

На правах рукописи

Назаров Александр Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ КРАНОВ МОСТОВОГО
ТИПА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИИ О ХАРАКТЕРЕ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и
комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре подъемно-транспортных систем.

Научный руководитель:

Иванов Сергей Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты:

Анцев Виталий Юрьевич

доктор технических наук, профессор, и.о. заведующего кафедрой «Транспортно-технологические машины и процессы» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

Сладкова Любовь Александровна

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Защита состоится «24» июня 2024 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета 24.2.331.13 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент

Б.Б. Косицын

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОРЫ

Актуальность темы. Решение задач интенсификации производства и наращивания грузооборота промышленных и логистических предприятий требует повышения интенсивности использования подъемно-транспортных машин (ПТМ), обеспечивающих технологические процессы. Однако увеличение количества и массы обрабатываемых грузов возможно только в пределах паспортных характеристик ПТМ, что закреплено требованиями федеральных норм и правил в области промышленной безопасности.

Проведенный анализ деятельности логистической компании показал, что за 10 лет при парке в 90 козловых контейнерных кранов, не отработавших нормативный срок службы, проведено более 3,5 тыс. внеплановых ремонтов и произошло 4 аварии, ущерб от которых составил более 70 млн. руб.

Установленные комиссиями по расследованию аварий и предполагаемые эксплуатирующей организацией причины произошедших инцидентов и возникших отказов согласуются с выводами проведенного обзора и анализа работы существующих приборов безопасности и систем дистанционного мониторинга, не предотвративших и не выявивших нарушений требований безопасности в указанных выше случаях.

Недостаточный уровень защищенности кранов мостового типа от случаев превышения номинальной грузоподъемности и неприемлемый уровень достоверности регистрируемых параметров являются следствием недостаточной адаптивности существующих алгоритмов приборов безопасности к динамическим параметрам конкретных кранов и особенностям приемов управления ими, низкой оснащенности приборов датчиками и отсутствия оценки точности регистрируемых параметров. Использование таких приборов не позволяет эксплуатирующей организации получать своевременную и достоверную информацию о нарушении правил использования техники и обеспечивать ее безопасную эксплуатацию.

Таким образом, актуальной научной задачей является разработка метода алгоритмической обработки технической информации о характере использования кранов мостового типа, обеспечивающего защиту от работы крана за пределами грузовой характеристики и получение достоверной информации об интенсивности его использования.

Цель и задачи. Целью исследования является повышение безопасности кранов мостового типа на этапе эксплуатации путем их защиты от возможности работы за пределами грузовой характеристики и получения достоверной информации об интенсивности их использования.

Для достижения цели работы поставлены и решены следующие задачи:

- проведен анализ отечественных приборов и зарубежных систем безопасности и систем мониторинга, обоснована целесообразность разработки метода совместной алгоритмической обработки первичной (датчиковой) информации о характере работы крана мостового типа;

- разработана динамическая модель механизма подъема в обобщенном цикле работы крана мостового типа;

- выбран и обоснован состав первичной информации об эксплуатационных

параметрах работы крана и разработан метод ее совместной алгоритмической обработки;

– разработаны алгоритмы настройки параметров ограничителя грузоподъемности с промежуточным порогом срабатывания (ОГП) для кранов с релейно-контакторной или частотной системой управления;

– предложен алгоритм ОГП для кранов с частотной системой управления, позволяющий обеспечить требования безопасности без использования аварийных режимов управления приводом механизма подъема;

– разработаны алгоритмы регистратора параметров работы крана (РП), позволяющие определить интенсивность использования механизма подъема и крана в целом с требуемой точностью;

– создан прототип прибора безопасности с программным обеспечением, реализующий на основе предложенных алгоритмов безопасности защиту крана от работы за пределами грузовой характеристики и определение интенсивности использования механизма подъема и крана в целом;

– проведены опытные испытания прибора для оценки достоверности информации РП, надежности защиты от работы кранов с релейно-контакторной или частотной системой управления за пределами грузовой характеристики и обеспечения снижения динамической нагрузки.

Научная новизна:

1. Разработана динамическая модель механизма подъема, отличающаяся учетом приемов управления и особенностей системы управления и описывающая работу с грузами произвольной массы. Получены зависимости для учета в модели жесткости металлоконструкции от положения грузовой тележки, движущего усилия двигателя от способов регулирования скорости при различных системах управления, жесткости канатного подвеса от усилия в нем.

2. Научно обоснован состав датчиковой информации и получены расчетные зависимости определения параметров алгоритмов ОГП от характеристик сигналов датчиков (аналого-цифрового преобразователя тензодатчика нагрузки и инкрементального датчика скорости электродвигателя) для выполнения требования по защите от возможности работы крана за пределами грузовой характеристики.

3. Предложены алгоритмы ОГП и РП, впервые получены расчетные зависимости определения промежуточного порога и порога безусловного запрета алгоритмов ОГП, а также длины окна сглаживания алгоритма РП для кранов мостового типа в зависимости от их динамических характеристик.

Практическая значимость работы заключается в:

– разработке способа экспериментального определения жесткости канатного подвеса для кранов мостового типа, на который получен патент № RU 2803775 С1 на изобретение;

– программных реализациях алгоритмов ОГП, адаптированных для кранов с релейно-контакторной или частотной системой управления;

– программной реализации алгоритмов РП для определения интенсивности использования механизма подъема и крана в целом;

- разработке методики настройки параметров алгоритмов ОГП и РП;
- создании прототипа прибора безопасности, реализующего автоматические режимы управления с целью недопущения использования крана за пределами паспортных характеристик и снижения динамических нагрузок, а также расчет показателей интенсивности его использования.

Методология исследования заключалась в теоретических и экспериментальных исследованиях с использованием методов математического моделирования динамических систем, строительной механики, теории алгоритмов, теории обработки сигналов, теории вероятностей и математической статистики.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов базируется на теоретических и экспериментальных исследованиях динамики ПТМ, а также на использовании апробированных методов математики и электротехники.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены на специализированном предприятии ООО «ИТЦ «КРОС», используются ПАО «ТрансКонтейнер» и в учебном процессе на кафедре «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Апробация работы. Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы обсуждались: на международной научно-практической конференции «Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в машиностроительной, дорожной и строительной отраслях – 2023». Белгород, 2023; на Международной научно-технической конференции «ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2022». Ярославль, 2022; на Семьдесят пятой всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием. Ярославль, 2022; на XXXIII международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС – 2021). Москва, 2021; на Всероссийской научно-практической конференции «Устойчивое развитие и новая индустриализация: наука, экономика, образование». Москва, 2021; Инновации и технологии в строительстве (BUILDINTECH BIT 2021). Белгород, 2021; на международном форуме по контроллингу «Контроллинг в экономике, организации производства и управлении». Москва, 2021; на 25-й Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Москва, 2021.

Личный вклад автора состоит в том, что представленные результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. Автором лично проведен обзор и анализ исследований в области технических средств обеспечения безопасности и динамики грузоподъемных машин; разработана динамическая модель механизма подъема в обобщенном цикле работы крана мостового типа; предложены алгоритмы ОГП и РП и их программная реализация; выполнены теоретические и экспериментальные исследования по оценке надежности и точности работы предложенных алгоритмов ОГП и РП.

На защиту выносятся основные положения научной новизны, выводы и результаты исследования:

1. Динамическая модель, позволившая определить действующие на механизм подъема силы в обобщенном цикле работы крана мостового типа.

2. Метод совместной обработки информации о характере использования крана мостового типа, включающий алгоритмы ОГП для кранов с релейно-контакторной или частотной системой управления и алгоритмы РП.

3. Практические методики определения параметров алгоритмов ОГП и РП, включающие проверку их точности в зависимости от характеристик датчикового оснащения.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в числе которых 6 статей в журналах из перечня ВАК РФ, 2 статьи в журналах, индексируемых в Scopus, получен 1 патент на изобретение. Общий объем публикаций 5,27 п.л.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Работа изложена на 193 страницах машинописного текста, содержит 94 рисунка, 20 таблиц, список литературы из 106 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы и приведено краткое содержание выполненных исследований, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** проведен анализ уровня аварийности и причин происшествий на опасных производственных объектах (ОПО), на которых используются подъемные сооружения. Сделан вывод о том, что значимым фактором риска при эксплуатации кранов мостового типа является превышение установленных паспортом технических характеристик.

Введен комплексный эксплуатационный показатель – интенсивность использования крана в реальных условиях работы *I*. Предложено его определение как скорость выработки фактического характеристического числа *N* в реальном времени. Отказ от осреднения за нормативный срок службы, используемого в установленной нормативной документацией методике расчета остаточного ресурса, позволил выявить периоды эксплуатации, на которых превышаются паспортные значения технических характеристик. Полученная связь между ресурсом, вырабатываемым циклически, и календарным временем использования крана, создает возможность для практического применения разработанных Н.Ю. Ивановой подходов к обеспечению безопасной и эффективной эксплуатации ПТМ путем разработки рационально обоснованных графиков планово-предупредительных ремонтов и расчета межсервисных интервалов на основе фактической и прогнозируемой наработки крана.

$$I = \frac{N}{t} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^{c_t} \left[\left(\frac{m_i}{m_{\text{ном}}} \right)^3 \right], \quad (1)$$

где *t* – продолжительность рассматриваемого периода эксплуатации крана; *m_i* – масса груза в *i*-м цикле; *N* – фактическое характеристическое число; *m_{ном}* – масса номинального груза; *c_t* – общее число циклов за период *t*.

Обзор существующих приборов безопасности на базе работ Ю.Ф. Тимина, В.С. Котельникова, В.А. Сушинского, С.Д. Иванова, В.А. Потапова, Л.С. Каминского, Ф.Л. Каминского, В.А. Коровина, К.В. Коровина показал, что современные ОГП призваны защитить кран от единичных случаев превышения номинальной грузоподъемности, а РП решают задачу расчета группы использования крана в целом за весь срок службы. Методика проверки работоспособности приборов безопасности на кране не содержит оценки точности показаний и не предусматривает тестирования при различных вариантах управления с учетом особенностей нагружения, обусловленных конкретными условиями технологического процесса. Это ведет к объективным затруднениям практического применения таких приборов для выполнения требований законодательства в области промышленной безопасности на этапе эксплуатации и повышает риски аварий и инцидентов на ОПО.

На основе проведенного анализа опыта применения систем безопасности зарубежных производителей (KoneCranes, Liebherr, Siemens, Mitsubishi, Nethix) выявлена тенденция увеличения количества используемых датчиков, обеспечивающих систему информацией о большем количестве параметров работы механизмов крана, и применении высокопроизводительных средств обработки и передачи информации, предоставляющих эксплуатирующей организации результаты работы системы в реальном времени.

Проведенное экспериментальное исследование показало, что современные отечественные приборы безопасности, формально защищая кран при попытке подъема груза, превышающего 125% номинальной массы, подвергают элементы конструкции нерасчетным силовым воздействиям. Экспериментально показана неприменимость широко применяемого алгоритма ОГП для кранов с частотной системой управления.

Сделан вывод о том, что работа крана в реальном технологическом процессе должна рассматриваться с точки зрения реализации динамического процесса, на характеристики которого влияют не только технические параметры самого крана, но также характер выполняемых основных и вспомогательных рабочих операций, приемы управления и алгоритмы работы применяемых приборов безопасности. Для обобщения влияния перечисленных факторов на динамический процесс проведен анализ работы козлового контейнерного крана, позволивший выявить ряд характерных рабочих циклов, полно описывающих особенности обслуживаемого технологического процесса.

Таким образом, для решения актуальной научной задачи – повышения безопасности кранов мостового типа на этапе эксплуатации путем их защиты от возможности работы за пределами грузовой характеристики и получения достоверной информации об интенсивности их использования, были сформулированы задачи работы.

В Главе 2 на основе анализа характерных рабочих циклов крана построен обобщенный цикл работы механизма подъема (Рис. 1), для описания которого выявлены 11 расчетных случаев (5 описывают работу на этапе до отрыва груза от основания, 6 – после отрыва груза от основания), полностью определяющих нагрузку на него в реальных условиях использования.

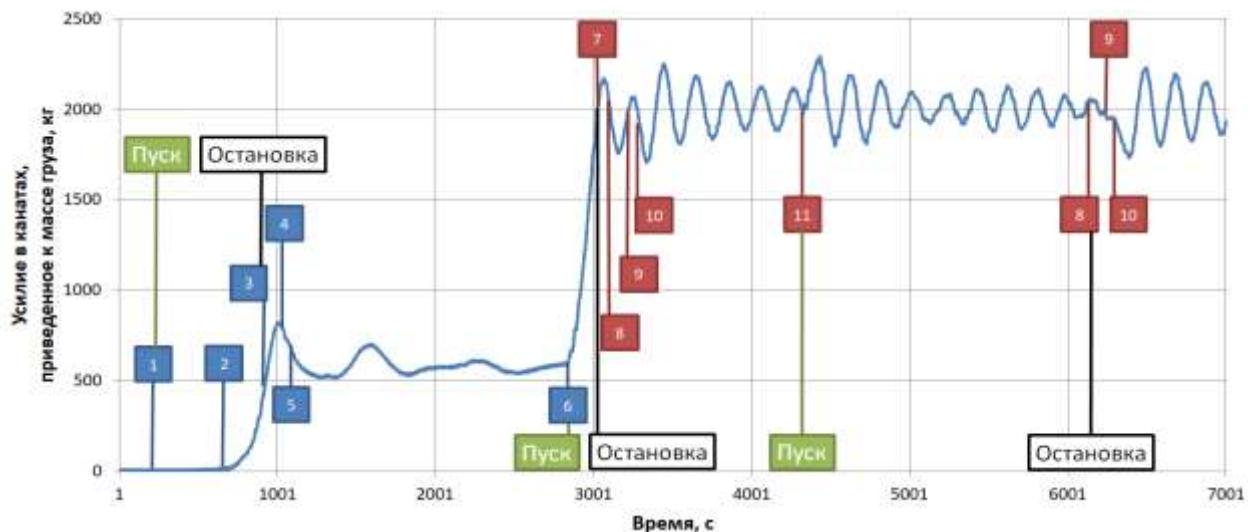


Рис. 1. Обобщенный цикл работы механизма подъема:

1 – «Пуск двигателя до начала натяжения канатов», 2 – «Натяжение канатов под действием усилия двигателя», 3 – «Свободный выбег до отрыва груза от основания», 4 – «Наложение тормоза до отрыва груза от основания», 5 – «Пауза до отрыва груза от основания», 6 – «Повторный пуск двигателя при натянутых канатах», 7 – «Подъем при включенном двигателе», 8 – «Свободный выбег после отрыва груза от основания», 9 – «Наложение тормоза после отрыва груза от основания», 10 – «Удержание груза», 11 – «Повторный пуск двигателя после отрыва груза от основания».

Основой для описания восьми расчетных случаев («Пуск двигателя до начала натяжения канатов», «Натяжение канатов под действием усилия двигателя», «Свободный выбег до отрыва груза от основания», «Наложение тормоза до отрыва груза от основания», «Подъем при включенном двигателе», «Свободный выбег после отрыва груза от основания», «Наложение тормоза после отрыва груза от основания», «Удержание груза») послужили классические одно-, двух- и трехмассовые динамические модели, разработанные Ф. Куртом, М. Шеффлером, Г. Пайером, С.А. Казаком, Н.А. Лобовым и уточненные Л.Я. Будиковым, В.В. Колмыковым, А.Н. Орловым, Д.Н. Спицыной, Д.Ю. Орловым, И.Г. Однокопыловым, А.В. Гусевым, а три расчетных случая («Пауза до отрыва груза от основания», «Повторный пуск двигателя при натянутых канатах», «Повторный пуск двигателя после отрыва груза от основания») являются новыми, ранее не рассмотренными в литературе.

При разработке динамической модели использованы следующие допущения: тормозное усилие прикладывается одномоментно с полной величиной; при отрыве от основания груз совершает поступательное движение; груз недеформируемый; жесткость подкрановой конструкции и опор в случае козловых кранов не учитывается; при пуске электродвигателя свободной составляющей тока в обмотках статора и ротора пренебрегаем.

Для описания расчетного случая «Пауза до отрыва груза от основания» (Рис. 2, а) введено дифференциальное уравнение затухающего движения приведенной массы металлоконструкции и грузовой тележки при отсутствии внешних силовых факторов на этапе работы механизма подъема до отрыва груза от основания.

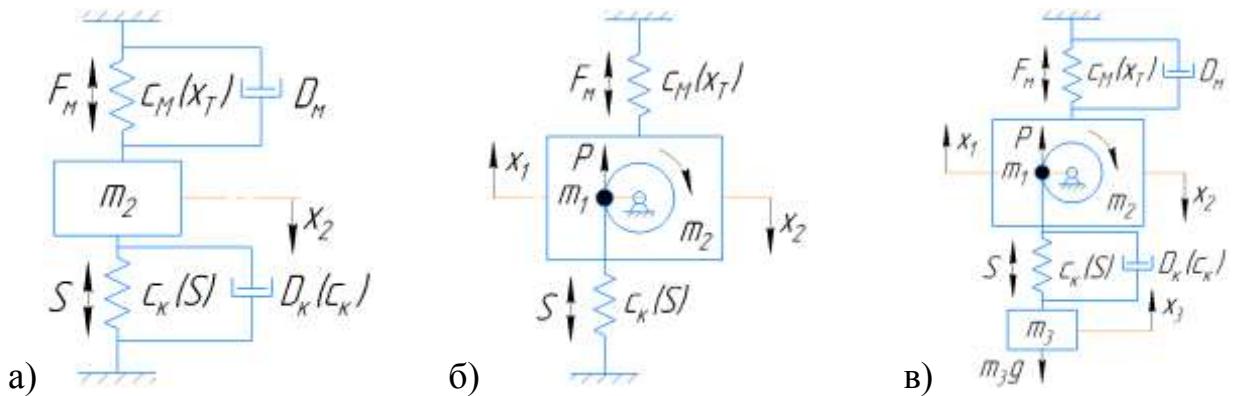


Рис. 2. Схемы введенных расчетных случаев:

а) «Пауза до отрыва груза от основания»; б) «Повторный пуск двигателя при натянутых канатах»; в) «Повторный пуск двигателя после отрыва груза от основания». m_1 – масса вращающихся частей; x_1 – перемещение m_1 ; m_2 – приведенная масса металлоконструкции и грузовой тележки; x_2 – перемещение m_2 ; m_2 – масса груза; x_3 – перемещение m_3 ; P – движущее усилие двигателя; S – усилие в канатном подвесе; c_k – жесткость канатного подвеса; D_k – коэффициент демпфирования канатного подвеса; c_m – жесткость металлоконструкции; D_m – коэффициент демпфирования металлоконструкции; F_m – усилие в металлоконструкции; T – тормозное усилие.

При рассмотрении расчетного случая «Повторный пуск двигателя при натянутых канатах» (Рис. 2, б) снято допущение классического расчетного случая «Подъем с упругим подхватом» о нулевой скорости приведенной массы металлоконструкции и тележки на момент начала расчетного случая.

При рассмотрении расчетного случая «Повторный пуск двигателя после отрыва груза от основания» (Рис. 2, в) снято допущение классического расчетного случая «Подъем с весом» о нулевых скоростях груза и приведенной массы металлоконструкции и грузовой тележки на момент его начала.

Для расчетных случаев «Натяжение канатов под действием усилия двигателя», «Подъем при включенном двигателе», «Свободный выбег до отрыва груза от основания» и «Свободный выбег после отрыва груза от основания» введены новые конечные и начальные условия, связанные с полным или частичным истечением времени отклика (при релейно-контакторной) или замедления (при частотной системе управления):

$$S = m_3 g \cup t_k < t_{\text{к.о.}} + t_{\text{откл/зам}}: t_{\text{откл/зам}}^{\text{ост}} = t_{\text{откл/зам}} - (t_k - t_{\text{к.о.}}) \quad (2)$$

где t_k – время конца расчетного случая; $t_{\text{к.о.}}$ – время подачи команды на отключение привода; $t_{\text{откл/зам}}$ – полное время отклика / замедления; $t_{\text{откл/зам}}^{\text{ост}}$ – оставшееся время отклика / замедления.

Для расчетных случаев «Свободный выбег до отрыва груза от основания», «Свободный выбег после отрыва груза от основания», «Наложение тормоза до отрыва груза от основания» и «Наложение тормоза после отрыва груза от основания» введены новые начальные и конечные условия, связанные с истечением полного $t_{\text{з. торм}}$ или частичного $t_{\text{з. торм}}^{\text{ост}}$ времени задержки наложения тормоза:

$$S = m_3 g \cup t < t_{\text{з. торм}}: t_{\text{з. торм}}^{\text{ост}} = t_{\text{з. торм}} - t_k \quad (3)$$

Для описания выявленных одиннадцати расчетных случаев работы механизма подъема получены следующие дифференциальные уравнения:

$$1. m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} = P; (\Delta_K = 0),$$

$$2. \begin{cases} m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} = P - S(c_K(S), \Delta x_K); \\ m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = S(c_K(S), \Delta x_K) - F_M(c_M(x_T)); \end{cases} (S = m_3 g \cup t_2 = t_{K.O.} + t_{откл}),$$

$$3. \begin{cases} m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} = -S(c_K(S), \Delta x_K); \\ m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = S(c_K(S), \Delta x_K) - F_M(c_M(x_T)); \end{cases} (S = m_3 g \cup t_3 = t_{3.топм}),$$

$$4. \begin{cases} m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} = -S(c_K(S), \Delta x_K) - T; \\ m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = S(c_K(S), \Delta x_K) - F_M(c_M(x_T)); \end{cases} (S = m_3 g \cup \dot{x}_{1K} = 0),$$

$$5. m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = c_K(S_0)x_2 + D_K(c_K(S_0))\dot{x}_2 - c_M(x_T)x_2 - D_M(c_M(x_T))\dot{x}_2; (\dot{x}_1 = +0),$$

$$6. \begin{cases} m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} = P - S(c_K(S), \Delta x_K); \\ m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = S(c_K(S), \Delta x_K) - F_M(c_M(x_T)); \end{cases} (S = m_3 g \cup t_2 = t_{K.O.} + t_{откл}),$$

$$7. \begin{cases} m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} = P - c_K(S_0, l_K) \cdot (x_1 - x_2 - x_3) - D_K(c_K(S_0, l_K)) \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2 - \dot{x}_3); \\ m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = c_K(S_0, l_K) \cdot (x_1 - x_2 - x_3) + D_K(c_K(S_0, l_K)) \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2 - \dot{x}_3) - \\ - c_M(x_T) \cdot x_2 - D_M(c_M(x_T)) \cdot \dot{x}_2; \\ m_3 \frac{d^2x_3}{dt^2} = c_K(S_0, l_K) \cdot (x_1 - x_2 - x_3) + D_K(c_K(S_0, l_K)) \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2 - \dot{x}_3) - m_3 \cdot g; \end{cases}$$

$$8. \begin{cases} m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} = -c_K(S_0, l_K) \cdot (x_1 - x_2 - x_3); \\ m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = c_K(S_0, l_K) \cdot (x_1 - x_2 - x_3) - c_M(x_T) \cdot x_2; \\ m_3 \frac{d^2x_3}{dt^2} = c_K(S_0, l_K) \cdot (x_1 - x_2 - x_3) - m_3 \cdot g; \end{cases} (t_8 = t_3 + t_{3.топм} - t_{K.O.} \cup t_8 = t_{7/11} + t_{3.топм}),$$

$$9. \begin{cases} m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} = -c_K(S_0, l_K) \cdot (x_1 - x_2 - x_3) - T, \\ m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = c_K(S_0, l_K) \cdot (x_1 - x_2 - x_3) - c_M(x_T) \cdot x_2 \ (\dot{x}_{1K} = 0) \\ m_3 \frac{d^2x_3}{dt^2} = c_K(S_0, l_K) \cdot (x_1 - x_2 - x_3) - m_3 \cdot g. \end{cases}$$

$$10. \begin{cases} m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = c_K(S_0, l_K) \cdot (-x_2 - x_3) + D_K(c_K(S_0, l_K)) \cdot (-\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - \\ - c_M(x_T) \cdot x_2 - D_M(c_M(x_T)) \cdot \dot{x}_2 \ (\dot{x}_{1K} = +0), \\ m_3 \frac{d^2x_3}{dt^2} = c_K(S_0, l_K) \cdot (-x_2 - x_3) + D_K(c_K(S_0, l_K)) \cdot (-\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - m_3 \cdot g. \end{cases}$$

$$11. \begin{cases} m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} = P - c_K(S_0, l_K) \cdot (x_1 - x_2 - x_3) - D_K(c_K(S_0, l_K)) \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2 - \dot{x}_3) \\ m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = c_K(S_0, l_K) \cdot (x_1 - x_2 - x_3) + D_K(c_K(S_0, l_K)) \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2 - \dot{x}_3) - \\ - c_M(x_T) \cdot x_2 - D_M(c_M(x_T)) \cdot \dot{x}_2 \\ m_3 \frac{d^2x_3}{dt^2} = c_K(S_0, l_K) \cdot (x_1 - x_2 - x_3) + D_K(c_K(S_0, l_K)) \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2 - \dot{x}_3) - \\ - m_3 \cdot g \end{cases} (t_{11} = t_{откл} \cup t_{11} = t_{откл} - t_{2/6})$$

где Δ_k – слабина канатов; Δx_k – деформация канатов; x_t – координата грузовой тележки; S_0 – усилие в канатах в момент отрыва груза от основания; l_k – длина канатного подвеса.

Учет жесткости металлоконструкции непрерывной функцией в зависимости от положения грузовой тележки в пролете – формула (4) или на консоли – формула (5) позволил снять допущение классических расчетных случаев с положением грузовой тележки на краю или в середине пролета:

$$c_m^{\text{пр}} = \frac{144 \cdot \delta_{\text{сеп}}}{x_t^2 \cdot l_{\text{пр}}^4 \cdot m \cdot g \cdot \left(1 - \frac{x_t}{l_{\text{пр}}}\right)^2}, \quad (4)$$

где $c_m^{\text{пр}}$ – жесткость пролетной металлоконструкции; $\delta_{\text{сеп}}$ – прогиб металлоконструкции при подъеме груза массой m и положении тележки в середине пролета; $l_{\text{пр}}$ – длина пролета;

$$c_m^k = \frac{(l_{\text{пр}}^3 + x_t^3) \cdot \delta_{\text{max}}}{m \cdot g \cdot (l_{\text{пр}}^3 + l_k^3)}, \quad (5)$$

где c_m^k – жесткость металлоконструкции при положении тележки на консоли; δ_{max} – прогиб на краю консоли от груза массой m и положении тележки на краю консоли; l_k – длина консоли.

На основе работ В.В. Пастухова, Е.В. Попова, Г.Б. Онищенко, К.В. Корнеева, Ш.Т. Дадабаева, В.А. Денисова, А.Н. Шилина, В.С. Ловейкина путем учета в формуле движущего усилия двигателя особенностей регулирования скорости при частотной или релейно-контакторной системе управления снято допущение о работе электродвигателя на естественной механической характеристике.

На основе обработки экспериментальных данных С.Л. Смолякова, А.В. Гусева, Н.А. Лобова, В.М. Мусалимова, В.К. Кабанова, Г.Д. Трифанова снято допущение о постоянстве жесткости канатного подвеса путем ее учета нелинейной функцией:

$$c_k(S) = \sum_{i=1}^3 i a_i \left(\sum_{j=0}^3 b_j S^j \right)^{i-1}, \quad (6)$$

где a_i и b_j – коэффициенты полиномов, аппроксимирующих функции $S(\Delta x_k)$ и $\Delta x_k(S)$ соответственно.

Таким образом, получена математическая модель, полностью определяющая динамическую нагрузку на механизм подъема в обобщенном цикле работы крана мостового типа, оснащенного релейно-контакторной или частотной системой управления, при произвольном положении грузовой тележки и наборе команд управления, которая впервые позволила учесть работу механизма подъема, оснащенного ОГП (за счет введенных расчетных случаев «Пауза до отрыва груза от основания», «Повторный пуск двигателя при натянутых канатах», «Повторный пуск двигателя после отрыва груза от основания»).

В Главе 3 на основании разработанной в Главе 2 динамической модели разработаны пять алгоритмов безопасности (три алгоритма ОГП и два РП).

Предложен «Способ экспериментального определения жесткости канатного подвеса для кранов мостового типа» (патент № RU 2803775 С1 на изобретение).

Способ отличается одновременным измерением усилия в канатном подвесе и его деформации, а также учетом деформации металлоконструкции крана.

Для кранов с частотной системой управления разработан алгоритм ОГП, основанный на обработке информации о скорости и перемещении вращающихся масс, усилии в канатном подвесе, его жесткости и деформации, что позволило при его реализации не использовать аварийные режимы управления приводом механизма подъема.

Для кранов с частотной или релейно-контакторной системой управления, в развитие работ С.Д. Иванова и Н.Л. Михальчика, разработаны расчетно-экспериментальные методики автоматизированного определения настроенных параметров алгоритма ОГП: промежуточного порога и порога безусловного запрета. Методики базируются на обработке информации об усилии в канатном подвесе, его жесткости и деформации, скорости и перемещении вращающихся масс, времени и пути отклика.

Величина промежуточного порога в случае релейно-контакторной системы управления $S_{\text{п}}^{\text{p.-к.}}$ определяется по формуле:

$$S_{\text{п}}^{\text{p.-к.}} = S(\Delta x_{\text{к}}(1,25m_{\text{ном}}g) - x_{\text{отк}}), \quad (7)$$

где $x_{\text{отк}}$ – путь отключения (расстояние, пройденное массой вращающихся частей от момента подачи команды на отключение до полной остановки привода).

Величина промежуточного порога в случае частотной системы управления $S_{\text{п}}^{\text{ч.}}$ определяется по формуле:

$$S_{\text{п}}^{\text{ч.}} = S(\Delta x_{\text{к}}(m_{\text{ном}}g) - x_{\text{зам}}^{\nu_{\text{max}} \rightarrow \nu_{\text{min}}}), \quad (8)$$

где $x_{\text{зам}}^{\nu_{\text{max}} \rightarrow \nu_{\text{min}}}$ – путь замедления, пройденный вращающимися массами при переходе с повышенной до пониженной скорости.

Величина порога безусловного запрета в случае релейно-контакторной системы управления $S_{6.3.}^{\text{p.-к.}}$ определяется по формуле:

$$S_{6.3.}^{\text{p.-к.}} = (S_{m_{\text{ном}}}^{\text{max}, S_{\text{п}}} + S_{1,25m_{\text{ном}}}^{\text{max}, S_{\text{п}}})/2, \quad (9)$$

где $S_{m_{\text{ном}}}^{\text{max}, S_{\text{п}}}$ и $S_{1,25m_{\text{ном}}}^{\text{max}, S_{\text{п}}}$ – максимальная нагрузка при подъеме номинального груза и груза 125% от номинального соответственно при отключении привода по промежуточному порогу.

Величина порога безусловного запрета в случае частотной системы управления $S_{6.3.}^{\text{ч.}}$ определяется по формуле:

$$S_{6.3.}^{\text{ч.}} = [S(\Delta x_{\text{к}}(1,25m_{\text{ном}}g) - x_{\text{зам}}^{\nu_{\text{min}} \rightarrow 0}) + S_{m_{\text{ном}}}^{\text{max}, \nu_{\text{min}}}] / 2, \quad (10)$$

где $x_{\text{зам}}^{\nu_{\text{min}} \rightarrow 0}$ – путь замедления с пониженной скорости до нуля; $S_{m_{\text{ном}}}^{\text{max}, \nu_{\text{min}}}$ – максимальная нагрузка при подъеме номинального груза на пониженной скорости.

Получены расчетные зависимости, позволяющие оценить точность параметров предложенных алгоритмов ОГП в зависимости от характеристик датчикового оснащения для обеспечения надежности выполнения функции защиты крана от работы за пределами грузовой характеристики.

Оценка сверху ошибки фиксации промежуточного порога $\Delta S_{\text{п}}$ в зависимости от периода опроса датчика нагрузки $t_{\text{опроса}}$:

$$\Delta S_{\text{п}} = t_{\text{опроса}} \cdot c_{\text{к.}max} \frac{\pi D_{\text{бар}} n_0}{60 \cdot u \cdot a}, \quad (11)$$

где $c_{\text{к.}max}$ – максимальная жесткость канатного подвеса; $D_{\text{бар}}$ – диаметр барабана; n_0 – синхронная частота вращения электродвигателя; u – передаточное отношение редуктора; a – кратность полиспаста.

Ошибка определения пиковой нагрузки (точность фиксации порога безусловного запрета $\Delta S_{6.3.}$) в зависимости от периода опроса датчика нагрузки:

$$\Delta S_{6.3.} = \frac{(P - m_{\text{ном}}g)m_{\text{ном}}}{m_1 + m_{\text{ном}}} \left[1 + \cos \left(\frac{t_{\text{опроса}}}{2} \sqrt{c_{\text{к}} \cdot \frac{m_1 + m_{\text{ном}}}{m_1 \cdot m_{\text{ном}}}} + \pi \right) \right], \quad (12)$$

Ошибка определения порогов срабатывания ОГП (промежуточного и безусловного запрета) $\Delta S_{\text{опр.п.}}$ в зависимости от разрешения p инкрементального датчика скорости и битовой глубины R аналого-цифрового преобразователя датчика нагрузки:

$$\Delta S_{\text{опр.п.}} = c_{\text{к.}max} \frac{\pi D_{\text{бар}}}{u \cdot a \cdot p} + \frac{k_{\text{у.в.}}}{2^R} m_{\text{ном}}g, \quad (13)$$

где $k_{\text{у.в.}}$ – коэффициент запаса прочности тензодатчика.

Разработан алгоритм определения нагрузки на механизм подъема и интенсивности его использования, базирующийся на обработке информации о скорости электродвигателя и активной мощности привода. Изменение паспортных характеристик электродвигателя, вызванное отклонением от номинальных значений параметров электрической сети, учтено применением корректировки по текущим значениям частоты и напряжения:

$$M_{\text{дв}} = 9,55 \frac{k_{\text{эд}}}{n_{\text{дв}}} \left(A_{\text{изм}}(U_{\text{изм}}, f_{\text{изм}}) \left(\frac{f_{\text{изм}}}{f_{\text{ном}}} \right)^2 + \frac{A_{\text{ном}}(U_1)}{A_{\text{ном}}(U_2)} \cdot (U_{\text{ном}} - U_{\text{изм}}) - A_{\text{торм}} \right) k_{\text{ПЧ}}, \quad (14)$$

где $M_{\text{дв}}$ – момент двигателя механизма подъема; $k_{\text{эд}}$ – КПД двигателя; $n_{\text{дв}}$ – скорость двигателя; $A_{\text{изм}}$ – измеренная активная мощность двигателя; $U_{\text{изм}}, f_{\text{изм}}$ – измеренное напряжение, частота питающей сети; $U_{\text{ном}}, f_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, частота питающей сети; $A_{\text{ном}}(U_j)$ – значение активной мощности, полученное при подъеме номинального груза при напряжении U_j ; $A_{\text{торм}}$ – активная мощность тормоза механизма подъема; $k_{\text{ПЧ}}$ – КПД преобразователя частоты.

Разработан алгоритм определения массы поднимаемого груза и интенсивности использования крана в целом, базирующийся на обработке информации об усилии в канатном подвесе, его жесткости и деформации, перемещении и ускорении вращающихся масс. Для адаптации алгоритма к условиям длительно затухающего ограниченного по времени динамического процесса реализована функция контроля установившегося движения и применен фильтр скользящего среднего, выбранный по критериям точности, требовательности к вычислительным ресурсам, скорости и стабильности сходимости. Длина окна сглаживания L_{buf} фильтра определяется двумя предложенными способами: расчетным (в момент отрыва груза от основания) и экспериментальным (по истечении W опорных полуволн усилия в канатах):

$$L_{buf}^p = 2\pi \sqrt{\frac{S_{отр}}{9,81 \cdot \sum_{i=1}^3 ia_i (\sum_{j=0}^3 b_j S^j)^{i-1}}} \quad (14)$$

$$L_{buf}^{\vartheta} = \frac{2}{W} \cdot \sum_i^W |t_{max}^i - t_{min}^i| \quad (15)$$

где $S_{отр}$ – усилие в канатном подвесе в момент отрыва груза от основания; t_{max}^i – время i -го максимума нагрузки; t_{min}^i – время i -го минимума нагрузки.

В Главе 4 описан созданный при участии автора прототип прибора безопасности кранов мостового типа (Прибор – Рис. 3), изготовленный ООО «ИТЦ «КРОС», реализующий разработанный метод и предназначенный для экспериментальной оценки качества работы алгоритмов безопасности.



Рис. 3. Прототип прибора безопасности кранов мостового типа:

1 – микропроцессорный блок; 2 – датчик нагрузки; 3 – инкрементальный энкодер (разрешение 80 имп/об); 4 – датчик параметров электрической сети (точность определения активной мощности $\pm 1\%$, напряжения и частоты $\pm 0,5\%$); 5 – плата аналого-цифрового преобразователя (частота опроса 500 Гц, битовая глубина 16 бит); 6 – нормировочное оборудование

Микропроцессорный блок состоит из микропроцессорного модуля и разработанной автором платы ввода-вывода. Микропроцессорный модуль, построенный на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi 4, выполняет преобразование сигналов датчиков в динамические параметры, их алгоритмическую обработку и генерацию команд управления приводами. Плата ввода-вывода предназначена для питания микропроцессорного модуля и датчиков, согласования их интерфейсов и связи с системой управления крана посредством исполнительных реле.

Разработанное автором программное обеспечение на языке Python реализует автоматизированную настройку Прибора путем анализа динамических процессов при тестовых подъемах контрольных грузов, защиту крана от работы за пределами номинальной грузоподъемности и определение интенсивности использования механизма подъема и крана в целом.

Лабораторное исследование проводилось на кафедре «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана с использованием мостового крана грузоподъемностью 2 т. Ошибка определения массы груза при продолжительности цикла 10 с составила 1,2%. Время измерения массы груза в цикле с точностью 3% не превысило 5 с. Точность определения нагрузки на механизм подъема и интенсивности его использования составила 1,5%.

Стендовые испытания функции ограничения грузоподъемности Прибора проведены на установленной в сборочном цехе ООО «ИТЦ «КРОС» тали электрической грузоподъемностью 5 т, оснащенной релейно-контакторной

системой управления. Экспериментально установленное снижение пиковой нагрузки составило 5...12% (Рис. 4) при подъеме номинального груза и 10...12% при попытке подъема груза $1,25m_{\text{ном}}$ (диапазон соответствует крайним значениям жесткости металлоконструкции в зависимости от положения тележки). Показано, что при настройке ОГП при максимальной жесткости металлоконструкции выполняются требования по защите крана во всем диапазоне положений грузовой тележки.

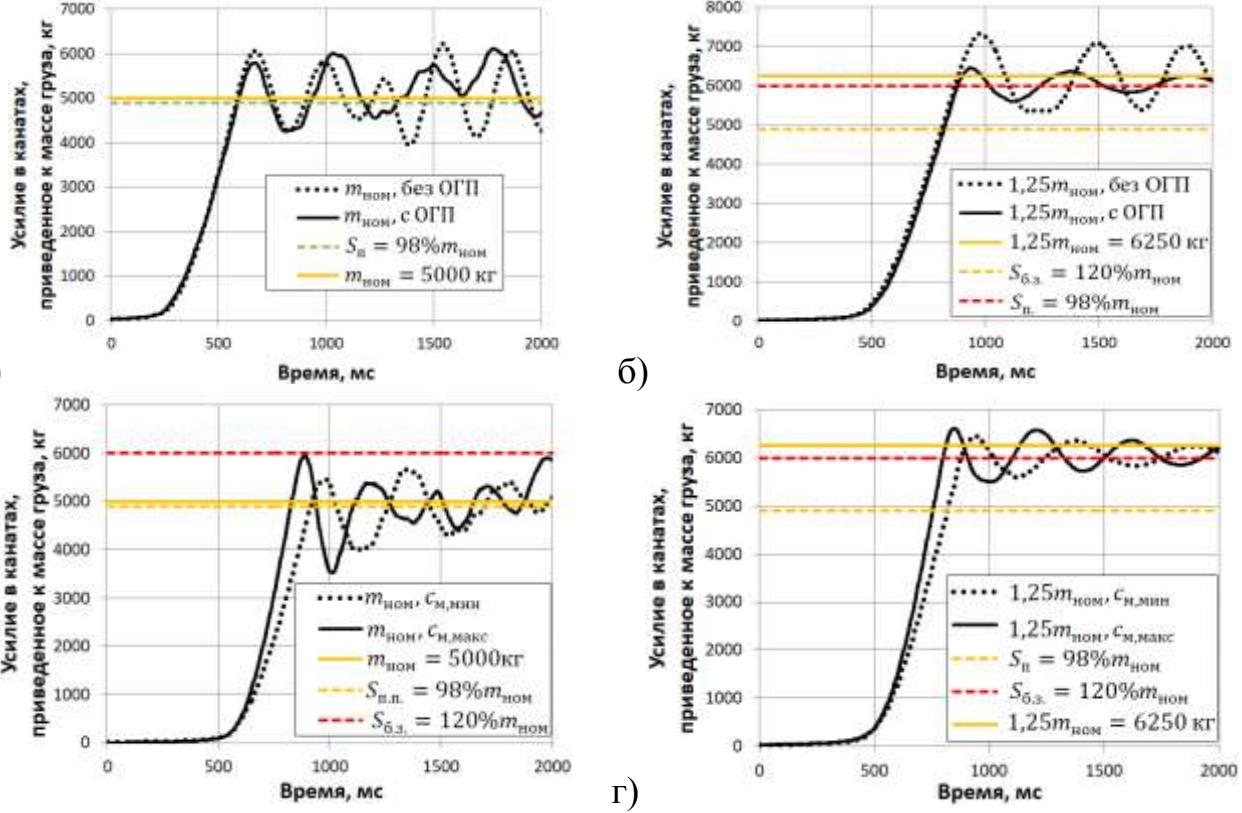


Рис. 3. Влияние алгоритма ОГП на динамические процессы в механизме подъема:

а) подъем номинального груза с ОГП и без него (середина пролета); б) подъем груза $125\%m_{\text{ном}}$ с ОГП и без него (середина пролета); в) подъем номинального груза с ОГП (середина и край пролета); г) подъем груза $125\%m_{\text{ном}}$ с ОГП (середина и край пролета)

Натурные испытания Прибора проведены на мостовом кране ОПТИМ-Кран грузоподъемностью 15 т, оснащенном частотной системой управления и обслуживающим технологический процесс на АО «Тихвинский вагоностроительный завод». Сравнение эксплуатационных характеристик Прибора со штатной системой безопасности крана ControlPro от KoneCranes (Финляндия) показало снижение динамической нагрузки на кран во всем диапазоне масс грузов, при этом наибольший эффект достигается в области оклономинальных нагрузок – двукратное снижение динамической составляющей (Рис. 5).

В режиме подъема с подхватом запрещенного для отрыва груза массой $1,27m_{\text{ном}}$ пиковая нагрузка не превысила $1,25m_{\text{ном}}g$ (при этом статическая составляющая равнялась $1,17m_{\text{ном}}g$), в то время как штатная система не предотвратила отрыв груза, а пиковая нагрузка составила $1,53m_{\text{ном}}g$.

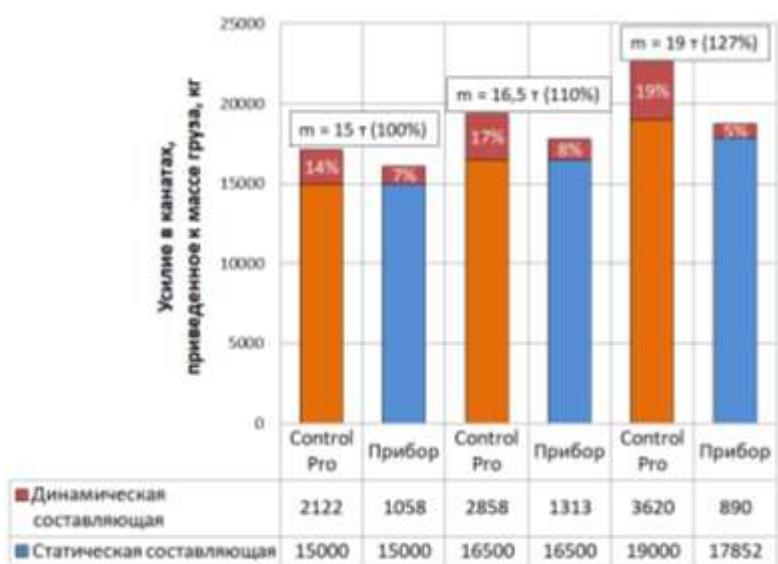


Рис. 5. Сравнение динамических характеристик механизма подъема, оснащенного Прибором и системой безопасности ControlPro

Ошибка определения интенсивности использования крана в условиях реального технологического процесса (масса грузов 8...15 т, продолжительность циклов 5...30 с, задействование механизмов передвижения), приведенная к выработке характеристического числа за рассматриваемый промежуток времени, не превышает 2,5% при ошибке определения массы груза не более 1,5%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основе теоретического и экспериментального исследования отечественных и зарубежных ОГП и РП сделан вывод о недостаточном уровне защищенности кранов мостового типа от случаев превышения номинальной грузоподъемности, неизученности влияния алгоритма работы ОГП на динамические процессы и неприемлемом уровне точности работы РП. Обоснована целесообразность разработки метода обработки первичной информации в приборах безопасности на основе теории динамики грузоподъемных машин.

2. Разработана динамическая модель механизма подъема в обобщенном цикле работы крана мостового типа, включающая 11 расчетных случаев, 3 из которых являются новыми, а 8 уточнены за счет дополнения начальных и конечных условий. Полученные формулы жесткости металлоконструкции, движущего усилия двигателя и жесткости канатного подвеса позволили описать динамический процесс при произвольном положении грузовой тележки, работе с грузом произвольной массы для кранов с релейно-контакторной или частотной системой управления.

3. Предложены алгоритмы ОГП и настройки ОГП для кранов с релейно-контакторной или частотной системой управления, позволившие защитить кран от недопустимых нагрузок при попытках работы за пределами номинальной грузоподъемности (по требованиям ГОСТ 32575.1-2015) и снизить динамическую составляющую нагрузки при работе в пределах грузовой характеристики. Обоснован набор параметров алгоритмов: усилие в канатном подвесе, его жесткость и деформация, перемещение и скорость вращающихся масс. Получены расчетные зависимости для определения требований к датчиковому оснащению.

4. Разработаны алгоритмы РП, позволяющие оценить интенсивность использования механизма подъема и крана в целом с точностью,

удовлетворяющей требованиям ГОСТ 33713-2015. Обоснован набор параметров алгоритмов: усилие в канатном подвесе, его жесткость, перемещение и скорость масс вращающихся частей, активная мощность привода, частота и напряжение питающей сети. Обеспечение точности весоизмерения достигнуто расчетным и экспериментальным способами определения длины окна сглаживания, используемыми на разных участках динамического процесса, и функцией контроля установившегося движения.

5. Создан прототип прибора ОГП и РП с программным обеспечением, реализующим разработанные алгоритмы безопасности. Экспериментально подтверждена достаточность набора и качества источников первичной информации (частота опроса датчика нагрузки: 500 Гц, битовая глубина: 16 бит, разрешение энкодера: 80 имп/об, частота опроса датчика параметров электрической сети: 1 Гц, точность измерения активной мощности: $\pm 1\%$, точность измерения частоты и напряжения: $\pm 0,5\%$) для недопущения отрыва от основания при попытке подъема груза массой 125% от номинальной, а также расчета интенсивности использования механизма подъема и крана в целом с точностью не хуже 3%.

6. Экспериментально установленное снижение пиковой нагрузки на механизм подъема крана в случае релейно-контакторной системы управления составило 5...12% (в зависимости от положения грузовой тележки) при подъеме номинального груза и 11...12% при попытке подъема груза запрещенной массы. В случае частотной системы управления пиковые нагрузки на механизм подъема крана не превышают $125\%m_{\text{ном}}g$ при любых приемах управления и работе с грузом произвольной массы (в том числе за пределами паспортной грузоподъемности). Доказано снижение пиковых нагрузок в сравнении с импортной системой безопасности во всем диапазоне поднимаемых грузов, при этом наибольшее снижение достигается в зоне оклономинальных грузов (9%).

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Назаров А.Н., Иванов С.Д. Алгоритмическая обработка объективной информации о характере работы кранов мостового типа // Материалы международной научно-практической конференции «Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в машиностроительной, дорожной и строительной отраслях – 2023». Белгород. 2023. С. 178-184. (0,29 п.л./ 0,2 п.л.).
2. Назаров А.Н., Иванов С.Д. Исследование влияния работы ограничителя грузоподъемности с промежуточными порогами на безопасность кранов мостового типа // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2023. № 1. С. 41-52. (0,57 п.л./ 0,45 п.л.).
3. Михалев А.В., Назаров А.Н. Применение алгоритма скользящего среднего для задачи определения массы груза // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2023. № 2. С. 44-57. (0,74 п.л./ 0,55 п.л.).
4. Объективная информация о работе подъемно-транспортных машин как основа повышения качества информационных систем грузообрабатывающих

- предприятий / А.Н. Назаров [и др.] // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2023. № 2. С. 81-96. (1,02 п.л./ 0,6 п.л.)
5. Назаров А.Н. Движущее усилие двигателя механизма подъема кранов мостового типа в реальных условиях эксплуатации // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2023. Т. 20, №1(89). С. 34-50. (1,12 п.л.).
6. Назаров А.Н., Иванов С.Д. Использование алгоритма весоизмерения на основе фильтра скользящего среднего в регистраторе параметров работы мостового крана // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2023. Т. 20, № 4(92). С. 418-431. (0,98 п.л./ 0,5 п.л.).
7. Назаров А.Н., Иванов С.Д. Оценка применимости электрических параметров привода для определения нагрузки на механизм подъема кранов мостового типа // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2022. Т. 19, № 1(83). С. 36-47. (0,84 п.л./ 0,6 п.л.).
8. Назаров А.Н., Иванов С.Д. Экспериментальное и теоретическое определение частоты опроса датчика нагрузки для защиты механизма подъема крана от перегрузок // Труды «XXXIII Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2021)». Москва. 2021. С. 157-162. (0,38 п.л./ 0,25 п.л.).
9. Применение имитационной логистической модели складирования в целях повышения качества принятия управлеченческих решений на грузоперерабатывающем предприятии / А.Н. Назаров [и др.] // Материалы конференции «Устойчивое развитие и новая индустриализация: наука, экономика, образование». Москва. 2021. С. 243-248. (0,3 п.л./ 0,2 п.л.).
10. Selection of a rational algorithm for data processing of the weight measuring system of a hoisting crane / A.N. Nazarov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing Ltd. 012047(2021). doi: 10.1088/1742-6596/1926/1/012047. (0,4 п.л./ 0,2 п.л.).
11. Nazarov A.N., Ivanov S.D. Experimental and theoretical determination of the load cell polling frequency to protect the crane hoisting mechanism from overloads // AIP Conf. Proc. 2697 (1), 030008 (2021). (0,4 п.л./ 0,2 п.л.).
12. Иванова Н.Ю., Назаров А.Н. Внедрение технологий цифровизации в процесс обеспечения эксплуатации промышленного оборудования // Сборник научных трудов международного форума по контроллингу «Контроллинг в экономике, организации производства и управлении». Москва. 2021. С. 93-103. (0,43 п.л./ 0,25 п.л.).
13. Назаров А.Н., Завальная Л.В. Определение группы классификации режима работы крана на основе объективной информации о характере его работы // Материалы 25 Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы». Москва. 2021. С. 80-84. (0,2 п.л./ 0,1 п.л.).
14. Способ экспериментального определения жесткости канатного подвеса для кранов мостового типа: Патент РФ № 2803775 / А.Н. Назаров, С.Д. Иванов, В.А. Потапов; заявл. 29.12.2022; опубл. 19.09.2023. Бюлл. №26.