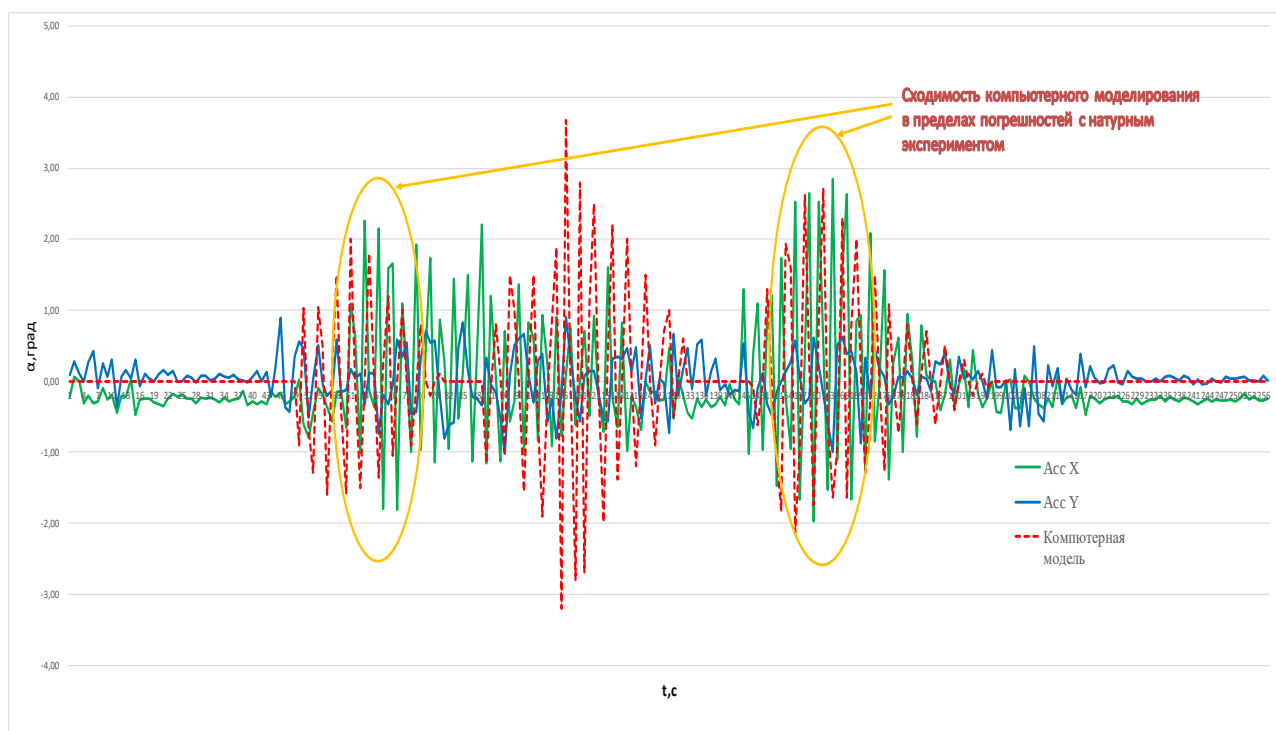


Рисунок 4.7 – Сравнение результатов отклонение груза при вращении башни крана на башенном кране КБ 674 №760 и расчётов в Mathcad

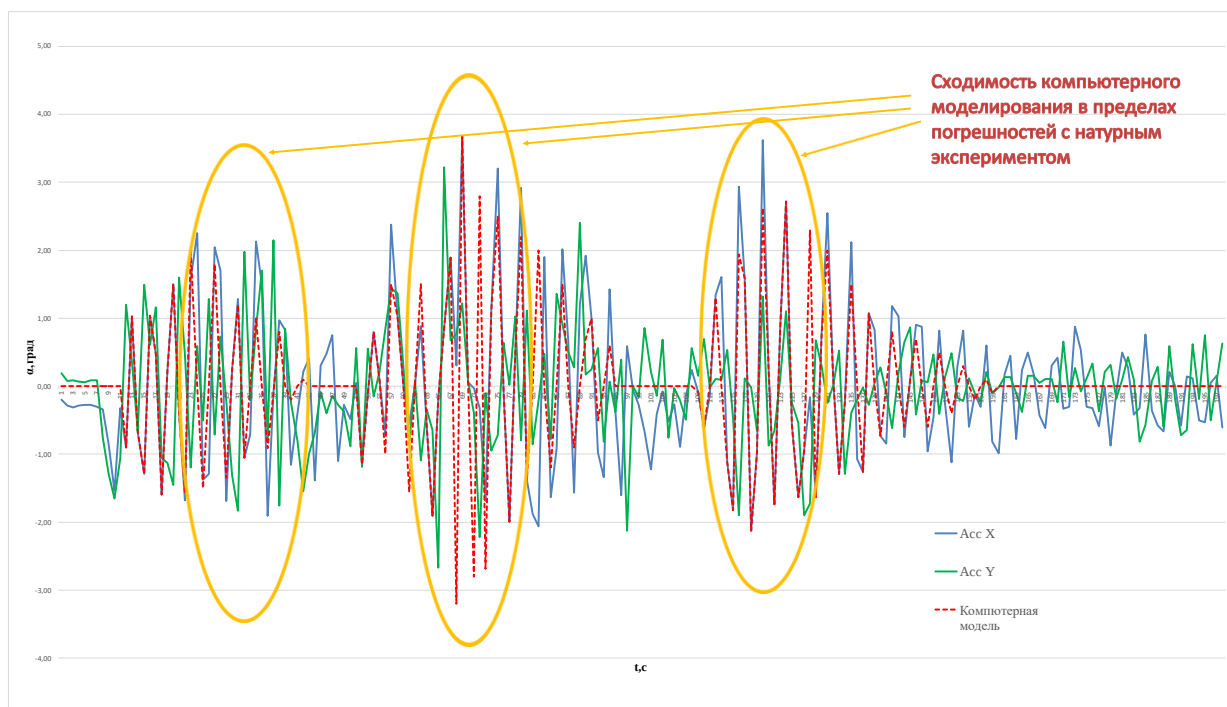


Рисунок 4.8 – Сравнение результатов отклонения груза при вращении башни крана на башенном кране КБ 503Б №553 и расчётов в Mathcad

Таким образом, при анализе результатов показаний с прототипа прибора безопасности, снятых с двух разных типов башенных кранов, выявлено затухание колебаний при одинаковой ветровой нагрузке, равной 2 м/с и одинаковом направлении ветра, а также направлении поворота стрелы с однотипным грузом и одинаковым весом в 1,5 тонны (данные с прибора безопасности ОНК-160Б, версия РП 6.15 №6090035).

Сравнивая смоделированные процессы, показанные на рисунке 4.7 и рисунке 4.8, можно прийти к выводу, что кривая изменения угла отклонения груза по оси Асс X не только имеет некоторый уровень шума (погрешность измерения прибора и времени записи в 1с на карту памяти), но также имеет ярко выраженную симметричную затухающую составляющую, которая в свою очередь имеет очевидное и непосредственное влияние кривой оси Асс Y.

Небольшое несовпадение Оси АссX экспериментальной и смоделированной кривой в рабочем процессе башенного крана обусловлено множеством свойств металлоконструкций, а также технических составляющих

узлов и механизмов башенного крана (работа блоков грузовой тележки и крюковой подвески, свойства каната, зазоры шестеренок узлов, участвующих в данном процессе, гибкость цепных строп и др.), которые не учитывались в компьютерной модели.

В рассматриваемой ситуации наиболее правильным будет выполнить анализ достоверности компьютерной модели на участке переходных процессов во время вращательного движения стрелы, с ускорением до угла поворота (угол разгона), а далее траектории движения груза и инерции.

С этой целью выделены три участка кривых показанных на рисунке 4.7, за промежуток времени в 200 секунд, где происходит поворот разгона и торможения с учётом гашения колебаний. На кривой изменения угла отклонения груза наибольший зафиксированный угол составил 3.68° – на башенном кране КБ 503Б №553, и 2.72° на башенном кране КБ 674 №760 соответственно. Приведённые данные свидетельствуют, что при одинаковых условиях, раскачивание груза при повороте стрелы башенного крана и соответственно, отклонение груза, больше у башенного крана КБ 503Б №553.

Изложенные выше данные, с учетом существующих погрешностей измерения и механических воздействий на объект исследования, подтверждают адекватность результатов совпадения компьютерной модели с экспериментальными данными.



Рисунок 4.9 – Результаты принятия мер по гашению колебаний груза при вращении башни крана на башенном кране КБ 503 Б № 553



Рисунок 4.10 – Результаты принятия мер по гашению колебаний груза при вращении башни крана на башенном кране КБ 674 № 760

На рисунке 4.9 и рисунке 4.10 показаны результаты принятия мер по гашению колебаний груза при вращении башни крана на башенных кранах: КБ 503Б №553 и КБ 674 №760. Полученные данные наглядно показывают, что при повышении угла отклонения с 2° до 3° по показаниям на приборе безопасности (сигнализирующем предельный угол отклонения груза) машинист должен предпринимать действия по замедлению поворота без резкого торможения, предпринять противофазу поворота, после чего происходит резкое затухание колебаний груза, что и получилось добиться в натурном эксперименте.

4.3.3. Экспериментальное исследование отклонения груза от действия ветра

Ниже приведены графики полученных результатов и данные сравнительного анализа экспериментальных и смоделированных процессов в Mathcad, в результате исследований получены процессы раскачивания груза при взаимодействии действия на груз, а также результаты принятия мер по гашению колебаний груза при ветровой нагрузке на кранах: КБ 503 № 553 и КБ 674 А № 760.

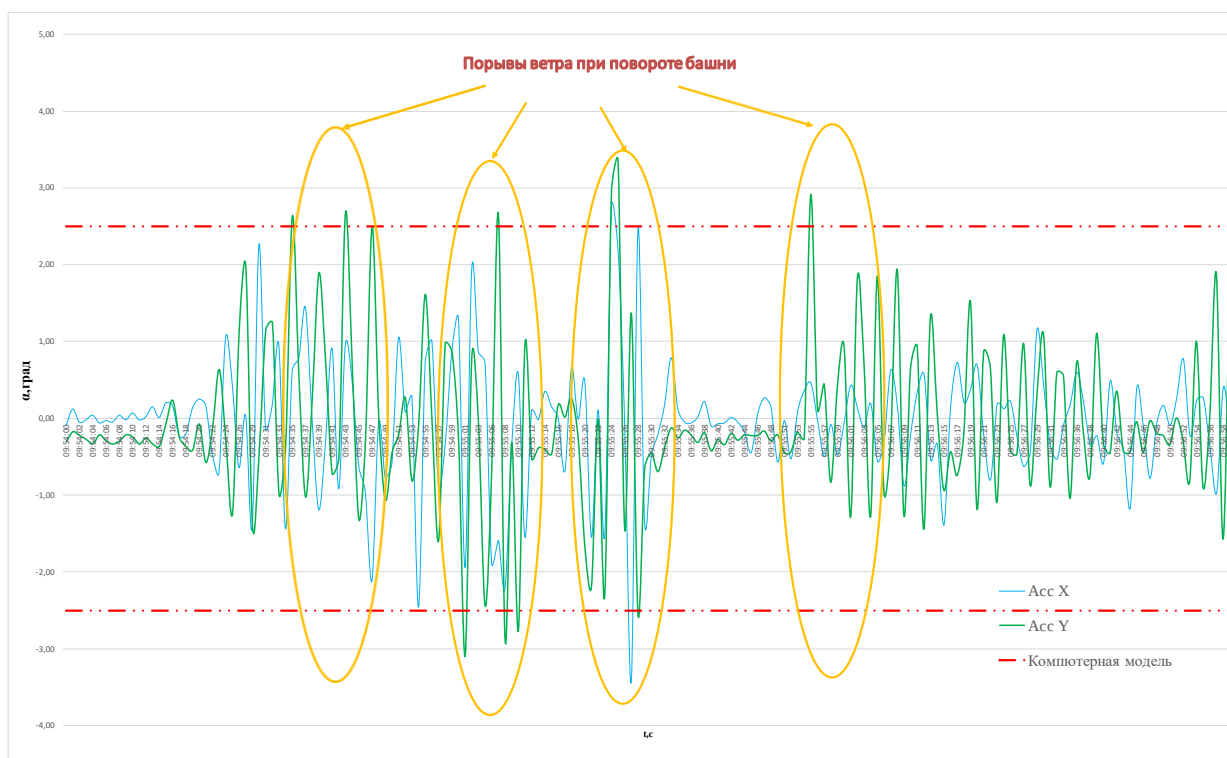


Рисунок 4.11 – Отклонение груза 1000 кг при давлении ветра 8 м/с, и процесс затухания колебаний груза по ветру и против ветра на башенном кране КБ 503Б №553 и расчётов в Mathcad

Анализ ветровой нагрузки в ходе эксперимента производился на башенном кране КБ 503Б №553, так как на нём имеется прибор безопасности ОНК-160 с регистрацией данного параметра. Для объективного исследования и сравнения был выбран период проведения эксперимента с самым высоким показателем по скорости ветра 8м/с. Вес груза составил 1000 кг, длина подвеса с учётом цепных строп составила 20м. При этом работы с грузом не производились (груз принудительно не двигался), только был подвешен.

Сравним полученные экспериментальные данные с моделированными процессами, представленных на рисунке 4.11. Кривая изменения угла отклонения груза по оси AccX и AccY имеет некоторый уровень шума, проявляемый резкими всплесками и затуханиями (погрешность измерения прибора и времени записи в одну секунду на карту памяти). При порывах ветра на графике прослеживается четкая закономерность изменения угла отклонения груза по осям AccX и AccY,

после этого происходит кратковременное затухание колебаний, а потом возобновление этого процесса, с определённой цикличностью, при этом без превышения средних значений в 3° (с учётом погрешностей измерения) как по оси АссХ, так и по оси АссУ.

Таким образом, анализ результатов приведенных экспериментальных данных подтверждает адекватность результатов совпадения компьютерной модели с экспериментальными данными.

Выводы по главе 4.

1. Экспериментальные исследования, проведенные на эксплуатируемых башенных кранах, подтверждают адекватность разработанной компьютерной модели, а также влияния основных факторов на раскачивание (колебания) груза, и возможность уменьшения угла отклонения груза при определённых действиях машиниста крана с помощью соответствующего инженерного решения.

2. Практическое использование описанной методики расчета углов отклонения грузового каната от вертикали может повысить безопасность эксплуатации башенных кранов. Установлено влияние расстояний между верхними и нижними точками крепления канатов груза крана на величину коэффициента затухания свободных колебаний груза, описываемое регрессионным уравнением (4.1).

3. Полученные в ходе натурного эксперимента данные при работе с грузом выявили следующие зависимости. Отклонение каната с грузом происходит в результате вращения башни крана и зависит, в частности, от скорости и от интенсивности торможения. Кроме того, затухающие колебания при торможении грузовой тележки с двойной запасовкой, при разных расстояниях между канатами имеют влияние на амплитуду раскачивания груза на башенном кране. Интенсивность и направление ветра по отношению к направлению движения груза может как усиливать, так и ослаблять раскачивание груза.

4. Полученные достоверные экспериментальные исходные данные показали, что значения относительных максимальных погрешностей не превышают 8...10%, что является допустимым.

5. Апробировано инженерное решение (опытный образец (прототип) прибора безопасности), основными компонентами которого являются датчики угла и ускорения с микроконтроллером, передатчик, записывающее устройство на карту памяти и элемент питания, отличающееся тем, что указанные компоненты, находятся в защищённом корпусе, закреплённом на крюковой

подвеске, и представляют собой прибор, способный передавать сигнал со встроенного приемопередатчика по стандарту Wi-Fi 802.11b/g/n, который, в свою очередь, позволяет подключаться устройствам напрямую к нему. Данное устройство можно подключить к персональному компьютеру, посредством которого осуществлять настройку такого устройства (обнуления датчиков гироскопа и акселерометра) для точного позиционирования на объекте, а также для визуального восприятия машинистом (оператором) башенного крана положения груза, а так же телеметрии по отклонению груза в пространстве. Данные функции позволяют контролировать перемещения груза при влиянии основных факторов на раскачивание груза в ситуациях, когда машинист (оператор) крана не может убедиться визуально о нахождении груза по траектории перемещения или опускания, или в нештатных ситуациях даёт возможность предпринять действия определенного характера для предупреждения неблагоприятных последствий.

ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМЫХ РЕШЕНИЙ

5.1. Экономическое обоснование эффективности применения технического решения при перемещении груза на примере башенного крана КБ503

В управлении башенным краном человеческий фактор (профессионализм машиниста) играет ведущую роль. При наличии оперативных данных о степени раскачивания груза опытный машинист (оператор) способен предпринять соответствующие действия по ограничению такого раскачивания.

При внедрении технического решения, передающего машинисту в режиме реального времени информацию о положении груза (что особенно актуально при значительной длине подвеса либо в условиях ограниченной видимости, либо риске нештатной ситуации по иным причинам), машинист, вне зависимости от уровня квалификации, имеет возможность немедленно среагировать и осуществить корректировку положения груза.

Таким образом, контролируя углы отклонения груза и прогнозируя безопасные траектории приближения к цели можно управлять точкой подвеса груза, что позволит сократить время рабочего цикла и повысить производительность башенного крана, не учитывая в расчёт человеческий фактор. При уменьшении колебаний увеличивается долговечность и надёжность различных узлов башенного крана.

При внедрении технического решения на основе прототипа прибора безопасности, описанного во второй главе, указанный технический результат достигается за счет оснащения конструкции крюковой подвески башенного крана устройством мониторинга положений канатов и груза грузоподъёмного крана.

Для оценки эффективности внедрения устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъёмного крана необходимо определить производительность башенного крана [105,106,107].

Описанный в настоящей работе натурный эксперимент проводился на двух типах башенных кранов российского производства: КБ 503 и КБ 674 А, отличающихся среди отечественных башенных кранов массовостью их использования. Таким образом, соответствующие экономические расчеты в настоящей главе будут осуществлены на примере одного из указанных башенных кранов.

Использованные для расчета показатели соответствуют техническим характеристикам рассматриваемого башенного крана:

- высота подъема/опускания 30м;
- скорость подъема минимальная 30 м/мин;
- скорость передвижения тележки 25 м/мин;
- скорость передвижения 19 м/мин;
- скорость поворота 0,64 об/мин;

Годовая производительность башенного крана может быть определена по формуле [101]:

$$П_{Г} = П_{С} \cdot t_{\phi} \quad (5.1)$$

где $П_{Г}$ – годовая производительность крана;

$П_{С}$ – суточная производительность крана, т/сут;

t_{ϕ} – годовая фактическая загрузка башенного крана, сут.

Суточная производительность башенного крана определяется как произведение среднесуточной массы груза $Q_{ср}$, перемещаемого башенным краном, на количество циклов за сутки $n_{ц}$

$$П_{С} = Q_{ср} \cdot n_{ц}, \quad (5.2)$$

где количество циклов в сутки определяется по формуле [5.1]:

$$n_{ц} = \frac{60}{T_{ц}} \cdot a \cdot K_{С} \cdot K_{П} \cdot K_{Р} \cdot K_{К.ПР} \quad (5.2)$$

где $T_{ц}$ – продолжительность рабочего цикла крана, с; a – количество рабочих часов в смену, ч; $K_{С}$ – коэффициент неравномерности использования крана по времени в течении смены, $K_{С} = 0,5...0,8$; $K_{П}$ – коэффициент простоев

по организационным причинам, $K_{\Pi} = 0,9$; K_P – коэффициент ремонта, $K_P = 0,95$; $K_{K.ПР}$ – коэффициент технологических простоев, $K_{K.ПР} = 0,9$.

Для определения часовой (пиковой производительности) можно принять $K_C K_{\Pi} K_P K_{K.ПР} = 0,85 \dots 0,9$.

Продолжительность рабочего цикла крана включает в себя время, затрачиваемое на строповку и расстроповку груза, подъем и опускание, перемещение груза с учетом совмещения движений, а также на успокоение груза.

$$T_{ц} = 2 \cdot k_{с\kappa} \cdot \left(\frac{h_{\Pi} + h_O}{V_{\Pi O}} \right) + k_{CO} \left(\frac{S_T}{V_T} + \frac{S_M}{V_M} + \frac{S_O}{V_O} \right) + t_P \quad (5.3)$$

где h_{Π} , h_O – высота подъема и опускания груза соответственно, (м); $V_{\Pi O}$ – скорость подъема/опускания груза (м/м), V_T – скорость перемещения тележки (м/мин), V_M – скорость перемещения башенного крана соответственно (м/мин), V_O – скорость поворота (об/мин); S_T – путь перемещения тележки (м), S_M – путь перемещения башенного крана (м); S_O – путь перемещение стрелы по кругу (м); t_P – время, затрачиваемое на ручные операции, с 1,35 и 1,2 – k_{CO} и $k_{с\kappa}$ коэффициент, учитывающий совмещение операций перемещения тележки и башенного крана, и коэффициент, учитывающий снижение скорости при подъеме и опускании груза.

В качестве примера рассчитаем производительность для башенного крана грузоподъемностью 3т. При этом остальные параметры принимают следующие значения:

$t_{CM} = 8$ ч; $Q_{CP} = 3$ т; $h_{\Pi} = h_O = 30$ м; $V_{\Pi O} = 30$ м/мин.; $V_T = 25$ м/мин.; $V_M = 19$ м/мин.; $k_{CO} = 1,35$; $k_{с\kappa} = 1,2$; $S_T = 35$ м; $S_M = 10$ м; $S_O = 220$ м; $V_O = 140$ м/мин.

$$T_{ц} = 2 \cdot 1,2 \cdot \left(\frac{30 + 30}{30} \right) + 1,35 \left(\frac{10}{25} + \frac{35}{19} + \frac{220}{140} \right) + 1 = 11 \text{ мин.}$$

Тогда число циклов:

$$n_{\text{ц}} = \frac{60}{11} \cdot 8 \cdot 0,85 = 37$$

Суточная производительность башенного крана:

$$П_{\text{с1}} = 3 \cdot 37 = 111 \text{ т/сут.}$$

$$П_{\text{г1}} = 111 \cdot 247 = 27\,417 \text{ т/год}$$

После внедрения устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана, предполагается, что полное время рабочего цикла сократится на 15%, за счет сокращения времени, затрачиваемого на процесс перемещения груза и отвлечения машиниста на гашения колебаний груза при плохой видимости [108,109,110].

$$T_{\text{ц}} = 9,35 \text{ мин.}$$

$$n_{\text{ц2}} = \frac{60}{9,35} \cdot 8 \cdot 0,85 = 43,63$$

Суточная производительность после внедрения устройства:

$$П_{\text{с2}} = 3 \cdot 43,63 = 130 \text{ т/сут.}$$

Среднегодовая производительность после внедрения устройства:

$$П_{\text{г2}} = 130 \cdot 247 = 32\,110 \text{ т/год}$$

Для оценки экономического эффекта от внедрения новой технической составляющей воспользуемся формулой (5.4)

$$\mathcal{E} = \frac{П_{\text{г2}}}{П_{\text{г1}}} \cdot C_{\text{г1}} - C_{\text{г2}} \quad (5.4)$$

где $C_{\text{г1}}, C_{\text{г2}}$ – годовые издержки потребителя при использовании башенного крана КБ 503 и после внедрения устройства соответственно;
 $П_{\text{г1}}, П_{\text{г2}}$ – среднегодовая производительность башенного крана КБ 503 и после внедрения устройства, т/год

$$C_{\Gamma} =, C_A + C_P + C_B + C_3 + C_Э + C_{CM} + C_{HP} \quad (5.5)$$

где C_A – амортизационные отчисления на полное восстановление техники;

C_P – затраты на выполнение текущих, внеплановых ремонтных работ и техобслуживания;

C_B – затраты на замену быстроизнашивающихся частей;

C_3 – затраты на оплату труда рабочих, управляющих техникой, $C_3 = 840000$;

$C_Э$ – затраты на электроэнергию;

C_{CM} – затраты на смазочные материалы;

C_{HP} – накладные расходы.

Далее, для оценки эффективности внедрения устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана необходимо определить стоимость затрат на внедрение рассматриваемого технического решения (изготовление, установку и обслуживание прибора). Какие-либо изготовленные промышленным образом устройства, которые в рамках реализации предлагаемого технического решения можно соответствующим образом модернизировать, в продаже отсутствуют. Таким образом, было принято решение изготовить два устройства из компонентной базы, описанной в 2 главе. В результате работы был собран опытный образец (прототип) устройства мониторинга положений канатов и груза (глава 2, рисунок 2.18).

В целом, работа по внедрению такого устройства мониторинга положений канатов и груза включала в себя следующие операции:

- приобретение принимающего оборудования (планшетный компьютер);
- приобретение компонентной базы;
- приобретение корпуса и крепежа;
- программирование модуля;
- установка компонентов в корпус;

- крепление прибора на крюковой подвеске и обслуживания (зарядки аккумулятора через 48 часов);
- изготовление крепления планшетного компьютера;
- техническая профилактика прибора безопасности в год.

Итого, общая стоимость внедрения одного устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана (включая его установку на башенный кран) составила 50 000 руб.

Стоимость эксплуатации башенного крана КБ 503 составляет $C_{г1} = 2\,189\,528$ руб. Стоимость эксплуатации после внедрения устройства башенного крана составляет: $C_{г2} = 2\,239\,528$ руб.

При расчете годовых текущих издержек после внедрения устройства принято, что средневзвешенная цена башенного крана и затраты на техобслуживание увеличились. Тогда экономический эффект башенного крана составит:

$$\mathcal{E} = 2\,189\,528 \frac{32110}{27417} - 2\,239\,528 = 324\,784,07 \text{ руб.}$$

Таким образом, повышение производительности и эффективности работы башенных кранов во многом зависит от времени, затрачиваемого на процессе перемещения груза, что показывает расчёт.

5.2. Экономический эффект использования прибора безопасности в контексте потенциальных нештатных ситуаций

В зоне плохой видимости для машиниста (оператора) башенного крана при перемещении груза башенным краном могут возникнуть такие колебания (раскачивания) груза, которые несут риск повреждения тары, грузозахватных приспособлений или канатов.

Между тем контролируя углы отклонения груза посредством предложенного устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана

можно управлять точкой подвеса груза в случае приближения препятствий и своевременно предотвращать колебания (раскачивания) груза.

В этом случае экономический эффект от использования рассматриваемого прибора представляет собой прогнозируемую величину экономии, которая может быть образована за счет снижения рисков повреждения дорогостоящего оборудования и обеспечения максимальной длительности эксплуатации различных узлов башенного крана (при отсутствии нештатных ситуаций) на ускорение износа которых влияют, в том числе, частота и интенсивность раскачивания груза.

В рамках настоящей главы для наибольшей наглядности осуществлена оценка величины экономии от использования устройства по сравнению с расходами, возникающими в связи с необходимостью внеочередной замены оборудования, повреждение которого могло бы быть предотвращено использованием указанного устройства.

Для примера произведем расчет вероятных издержек в случае разового повреждения каната. Средняя стоимость наиболее востребованных канатов для башенных кранов (на 01.02.2023) приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Средняя стоимость канатов для башенных кранов

Тип и марка башенного крана	Диаметр каната	Длина каната (min)	Общая стоимость каната
	мм	м	руб.
КБ-503Б	24	290	154 570
Liebherr 110EC-B6	16	200	144 200
Liebherr 132EC-H8 FR-tronic	18	205	182 450
Liebherr 180EC-B10 FR-tronic	20	230	247 250
Liebherr 280EC-H12 FR-tronic	22	225	315 000
Potain-MDT178	13	328	176 464
Potain-MDT218J10	14	330	185 130

Для целей расчета возьмем самый недорогой канат для Liebherr 110EC-B6, с минимальной запасовкой, стоимостью 144 200 руб. В случае нештатной ситуации, произошедшей по причинам, описанным выше,

минимальные издержки по замене такого каната будут рассчитаны следующим образом:

$$K_{обш} = K_k + K_{пр} + K_{см} = 144\,200 \text{ руб.} + 15\,000 \text{ руб.} + 3\,600 \text{ руб.} = 162\,800 \text{ руб.}$$

где:

K_k – минимальная стоимость каната (таблица 5.1) = 144 200 руб.

$K_{пр}$ – минимальная стоимость простоя башенного крана (3 ч) = 15 000 руб.

$K_{см}$ – минимальная стоимость смены бригады для замены каната = 3 600 руб.

В случае предотвращения однократной нештатной ситуации, требующей замены одного каната, с помощью предложенных технического решения (устройство, ориентировочной стоимостью 50 000 руб.) и соответствующего метода прогнозируемая величина экономии составит:

$$K_{э} = 162\,800 \text{ руб.} - 50\,000 \text{ руб.} = 112\,800 \text{ руб.}$$

Выводы по главе 5

1. Повышение производительности и эффективности работы башенных кранов во многом зависит от времени, затрачиваемого на процессе перемещения груза.

2. В условиях снижения посредством использования рассматриваемого устройства рисков возникновения нештатных ситуаций, сопряженных, в том числе, с повреждением оборудования башенного крана и возникновением простоя башенного крана, обеспечивается повышение производительности, а следовательно, и эффективности работы башенного крана.

3. Представленный расчет показал, что использование устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана экономически целесообразно, поскольку расходы по замене поврежденного оборудования башенного крана существенно перекрывает затраты по производству, установке и техническому обслуживанию такого устройства

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Достигнута цель диссертационной работы – разработан метод, а также разработаны способы мониторинга положения грузового каната и груза, перемещаемым башенным краном, и контроля за опасными отклонениями каната от вертикальной оси.

2. Решены задачи диссертационной работы, представляющие её научную новизну:

- установлена специфика структурного состава и конструктивного исполнения приборов (систем) безопасности башенных кранов, используемых в отечественной строительной отрасли;

- разработан новый подход к обеспечению безопасности при опасном колебании груза на башенном кране в зоне ограниченной видимости.

- смоделирована зависимость между основными факторами, влияющими на позиционирование груза в процессе его перемещения башенным краном, и углом отклонения каната с грузом от вертикальной оси;

- предложен способ и метод безопасного и эффективного процесса перемещения груза и позиционирования его башенным краном с учётом контроля колебаний груза (в т.ч. в зоне ограниченной видимости («слепой» зоне) для машиниста (оператора) башенного крана);

- на основе произведенных расчетов сформулированы рекомендации для машинистов (операторов) крана по уменьшению раскачивания груза при повороте стрелы, ветровой нагрузке и торможении грузовой тележки.

3. Новизна и практическая промышленная применимость разработанных технических решений подтверждена полученными патентами на полезные модели (патенты RU 196670 U1, RU 197689 U1, автор Боушев В.Ю.).

4. Принципиальные преимущества предложенных автором разработок заключаются в:

- относительной простоте технического исполнения и удобстве дальнейшего технического обслуживания;

- универсальности их функционального использования на любых типах грузоподъёмных кранов;

- возможности использования в зонах ограниченной видимости («слепой зоне») для машиниста (оператора) крана;

- низком уровне затрат по производству, установке и техническому обслуживанию предложенного устройства.

5. Включение предложенных автором разработок в систему управления грузоподъёмных кранов даёт преимущество перед другими приборами безопасности, поскольку может предупредить о возможном нарастании раскачивания груза, позволяя при получении соответствующих сигналов – выполнить команды по уменьшению раскачивания груза.

6. Экономическая эффективность предложенной разработки достигается не только за счет повышения безопасности эксплуатации грузоподъёмных кранов, но и в значительной степени – посредством уменьшения скорости износа узлов и деталей и сокращения длительности выполняемых рабочих циклов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БОИ	Блок отображения информации
БП	Блок питания
ОГП	Ограничитель грузоподъёмности
ОНК	Ограничитель нагрузки крана
ОПО	Опасный производственный объект
ПЛК (PLC)	Программируемый логический модуль
РП	Регистраторы параметров
ФНП	Федеральные нормы и правила
ФНЧ (LPF)	Фильтр низких частот
ABB	Электронный модуль ограничения рабочей зоны;
AKS	Электронный модуль предотвращения аварий
DMP	Цифровой процессор движения
LICOM	Программа телекоммуникационного сервиса
LMB	Электронный модуль ограничения грузоподъёмности
LSB	Младший значащий бит, в серии чисел в двоичном формате
MDE	Модуль сбора данных о работе машины;
MEMS	Микроэлектромеханические системы
PROFINET	Открытый промышленный стандарт для автоматизации от ассоциации Ethernet
RDT	Систему дистанционной передачи данных
SPS	Центральный блок системы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports.

2. Башенные краны: раздвигая границы возможного (Часть 5) Основные Средства. журн. – 2019. – №11.(ноябрь). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://os1.ru/article/24348-tendentsii-v-razviti-bashennyh-kranov-bashennye-kran-razdvigaya-granitsy-vozmojnogo-ch-5>.

3. Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения», утв. приказом Ростехнадзора от 26.11.2020 № 461 (вступил в силу с 01.01.2021).

4. Боушев, В.Ю. Методика обеспечения безопасности эксплуатации башенных кранов, оборудованных регистраторами параметров /В.Ю Боушев //Актуальные проблемы безопасности дорожного движения. Материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Сер. «Актуальные проблемы современного строительства». – 2018. – С. 50-54.

5. Боушев, В.Ю. Обеспечение безопасности эксплуатации башенных кранов/В.Ю Боушев //Актуальные проблемы современного строительства. Материалы 72-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х частях. – 2019. – С. 101-105.

6. Боушев, В.Ю. Метод повышения безопасности эксплуатации грузоподъемных машин // Актуальные проблемы современного строительства. Материалы 73-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х частях. – 2020. – С. 3-9.

7. Патент. № 2145701 Российская Федерация, МПК G01G 19/18 (2006.01). Способ автоматического определения веса груза подъёмным механизмом

с электроприводом и устройство его реализации: № 98110316 заявл. 29.05.98; опубл. 20.02.00 / Мамошин В.Р., Немчинов В.И., Сикорин В.В.; Яковлев А.А., Головина О.В.

8. Патент. № 279093, МПК G01G 23/365 (1995.01). Автоматический счетчик интегратор для определения веса поднятого груза: № 1337962 заявл. 13.06.69; опубл. 21.08.70 / Краличкин Л.К.

9. Патент. № 158693 Российская Федерация, МПК G01G 23/36 (1995.01). Автоматический счетчик-интегратор для определения веса поднятого груза № 807109 заявл. 07.12.62 ; опубл. 12.11.63 / Бувалый Э.И., Захваткина Б.И.

10. Патент. № 2306535, МПК B66C 13/16 (1995.01) Способ измерения веса поднимаемого груза в кранах с турбопередачей в приводе: № 611606 заявл. 14.11.58; опубл. 01.01.59 / Николаев Р.Л.

11. Патент. № 158693 Российская Федерация, G01L 3/10(2006.01) Способ оценивания массы полезного груза, поднимаемого грузоподъемной установкой приводимой асинхронным двигателем с фазным ротором, и устройство для его реализации: № 2006112308 заявл. 04.13.06 ; опубл. 20.09.20 / Ваулин Г.А., Зубок К.А., Мещерин А.Т., Мещерина Ю.А., Сорокин В.А., Сухов М.В.; заявитель СибГИУ – 2с.

12. ОНК 160Б. Ограничитель нагрузки крана (ограничитель грузоподъемности). Руководство. – ПИО ОБТ. – 2008. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://nppego.com/Product/doc/re160b.pdf>

13. СКДРП Система компьютерной диагностики Руководство пользователя [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ooovira.ru/>

14. Руководство по эксплуатации Системы безопасности ОГМ240-40.4 и ОГМ240-41.4 ОГМ 240 для башенных кранов. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.Rezonans tech.ru/catalog/systems/lmi/ogm240 /towercranes/>.

15. Руководство по эксплуатации Системы безопасности ОГМ240-40.4 и ОГМ240-41.4 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://data.rez.ru/parts/>.

16. Дополнительное Руководство Краны RU, ЕС-Н/ЕС-В. Состояние: 07/2019 V03-01 Версия программного обеспечения EMS 2.16 copyright by LIEBHERR. – 234 с.
17. Боушев, В.Ю. Современные приборы безопасности башенных кранов, оснащённые регистраторами параметров и их перспективное развитие /В.Ю. Боушев // Строительные и дорожные машины. – 2021. – № 8. – С. 39-42.
18. Инструкция по эксплуатации EMS-3 Электронная мониторинговая система 2010 Lebherr -Werk Biderach GmbH. – 102 с.
19. Коммуникационное программное обеспечение для башенных поворотных кранов Liebherr LIKOM V2.2 10 января 2008 80ст «Likom-Cran» Lebherr-Werk Biderach – 80 с.
20. Fosow PM530-I installation Manual Xi'an Fosow Electronic Technology Development Co., Ltd) – 50 с.
21. Гаранин Н.П. Эффективное средство гашения колебаний груза на тросе / Речной транспорт. 1974. – Л II. – С. 284-288.
22. Дроздович В.А. Система для ограничения раскачивания груза на гибком подвесе // Машиноведение, 1985. – №7. – С. 34-38.
23. Зарецкий, А.А. Исследование колебаний строительных башенных кранов с поворотной колонной при работе механизма подъема: дис. ...канд. техн. наук: 05.00.00 / Зарецкий Анатолий Абрамович. – М., 1962. – 180 с.
24. Зарецкий, А.А. Развитие теории расчёта грузоподъёмных кранов по предельным состояниям: дис. ...докт. техн. наук: 05.05.05 / Зарецкий Анатолий Абрамович. – М., 1982. – 442 с.
25. Зарецкий, А.А. Оптимизация управления механизмами грузоподъёмных кранов в переходных режимах / А.А. Зарецкий, Н.И. Портной // Вестник машиностроения – 1969. – №8. – С. 14-18.

26. Зарецкий, А.А. Расчет свободно стоящих кранов на устойчивость против опрокидывания по предельным состояниям. / А.А. Зарецкий. М.: Проблемы развития строительных и дорожных машин, ВНИИСтродормаш, 1989. – С. 57.

27. Каминский, Л.С. Повышение безопасности эксплуатации стреловых кранов на основе регистрации и анализа их рабочих параметров: дис. ...канд. техн. наук: 05.05.04 / Каминский Леонид Станиславович. – Новочеркасск., 2001. – 159 с.

28. Каминский, Л.С. Современные системы безопасности и управления для грузоподъемных машин / Л.С. Каминский, А.С. Каминский, И.А. Пятницкий, И.Г. Федоров, М.И. Затравкин, Л.Н. Мухин //Подъемно-транспортное дело, январь-февраль. – 2014. С. 23-29.

29. Кoryтов, М.С. Автоматизация синтеза оптимальных траекторий перемещения грузов мобильными грузоподъемными кранами в неоднородном организованном трехмерном пространстве: монография / М.С. Кoryтов. – Омск: СибАДИ, 2012. – 380 с.

30. Кoryтов, М.С. Моделирование динамической системы автокрана при помощи блоков пакета «SIMMECHANICS» системы MATLAB / М.С. Кoryтов, С.А. Зырянова // Омский научный вестник. – 2004. – № 4 (29). – С. 88-90.

31. Кoryтов, М.С. Моделирование рабочих движений автокрана при помощи SimMechanics и Virtual Reality Toolbox / М.С. Кoryтов, В.А. Глушеч, С.А. Зырянова // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2004. – №3-4(7-8). – С. 94-102.

32. Кoryтов, М.С. Система автоматизации моделирования стреловых грузоподъемных кранов: монография / М.С. Кoryтов, В.С. Щербаков, С.В. Котькин. – Омск: СибАДИ, 2012. – 143 с.

33. Автоматическое устранение колебаний груза на гибкой подвеске при подъеме и опускании: монография / Я.Л. Либерман, К.Ю. Летнев. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 215 с

34. Либерман, Я.Л. Исследование вертикальных колебаний груза на тросовой подвеске при резком торможении / Я. Л. Либерман, Ю. О. Лысый, К. Ю. Летнев // Современные технологии и бизнес: сб. научн. тр. Челябинск: ЧРО РЕАН, 2010. – С. 51-56. Сохадзе, А.Г. Мехатронная система грузоподъемного крана для автоматической стабилизации положения груза и управления его движением: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.05 / Сохадзе Александр Георгиевич. – Новочеркасск., 2006. – 218 с.

36. Терехов, А.М. Устройство для успокоения раскачивания груза на портовых порталных кранах: дис. ...канд. техн. наук: 05.22.19 Терехов Андрей Михайлович. – М., 2003. – 158 с.

37. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов. Учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. 2-е изд. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 304 с.

38. 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.

39. Щербаков, В.С. Определение значений управляемых координат автокрана по известным координатам груза / В.С. Щербаков, М.С. Кoryтов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – №2(10). – С. 176-192.

40. Щербаков, В.С. Повышение точности и скорости перемещения груза по требуемой траектории грузоподъемным краном мостового типа / В.С. Щербаков, М.С. Кoryтов, Е.О. Вольф // Системы. Методы. Технологии. Братск: БГУ. – 2014. – №4. – С. 52-57.

41. Щербаков, В.С. Результаты сравнительного анализа алгоритмов планирования траектории движения объекта с учетом его угловых координат в трехмерном пространстве с препятствиями / В.С. Щербаков, М.С. Кoryтов //

Вестник СибАДИ: Научный рецензируемый журнал. – Омск: СибАДИ. – № 1 (19). – 2011. – С. 68-74.

42. Щербаков, В.С. Способ повышения точности траектории перемещения объекта грузоподъемным краном путем компенсации его неуправляемых пространственных колебаний / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, Е.О. Вольф // Механизация строительства. – 2014. – № 2. – С. 21-25.

43. Blackburn, D. Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics / Singhose W. Kitchen J. Patrangenaru V. Lawrence J. // Journal of Vibration and Control. 2010. – No 16. – PP. 477-501.

44. Manson, G.A. Time-optimal control of and overhead crane model // Optimal Control Applications & Methods. 1982. Vol. 3. No. 2. PP. 115-120.

45. Ridout, A.J. Anti-swing control of the overhead crane using linear feedback // Journal of Electrical and Electronics Engineering. 1989. Vol. 9. No. 1/2. PP. 17-26

46. Magnetek Material Handling, Crane anti sway control system [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.magnetekmh.com/Material>

47. Camotion Thinking Machines, Motion control for industry [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.camotion.com/SOLUTIONS/CRANECONTROL/EXPERT_OPERATOR/tabid/507/Default.aspx.

48. Konecranes, Dynapilot sway control system [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.konecranes.com/resources/video-library/dynapilot-sway-control-system>.

49. 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>.

50. Smart Crane, AntiswayComplete [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.smartcrane.com/SmartCrane/AntiswayComplete.html>

51. Siemens, SIMOCRANE sway control [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://w3.siemens.com/mcms/mc-solutions/en/mechanical-engineering/crane-solutions/simocrane/advanced-technology/sway-control-systems/pages/sway-control-systems.aspx>.

52. Система HookCam [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hookcamcompany.com>

53. Патент. № 2700312 Российская Федерация, МПК В66С 23/88. Способ повышения безопасности и система безопасности стрелового грузоподъемного крана / Ватулин Я.С., Потахов Е.А., Потахов Д.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». – 2018129511; заявл. 13.08.18; опубл. 16.09.19.

54. Патент. № 2676210 Российская Федерация, МПК В66С 13/06. Устройство и способ управления раскачиванием груза, подвешенного на подъёмном устройстве / Саварежи С.М., Винати Ф., Винати С., Винати М., Винати М., Винати Д.; заявитель и патентообладатель ВИНАТИ С.Р.Л. – 2016125496; заявл. 06.11.14; опубл. 26.12.18.

55. Патент. № 2623295 Российская Федерация, МПК В63В 27/30. Система, устройство и способ текущего контроля положения и ориентации транспортного средства, погрузочного устройства и груза при работе погрузочного устройства / Энгедал Т., Неклан Х., Густавссон Д.; заявитель и патентообладатель ОПТИЛИФТ АС. – 2013156680; заявл. 18.05.12; опубл. 23.06.17.

56. Патент. № 189103 Российская Федерация, МПК В66С 23/90, В66С 23/00, В66С 23/88. Система безопасности и управления грузоподъёмной машины / Каминский Л.С., Каминский Ф.Л., Фёдоров И.Г.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие «ЭГО». – 2019104257; заявл. 15.02.19; опубл. 13.05.19.

57. Патент. № 172638 Российская Федерация, МПК В66С 13/16, В66С 13/18. Система мониторинга грузоподъёмной машины / Алексанкин В.А., Каминский Л.С., Каминский Ф.Л., Пятницкий И.А., Фёдоров И.Г.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие «ЭГО» . – 2016146574; заявл. 28.11.16; опубл. 18.07.17.

58. Патент. № 2516812 Российская Федерация, МПК В66С 1/14, В66С 13/18. Устройство определения положения крюка и кран / ТАН С., ЯН Д., ЧЖОУ Б., ; заявитель и патентообладатель ХУНАНЬ САНИ ИНТЕЛЛИДЖЕНТ КОНТРОЛ ЭКВИПМЕНТ КО., ЛТД. – 2012107154/11; заявл. 25.06.10 ; опубл. 20.05.14.

59. Using an Accelerometer for Inclination Sensing by Christopher J.Fisher. (AN-1057.pdf) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://bitaks.com/resources/inclinometer/content.html>.

60. МЭМС-датчики движения от STMicroelectronics: акселерометры и гироскопы [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://russianelectronics.ru/mems-datchiki-dvizheniya-ot-stmicroelectronics-akselerometry-i-giroskopy/>.

61. Патент. № 196670 Российская Федерация, МПК В66С 23/88. Устройство мониторинга положений канатов и груза грузоподъёмного крана /Боушев В.Ю.; заявитель и патентообладатель Боушев В.Ю. – 2019138964; заявл. 30.11.19; опубл. 11.03.20.

62. Патент. № 197689 Российская Федерация, МПК В66С 13/04, В66С 23/90. Устройство мониторинга положений канатов грузовой тележки башенного крана / Боушев В.Ю.; заявитель и патентообладатель Боушев В.Ю. – 2019134314; заявл. 26.10.2019; опубл. 21.05.2020.

63. ESP-WROOM-32 [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf.

64. MPU6050 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>.

65. Micro SD Card Micro SDHC Mini TF Card Adapter Reader Module for Arduino [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://datalogger.pbworks.com/w/file/attach/89507207/Datalogger%20%20SD%20Memory%20Datasheet.pdf>

66. Мещеряков, В.Н. Ограничение колебаний груза, перемещаемого мостовыми кранами /Колмыков В.В. Мигунов Д.В. // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 6. – С. 268-272.

67. Енин, С.С. Совершенствование системы управления электроприводами мостового крана для демфирования колебаний подвешенного груза: дис. ...канд. техн. наук: 05.09.03 / Енин Сергей Сергеевич. – Магнитогорск., 2020. – 150 с.

68. Шершнева, Е.О. Повышение эффективности процесса перемещения груза мостовым краном: дис. ...канд. техн. наук: 05.05.04 / Шершнева Елена Олеговна. – Омск., 2017. – 187 с.

69. Флюгель, Ф. Методика построения обобщенных математических моделей грузоподъемных кранов с грузом на пространственном канатном подвесе: дис. ...канд. техн. наук: 05.05.04. / Флюгель Франк. – Магнитогорск., 2002. – 182 с.

70. Мишин, А.В. Метод обеспечения устойчивости башенных кранов при действии случайных нагрузок: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.02 / Мишин Алексей Владимирович. – М., 2014. – 158 с.

71. Обыдёнов, В.А. Устойчивость грузоподъёмных машин в период сильных порывов ветра: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.13 / Обыденов Валерий Анатольевич. – Тула., 2010. –142 с.

72. Чан, Д.Х. Устойчивость стационарных башенных кранов при действии резких порывов ветра в условиях Вьетнама: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.02 / Чан Дык Хиеу. – М.: 2013. – 130 с.

73. Подобед, В.А. Повышение эффективности использования портовых кранов при ветровых нагрузках: дис. ...д-ра техн. наук: 05.22.19 / Подобед Виталий Александрович. Мурманск., 2006. – 357 с.

74. Подобед, Н.Е. Исследование работы механизмов передвижения порталных кранов в морских портах при ветровых нагрузках: дис. ...канд. техн. наук: 05.22.19 / Подобед Наталья Евгеньевна. Мурманск., 2010. – 166 с.

75. Бильфельд, Н.В. Методы MS Excel для решения инженерных задач / Н.В. Бильфельд, Н.М. Фелькер. – СПб.: Изд-во Лань, 2020. – 164 с.

76. Энциклопедия MathCad 2011 и MathCad 14. – М.: Солон-Пресс, 2010. – 832 с.

77. Мур, Д. Экономическое моделирование в Microsoft Excel / Дж. Мур, Р. Уздерфорд. – М.: Изд-во Вильямс. – 2004. – 1024 с.

78. РД 10-93-95 Типовая инструкция для крановщиков (машинистов) по безопасной эксплуатации башенных кранов. Серия 10. Выпуск 48. – М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004. – 32 с.

79. СНиП 12-04-2002 Безопасность труда в строительстве. Часть 2; введ. с 01.01.03. – М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центр проектной продукции в строительстве» (ФГУП ЦПП) 2002. – 35 с.

80. Ерофеев, Н. Особенности и пути улучшения технической эксплуатации кранов в портах Крайнего Севера / Орлов. И. // Морской флот, 1966. - Том 26, № 9. – С. 10-12.

81. ГОСТ 32579.3–2013. Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчётных нагрузок и комбинаций нагрузок. Ч. 3 Краны башенные. Введён в действие 01.06.15. – М.: Стандартинформ, 2015. – 19с.

82. Code of Practice for Safe Use of Tower Cranes (Гонконг, КНР), 2012 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.labour.gov.hk>

83. Aleynik, V. ASSESSMENT OF THE CORIOLIS FORCE IMPACT ON THE OPERATION OF THE TOWER CRANE SWING MECHANISM. (Оценка влияния кориолисовой силы на нагруженность механизма поворота башенного крана) / Vadim Aleynik, Sergey Repin, Constantine Rulis // Architecture and Engineering, Vol1, No 4. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://aej.spbgasu.ru/index.php/AE/article/view/69>.

84. Bardyshev, O.A. Method of modeling oscillatory processes of rotary mechanisms / Popov V.A. Filin A.N. Repin S.V. // Contemporary Problems of Architecture and Construction. Proceedings of the 12th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction (ICCPAC-2020), November 25-26, 2020, Saint Petersburg, Russia. PP. 127-134. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003176428-26/method-modeling-oscillatory-processes-rotary-mechanisms-bardyshev-popov-filinrepin?context=ubx&refId=9587003a-a438-4c17-85d3-257b5592be66>.

85. Вайнсон, А.А. Подъемно-транспортные машины: Учебник для вузов по специальности «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование». – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 536 с.

86. Лобов, Н.А. Динамика грузоподъемных кранов. М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.

87. Неспирный, В.Н. Стационарные режимы сферического маятника с подвижной точкой подвеса / В.Н. Неспирный, В.А. Королев // Механика твердого тела. – 2011. – Вып. 41. – С. 225-232.

88. Толочко, О.И. Сравнительный анализ методов ограничения колебаний груза, подвешенного к механизму поступательного движения мостового крана / О.И. Толочко, Д.В. Бажутин // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2010. – № 75. – С. 22-28.

89. Кузьмичев, В.А. Основы проектирования вибрационного оборудования. Учебное пособие. – СПб: Изд-во «Лань». 2014, – 208 с.

90. Зарецкий, А.А. Управление и защита грузоподъемного крана с гашением раскачивания груза Ч.2. / Л.С. Каминский, Д.М. Маш, И.А. Пятницкий, И.Г. Фёдоров // Все краны. – 2008. – №1. – С 8-12.

91. Корниенко, С.В. Математическое описание электромеханической системы подъема груза башенным краном / С.В. Корниенко // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. Електротехніка і енергетика. – 2013. – Вип. 1. – С. 114-117.

92. Гниломедов, Г.И. Исследование процессов раскачивания груза и эксплуатационных нагрузок порталных кранов: дис. ...канд. техн. наук: 05.05.05. / Гниломедов Григорий Иванович. – Л., 1975. – 239 с.

93. Зубко, Н.Ф. Влияние ветровых нагрузок на работу приводов механизмов порталного крана / Н.Ф. Зубко, В.А. Подобед // Электротехническая промышленность. Сер Электропривод. – 1983. – Вып.2. – С 12.

94. Раскатов, А.В. Выравнивание нагрузок в грузовых канатах кранов при подъеме груза спаренными кранами: дис. ...канд. техн. наук: 05.22.19 / Раскатов Александр Валерьевич. – М., 2013. – 134 с.

95. Редькин, А.В. Устройство управления устойчивостью башенного крана в условиях воздействия ветровых нагрузок / А.В. Редькин, А. В. Мишин // Строительные и дорожные машины, 2012. – С. 32.

96. Сорокин, П.А. Устойчивость башенных кранов от опрокидывания при случайном воздействии порывов ветра / П.А. Сорокин, А.В. Мишин // TTS TECHNIKA TRANSPORTU SZYNOWEGO. Koleje. Tramwaje. Metro. 2012. – № 9. – PP. 881-887.

97. Сорокин, П.А. Разработка системы безопасности башенных кранов при воздействии ветровой нагрузки / П.А. Сорокин, А.В. Мишин, К.С. Хряков, Чан Дык Хиеу // Инновационное развитие образования, науки и технологий. – 2012. – С. 136-140.

98. Спицина, Д.Н. Динамическое воздействие ветровой нагрузки на козловые краны [Текст] / Д.Н. Спицина и др. // Труды ВНИИПТМАШ. – М., 1976. – Вып.1. – С. 88-96.
99. Wilcox, D.C. Turbulence Modeling for CFD / D.C. Wilcox – La Canada, California. – 1994. – 477 P.
100. Коган, И.Я. Строительные башенные краны / И.Я. Коган. – М.: машиностроение. 1971. – 396 с.
101. ГОСТ 1451-77. Краны грузоподъёмные. Нагрузка ветровая. Введён в действие 01.01.78. – М.: Издательство стандартов, 1977. – 19с.
102. Abdel-Rahman, E.M., Nayfeh, A.H., Masoud, Z.N. (2003). Dynamics and control of cranes: a review. Journal of Vibration and Control. – № 9. – 2003. – PP. 863-908.
103. Blackburn, D. Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics / Singhose W. Kitchen J. Patrangenaru V. Lawrence J. // Journal of Vibration and Control. 2010. – № 16. – PP 477-501.
104. Shcherbakov, V. (2015).Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane / V. Shcherbakov, M. Korytov, R. Sukharev, E. Volf // Applied Mechanics and Materials. Vols., PP 701-702.
105. Васильев, И.А., Экономика отрасли строительного и дорожного машиностроения на современном этапе / И.А. Васильев, Ю.И. Васильева // Строительные и дорожные машины. – 1997. – № 4. – С. 2-3
106. Канторер, С.Е. Строительные машины и экономика их применения. – М.: Высш. шк., – 528 с.
107. Временные нормативы затрат средств и стоимости работ по централизованному ремонту и техническому обслуживанию импортных и мощных отечественных строительных машин. ВНИИПК техоргнефтегазстрой, ОНАО-2085, – 74 с.

108. Рекомендации по расчёту экономической эффективности технических решений в области организации, технологии и механизации строительных работ / ЦНИИОМТП. – М.: Стройиздат, 2014. – 128 с.

109. МДС 83-1.99 Методические рекомендации по определению размера средств на оплату труда в договорных ценах и сметах на строительство и оплате труда работников строительно-монтажных и ремонтно-строительных организаций / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1999. – 52 с.

110. Мур, Джеффри Х. Экономическое моделирование в Microsoft Excel / Джеффри Х. Мур, Ларри Р. Уэдерфорд; [Пер. с англ. Р. Г. Имамутдиновой и др.]. – 6-е изд. – М.: Вильямс, 2004. – 1018 с.

Программный код для модуля - ESP-32S ESP-WROOM-32 NodeMCU Wi-Fi

```

#include <Arduino.h>
#include <WiFi.h>
#include <AsyncTCP.h>
#include <ESPAsyncWebServer.h>
#include <Adafruit_MPU6050.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Arduino_JSON.h>
#include <Wire.h>
#include <GyverNTP.h>
#include <WiFiUdp.h>
#include "SPIFFS.h"
//Libraries for microSD card
#include "FS.h"
#include "SD.h"
#include "SPI.h"
GyverNTP ntp(3);
// Определите PIN-код CS для модуля SD-карты
#define SD_CS 5
// Replace with your network credentials
const char* ssid = "*****";
const char* password = "*****";
// Create AsyncWebServer object on port 80
AsyncWebServer server(80);
// Create an Event Source on /events
AsyncEventSource events("/events");
// Json Variable to Hold Sensor Readings
JSONVar readings;
// Сохранить номер считывания в памяти RTC
RTC_DATA_ATTR int readingID = 0;
// Timer variables
unsigned long lastTime = 0;
unsigned long lastTimeTemperature = 0;
unsigned long lastTimeAcc = 0;
unsigned long lastTimeSD = 0;
unsigned long gyroDelay = 10;
unsigned long temperatureDelay = 1000;
unsigned long accelerometerDelay = 200;
unsigned long sdDelay = 1000;
// Create a sensor object
Adafruit_MPU6050 mpu;
sensors_event_t a, g, temp;
String dataMessage;
float gyroX, gyroY, gyroZ;
float accX, accY, accZ;
float temperature;
//Отклонение датчика гироскопа
float gyroXerror = 0.09;
float gyroYerror = 0.03;
float gyroZerror = 0.09;
// Init MPU6050
void initMPU(){

```

```

    if (!mpu.begin()) {
        Serial.println("Failed to find MPU6050 chip");
        while (1) {
            delay(10);
        }
    }
    Serial.println("MPU6050 Found!");
}

void initSPIFFS() {
    if (!SPIFFS.begin()) {
        Serial.println("An error has occurred while mounting SPIFFS");
    }
    Serial.println("SPIFFS mounted successfully");
}

// Инициализация SD-карты
void initSDCard(){
    if (!SD.begin(SD_CS)) {
        Serial.println("Card Mount Failed");
        return;
    }
}

// Write to the SD card
void writeFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) {
    Serial.printf("Writing file: %s\n", path);
    File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
    if(!file) {
        Serial.println("Failed to open file for writing");
        return;
    }
    if(file.print(message)) {
        Serial.println("File written");
    } else {
        Serial.println("Write failed");
    }
    file.close();
}

// Append data to the SD card
void appendFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) {
    Serial.printf("Appending to file: %s\n", path);
    File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
    if(!file) {
        Serial.println("Failed to open file for appending");
        return;
    }
    if(file.print(message)) {
        Serial.println("Message appended");
    } else {
        Serial.println("Append failed");
    }
    file.close();
}

// Initialize WiFi
void initWiFi() {
    WiFi.mode(WIFI_STA);

```

```

if(!file) {
    Serial.println("File doesn't exist");
    Serial.println("Creating file...");
    writeFile(SD, "/data.txt", "gyroX,gyroY,gyroZ,accX,accY,accZ,temperature \r\n");
}
else {
    Serial.println("File already exists");
}
file.close();
// Handle Web Server
server.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    request->send(SPIFFS, "/index.html", "text/html");
});
server.serveStatic("/", SPIFFS, "/");
server.on("/reset", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    gyroX=0;
    gyroY=0;
    gyroZ=0;
    request->send(200, "text/plain", "OK");
});
server.on("/resetX", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    gyroX=0;
    request->send(200, "text/plain", "OK");
});
server.on("/resetY", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    gyroY=0;
    request->send(200, "text/plain", "OK");
});
server.on("/resetZ", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
    gyroZ=0;
    request->send(200, "text/plain", "OK");
});
// Handle Web Server Events
events.onConnect([](AsyncEventSourceClient *client){
    if(client->lastId()){
        Serial.printf("Client reconnected! Last message ID that it got is: %u\n", client->lastId());
    }
    // send event with message "hello!", id current millis
    // and set reconnect delay to 1 second
    client->send("hello!", NULL, millis(), 10000);
});
server.addHandler(&events);
server.begin();
ntp.begin();
}

void loop() {
    ntp.tick();
    if ((millis() - lastTime) > gyroDelay) {
        // Send Events to the Web Server with the Sensor Readings
        events.send(getGyroReadings().c_str(), "gyro_readings", millis());
        lastTime = millis();
    }
    if ((millis() - lastTimeAcc) > accelerometerDelay) {
        // Send Events to the Web Server with the Sensor Readings

```

```

WiFi.begin(ssid, password);
Serial.println("");
Serial.print("Connecting to WiFi...");
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
  Serial.print(".");
  delay(1000);
}
Serial.println("");
Serial.println(WiFi.localIP());
}

String getGyroReadings(){
  mpu.getEvent(&a, &g, &temp);
  float gyroX_temp = g.gyro.x;
  if(abs(gyroX_temp) > gyroXerror) {
    gyroX += gyroX_temp/90.00;
  }
  float gyroY_temp = g.gyro.y;
  if(abs(gyroY_temp) > gyroYerror) {
    gyroY += gyroY_temp/70.00;
  }
  float gyroZ_temp = g.gyro.z;
  if(abs(gyroZ_temp) > gyroZerror) {
    gyroZ += gyroZ_temp/90.00;
  }
  readings["gyroX"] = String(gyroX);
  readings["gyroY"] = String(gyroY);
  readings["gyroZ"] = String(gyroZ);
  String jsonString = JSON.stringify(readings);
  return jsonString;
}

String getAccReadings() {
  mpu.getEvent(&a, &g, &temp);
  // Get current acceleration values
  accX = a.acceleration.x;
  accY = a.acceleration.y;
  accZ = a.acceleration.z;
  readings["accX"] = String(accX);
  readings["accY"] = String(accY);
  readings["accZ"] = String(accZ);
  String accString = JSON.stringify(readings);
  return accString;
}

String getTemperature(){
  mpu.getEvent(&a, &g, &temp);
  temperature = temp.temperature;
  return String(temperature);
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  initWiFi();
  initSPIFFS();
  initMPU();
  initSDCard();
  File file = SD.open("/data.txt");

```

```

events.send(getAccReadings().c_str(),"accelerometer_readings",millis());
lastTimeAcc = millis();
}
if ((millis() - lastTimeTemperature) > temperatureDelay) {
    // Send Events to the Web Server with the Sensor Readings
    events.send(getTemperature().c_str(),"temperature_reading",millis());
    lastTimeTemperature = millis();
}
if ((millis() - lastTimeSD) > sdDelay) {
    // Save data SD card
    dataMessage = ntp.dateString() + " " + ntp.timeString() + "-" + String(gyroX) + "," + String(gyroY) + "," +
String(gyroZ) + "," + String(accX) + "," + String(accY) + "," + String(accZ) + "," + String(temperature) +
"\r\n";
    appendFile(SD, "/data.txt", dataMessage.c_str());
    lastTimeSD = millis();
}
}

```



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»
(СПбГАСУ)

ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, 190005

№ _____

[Внедрение материалов диссертации
в учебный процесс]



УТВЕРЖДАЮ
 Проректор по учебной работе
 С.В. Михайлов
 2023 года

АКТ

внедрения материалов кандидатской диссертации

**«Метод обеспечения безопасности эксплуатации башенных кранов,
 оборудованных регистраторами параметров» Боушева В.Ю.,
 представленной на соискание учёной степени
 кандидата технических наук**

Учебно-методическая комиссия автомобильно-дорожного факультета:

Председатель:

кандидат технических наук, доц. А.В. Зазыкин - декан автомобильно-дорожного факультета.

Секретарь:

кандидат технических наук, доц. Т.В. Виноградова - доцент кафедры наземных транспортно-технологических машин,

Настоящим актом подтверждает внедрение материалов кандидатской диссертации соискателя Боушева Виктора Юрьевича «Метод обеспечения безопасности эксплуатации башенных кранов, оборудованных регистраторами параметров», выполненной на кафедре наземных транспортно-технологических машин (НТТМ), в учебный процесс выпускающей кафедры НТТМ автомобильно-дорожного факультета при изучении дисциплины «Грузоподъёмные машины и оборудование» обучающихся по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства, профиль «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование».

Использование результатов кандидатской диссертации «Метод обеспечения безопасности эксплуатации башенных кранов, оборудованных

регистраторами параметров» соискателя Боушева В.Ю. обсуждено на заседании учебно-методической комиссии автомобильно-дорожного факультета Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета 20 февраля 2023 г., протокол №4.

Научная новизна диссертации заключается в обосновании критериев безопасности и эффективности процесса перемещения груза и позиционирования его башенным краном с учётом контроля колебаний груза.

Результаты диссертационной работы, внедренные в учебный процесс, размещены на портале <https://moodle.spbgasu.ru>, изложены в публикациях:

1. Боушев В.Ю. Современные приборы безопасности башенных кранов, оснащённые регистраторами параметров и их перспективное развитие /В.Ю. Боушев // Строительные и дорожные машины. - 2021. - № 8.- С. 39-42.

2. Боушев В.Ю. Раскачивание груза на башенном кране и проблемы мониторинга колебательных движений груза /В.Ю. Боушев //Справочник. Инженерный журнал с приложением. - 2021. - № 11. С. 20-24.

3. Боушев В.Ю., К вопросу о защите башенного крана от достижения предельного угла отклонения грузового каната /В.Ю. Боушев, Т.В. Виноградова, А.В. Зызыкин, С.В. Репин, Н.Д. Ховалыг //Строительные и дорожные машины. - 2022. -№ 6. С. 14-18.

4. Боушев В.Ю. Экспериментальное исследование влияния вариантов запасовки каната на грузовой тележке башенного крана на раскачивание груза /В.Ю. Боушев // Строительные и дорожные машины. - 2022. - № 8. С. 8-14.

Председатель комиссии:
Декан АДФ, к.т.н., доцент



А.В. Зызыкин

Секретарь комиссии:
к.т.н., доцент кафедры НТТМ



Т.В. Виноградова



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор АО «ЛСР. Краны-СЗ»

К.А.Демидов



« » 2023 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**результатов диссертационной работы Боушева В. Ю.,
представленной на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы начальника участка по ремонту электрооборудования АО «ЛСР.Краны-СЗ» Боушева В.Ю. приняты к использованию в указанной организации.

Принят к использованию способ мониторинга положений канатов и груза грузоподъёмного крана.

Цель применения разработки заключается в повышении точности позиционирования груза при недостаточном обзоре из кабины машиниста, а также в повышении безопасности работ на строительной и складской площадках.

Главный инженер АО «ЛСР. Краны-СЗ» _____ Афанасьев А. П.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 196670

УСТРОЙСТВО МОНИТОРИНГА ПОЛОЖЕНИЙ
ГРУЗОВЫХ КАНАТОВ И ГРУЗА ГРУЗОПОДЪЕМНОГО
КРАНАПатентообладатель: **Боушев Виктор Юрьевич (RU)**Автор: **Боушев Виктор Юрьевич (RU)**

Заявка № 2019138964

Приоритет полезной модели 30 ноября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 11 марта 2020 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 30 ноября 2029 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 197689

УСТРОЙСТВО МОНИТОРИНГА ПОЛОЖЕНИЙ
КАНАТОВ ГРУЗОВОЙ ТЕЛЕЖКИ БАШЕННОГО КРАНАПатентообладатель: **Боушев Виктор Юрьевич (RU)**Автор: **Боушев Виктор Юрьевич (RU)**

Заявка № 2019134314

Приоритет полезной модели 26 октября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 21 мая 2020 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 26 октября 2029 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев