

УДК 621.86

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843>

EDN: TYGGUV



РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРИБОРА БЕЗОПАСНОСТИ КРАНОВ МОСТОВОГО ТИПА

А.Н. Назаров^{1,2} ✉, **С.Д. Иванов¹**¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия²ООО «ИТЦ «КРОС»,

г. Ивантеевка, Россия

✉ ответственный автор
alexnazavr@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Перечислены экспериментально выявленные недостатки отечественных комплексных приборов безопасности в части ограничения грузоподъемности и регистрации параметров. Обоснованы причины, по которым недопустимо переоснащение кранов под управлением зарубежных систем безопасности на существующие отечественные приборы. Предложено обеспечивать безопасность таких кранов за счет разработки приборов безопасности, учитывающих динамические характеристики конкретного крана и алгоритмы управления его приводами.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием разработанного прибора безопасности, реализующего функции ограничения грузоподъемности, автоматического определения параметров алгоритма ОГП, определения интенсивности работы крана в целом. Приведено описание данных алгоритмов применительно к кранам, оснащенным частотной системой управления. Экспериментальное определение эксплуатационных параметров прибора проведено на мостовом кране, оснащенном системой безопасности ControlPro (KoneCranes).

Результаты. Применение прибора позволило снизить коэффициент динамичности при подъеме с подхватом во всем диапазоне масс поднимаемых грузов. При подъеме околономинальных грузов зафиксировано двукратное снижение динамической составляющей. Точность определения характеристического числа составила 1,3%.

Обсуждение и заключение. Продемонстрировано, что разработанный алгоритм ограничения грузоподъемности позволил не только повысить защищенность крана, но и снизить нагрузки на него, в сравнении со штатной системой безопасности. Точность определения рабочих параметров в условиях реального технологического процесса удовлетворяет требованиям нормативной документации. Таким образом, показана допустимость дублирования или замены части функций штатной системы безопасности путем применения разработанного прибора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мостовой кран, механизм подъема, прибор безопасности, ограничитель грузоподъемности, регистратор параметров, защита от перегрузки, наработка крана

Статья поступила в редакцию 14.11.2024; одобрена после рецензирования 26.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Назаров А.Н., Иванов С.Д. Разработка перспективного прибора безопасности кранов мостового типа // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 826-843. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843>

© Назаров А.Н., Иванов С.Д., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843>

EDN: TYGGUV

DEVELOPING AN ADVANCED SAFETY DEVICE FOR BRIDGE-TYPE CRANES

Aleksandr N. Nazarov^{1,2}✉, Sergey D. Ivanov¹

¹Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russia

²ETC KROS LLC,
Ivanteevka, Russia

✉ corresponding author
alexnazavr@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Experimentally revealed disadvantages of domestic complex safety devices in the part of load capacity limitation and parameters registration are described. The reasons why it is inadmissible to re-equip cranes under the control of foreign safety systems to the existing domestic devices are explained. It is suggested to achieve the safety of such cranes through the development of safety devices that take into account the dynamic characteristics of a particular crane and control algorithms of its drives.

Materials and methods. The study was done using the developed safety device realizing the functions of load capacity limitation, automatic determination of the parameters of the load capacity limiter algorithm, determination of the crane operation intensity. The description of these algorithms in relation to cranes equipped with frequency control system is given. Experimental determination of operational parameters of the device is carried out on an overhead crane equipped with the ControlPro safety system (KoneCranes).

Results. The use of the device allowed to decrease the dynamic coefficient in the whole range of lifted loads masses. A twofold reduction of the dynamic component was obtained when lifting near-nominal loads. The accuracy of characteristic number determination was 1.3%.

Discussion and conclusion. It is demonstrated that the developed algorithm of load capacity limitation allowed not only to increase crane security, but also to reduce the loading on the crane, in comparison with the standard safety system. The accuracy of operating parameters determination in conditions of real technological process satisfies the requirements of normative documentation. Thus, the possibility of duplicating or replacing some functions of the standard safety system by using the developed device is shown.

KEYWORDS: overhead crane, lifting mechanism, safety device, load capacity limiter, parameters recorder, overload protection, crane runtime

The article was submitted: 05.11.2024 approved after reviewing: 21.11.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Nazarov A.N., Ivanov S.D. Developing an advanced safety device for bridge-type cranes. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 826-843. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843>

© Nazarov A.N., Ivanov S.D., 2024



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство отечественных кранов мостового типа оснащаются комплексными приборами безопасности, выполняющими функции ограничения грузоподъемности и регистрации параметров. Согласно ФНП¹ ограничитель грузоподъемности должен предотвратить отрыв груза от основания, на 25% превышающий номинальный, и позволить беспрепятственно поднимать номинальный груз. Применительно к задаче регистрации параметров текущий технический уровень современных серийно выпускаемых приборов² позволяет собирать и обрабатывать информацию, необходимую для расчета остаточного ресурса крана в целом (характеристическое число, количество рабочих циклов, масса груза в каждом из циклов) и анализа аварийных ситуаций (фиксация состояния исполнительного реле ОГП)³ [1, 2]. Следует отметить, что с 2015 г. ГОСТ 33713–2015⁴ ввел требование к точности регистрируемых данных – допустимая ошибка, при которой не требуется переналадка прибора, составляет 3%.

Проведенные ранее экспериментальные исследования⁵ [3, 4] приборов серии ОГШ-2 (мостовой кран с релейно-контакторной и частотной системой управления г/п 2 т, установленный в лаборатории кафедры РК4 МГТУ им. Н.Э. Баумана) и ОНК-160М (козловой контейнерный кран г/п 45 т ПАО «Трансконтейнер») позволили выявить ряд недостатков наиболее распространенных приборов безопасности:

1. Производителями приборов безопасности недостаточно проработан вопрос подбора технических характеристик измерительной и обрабатывающей аппаратуры. Так, в частности, неправильный подбор частоты опроса

и разрешения аналого-цифрового преобразователя тензодатчика нагрузки является причиной отсутствия срабатывания ОГП при достижении нагрузкой порога безусловного запрета и существенного разброса момента подачи команды на предварительный останов при достижении нагрузкой промежуточного порога срабатывания⁶.

2. Отсутствует методика настройки параметров алгоритма ОГП, вследствие чего наладчиками приборов безопасности сохраняются заводские настройки – у части кранов, характеризующихся относительно высокой жесткостью канатного подвеса и металлоконструкции и продолжительным временем отклика системы управления и механизма на команду останова, сохраняется возможность отрыва от основания груза, превышающего номинальный на 25%.

3. Применительно к задаче регистрации параметров основную составляющую ошибки при измерении массы груза вносят два фактора: ошибка нормировки и неучет динамической составляющей нагрузки. Согласно информации, предоставленной разработчиками РП, массой груза принимается максимальное секундное осреднение нагрузки:

$$m_i = \max_{j = 1, 2, \dots, t_{ц}} \left(\frac{1}{f_{опроса}} \sum_{j=1}^{(j+1)t_{опроса}} f_{опроса} Q_j \right), \quad (1)$$

где $f_{опроса}$ – частота опроса датчика нагрузки, Гц; $t_{опроса}$ – период опроса датчика нагрузки, с; Q_j – показание датчика нагрузки при j -м опросе; $t_{ц}$ – время рабочего цикла, с.

4. К другим экспериментально зафиксированным факторам, приводящим к потере

¹ Приказ Ростехнадзора от 26.11.2020 № 461 (ред. от 22.01.2024) «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» (Зарегистрировано в Минюсте России 30.12.2020 № 61983).

² Пестич С.Д. Обзор регистраторов параметров кранового оборудования при строительстве для предотвращения аварийных ситуаций // International scientific review of the problems and prospects of modern science and education: Collection of scientific articles LVI International correspondence scientific and practical conference, Boston, USA, 24–25 марта 2019 года. Boston, USA: PROBLEMS OF SCIENCE, 2019. С. 16–18. EDNZBVTWX.

³ Михальчик Н.Л. Построение весоизмерительной системы путем расширения функционала электронного регистратора параметров работы мостового крана // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию кафедры подъемно-транспортных машин и роботов (Екатеринбург, 6 декабря 2019 г.). Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2020. С. 169–171.

⁴ ГОСТ 33713–2015 Краны грузоподъемные. Регистраторы параметров работы. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2016. 19 с.

⁵ Nazarov A., Ivanov S., Yilmaz M. Configuring the algorithm of the load limiter with intermediate threshold // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 515. P. 02015. DOI 10.1051/e3sconf/202451502015. EDN NGQCHM.

⁶ Nazarov A., Ivanov S. Experimental and theoretical determination of the load cell polling frequency to protect the crane hoisting mechanism from overloads // AIP Conference Proceedings. 2023. 2697 (1): 030008. <https://doi.org/10.1063/5.0111939>

регистрируемых данных, относятся сбои программного обеспечения, отказ прибора и ошибка фиксации начала/конца цикла (склеивание нескольких циклов нагружения крана в один, если межоперационное время менее 5 сек).

Решение задачи совершенствования приборов безопасности видится актуальным не только с точки зрения повышения защищенности отечественных кранов, но и для сохранения возможности эксплуатации зарубежных^{7,8,9}, оснащенных системами безопасности и находящихся вне системы мониторинга и обслуживания со стороны производителей¹⁰ [5, 6]. В противовес отечественному подходу, при котором за каждую функцию безопасности отвечает отдельный прибор или устройство безопасности, изолирующие информационный поток внутри себя, система безопасности позволяет создать общее информационное поле крана, обеспечивая доступ алгоритмов безопасности сразу ко всему оснащению датчика.

Проектирование конструкции крана, его механизмов и узлов с учетом работы системы безопасности в совокупности с анализом статистики по отказам в зависимости от наработки позволило перейти от задачи оценки остаточного ресурса крана в целом к прогнозированию времени безотказной работы отдельных механизмов и их узлов. В совокупности с предоставлением доступа к параметрам работы крана в реальном времени эксплуатирующая организация переходит от системы планово-предупредительных ремонтов к экономически более выгодной системе с плавающими межсервисными интервалами, основанными на фактической интенсивности

эксплуатации. Техничко-экономическая оценка такого подхода дана в работах [7, 8] Н.Ю. Ивановой¹¹.

В основе определения остаточного ресурса крана и его механизмов при использовании систем безопасности стоит анализ режимов управления, реализуемых в реальных условиях эксплуатации. Ярким примером служит трехкратная разница при расчете выработки ресурса механизма подъема между остановкой по команде оператора и при срабатывании ОГП [9, 10]. Реализовать такой подход стало возможным за счет перенятия системами безопасности части функций по управлению приводами крана, алгоритмически обеспечив их безопасность (алгоритмы пуска механизма, отрыва груза от основания, уменьшения раскачки груза и др.) [11, 12]. Алгоритмизация работы приводов, оставившая за оператором крана только функцию целеуказания, с одной стороны, приближает способ управления к оптимальному, а с другой стороны, уменьшает количество вариантов развития динамических процессов, что позволило на практике учесть динамические составляющие нагрузок при расчете ресурса элементов крана.

Таким образом, отечественная методика расчета остаточного ресурса, учитывающая только массы поднимаемых грузов и количество рабочих циклов, оказывается неприменимой для современных зарубежных кранов (KoneCranes с системами ControlPro и True Connect, Liebherr с системой LiDAT и др.) и отечественных, но оснащенных импортными приводами (Siemens, Mitsubishi, Nethix) и спроектированных с учетом работы предустанов-

⁷ Ильин Е.И., Сильванович В.К. Особенности технической эксплуатации грузоподъемных кранов в современных условиях // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта: сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции, Екатеринбург, 15 декабря 2023 года. Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2024. С. 138–142. EDN WNMQKD.

⁸ Дианов Х.А., Джафаров С.Г. Анализ эксплуатации мостовых кранов // Транспортное строительство: сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 12–13 апреля 2022 года. М.: Издательство «Перо», 2022. С. 149–157. EDN UXSLCD.

⁹ Akhtulov A.L., Akhtulov M.O. Kirasirov, O.M. Kirasirov Methods to ensure durability and improvement of reliability of bridge cranes of General purpose during their operation // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk, 04 марта 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 1515. Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 22083. DOI 10.1088/1742-6596/1515/2/022083. EDNZQBZTN.

¹⁰ Орлов Д.Ю. Автоматические системы обеспечения безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов: учебное пособие. Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. 76 с. ISBN 978-5-93057-958-1. EDN FQYFJQ.

¹¹ Иванова Н.Ю., Надеженков С.А., Иванов С.Д. Внедрение корпоративных информационно-управляющих систем обеспечения безопасной эксплуатации оборудования как тенденция развития предприятий грузопереработки // Устойчивое развитие и новая индустриализация: наука, экономика, образование: материалы конференции, Москва, 18 июня 2021 года. М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2021. С. 237–242. EDN SFVUXU.

ленных систем безопасности. Переоснащение таких кранов в условиях отсутствия доступа к обслуживанию производителем на отечественные приборы безопасности приведет к реализации иных динамических процессов, чем те, которые были заложены при проектировании и задании нормативных значений ресурса, и непрогнозируемому изменению темпа его исчерпания. Это подчеркивает актуальность развития обозначенного направления в подъемно-транспортной технике и диктует необходимость ускоренного создания приборов безопасности нового поколения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках работ по совершенствованию технических средств обеспечения безопасности был разработан опытный образец перспективного прибора безопасности кранов мостового типа (Прибор) (рисунок 1). Датчиковое оснащение Прибора включает:

1. Датчик нагрузки. Предназначен для измерения усилия в системе полиспаста. Применен тензометрический накладной датчик модели ДНК-2 производства ООО «ИТЦ «КРОС», устанавливаемый в каждую холостую ветвь канатного подвеса.

2. Датчик параметров электрической сети. Предназначен для измерения активной мощности, напряжения и частоты сети. Прибор оснащен датчиком модели SPM 93 производства Alpha Automation.

3. Датчик скорости. Предназначен для получения информации о перемещении, скорости и ускорении электродвигателя механизма подъема и деформации канатного подвеса. Использован инкрементальный энкодер LDP 3806.

Для обработки сигнала тензометрических датчиков использован разработанный ООО «ИТЦ «КРОС» (с учетом требований к характеристикам источников первичной информации, предъявленных в работах¹²) преобразователь тензокодовый ПТК-2(7.0.4). Использование АЦП AD7705BRZ-REEL позволило реализовать возможность одновременного оцифровывания сигналов двух датчиков с разрешением 16 бит и частотой опроса 500 Гц.

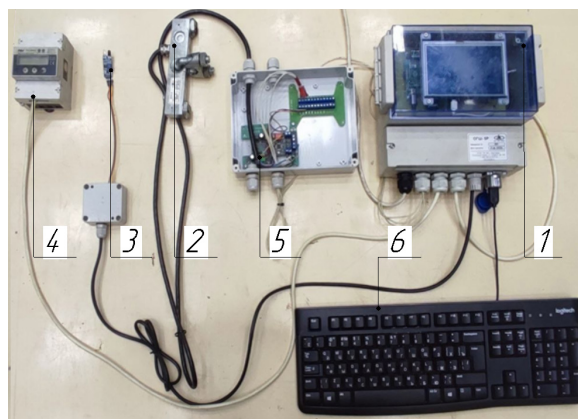


Рисунок 1 – Общий вид прибора:

- 1 – микропроцессорный блок;
2 – накладной датчик усилия ДНК-2;
3 – датчик скорости LDP 3806;
4 – датчик параметров электрической сети SPM93;
5 – плата аналого-цифрового преобразователя ПТК-2(7.0.2);
6 – нормировочное оборудование
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – General view of the Device.

- 1 – microprocessor unit; 2 – force sensor DNK-2;
3 – speed sensor LDP 3806;
4 – sensor of electrical parameters SPM93;
5 – analog-to-digital converter board PTK-2(7.0.2);
6 – auxiliary equipment
Source: compiled by the authors.

Разработанная плата ввода-вывода (рисунок 2) выполняет следующие функции:

1) преобразование питающего нестабилизированного напряжения крана 380 В в стабилизированное 5 В для питания микропроцессора и 24 В для управления исполнительными реле;

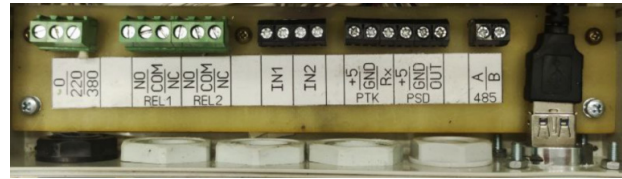
2) питание датчиков и согласование параметров их сигналов с допустимым уровнем напряжения и требуемого интерфейса на входе микропроцессора;

3) управление исполнительными реле, встраиваемыми в систему управления крана и обеспечивающими связь между алгоритмами безопасности, реализуемыми микропроцессором, и приводами крана.

¹² Nazarov A., Ivanov S. Experimental and theoretical determination of the load cell polling frequency to protect the crane hoisting mechanism from overloads // AIP Conference Proceedings. 2023. 2697 (1): 030008. <https://doi.org/10.1063/5.0111939>



a



b

Рисунок 2 – Плата ввода-вывода: а – силовая часть платы ввода-вывода; б – панель ввода-вывода
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – I/O board: a – power part of the I/O board; b – I/O panel
Source: compiled by the authors.

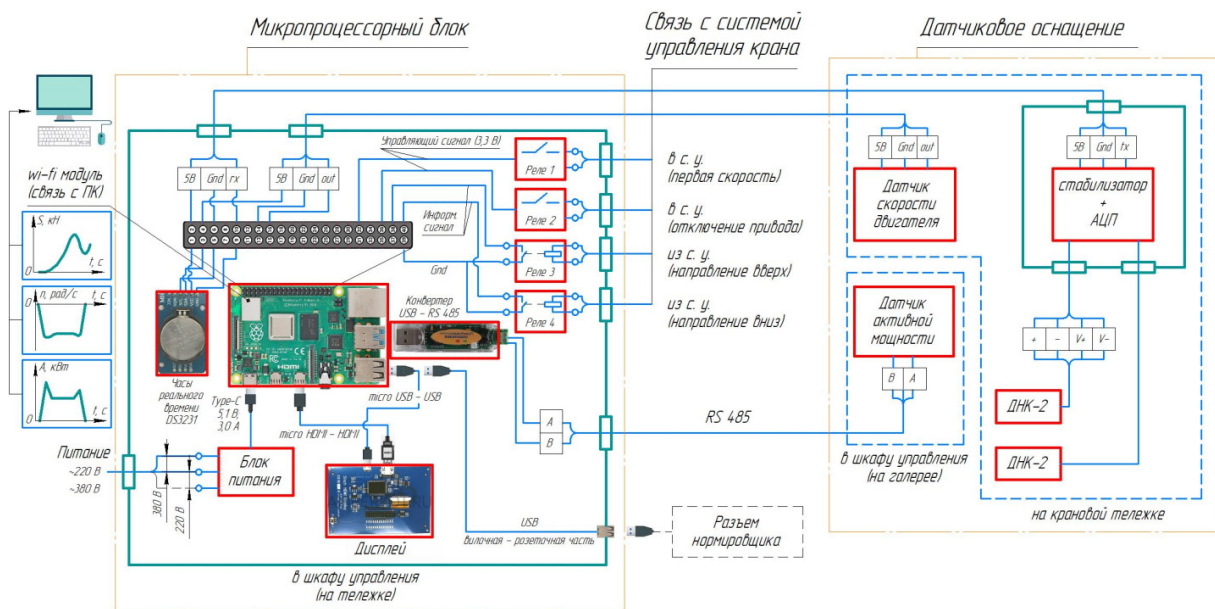


Рисунок 3 – Функциональная схема Прибора
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Device functional diagram
Source: compiled by the authors.

Микропроцессорный блок построен на базе одноплатного компьютера модели RaspberryPi 4 Model B, реализующего функции алгоритмической обработки сигналов датчиков, генерации команд управления приводом, считывания информации датчиков и передачи расчетных параметров.

Функциональная схема Прибора, иллюстрирующая взаимосвязь датчикового оснащения, микропроцессорного блока и нормировочного оборудования приведена на рисунке 3.

Прибор реализует следующие алгоритмы:

- 1) автоматизированной настройки параметров алгоритма ОГП;
- 2) ограничения грузоподъемности кранов с релейно-контакторной системой управления;
- 3) ограничения грузоподъемности кранов с частотной системой управления;
- 4) определения интенсивности работы крана в целом;
- 5) определения интенсивности работы механизмов.



Рисунок 4 – Экспериментальная установка: а – мостовой кран 15 т; б – груз наборный 19 т
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – experimental setup: a – overhead crane 15 t; b – set load 19 t
Source: compiled by the authors.

Таблица 1
Параметры экспериментальной установки (мостовой кран 15 т)
Источник: составлено авторами.

Table 1
Parameters of the experimental setup (overhead crane 15 t)
Source: compiled by the authors.

Грузоподъемность, т	$m_{гр}$, т	Двигатель механизма подъема	$P_{дв}$, кВт	$n_{дв.хх}$, об/мин
5	8; 12; 15; 16,5; 19	MF13ZC200N 188F85063E-IP55	28	3000

$n_{дв.ном}$, об/мин	$v_{ном}$, м/мин	$v_{мин}$, м/мин	$a_{пол}$	c_m , Н/м
2880	20	3,3	2	$3,64 \cdot 10^6$

Экспериментальная установка

В рамках данного исследования оценивались эксплуатационные характеристики Прибора при работе с кранами, оснащенными частотной системой управления. Для проведения эксперимента использован мостовой кран ОПТИМ-Кран г/п 15 т (рисунок 4), установленный на АО «Тихвинской вагоностроительный завод». Параметры крана в целом и механизма подъема приведены в таблице 1.

Система управления механизмом подъема – частотная, обеспечивает две скорости работы привода в каждом направлении (диапазон регулирования – 6). Кран оснащен системой безопасности ControlPro от компании KoneCranes, реализующей функции защиты от перегрузки, определения режима работы

механизма подъема и крана в целом. Исполнительное реле контроллера, реализующего функцию ОГП, подает сигнал на аварийную остановку преобразователя частоты механизма подъема при достижении усилием в системе полиспада, соответствующего 110% веса номинального груза. В этом случае остановка происходит не за счет плавного снижения частоты питания двигателя, а путем наложения тормоза.

Для сравнения эксплуатационных характеристик Прибора и штатной системы безопасности ControlPro Прибор реализует два режима: наблюдения (запись динамических параметров) и эксплуатации (запись динамических параметров + срабатывание исполнительных реле).

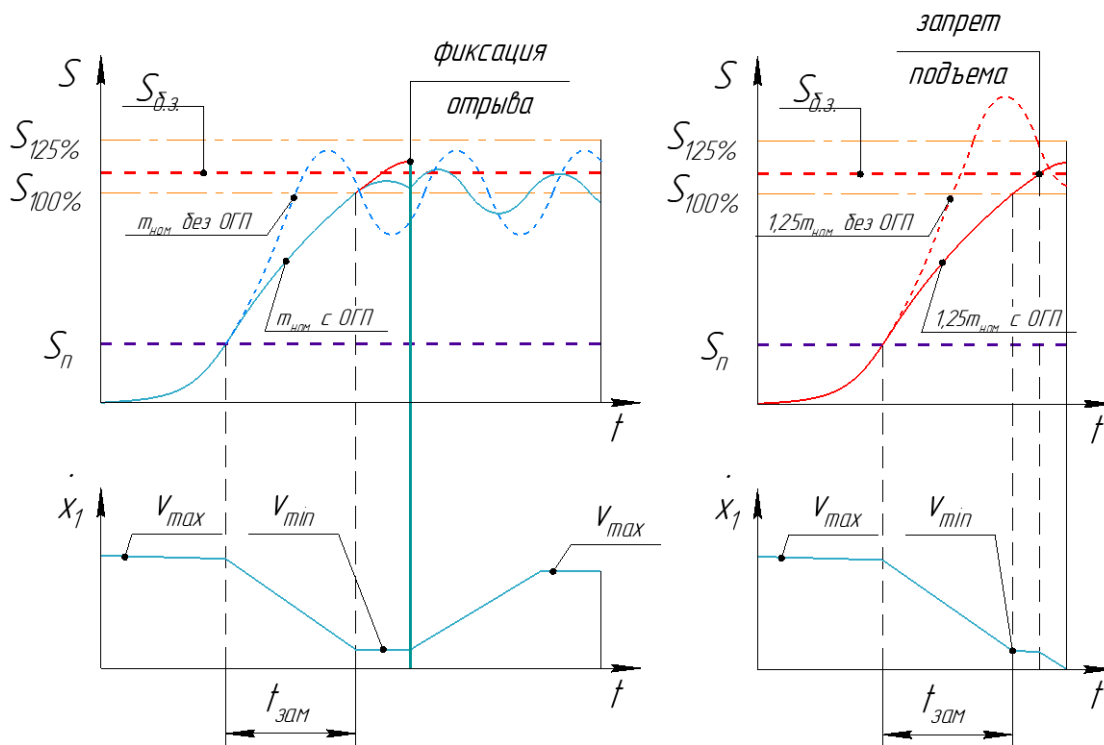


Рисунок 5 – Иллюстрация работы алгоритма ОГП при частотной системе управления, стадия отрыва груза от основания /запрета подъема:
 S – усилие в канатах; S_n – промежуточный порог; $S_{б.з.}$ – порог безусловного запрета;
 \dot{x}_1 – скорость электродвигателя; V_{max} – повышенная скорость;
 V_{min} – пониженная скорость; $t_{зам}$ – время замедления
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – illustration of the load capacity limiter algorithm operation with frequency control system:
 stage of load detachment from the base / lifting prohibition.
 S – force in ropes; S_n – intermediate threshold; $S_{б.з.}$ – threshold of unconditional prohibition;
 \dot{x}_1 – motor speed; V_{max} – increased speed;
 V_{min} – reduced speed; $t_{зам}$ – deceleration time
 Source: compiled by the authors.

Описание алгоритма ограничения грузоподъемности

Алгоритм ОГП при частотной системе управления, реализуемый Прибором, заключается в том, что при достижении усилием в канатах промежуточного порога подается команда на запрет повышенной скорости. При этом происходит плавное снижение скорости до минимально допустимой. Переходный процесс заканчивается к моменту отрыва от основания номинального груза.

В случае если фиксируется отрыв груза от основания, запрет подъема на повышенной скорости снимается. Если же нагрузка достигает порога безусловного запрета, подается

команда на размыкание цепи на подъем (рисунок 5).

Для фиксации отрыва груза от основания сопоставляется информация датчиков усилия в канатном подвесе и скорости электродвигателя. Текущие значения усилия и деформации, вычисленной интегрированием информации датчика скорости, сравниваем с экспериментальной характеристикой, полученной на этапе работы механизма подъема до отрыва груза от основания (рисунок 6). Характеристика усилия в канатах от их деформации описывается нелинейной функцией, на способ определения параметров, которой ранее получен патент¹³.

¹³ Патент № 2803775 С1 Российская Федерация, МПК G01M 5/00. Способ экспериментального определения жесткости канатного подвеса для кранов мостового типа: № 2022135212: заявл. 29.12.2022: опубл. 19.09.2023 / А.Н. Назаров, С.Д. Иванов, В.А. Потапов; заявитель Закрытое акционерное общество «Инженерно-технический центр «КРОС». EDN ZNOAHV.

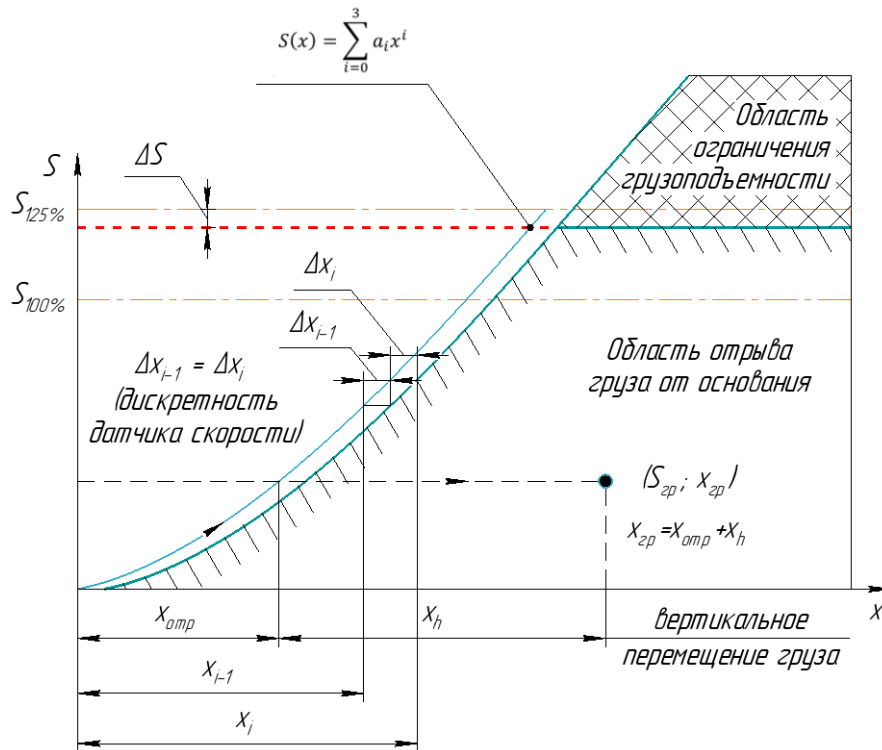


Рисунок 6 – Фиксация отрыва груза от основания:

ΔS – шаг дискретизации усилия в канатах; Δx – дискретность инкрементального энкодера;
 $x_{отр}, S_{отр}$ – деформация каната и усилие в нем в момент отрыва груза от основания;
 $x_{гр}, S_{гр}$ – текущие значения деформации канатов и усилия в них; x_h – перемещение центра масс груза;
 $S(x)$ – характеристика усилия в канатах от их деформации; a_i – i -й коэффициент полинома, аппроксимирующего экспериментальную зависимость $S(x)$
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – detection of the load detachment from the base.

ΔS – sampling step of the force in the ropes; Δx – incremental encoder sampling;
 $x_{отр}, S_{отр}$ – rope deformation and force in it at the moment of load detachment from the base;
 $x_{гр}, S_{гр}$ – current values of rope deformation and force in it; x_h – load center of mass displacement;
 $S(x)$ – characteristic of the force in the ropes due to their deformation; a_i – i -th coefficient of the polynomial approximating the experimental function $S(x)$
 Source: compiled by the authors.

Критерием отрыва является нахождение точки текущих измерений с координатой $(x_{отр}; S_{отр})$ в область справа (см. рисунок 6) от характеристики $S(x)$. Условие отрыва груза от основания:

$$S_{гр} < S(x_{гр} - \Delta x) - \Delta S. \quad (2)$$

Для реализации описанного алгоритма исполнительное реле Прибора REL1 подключаем в участок цепи управления, связывающий орган управления и контроллер системы безопасности, последовательно с контактом включения механизма подъема на подъем, а реле REL2 последовательно с контактом повышенной скорости. Такая схема подключения обеспечивает выполнение команд Прибора приводом механизма подъема крана без отключения штатной системы безопасности.

Описание алгоритма определения интенсивности работы крана

Первый этап – определение границ рабочего цикла. Признаком границы цикла является преодоление нагрузкой порога, значение которого согласно рекомендации ГОСТ 33713–2015 составляет 5%. На практике пороги разносят (начала цикла – 6%, конца – 4%), чтобы избежать многократной ложной фиксации одного и того же цикла при подъеме груза, близкого по массе к значению порога, вследствие действия колебательной динамической составляющей нагрузки.

Второй этап – выделение пригодного для весоизмерения участка динамического процесса. В данном алгоритме применена функция контроля установившегося движения.

Необходимость ее введения продиктована тем, что в переходных процессах (пуск, торможение, переключение скорости) на датчик нагрузки помимо колеблющейся относительно одного значения, соответствующего весу поднимаемого груза, действует составляющая от сил инерции, вызванных ускорением или замедлением элементов механизма подъема и груза (рисунок 7). Следовательно, определение нагрузки в переходных процессах приводит к вычислению совокупного значения веса груза и сопутствующей динамической нагрузки, что является причиной возникновения ошибки весоизмерения или увеличения требуемого времени весоизмерения для снижения ошибки до допустимого уровня.

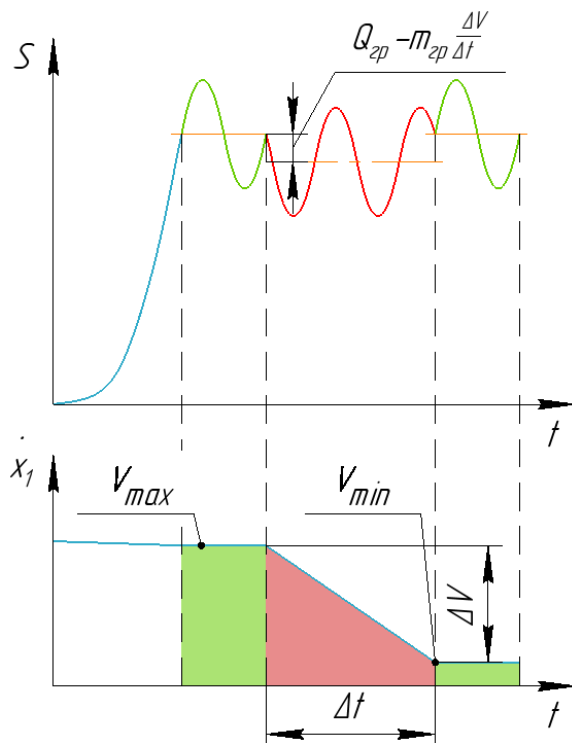


Рисунок 7 – Функция контроля установившегося движения
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – steady state monitoring function
Source: compiled by the authors.

Контроль установившегося движения механизма подъема осуществляется на основании информации датчика скорости вращения электродвигателя механизма подъема. Если ускорение (вычисленное дифференцированием данных скорости электродвигателя) соответствует переходному процессу в механизме подъема, то данный участок динамического процесса исключается из обработки

$$\frac{\pi D_{бар}}{60 \cdot a \cdot u} k_{y.д.} \left| \frac{t_{i-2} - t_{i-1}}{t_{i-1} - t_i} \right| \geq \left| \frac{v_n - v_k}{t_{пуск/торм}} \right|, \quad (3)$$

где t_i – время i -го импульса датчика скорости, с; $k_{y.д.}$ – коэффициент запаса функции контроля установившегося движения; v_n – скорость на начало переходного процесса, м/с; v_k – скорость к окончанию переходного процесса, м/с.

В случае реализации цикла, при котором груз от основания не оторван, значение массы груза в цикле определяется на этапе остановки электродвигателя механизма подъема. Если в динамическом процессе цикла отсутствует участок, пригодный для весоизмерения, то за массу груза в таком цикле принимается максимальное значение нагрузки в нем.

Третий этап – вычисление массы груза в цикле. Пригодный для весоизмерения участок динамического процесса характеризуется наличием значительной по величине колебательной составляющей, на порядок превышающей требуемую точность весоизмерения (допустимая ошибка регистрируемых параметров – 3%).

В алгоритме применен фильтр скользящего среднего, выбор которого обоснован в работе [13]. Как показано в работах [4, 14, 15], точность определения длины окна сглаживания значительно влияет на скорость весоизмерения (сходимость тем быстрее, чем ближе длина окна сглаживания к периоду главной гармоники колебаний). Применительно к задаче регистрации параметров работы крана время весоизмерения является лимитирующим фактором и ограничено длиной цикла, что обусловило применение двух способов вычисления длины окна сглаживания, работающих в разное время.

Первый способ заключается в расчете длины окна сглаживания на основе информации о реальной жесткости канатного подвеса, зависящей от текущего значения усилия в нем, что позволяет начать фильтрацию непосредственно в момент отрыва груза от основания и повысить точность весоизмерения для циклов малой продолжительности [16]:

$$L^1_{buf} = 2\pi \sqrt{\frac{S_{отр}}{9,81 \cdot \sum_{i=1}^3 a_i (\sum_{j=0}^3 b_j s^j)^{i-1}}}, \quad (4)$$

где L^1_{buf} – длина окна сглаживания, определенная теоретически, с; $S_{отр}$ – усилие в канатном подвесе в момент отрыва груза от основания, Н; b_j – j -й коэффициент полинома, обратного $S(x)$.

Второй способ основан на прямом измерении периода колебаний путем вычислений времени между последовательными экстремумами усилия в канатном подвесе:

$$L^2_{buf} = \frac{2}{W} \cdot \sum_i^W |t_{max}^i - t_{min}^i|, \quad (5)$$

где L^2_{buf} – длина окна сглаживания, определенная экспериментально, с; t_{max}^i – время максимума i -й полуволны, с; t_{min}^i – время минимума i -й полуволны, с; W – опорное количество полуволн при определении длины окна сглаживания.

Масса груза вычисляется как непосредственное осреднение данных, сглаженных фильтром скользящего среднего:

$$\bar{S} = \frac{1}{n-K} \sum_{j=0}^{n-K} \bar{S}_{buf j}, \quad (6)$$

где n – общее количество опросов датчика нагрузки.

$$\bar{S}_{buf j} = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^K S_i, \quad (7)$$

$$K = L_{buf} \cdot f_{опроса}. \quad (8)$$

Ошибка весоизмерения определяется по формуле

$$\sigma_{\bar{S}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}(n))^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (9)$$

где $\sigma_{\bar{S}}$ – среднее квадратическое отклонение.

Данный этап продолжается до момента окончания цикла даже после достижения требуемого уровня точности. Так как продолжительность динамического процесса и его характер во время эксплуатации произвольны, каждому измерению массы груза будет соответствовать своя ошибка. Поэтому повышенный уровень точности в циклах, динамический процесс которых к этому располагает, будет компенсировать низкую точность в циклах с недостаточной продолжительностью пригодного для весоизмерения динамического процесса при расчете интенсивности работы крана.

Четвертый этап – перерасчет показателей интенсивности работы с учетом последних полученных данных.

С учетом точности весоизмерения рассчитывается оценка характеристического числа:

$$N_{t-1}^{\max} = N_{t-1}^{\min} + \left(\frac{\bar{S} \pm 3 \cdot \sigma_{\bar{S}}}{9,81 \cdot m_{ном}} \right)^3, \quad (10)$$

где N_{t-1}^{\max} – предыдущее значение максималь-

ной/минимальной оценки характеристического числа; t – номер текущего цикла работы крана; и коэффициента распределения нагрузки:

$$k_p^{\max} = \frac{N_{t-1}^{\max}}{c_{t-1} + 1}, \quad (11)$$

где k_p^{\max} – максимальная/минимальная оценка коэффициента распределения нагрузок; c_t – общее число циклов работы крана.

Объем испытаний

В части ограничения грузоподъемности эксплуатационные характеристики Прибора сравнивались со штатной системой безопасности крана ControlPro (KoneCranes) путем сопоставления коэффициентов динамичности при подъеме с подхватом номинального груза (15 т) и груза, запрещенного для отрыва от основания (19 т – на 27% превышает номинальный), а также груза массой 16,5 т – 110% от номинального.

Для накопления информации об интенсивности работы крана было проведено 3 серии подъемов контрольных грузов различной массы (8, 12 и 15 т). Для достижения условий реального технологического процесса каждая серия выполнялась крановщиком привычными для него приемами управления и включала следующие характерные для обслуживаемого технологического процесса циклы работы крана:

- подъем, опускание без паузы;
- подъем, пауза, опускание;
- кратковременный отрыв груза от основания, опускание;
- подъем, опускание без паузы (пониженная скорость);
- подъем и опускание при передвижении тележки;
- подъем и опускание при передвижении моста;
- подъем и опускание при одновременном передвижении тележки и моста.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На этапе настройки Прибора получены следующие значения порогов срабатывания: промежуточный порог – 13%; порог безусловного запрета – 119%.

На рисунке 8 приведены динамические процессы при попытке подъема груза 19 т ($127\% m_{ном}$). В случае работы Прибора величина статической нагрузки составила $117\% Q_{ном}$, что является признаком того, что груз от основания не оторван. При этом максимальная динамическая нагрузка не превысила $125\% Q_{ном}$.

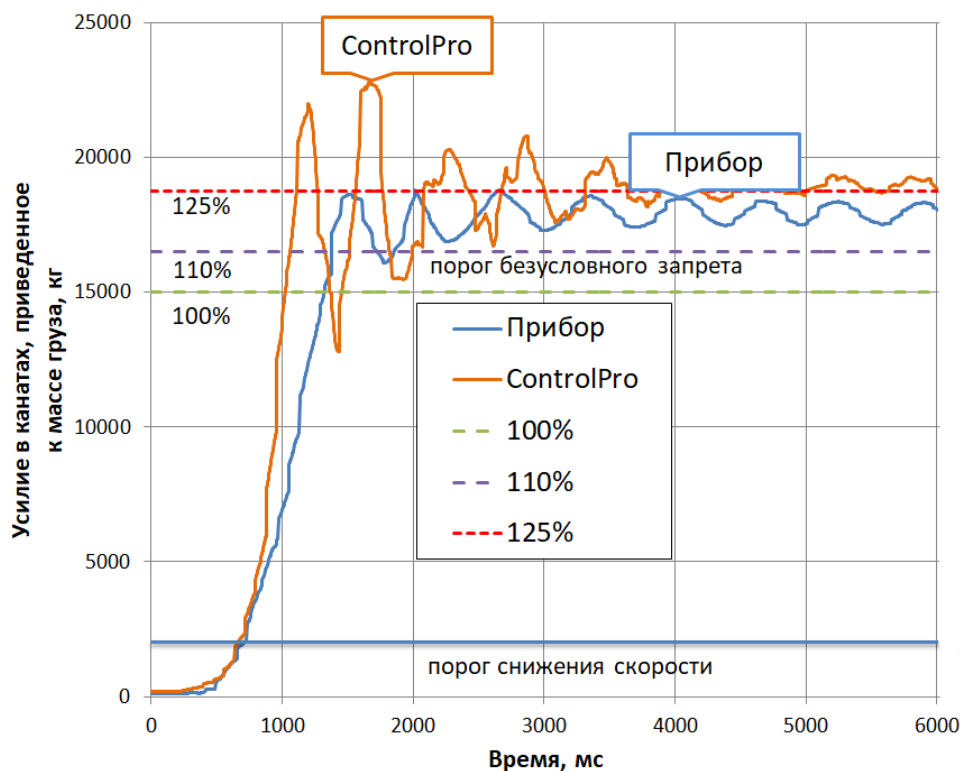


Рисунок 8 – Динамический процесс при попытке подъема запрещенного груза ($127\% m_{\text{ном}} = 19 \text{ т}$)
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Dynamic process during the attempt to lift a load of prohibited mass ($127\% m_{\text{ном}} = 19 \text{ tons}$)
Source: compiled by the authors.

В случае же работы штатной системы безопасности (ControlPro), основанной на применении алгоритма с одним порогом срабатывания, статическая составляющая нагрузки составила $127\% Q_{\text{ном}}$ – груз оторван от основания. При этом максимальная нагрузка достигла значения $153\% Q_{\text{ном}}$.

При анализе динамического процесса подъема номинального груза в случае штатной системы безопасности выявлена особенность алгоритма, препятствующая выполнению условия неотрыва от основания груза запрещенной массы. Несмотря на то, что динамическая нагрузка на 43% превысила порог безусловного запрета подъема (в случае Control Pro $S_{\text{б.з.}} = 110\% Q_{\text{ном}}$), применение фильтра аналогового сигнала датчика нагрузки, допускающего выход за пределы порога на 200 мс – период главной гармоники при подъеме номинального груза, не позволило своев-

ременно отключить привод подъема. Именно эта задержка, как показано экспериментально, является причиной отрыва от основания груза массой $125\% m_{\text{ном}}$ и более даже в случае аварийного отключения привода. Данная особенность работы системы безопасности ControlPro не позволяет выполнить требования безопасности на основе применения алгоритма ОГП с одним порогом срабатывания (безусловного запрета). В то же время экспериментально показано, что на основе адаптированного для кранов с частотной системой управления алгоритма ОГП с промежуточным порогом возможно обеспечить надежную защиту от перегрузки.

При подъеме груза номинальной массы (рисунок 9) разница пиковых нагрузок составила 7% : $114\% Q_{\text{ном}}$ (ControlPro) и $107\% Q_{\text{ном}}$ (Прибор).

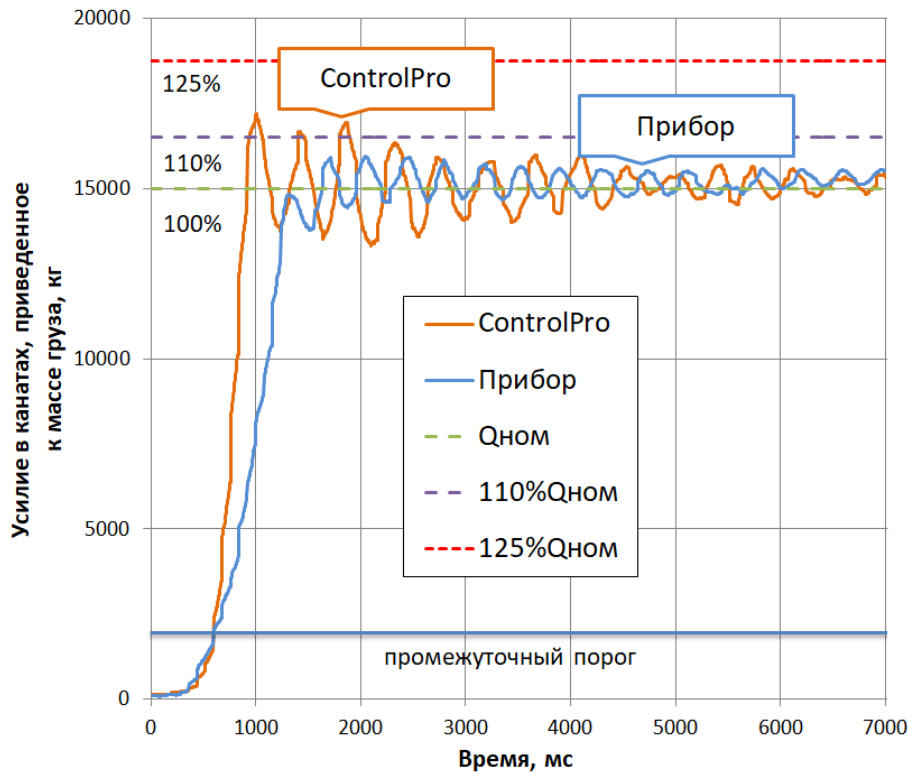


Рисунок 9 – Динамический процесс при подъеме номинального груза ($m_{ном} = 15\text{ т}$)
 Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Dynamic process during the lifting of nominal load ($m_{nom} = 15\text{ tons}$)
 Source: compiled by the authors.

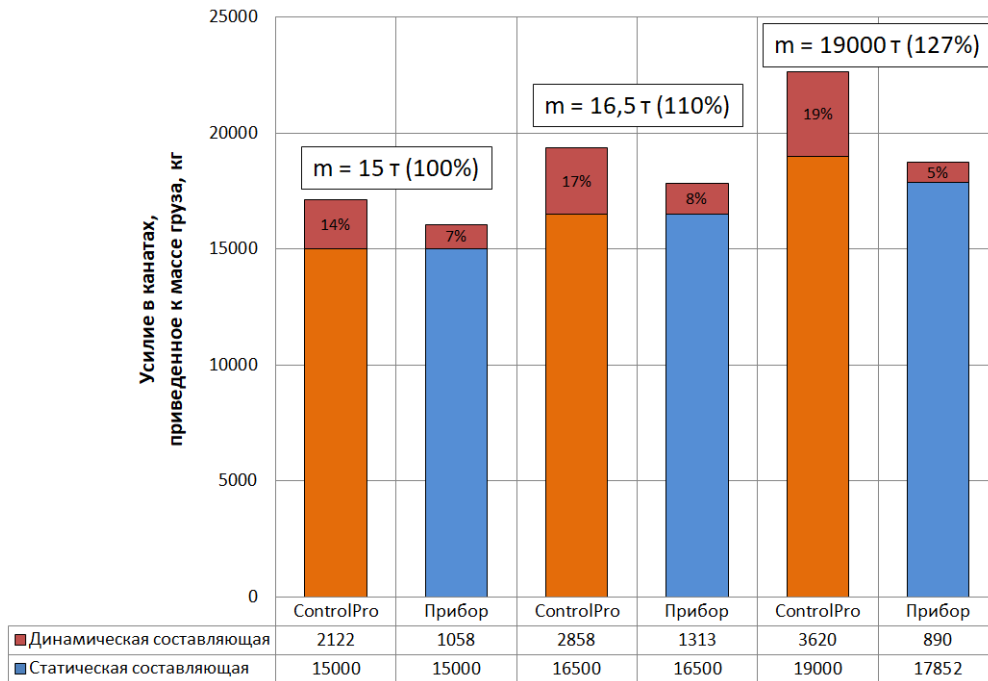


Рисунок 10 – Динамические характеристики при подъеме околономинальных грузов
 Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Dynamic characteristics of near-nominal loads lifting
 Source: compiled by the authors.

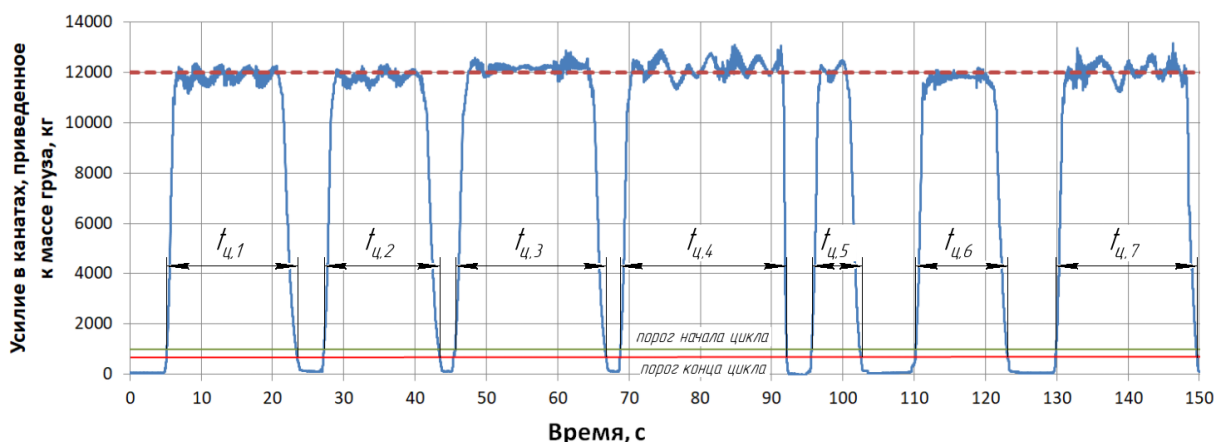


Рисунок 11 – Динамический процесс при работе крана с грузом 12 т
 Источник: составлено авторами.

Figure 11 – Dynamic process during crane operation with a load of 12 tons
 Source: compiled by the authors.

Оценка снижения динамической составляющей в случае применения алгоритма с промежуточным порогом проиллюстрирована на рисунке 10. Наибольший результат (снижение динамической составляющей в 2 раза) достигается в области околономинальных грузов, так как к моменту перехода на послеотрывный этап движения скорость успевает опуститься до минимального значения. Однако чем меньше масса груза, тем меньше успевает снизиться скорость к моменту отрыва, и снижение динамической нагрузки сокращается. Разница

в динамических характеристиках пропадает вовсе при подъеме грузов, вес которых не превышает значения промежуточного порога (в данном случае 13% $Q_{ном}$).

На рисунке 11 приведен пример серии подъемов контрольного груза, имитирующей реальные условия эксплуатации.

На основании данных, полученных посредством работы алгоритма весоизмерения, рассчитаны коэффициенты распределения нагрузки и характеристические числа для каждой серии подъемов (таблицы 2, 3, 4).

Таблица 2

Обработка данных регистратора параметров для серии 8 т
 Источник: составлено авторами.

Table 2

Parameters recorder data processing for the 8 tons series
 Source: compiled by the authors.

№	$m_{гр}^{изм}$, кг	$\Delta m_{гр}^{изм}$, кг	k_p^{max}/k_p^{min}	N_k^{min}/N_k^{max}	$N_k^{изм}/\Delta N_k^{ср}$
1	7907±157	-93	0,115/0,138	1,004/1,147 ($N_k^\phi = 1,062$)	1,074/1,2%
2	8060±154	+60	0,164/0,146		
3	7906±194	-94	0,157/0,136		
4	8109±215	+109	0,171/0,146		
5	8190±129	+190	0,171/0,155		
6	7817±196	-183	0,152/0,131		
7	8207±217	+207	0,176/0,152		

Таблица 3
Обработка данных регистратора параметров для серии 12 т
Источник: составлено авторами.

Table 3
Parameters recorder data processing for the 12 tons series
Source: compiled by the authors.

№	$m_{гр}^{изм}$, кг	$\Delta m_{гр}^{изм}$, кг	k_p^{max}/k_p^{min}	N_k^{min}/N_k^{max}	$N_k^{изм}/\Delta N_k^{ср}$
1	11879±246	-121	0,528/0,466	3,393/3,829 ($N_k^\phi = 3,584$)	3,607/0,6%
2	11815±214	-185	0,516/0,463		
3	12170±204	+170	0,561/0,508		
4	12181±288	+181	0,574/0,498		
5	12027±278	+27	0,552/0,481		
6	11958±194	-42	0,532/0,482		
7	12135±269	+135	0,565/0,495		

Таблица 4
Обработка данных регистратора параметров для серии 15 т
Источник: составлено авторами.

Table 4
Parameters recorder data processing for the 15 tons series
Source: compiled by the authors.

№	$m_{гр}^{изм}$, кг	$\Delta m_{гр}^{изм}$, кг	k_p^{max}/k_p^{min}	N_k^{min}/N_k^{max}	$N_k^{изм}/\Delta N_k^{ср}$
1	14940±227	-60	1,034/0,944	7,499/6,749 ($N_k^\phi = 7,000$)	7,117/1,7%
2	15312±332	+312	1,113/0,996		
3	15073±221	+73	1,060/0,971		
4	15123±305	+123	1,088/0,964		
5	15156±189	+156	1,071/0,993		
6	14919±196	-81	1,023/0,946		
7	15051±379	+51	1,088/0,936		

Проведенный эксперимент показал, что ошибка определения масс грузов равномерно распределена относительно средних значений, соответствующих массам контрольных грузов, что свидетельствует об отсутствии влияния на весоизмерение динамических нагрузок. Суммарное характеристическое число, рассчитанное за три серии экспериментов, составило 11,798 при фактическом значении 11,696. Таким образом, ошибка определения интенсивности работы крана, выраженная в выработке характеристического числа за рассматриваемый промежуток времени, составила 1,3%.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизация зарубежных кранов на основе существующих отечественных приборов безопасности изменяет динамические характеристики, что вносит искажение в расчет оста-

точного ресурса. Поэтому план модернизации должен включать исследование алгоритмов работы штатной системы безопасности и подбор такого аналога, который бы не приводил к реализации режимов управления, при которых динамические нагрузки увеличиваются.

Установлено, что для замены штатных систем управления ряда кранов эксплуатационные характеристики отечественных приборов безопасности являются недостаточными. Этот факт определил разработку нового поколения приборов, основными особенностями которых является обоснованный подбор датчикового и обрабатывающего оборудования и применение более совершенных алгоритмов, повышающих надежность ограничения грузоподъемности при снижении динамических нагрузок и позволяющих определять интенсивность работы крана с требуемой точностью нормативно-технической документацией.

Применение для кранов с частотной системой управления алгоритма ОГП с промежуточным порогом срабатывания, позволяющим полно использовать возможности регулирования скорости, позволило повысить защищенность крана от перегрузки в сравнении с базовым алгоритмом Kone Cranes с одним порогом безусловного запрета. Снижение динамической нагрузки наблюдалось в большей части диапазона масс поднимаемых грузов. При этом наибольший эффект достигнут в зоне околономинальных грузов (снижение динамической составляющей в два раза).

Кроме того, наряду со снижением негативного влияния динамических нагрузок, положительный эффект от применения разработанного алгоритма ОГП заключается в рациональном расходовании ресурса элементов механизма подъема, так как каждый цикл (согласно эксплуатационной документации KoneCranes), в котором остановка произошла по сигналу ОГП (остановка за счет тормоза), эквивалентен трем циклам с тем же грузом, в котором остановка произошла по команде оператора (снижением частоты питания электродвигателя).

Применение алгоритма весоизмерения, использующего фильтр скользящего среднего и функцию контроля установившегося движения, позволило достичь точности определения параметров интенсивности работы крана (массы груза в цикле, количестве циклов, коэффициента распределения нагрузки и характеристического числа), достаточной для удовлетворения требований по ГОСТ 33713–2015. При этом методика проверки имитировала реальные условия эксплуатации: совместная работа механизмов подъема и передвижения, отсутствие участков установившегося движения, повторно-кратковременный режим включения привода подъема. Экстраполируя результаты эксперимента на весь срок службы крана (25 лет), получим ошибку определения остаточного ресурса крана 153 дня (5 месяцев).

Перспектива развития направления обеспечения безопасности ПТМ заключается в повышении датчиковой оснащенности комплексных приборов безопасности с целью получения возможности определения интенсивности работы и ресурса не только крана, но и его механизмов, а также разработке алгоритмов, позволяющих повысить эксплуатационные характеристики приборов путем большей их адаптированности к динамическим параметрам конкретного крана.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Потапов В.А., Роцин В.А., Агейчева М.М. Расшифровка исходных данных регистратора параметров работы грузоподъемного крана для уменьшения аварийности и травматизма при работе грузоподъемных машин // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. 2024. № 1. С. 14–25. EDN CCQRCH.
2. Сытник А.С. Предиктивная аналитика сервиса технических объектов // *Вестник НЦБЖД*. 2021. № 1(47). С. 159–170. EDN SJJTVP.
3. 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. EDN SZRVVB.
4. Михалев А.В., Михалев А.В. Применение алгоритма скользящего среднего для задачи определения массы груза // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. 2023. № 2. С. 44–57. EDN XLXJRI.
5. Воронков И.Е., Овинкин Н.В. Мировой опыт и перспективы разработки схем механизации строительства атомных электростанций // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 11. С. 1584–1596. DOI 10.22227/1997-0935.2020.11.1584-1596. EDN XSVPSV.
6. Цепов Н., Пономарев Д., Рожков Н. и др. Проблемы обеспечения безопасности при аренде и эксплуатации грузоподъемных кранов // *ТехНадзор*. 2015. № 11(108). С. 698–699. EDN XHBFXP.
7. Иванова Н.Ю., Иванов С.Д., Надеженков С.А., Назаров А.Н. Объективная информация о работе подъемно-транспортных машин как основа повышения качества информационных систем грузообработывающих предприятий // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. 2023. № 2. С. 81–96. EDN MRGIFW.
8. Иванова Н.Ю., Иванов С.Д. Техничко-экономические показатели эффективности подъемно-транспортных работ // *Механизация строительства*. 2016. Т. 77, № 6. С. 15–21. EDN VZYBYJ.
9. Mustapää T. et al. Secure Exchange of Digital Metrological Data in a Smart Overhead Crane // *Sensors*. 2022. Т. 22. № 4. С. 1548.
10. Бутузов С.В. Технологические инновации на тихвинских вагоностроительных производствах // *Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог*. 2016. № 3(35). С. 42–46. EDN WGWNSN.
11. Li H. Intelligent control system of port turning line based on WITNESS software // *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2024. Vol. 9, No. 1. DOI 10.2478/amns.2023.1.00374. EDN ITKWO.
12. Петрова Е.Е., Ганнесен В.В. Анализ опыта автоматизации и роботизации операционных процессов контейнерного терминала // *Научные проблемы водного транспорта*. 2024. № 78. С. 178–190. DOI 10.37890/jwt.vi78.439. EDN SWMYMJ.
13. Ivanov S.D., Nazarov A.N., Mikhailchik N.L. Selection of a rational algorithm for data processing

of the weight measuring system of a hoisting crane // *Journal of Physics: Conference Series*, Belgorod, 09–10 March. 2021. Vol. 1926. Belgorod: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012047. DOI 10.1088/1742-6596/1926/1/012047. EDN JIUUGG.

14. Tang X. et al. Battery incremental capacity curve extraction by a two-dimensional Luenberger – Gaussian-moving-average filter // *Applied Energy*. 2020. T. 280. C. 115895.

15. Shtayat A. et al. Application of noise-cancelling and smoothing techniques in road pavement vibration monitoring data // *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2024. T. 14. C. 110–119.

16. 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. DOI 10.26518/2071-7296-2023-20-4-418-431. EDN CBIJMP.

REFERENCES

1. Potapov V.A., Roshchin V.A., Ageicheva M.M. Decoding of the initial data of the registrar of the parameters of the lifting crane to reduce accidents and injuries during the operation of lifting machines. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2024; (1): 14–25. (In Russ.)

2. Sytnik A.S. Predictive analytics of service of technical objects. *Vestnik NTsBZhD*. 2021; (1): 159–170. (In Russ.)

3. Nazarov A.N., Ivanov S.D. Influence of capacity limiter operation with tripping thresholds on the overhead cranes safety. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2023;1(1):41 – 52. (In Russ.)

4. Mikhalev A.V., Nazarov A.N. Applying the moving average algorithm for the weight calculation task. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2023; (2): 44–57. (In Russ.)

5. Voronkov I.E., Ovinkin N.V. World experience and development prospects of mechanization scheme of nuclear power plants construction. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(11): 1584–1596. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1584–1596 (In Russ.)

6. Tsepov N., Ponomarev D., Rozhkov N. [et al. Problems of safety during the rental and operation of lifting cranes. *Technical supervision*. 2015; No 11(108): 698–699. (In Russ.) EDN XHBFXP.

7. Ivanova N.Yu., Ivanov S.D., Nadezhenkov S.A., Nazarov A.N. Objective information about the operation of lifting and transport machines as a basis for improving the quality of information systems of cargo handling enterprises. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2023; (2): 81 – 96. (In Russ.)

8. Ivanova N.Yu., Ivanov S.D. Technical and economic indices of the efficiency of lifting-transport

operations. *Mechanization of construction*. 2016; Vol. 77, No. 6: 15–21. (In Russ.) EDN VZYBYJ.

9. Mustapää, Tuukka, et al. “Secure Exchange of Digital Metrological Data in a Smart Overhead Crane.” *Sensors* 22.4 (2022): 1548.

10. Butuzov S.V. Technological innovations at tikhvin freight car plants. *Railway Equipment journal*. 2016; 3(35): 42–46. (In Russ.) EDN WGWNSN.

11. Li H. Intelligent control system of port turning line based on WITNESS software. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2024; Vol. 9, No. 1. DOI 10.2478/amns.2023.1.00374. EDN ITKWO.

12. Petrova E.E., Gannesen V.V. Experience analysis of automation and robotization of the container terminal operation. *Russian Journal of Water Transport*. 2024; No. 78: 178–190. (In Russ.) DOI 10.37890/jwt.vi78.439. EDN SWMYMJ.

13. Ivanov S.D., Nazarov A.N., Mikhalev N.L. Selection of a rational algorithm for data processing of the weight measuring system of a hoisting crane. *Journal of Physics: Conference Series*. Belgorod, 09–10 March 2021. Vol. 1926. Belgorod: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012047. DOI 10.1088/1742-6596/1926/1/012047. EDN JIUUGG.

14. Tang, Xiaopeng, et al. Battery incremental capacity curve extraction by a two-dimensional Luenberger–Gaussian-moving-average filter. *Applied Energy*. 280 (2020): 115895.

15. Shtayat, Amir, et al. Application of noise-cancelling and smoothing techniques in road pavement vibration monitoring data. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2024; 14: 110–119.

16. Nazarov A.N., Ivanov S.D. Use of weight measurement algorithm on the basis of moving average filter in the recorder of overhead crane operation parameters. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (4): 418–431. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-418-431>. EDN: CBIJMP

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Иванов С.Д. Вклад в общую работу заключается в постановке цели и задач исследования, организации проведения эксперимента, подготовке текста статьи.

Назаров А.Н. Вклад в общую работу заключается в разработке Прибора, проведении экспериментального исследования, подготовке текста статьи.

CO-AUTHORS' CONTRIBUTION

Ivanov S.D. Contribution to the overall work consists in setting the goal and objectives of the study, organization of the experiment, preparation of the article text.

Nazarov A.N. Contribution to the overall work consists in the development of the Device, experimental research, preparation of the article text.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Назаров Александр Николаевич – ассистент кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), инженер ООО «ИТЦ «КРОС» (141281, Московская область, г.о. Пушкинский, г. Ивантеевка, проезд Санаторный, д. 1/1Б).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8039-4331>.

SPIN-код: 2028-7651,

e-mail: alexnazavr@yandex.ru

Иванов Сергей Дмитриевич – доц. кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7912-609X>,

SPIN-код: 8035-2780,

e-mail: ptm-diagnostika@yandex.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Nazarov Alexander N. – assistant of department “Lifting and transporting systems of Bauman Moscow State Technical University”, engineer (105005, Moscow, 2nd Baumanskayastr, 5, p. 1), Engineer, LLC “RDC ‘KROS’ (141281, Moscow Region, Pushkin-sky District, Ivanteevka, SanatornyProezd, 1/1B).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8039-4331>,

SPIN-code: 2028-7651,

e-mail: alexnazavr@yandex.ru

Ivanov Sergey D. – Associate Professor, Department “Lifting and Transportation Systems of Bauman Moscow State Technical University” (105005, Moscow, 2nd Baumanskaya St., 5, p. 1).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7912-609X>,

SPIN-code: 8035-2780,

e-mail: ptm-diagnostika@yandex.ru