Научная статья
УДК 621.86
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-418-431
EDN: CBIJMP

Check for updates

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА ВЕСОИЗМЕРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРА СКОЛЬЗЯЩЕГО СРЕДНЕГО В РЕГИСТРАТОРЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ МОСТОВОГО КРАНА

А. Н. Назаров*, С. Д. Иванов
МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия
alexnazavr@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-8039-4331
ptm-diagnostika@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7912-609X
**ответственный автор*

АННОТАЦИЯ

Введение. *Проанализирована проблема низкого качества первичной информации приборов регистраторов параметров работы крана. Принятое направление повышения качества информации о массе груза – совершенствование алгоритма весоизмерения. Описаны недостатки алгоритмов серийно выпускаемых регистраторов параметров. Предложено построение алгоритма на основе фильтра скользящего среднего.*
Материалы и методы. *Описан принцип работы предложенного алгоритма весоизмерения, состоящего из предварительного (определение пригодного для весоизмерения участка динамического процесса, расчет длины окна сглаживания) и основного этапов (применение фильтра, вычисление массы и ошибки измерения). Приведены два способа определения длины окна сглаживания, а также параметры использованных в экспериментальной части мостового крана, тензодатчика и датчика скорости вращения двигателя.*
Результаты. *Представлены графики усилия в механизме подъема и скорости вращения двигателя в момент весоизмерения. Показана работа функции контроля установившегося движения. Приведены результаты работы алгоритма при фиксированной точности измерения 3% с определением времени работы алгоритма и фиксированном времени работы алгоритма 10 сек с определением точности измерения.*
Обсуждение. *Время весоизмерения с точностью, требуемой для регистраторов параметров, составило 2…5 сек. Повышение скорости весоизмерения достигнуто за счет подстраиваемых параметров алгоритма при каждом включении механизма подъема. Для кранов с продолжительностью времени подъема непрерывно более 10 сек алгоритм позволяет рассчитать массу груза с точностью 1%, что обеспечивает точность определения показателей интенсивности работы крана 3%.*
Заключение. *Оценка точностных и временных параметров показала применимость разработанного алгоритма весоизмерения в задаче определения массы груза для регистраторов параметров работы крана. Преимуществом разработанного алгоритма является гарантированная точность весоизмерения. Алгоритм весоизмерения позволяет адаптировать регистратор параметров под технологический процесс работы крана и эффективно использовать пригодные для измерения участки динамического процесса.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *весоизмерение, регистратор параметров работы крана, фильтр скользящего среднего, механизм подъема, кран мостового типа, нагрузка на механизм подъема*

БЛАГОДАРНОСТИ: *авторы статьи выражают свою благодарность сотрудникам кафедры «Подъёмно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана и коллективу ЗАО «ИТЦ «КРОС» за их помощь, советы, рекомендации, ценные замечания и критику.*

Статья поступила в редакцию 27.07.2023; одобрена после рецензирования 28.08.2023; принята к публикации 30.08.2023.
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. Использование алгоритма весоизмерения на основе фильтра скользящего среднего в регистраторе параметров работы мостового крана // *Вестник СибАДИ*. 2023. Т. 20, № 4 (92). С. 418-431. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-418-431

© Назаров А. Н., Иванов С. Д., 2023

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-418-431
EDN: CBIJMP

USE OF WEIGHT MEASUREMENT ALGORITHM ON THE BASIS OF MOVING AVERAGE FILTER IN THE RECORDER OF OVERHEAD CRANE OPERATION PARAMETERS

Aleksandr N. Nazarov*, Sergey D. Ivanov
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
alexnazavr@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-8039-4331
ptm-diagnostika@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7912-609X
**corresponding author*

ABSTRACT

Introduction. *The problem of primary information low quality of crane operation parameters recorders is analyzed. The accepted direction to improve the quality of information about the mass of the cargo is to improve the algorithm of weight measurement. Shortcomings of algorithms of serially produced parameter recorders are described. The design of the algorithm based on the moving average filter is proposed.*
Materials and Methods. *The principle of operation of the proposed weight measurement algorithm is described. The algorithm consists of preliminary (determination of the dynamic process section suitable for weight measurement, calculation of the smoothing window length) and main stages (application of filter, calculation of mass and measurement error). Two methods for determining the length of the smoothing window are given. The parameters of the overhead crane, load cell and motor speed sensor used in the experimental part are given.*
Results. *Graphs of lifting mechanism force and motor rotation speed at the moment of weight measurement are given. The work of the steady-state motion control function is shown. The results of algorithm operation at fixed measurement accuracy of 3% with determination of algorithm operation time and fixed algorithm operation time of 10 seconds with determination of measurement accuracy are given.*
Discussion. *The time of weight measurement with the accuracy required for parameter recorders was 2...5 seconds. Increase in speed of weight measurement is achieved due to adjustable parameters of the algorithm at each switching on of the lifting mechanism. For cranes with duration of lifting time continuously more than 10 seconds the algorithm allows to calculate the mass of the load with an accuracy of 1%. This ensures the accuracy of the crane intensity indicators with an accuracy of 3%.*
Conclusion. *Evaluation of accuracy and time parameters showed the applicability of the developed algorithm of weight measurement in the task of determining the mass of the load to recorders of crane operation parameters. The advantage of the developed algorithm is the guaranteed accuracy of weight measurement. The algorithm of weight measurement allows to adapt the parameter recorder to the technological process of crane operation and effectively use the areas of the dynamic process suitable for measurement.*

KEYWORDS: *weight measurement, crane operation parameter recorder, moving average filter, hoisting mechanism, bridge crane, hoisting mechanism load*

ACKNOWLEDGEMENT. *The authors of the article express their gratitude to the staff of the Lifting and Transportation Systems Department of N.E. Bauman Moscow State Technical University and the staff of ZAO ITTS KROS for their help, advice, recommendations, valuable comments and criticism.*

The article was submitted 27.07.2023; approved after reviewing 28.08.2023; accepted for publication 30.08.2023.
The 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. Aleksandr N. Nazarov, Sergey D. Ivanov 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. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-418-431

© Nazarov A. N., Ivanov S. D., 2023

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

ВВЕДЕНИЕ

Основой обеспечения безопасности грузоподъемных кранов согласно действующей нормативной[1] и технической документации [1] является соблюдение паспортных характеристик и требований руководства по эксплуатации, в частности режима работы крана [2].

Наиболее распространённым объективным средством определения режима работы крана являются приборы регистраторы параметров работы крана (РП)[2,3] [3]. Со стороны эксплуатирующих организаций регулярно поступают претензии, касающиеся качества регистрируемой РП информации.

Оценке качества информации имеющихся на рынке приборов безопасности РП посвящены работы [4, 5, 6]. В работах[4] и[5] приведены точностные показатели работы РП серий ОГШ и ОНК. Согласно их данным точность измерения массы груза в цикле работы крана составляет 7% при требовании 3%[6]. Расчет показателей интенсивности (коэффициента распределения нагрузки и характеристического числа) на основании информации такого качества гарантированно приводит к ошибке определения группы классификации режима работы крана.

Точность определения массы груза зависит от двух параметров: качества сигнала датчика нагрузки и алгоритма его обработки. Преимуществом совершенствования второго параметра является повышение точности работы уже установленных РП только за счет обновления программного обеспечения без вмешательства в конструкцию механизма подъема и датчиковое оснащение прибора безопасности.

Алгоритм весоизмерения прибора ОГШ-2 построен на определении максимального значения секундных осреднений нагрузки в цикле [7, 8, 9]. Недостатком данного алгоритма является неспособность адаптироваться под динамический процесс механизма подъема. Варьирование массы груза, скорости отрыва, длины канатного подвеса оказывают влияние на динамический процесс и, следовательно, на точность весоизмерения.

В работах [10, 11] и[7] предложен подход к обработке динамических процессов механизма подъема. В его основе лежит применение фильтра скользящего среднего [12]. В [11] показано, что данный фильтр в сравнении с непосредственным осреднением, регрессией и осреднением по экстремумам обладает наилучшим сочетанием надежности, скорости и точности работы.

Цель работы – оценить применимость алгоритма весоизмерения на основе фильтра скользящего среднего в регистраторе параметров работы мостового крана.

---

[1] Приказ Ростехнадзора от 26.11.2020 N 461 ФНП в области промышленной безопасности от 26.11.2020 N 461 об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения».

[2] Усачев Г. Ю. Система мониторинга регистрируемых параметров грузоподъемных машин // WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS: сборник статей победителей IX Международной научно-практической конференции: в 2 частях. Пенза. 30 апреля 2017 года. Том Часть 1. Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.). 2017. С. 84 – 87. EDN YMGZTX.

[3] Горелов В. Н., Горелов Н. В. Использование данных регистратора параметров при эксплуатации грузоподъемных кранов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции. Курск.19–20 марта 2015 года / Ответственный редактор: Горохов А.А. Том 1. Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2015. С. 334 – 336. EDN TPRVUR.

[4] Иванова Н. Ю., Иванов С. Д. Формирование информационной базы для уточнения расчета остаточного ресурса и улучшения методики планирования ремонтов подъемно-транспортного оборудования с использованием приборов безопасности – регистраторов параметров (на примере кранов) // Всероссийская научно-практическая конференция «Цифровая экономика: технологии, управление, человеческий капитал» МГТУ СТАНКИН. Москва. 2019 год. С. 236 – 241.

[5] Коенова Ю. И., Иванов С. Д. Оценка достоверности работы регистратора параметров // XIX Московская международная межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы» Материалы конференции, Москва. 9 апреля 2015 года. Москва: / МГТУ им. Н. Э. Баумана. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 328 с.: ил. Библиогр. в конце статей. ISBN 978-5-7367-1085-0.

[6] ГОСТ 33713–2015 Краны грузоподъемные. Регистраторы параметров работы. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 июня 2016 г. № 561-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 33713 – 2015 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 апреля 2017 г. Москва: Стандартинформ, 2016. 19 с.

[7] Михальчик Н. Л., Иванов С. Д. Построение весоизмерительной системы путем расширения функционала электронного регистратора параметров работы мостового крана // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта. Екатеринбург 6 декабря 2019 года / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Екатеринбург: Издательство Уральского университета. 2020. С. 169 – 171. EDN HAFJBZ.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

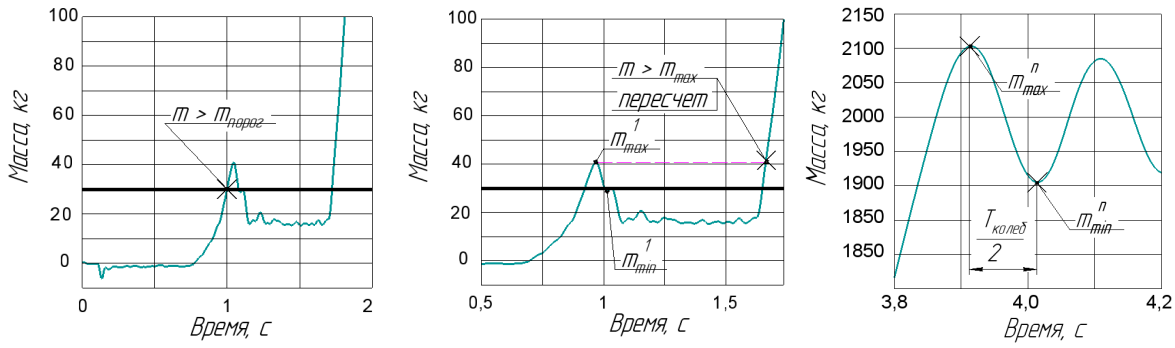

Рисунок 1 – Предварительные этапы работы алгоритма весоизмерения:
а – начало весоизмерения – превышение порога начала взвешивания;
б – определение динамических характеристик;
в – определение параметров фильтра скользящего среднего
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Preliminary stages of the weighing algorithm:
а) The beginning of the weighing – exceeding the threshold of the beginning of weighing;
б) Determination of dynamic characteristics;
в) Determination of the parameters of the moving average filter
Source: compiled by the authors.

Задачи:

- адаптировать алгоритм весоизмерения, использующего фильтр скользящего среднего, к динамическим процессам, характерным для механизмов подъема мостовых кранов;
- реализовать в алгоритме возможность весоизмерения в процессе подъема груза;
- оценить точностные и временные параметры работы алгоритма весоизмерения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предлагаемый алгоритм весоизмерения содержит два этапа: предварительный и основной (рисунок 1). На предварительном этапе определяют момент начала весоизмерения и параметры применяемого фильтра.

На предварительном и основном этапе работы алгоритма реализуется функция контроля установившегося движения. Необходимость ее применения продиктована тем, что в переходных процессах на датчик нагрузки помимо периодически колеблющейся относительно одного значения, соответствующего весу поднимаемого груза, действует составляющая от сил инерции, вызванных ускорением или замедлением элементов механизма подъема и груза. Следовательно, определение нагрузки в переходных процессах будет приводить к схождению алгоритма к совокупному значению веса груза и динамической нагрузки, если время измерения равно времени переходного процесса, или к затягиванию времени измерения, если оно превышает время переходного процесса. Контроль установившегося движения (покоя) механизма подъема осуществляется с помощью датчика скорости вращения электродвигателя механизма подъема. При недопустимом значении ускорения, полученного дифференцированием показаний датчика скорости, процесс весоизмерения возвращается на этап определения динамических характеристик.

На основном этапе вычисляют текущие значения нагрузки, среднее значение нагрузки за время измерения и момент окончания весоизмерения. В работе использован фильтр скользящего среднего [12]. Выбор данного фильтра обоснован характером динамического процесса, характерного для кранового механизма подъема. Так, в работе [11] показано, что на основе фильтра скользящего среднего возможно получить наиболее стабильные измерения нагрузки, что обусловлено фильтрацией превалирующей по амплитуде гармоники колебаний.

Основным параметром фильтра скользящего среднего является длина окна сглаживания. В работе [13] показано, что качество определения данного параметра значительно влияет на скорость весоизмерения. Применение описываемого алгоритма в задачах коммерческого взвешивания или регистрации

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

параметров работы крана время взвешивания является лимитирующим фактором. В первом случае увеличение времени взвешивания приводит к затягиванию времени вспомогательных операций и к снижению общей эффективности предприятия. Во втором случае наибольшей точности весоизмерения возможно добиться на участках технологического процесса, когда все механизмы крана отключены. Такие промежутки времени могут не быть продолжительными в каждом рабочем цикле, следовательно, становятся задачи определения пригодного участка для весоизмерения и максимально эффективного использования данного участка. Для определения пригодного для весоизмерения участка в алгоритме присутствуют этап определения динамических характеристик (момент начала фильтрации) и функция контроля установившегося движения (момент окончания фильтрации).

Задача наиболее эффективного использования участка, пригодного для весоизмерения, определяет необходимость применения двух способов определения длины окна сглаживания. Первый способ заключается в определении периода колебаний канатного подвеса (периода главной гармоники, определяющей длину окна сглаживания) на основе текущего усилия в нем, а второй – определении периода колебаний по значениям нагрузки в экстремумах послеотрывного этапа динамического процесса. Первый способ является теоретическим (1), соответственно ему как косвенному методу измерения, свойственна ошибка, связанная с комплексной ошибкой средств измерения и алгоритмов определения усилия при отрыве груза от основания и текущей жесткости канатного подвеса:

$$L^1{}_{buf} = 4\pi\sqrt{\frac{S_{\text{отр}}}{9{,}81\cdot c_{\text{к}}}}, \qquad (1)$$

где $L^1{}_{buf}$ – длина окна сглаживания, определенная теоретически;

$S_{\text{отр}}$ – усилие в канатном подвесе в момент отрыва груза от основания;

$c_{\text{к}}$ – жесткость канатного подвеса, соответствующая усилию в канате в момент отрыва груза от основания.

Несмотря на то, что теоретический способ определения длины окна сглаживания менее точен в сравнении с экспериментальным, он обладает преимуществом в условиях повышения эффективности использования пригодного для весоизмерения участка – на момент начала данного участка длина окна сглаживания уже известна, а для определения того же параметра экспериментальным методом тратится время, равное нескольким (2…4) периодам колебаний основной гармоники. Таким образом, к моменту вычисления окна сглаживания более точным способом в буфере непосредственного измерения за весь пригодный для весоизмерения этап будут находится отфильтрованные данные за 2…4 периодов колебаний динамической системы.

Второй – экспериментальный – способ вычисления длины окна сглаживания заключается в определении моментов достижения пиковых значений нагрузки – максимумов и минимумов – за несколько периодов колебаний (2…4) и принятии вычисляемого параметра равным двум значениям осредненного периода колебаний по формуле

$$L^2{}_{buf} = \frac{4}{W}\cdot\sum_i^W\left|\mathrm{t}^{\mathrm{i}}_{\max} - t^i_{\min}\right|, \qquad (2)$$

где $L^2{}_{buf}$ – длина окна сглаживания, определенная экспериментально;

$\mathrm{t}^{\mathrm{i}}_{\max}$ – время максимума $i-$й полуволны;

t^i_{mim} – время минимума $i-$й полуволны;

W – опорное количество полуволн при определении длины окна сглаживания (4…8).

После прохождения полуволн дальнейшая фильтрация исходного сигнала производится с помощью длины окна сглаживания, вычисленного вторым (экспериментальным) способом, благодаря чему уменьшается требуемое для весоизмерения время.

Функция фильтрации описывается формулой

$$\bar{S}_{buf\,i} = \frac{1}{N}\sum_{j=0}^{N} S_j\,, \qquad (3)$$

где $\bar{S}_{buf\,i}$ – текущее осреднение буфера длиной i;

N – количество элементов в буфере, соответствующего окну сглаживания. Определяется по формуле

$$N = L_{buf}\cdot f_{\text{АЦП}}, \qquad (4)$$

где $f_{\text{АЦП}}$ – частота опроса аналого-цифровым преобразователем датчика нагрузки.

Масса груза вычисляется как среднее арифметическое данных буфера непосредственного осреднения по формуле

$$\bar{S}_n = \frac{1}{n}\sum_{j=0}^{n} S_j, \qquad (5)$$

где $\overline{S}_n$ – текущее осреднение буфера непосредственного осреднения длиной n;

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

n – количество элементов в буфере непосредственного осреднения;

S_j – значение j-го элемента буфере непосредственного осреднения.

Завершение алгоритма весоизмерения возможно по трем условиям:

1) срабатывание функции контроля установившегося движения, за чем следует возвращение на предварительный этап алгоритма;

2) достижение предельного времени весоизмерения. По его истечении значением массы груза принимается $\overline{S}_n$ с наибольшей длиной буфера непосредственного осреднения $n_{\max}$;

3) достижение требуемой точности весоизмерения σ_n, которая определяется по формуле

$$\sigma_n = \sum_{i=0}^{n} \frac{\left(\bar{S}_{buf\,i} - \bar{S}_n\right)^2}{n}. \quad (6)$$

Для оценки применимости в задаче регистрации параметров крана приведенный алгоритм был дополнен этапом получения расчетных значений, на котором вычисляются максимальные и минимальные оценки характеристического числа $\mathrm{N}_{\mathrm{t}}^{\frac{\max}{\min}}$ и коэффициента распределения нагрузки $k_p^{\frac{\max}{\min}}$ по формулам (7) и (8) соответственно:

$$N_t^{\frac{\max}{\min}} = \mathrm{N}_{\mathrm{t-1}}^{\frac{\max}{\min}} + \left(\frac{m_{\mathrm{гр}} \pm 2 \cdot \sigma_n}{m_{\mathrm{ном}}}\right)^3, \quad (7)$$

где $N_{t-1}^{\frac{\max}{\min}}$ – предыдущее значение максимальной / минимальной оценки характеристического числа;

$m_{\mathrm{гр}}$ – вычисленная масса груза ($m_{\mathrm{гр}} = \frac{\bar{S}_n}{9{,}81}$);

$m_{\mathrm{ном}}$ – масса номинального груза;

$$k_p^{\frac{\max}{\min}} = \frac{\mathrm{N}_{\mathrm{t}}^{\frac{\max}{\min}}}{\mathrm{c_t}}, \quad (8)$$

где c_t – общее число циклов работы крана.

На рисунке 2 приведена схема работы разработанного алгоритма весоизмерения.

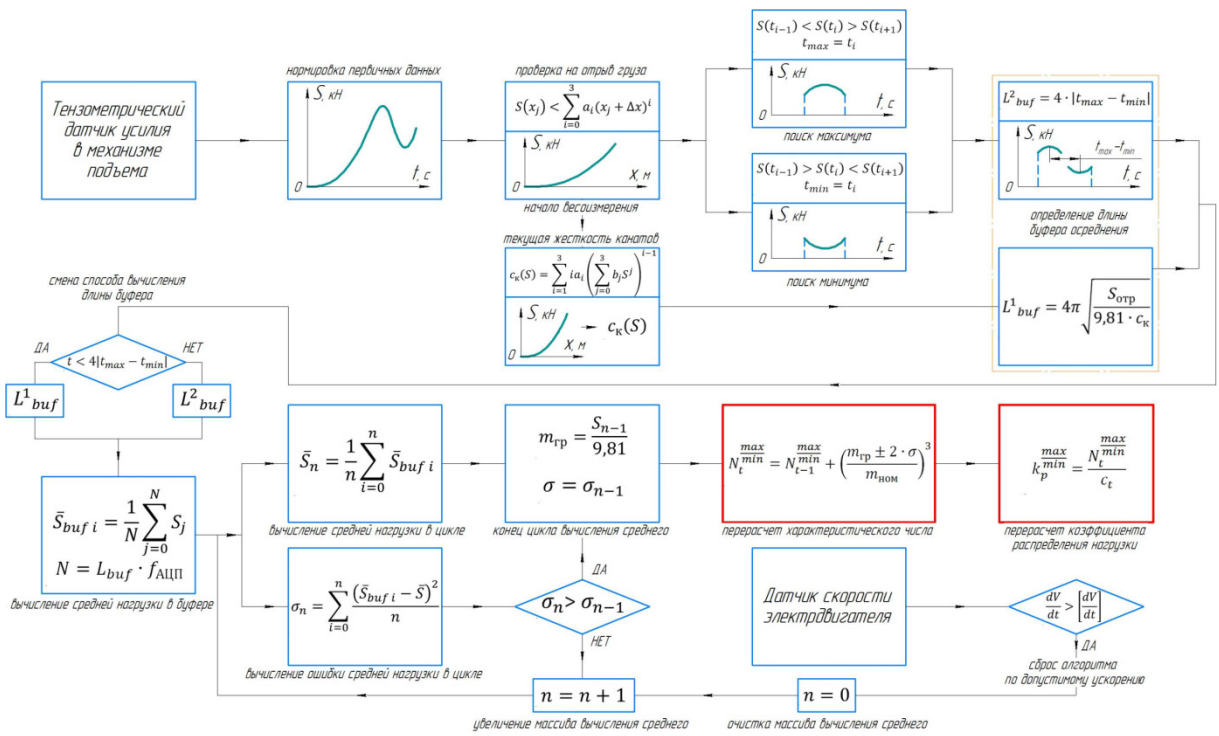

Рисунок 2 – Алгоритм весоизмерения, построенный на основе фильтра скользящего среднего
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Weight measurement algorithm based on a moving average filter
Source: compiled by the authors.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

Таблица 1
Основные параметры экспериментальной установки
Источник: составлено авторами.

Table 1
Main parameters of the experimental equipment
Source: compiled by the authors.

Грузоподъ-ёмность крана	Масса груза	Двигатель механизма подъема	Мощность двигателя подъема	Синхронная частота вращения	Номинальная частота вращения
2 т	2 т	МТКН -112-6	5 кВт	1000 об/мин	910 об/мин
Номинальный крутящий момент, Нм	$M_{макс}/M_{ном}$	Момент инерции ротора	Диаметр барабана	Передаточное число редуктора	Кратность полиспаста
52,5	2,3	0,056 кг м^2	0,198 м	38,1	2

Для оценки полученных в данной работе зависимостей и алгоритма в целом проведен эксперимент, заключавшийся в подъеме груза известной массы. В качестве экспериментальной установки использован двухбалочный мостовой кран КМГ-201, установленный в лаборатории кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н. Э. Баумана[8] [14, 15]. Механизм подъема приводится в движение электродвигателем с короткозамкнутым ротором. Основные параметры экспериментальной установки приведены в таблице 1.

Используемый кран оснащен релейно-контакторной системой управления, что в совокупности с высокой жесткостью главных балок обуславливает наибольший из возможных среди кранов общего назначения коэффициент динамичности. Максимально возможная начальная амплитуда колебаний определяет продолжительность затухающего динамического процесса, значительно превышающую желаемое время взвешивания. Таким образом оценивается свойство разработанного алгоритма, определяющего массу груза в условиях незатухающих колебаний с несколькими гармониками, амплитуда которых в несколько раз превышает предел допустимой погрешности измерения.

Производилось измерение усилия тензометрическим способом. Датчик-тензоось с наклейкой тензорезисторов на плоские стенки глухих отверстий (рисунок 3).

а

б

Рисунок 3 – Оборудование для измерения усилия в канате:
а – вид узла встройки датчика нагрузки; б – датчик нагрузки – тензометрическая ось
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Rope force measuring equipment
a) View of the load cell assembly; б) Load sensor - strain gauge axis
Source: compiled by the authors.

[8] Назаров А. Н., Иванов С. Д. Экспериментальное и теоретическое определение частоты опроса датчика нагрузки для защиты механизма подъема крана от перегрузок // XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС – 2021): Труды конференции, Москва, 30 ноября – 02 2021 года. Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук. 2021. С. 157 – 162. EDN EUPIWD.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

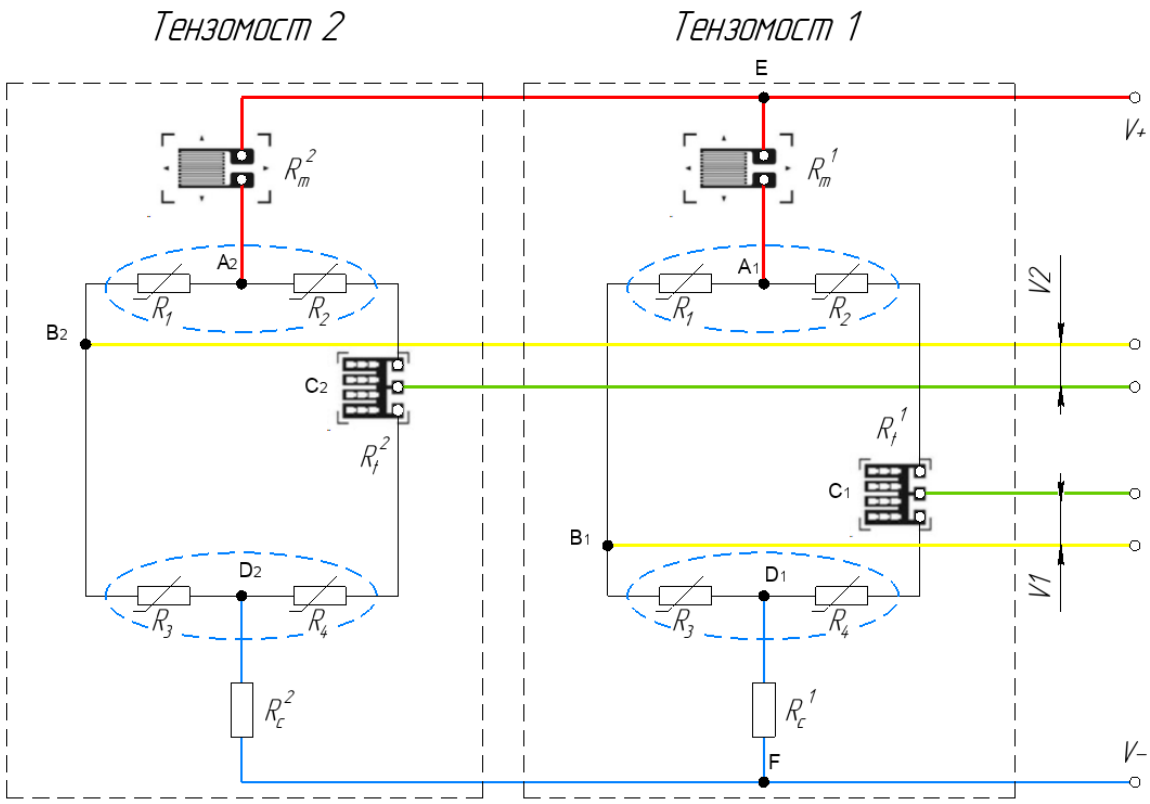

Рисунок 4 – Схема соединения чувствительных элементов датчика нагрузки: V1, V2 – сигналы первого и второго тензомоста соответственно, V+, V- – питание схемы, $R_c^{1,2}$ – сопротивление для регулировки чувствительности соответствующих тензомостов, $R_t^{1,2}$ – сопротивление для регулировки температурного нуля, $R_m^{1,2}$ – сопротивление для регулировки температурной чувствительности
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Connection diagram of the sensitive elements of the load sensor. V1, V2 are the signals of the first and second strain bridge, respectively, V+, V- – circuit power supply, $R_c^{1,2}$ – resistance to adjust the sensitivity of the corresponding strain gages, $R_t^{1,2}$ – resistance to adjust the temperature zero, $R_m^{1,2}$ – resistance for temperature sensitivity adjustment
Source: compiled by the authors.

Чувствительные элементы соединены в два тензомоста с регулировкой температурного нуля и температурной чувствительности (рисунок 4).

Параметры аналого-цифрового преобразователя: частота опроса 500 Гц, глубина дискретизации 12 бит. Датчик скорости – инкрементальный энкодер LM393.

Алгоритм весоизмерения реализовывался на одноплатном компьютере RaspberryPi 4B.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 5 приведены сигналы соответственно первого и второго тензомоста, а также сигнал, соответствующий среднему арифметическому их значению.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

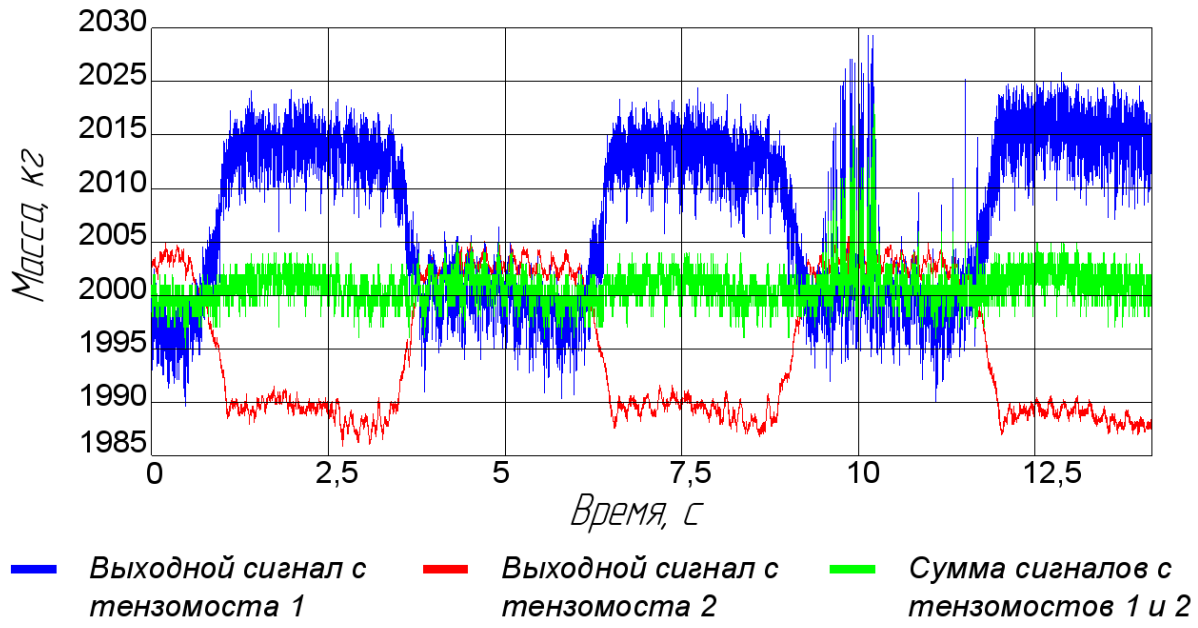

Рисунок 5 – Сигналы соответственно первого и второго тензомоста, а также сигнал, соответствующий среднему арифметическому их значению
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Signals of the first and second strain bridge, respectively, as well as a signal corresponding to their arithmetic mean
Source:compiled by the authors.

На рисунке 6 приведен результат предварительной фильтрации сигнала датчика нагрузки. Длина окна сглаживания фильтра кратна периоду шума, связанного с электромагнитными помехами, и составляет 50 мс.

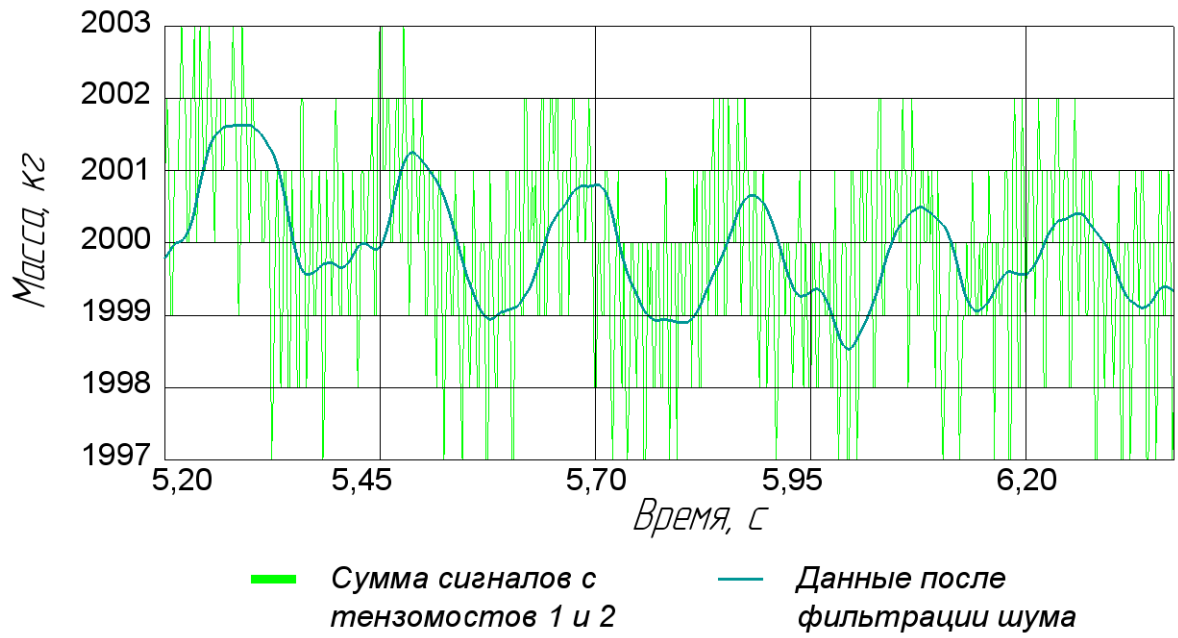

Рисунок 6 – Фильтрация шума, вызванного электромагнитными помехами
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Filtering of noise caused by electromagnetic interference
Source: compiled by the authors.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

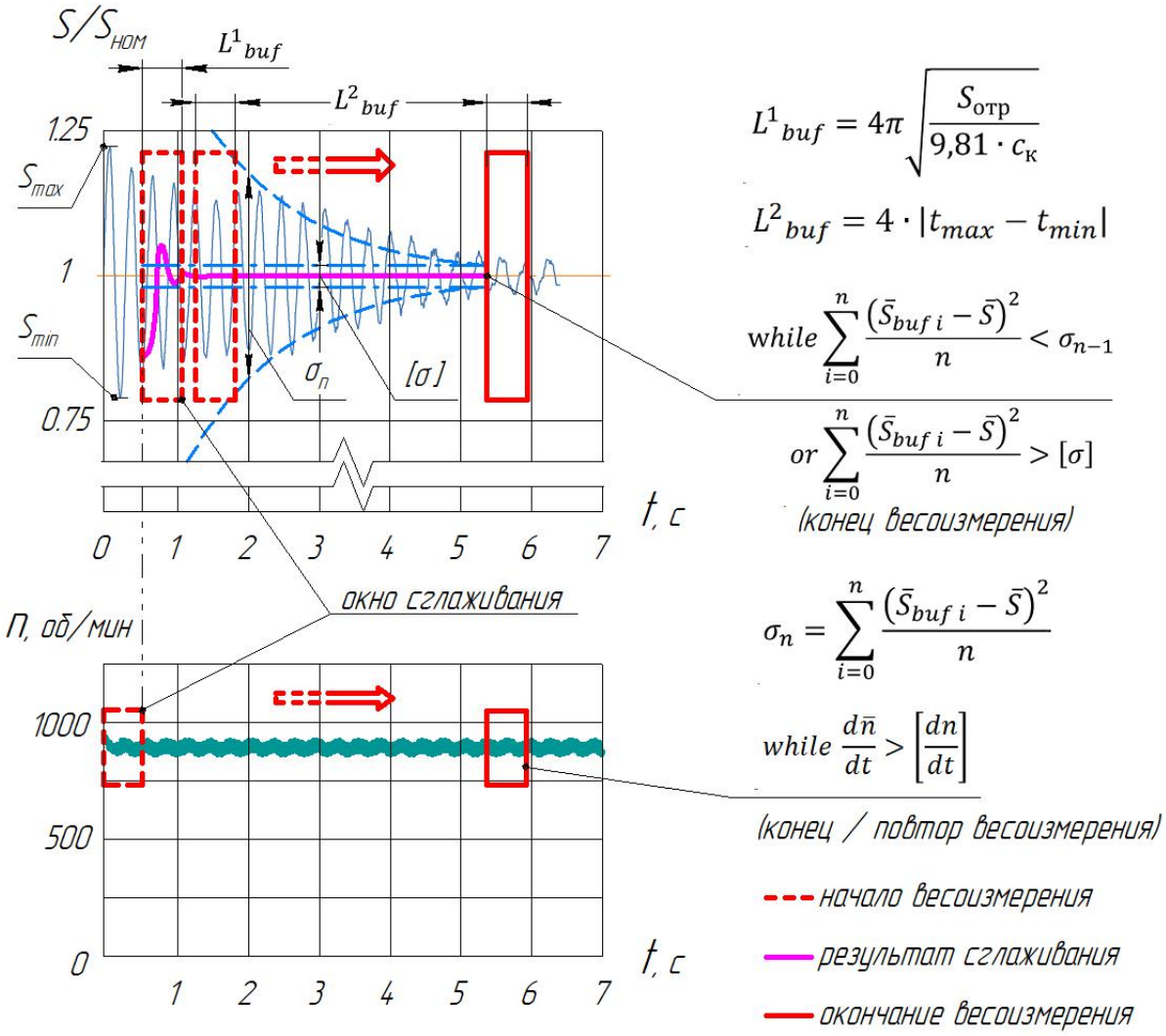

Рисунок 7 – Иллюстрация алгоритма работы весоизмерения: S – показание датчика нагрузки, $S_{ном}$ – показание датчика нагрузки от груза номинальной массы, S_{max} – максимальная динамическая нагрузка, S_{min} – нагрузка, соответствующая первому минимуму после отрыва груза от основания, n – скорость вращения электродвигателя механизма подъема, об/мин, t – время, с
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Illustration of the algorithm of the weighing operation. S – load sensor reading, $S_{ном}$ is the indication of the load sensor from the load of the nominal mass, S_{max} is the maximum dynamic load, S_{min} is the load corresponding to the first minimum after the load is detached from the base, n is the rotation speed of the electric motor of the lifting mechanism, rpm, t is the time
Source:compiled by the authors.

Последовательность обработки сигнала на основном этапе цикла представлена на рисунке 7. Одновременная запись сигналов тензометрического датчика и датчика скорости позволяют вычислить участок, пригодный для измерения (скорость электродвигателя механизма подъема постоянная + отрыв груза от основания). Показаны участки динамического процесса, на которых для фильтрации используются теоретически и экспериментально вычисленные длины окна сглаживания. Также приведено условие окончания алгоритма – достижение точностью весоизмерения требуемого значения.

На рисунке 8 представлена обработка динамического процесса, содержащего переходный процесс торможения механизма подъема. В момент остановки основной этап алгоритма завершается, и алгоритм возвращается к предварительному этапу, после чего основной этап повторяется с вновь рассчитанными параметрами фильтра до момента определения массы груза с точностью, равной требуемому значению.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

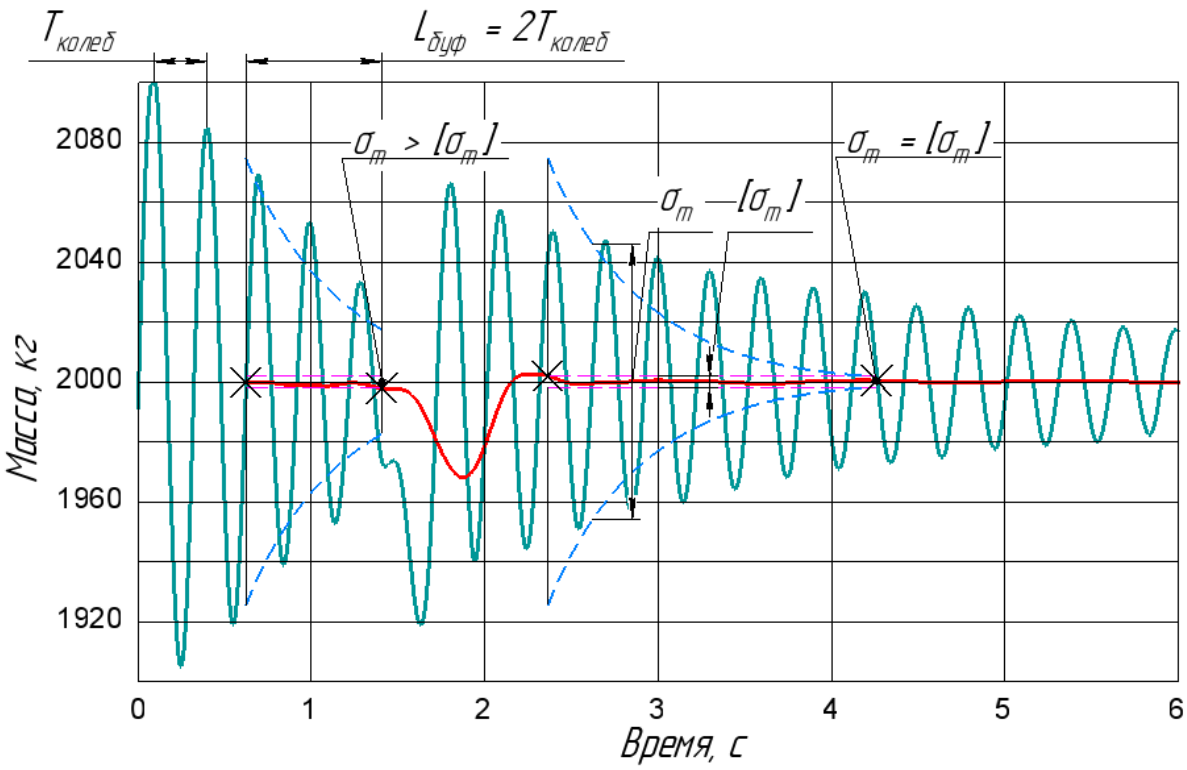

Рисунок 8 – Работа алгоритма весоизмерения при наличии динамических нагрузок
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Operation of the weighing algorithm in the presence of dynamic loads
Source:compiled by authors.

В таблице 2 приведены результаты работы алгоритма весоизмерения и их статистическая обработка. В таблице условием завершения алгоритма являлось достижение точности весоизмерения 3%, что соответствует требуемой точности данных регистратора параметров согласно ГОСТ 33713–2015. При этом эффективность работы алгоритма оценивалась по времени, требуемому на схождение к требуемой точнрости.

Таблица 2
Измерение массы груза с уровнем точности 3%
Источник: составлено авторами.

Table 2
Measuring the weight of a load with an accuracy level of 3%
Source: compiled by the authors.

№	1	2	3	4	5	Δ
$m_{гр}$, кг	1968	1985	2028	2036	1961	1996 ± 38
$t_{изм}$, с ($\sigma = 3\%$)	4,7	3,6	2,0	3,2	4,1	3,5 ± 1,4
$k_p^{\frac{min}{max}}$	0,87/1,04	0,89/1,07	0,95/1,14	0,96/1,15	0,86/1,03	-
$N_t^{\frac{min}{max}}$	0,87/1,04	1,76/2,11	2,71/3,25	3,67/4,40	4,53/5,43	-9% / +8%

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Таблица 3
Измерение массы груза с предельным временем весоизмерения 10 сек
Источник: составлено авторами.

Table 3
Measurement of the weight of the cargo with a maximum weighing time of 10 s
Source:compiled by the authors.

№	1	2	3	4	5	Δ
$m_{гр}$, кг	2014	2006	1981	2010	2001	2002 ± 17
$t_{изм}$, с ($\sigma = var$)			10			-
σ, %	0,8	1,0	1,2	1,1	0,5	1,2
$k_p^{\frac{min}{max}}$	1,00/1,05	0,98/1,04	0,94/1,01	0,98/1,05	0,99/1,01	-
$N_t^{\frac{min}{max}}$	1,00/1,05	1,98/2,10	2,92/3,11	3,90/4,16	4,89/5,17	-2% / +3%

В таблице 3 условием завершения алгоритма являлось достижение предельного времени весоизмерения, принятого равным $t_{изм}$ = 10 с.

ОБСУЖДЕНИЕ

Из рисунка 6 видно, что на вход разработанному алгоритму весоизмерения подается предобработанный сигнал. Схема наклейки и соединения тензорезисторов (см. рисунок 4) позволяет компенсировать колебания груза (см. рисунок 5), вызванные его раскачиванием (аналогично математическому маятнику). Фильтрация этой гармоники до входа алгоритма позволяет значительно сократить время его работы пропорционально отношению периодов поперечных колебаний груза и продольных колебаний усилия в канатном подвесе.

На основании данных таблицы 2 видно, что среднее время работы алгоритма весоизмерения при схождении точности к 3% составляет 2…5 сек. Такое значение точности характерно для регистраторов параметров работы крана. Полученный результат в несколько раз меньше, чем средняя продолжительность включения механизма подъема. Этого удалось достичь за счет того, что алгоритм, включающий подстраиваемый под каждый подъем фильтр, способен на ранней стадии динамического процесса преобразовавать и далее использовать данные, близкие к среднему значению нагрузки, и фактически всё время основного этапа тратится на накопление статистики для вхождения измерения в требуемую трубку точности.

Известный алгоритм весоизмерения, используемый регистраторами параметров работы крана фирмы ЗАО «ИТЦ «КРОС», имеет постоянный интервал осреднения, равный 1 сек, и нагрузка за цикл работы определяется как наибольшее из секундных осреднений нагрузки. Недостатков данного алгоритма, заключающихся в ложной фиксации динамической нагрузки, и ошибкой, вызванной отклонением интервалом осреднения от значения, кратного периоду главной гармоники, лишен разработанный алгорим. Этого удалось достичь за счет введения в алгоритм предварительного этапа и функции контроля установившегося движения, выделяющих наиболее пригодный для весоизмерения участок динамического процесса; а также за счет адаптивного фильтра, подстраивающегося под параметры динамической системы: вес груза, текущую жесткость и длину канатного подвеса.

Из таблицы 3 сделан вывод, что для некоторых технологических процессов с достаточно продолжительным этапом подъема груза или остановки привода с поднятым грузом порядка 10 сек возможно получить требуемую ГОСТ 33713–2015 точность определения расчетных параметров, таких как коэффициент распределения нагрузки и характеристическое число.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка точностных и временных параметров показала применимость разработанного алгоритма весоизмерения в задаче определения массы груза для регистраторов параметров работы крана. Требуемая ГОСТ 33713–2015 точность 3% достигается в режиме подъема груза с установившейся скоростью за 2…5 сек, что в разы меньше среднего времени работы механизма подъема за цикл.

Преимуществом разработанного алгоритма является оцененная точность, что позволяет получать расчетные параметры регистратора параметров (коэффициент распределения нагрузки и характеристическое число) с гарантированной точностью.

Алгоритм весоизмерения позволяет адаптировать прибор, его реализующий, под технологический процесс работы крана и эффективно использовать пригодные для измерения участки динамического процесса. Расчет точности в каждом рабочем цикле позволяет без повышения характеристик элементной базы повысить точность интегральных (расчетных) параметров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Полквой М. А., Сторожев А. А. Анализ Федеральных норм и правил, регламентирующих процесс безопасной эксплуатации подъемных сооружений // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. 2015. № 1 (21). С. 65 – 75. EDN TKBISD.

2. Воронцов Д. С. Применение данных с регистраторов параметров работы крана с целью определения ресурса работы грузоподъемных кранов с истекшим сроком службы // European Science. 2015. № 3 (4). С. 10 – 17. EDN TXGUAB.

3. Скосырский Н. П., Даньшин В. В., Будаков Д. С. Использование регистраторов параметров работы на мостовых грузоподъемных кранах, работающих со сменными грузозахватными приспособлениями // Инновации в строительстве и промышленности. 2016. № 7(9). 5 с. EDN VTINPX.

4. Объективная информация о работе подъемно-транспортных машин как основа повышения качества информационных систем грузообрабатывающих предприятий / Н. Ю. Иванова, С. Д. Иванов, С. А. Надеженков, А. Н. Назаров // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2023. № 2. С. 81 – 96. EDN MRGIFW.

5. Иванов С. Д. Стенд для изучения работы ограничителя грузоподъемности и регистратора параметров работы мостового крана // Механизация строительства. 2012. № 8 (818). С. 32 – 37. EDN PEWNOL.

6. Бром А. Е., Иванов С. Д., Шакаров К. К. Использование регистраторов параметров при эксплуатации мостовых кранов // Механизация строительства. 2016. Т. 77, № 6. С. 36 – 40. EDN VZYBZX.

7. Скосырский Н. П., Даньшин В. В., Будаков Д. С. Применение приборов безопасности ЗАО «ИТЦ «КРОС» // Промышленные и строительные технологии. 2016. № 8 (10). 5 с. EDN VTPROD.

8. Тимин Ю. Ф., Сушинский В. А. Опыт применения регистраторов параметров в кранах мостового типа // Подъемно-транспортное дело. 2009. № 3(53). С. 12 – 14. EDN NDIICZ.

9. Скосырский Н. П., Даньшин В. В., Будаков Д. С. Влияние предварительных порогов срабатывания ограничителя грузоподъемности на динамику мостового крана // Промышленные и строительные технологии. 2016. № 7 (9). 8 с. EDN VTPRKH.

10. Иванов С. Д., Михальчик Н. Л. Создание и экспериментальное обоснование алгоритма работы весоизмерительной системы на базе регистратора параметров // Подъемно-транспортное дело. 2019. № 3-4 (97). С. 27–30. EDN WRJTFW.

11. Ivanov, S. D. Selectionofarationalalgorithmfordataprocessingoftheweightmeasuringsystem of a hoisting crane / S. D. Ivanov, A. N. Nazarov, N. L. Mikhalchik // Journal of Physics: Conference Series, Belgorod, 09–10 марта 2021 года. Vol. 1926. Belgorod: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012047.DOI 10.1088/1742-6596/1926/1/012047. EDNJIUUGG.

12. Переверзев А. Л. Адаптивный цифровой фильтр на основе скользящего среднего // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2005. № 2. С. 70 – 72. EDN HZNLZN.

13. 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. EDN XLXJRI.

14. Иванов С. Д., Назаров А. Н. Оценка применимости электрических параметров привода для определения нагрузки на механизм подъема кранов мостового типа // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 1(83). С. 36 – 47. DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47. EDN XZSFJQ.

15. Назаров А. Н. Движущее усилие двигателя механизма подъема кранов мостового типа в реальных условиях эксплуатации // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1(89). С. 34 – 50. DOI 10.26518/2071-7296-2023-20-1-34-50. EDN DJBHGB.

REFERENCES

1. Polkvoj M. A. Analiz Federal'nyh norm i pravil, reglamentirujushhih process bezopasnoj jekspluatacii pod#emnyh sooruzhenij [Analysis of the Federal norms and rules regulating the process of safe operation of lifting structures]. *Chrezvychajnye situacii: promyshlennaja i jekologicheskaja bezopasnost'*. 2015; 1 (21): 65 – 75. EDN TKBISD. (In Russ.)

2. Voroncov D. S. Primenenie dannyh s registratorov parametrov raboty krana s cel'ju opredelenija resursa raboty gruzopod'emnyh kranov s istekshim srokom sluzhby [Application of the data from the crane operation parameters recorders in order to determine the resource of the hoisting cranes with the expired service life]. *European Science*. 2015; 3 (4): 10 – 17. EDN TXGUAB. (In Russ.)

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

3. Skosyrskij N. P., Dan'shin V. V., Budanov D. S. Ispol'zovanie registratorov parametrov raboty na mostovyh gruzopod'emnyh kranah, rabotajushhih so smennymi gruzozahvatnymi prisposoblenijami [The use of recorders of operation parameters on overhead lifting cranes operating with replaceable lifting devices]. *Innovacii v stroitel'stve i promyshlennosti.* 2016; 7 (9): 5. (In Russ.)

4. Ivanova N. Ju., Ivanov S. D., Nadezhenkov S. A., Nazarov A. N. Ob'ektivnaja informacija o rabote pod'emno-transportnyh mashin kak osnova povyshenija kachestva informacionnyh sistem gruzoobrabatyvajushhih predprijatij [Objective information about the operation of lifting and transport machines as a basis for improving the quality of information systems of cargo handling enterprises]. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i jekspluatacija.* 2023; 2: 81 – 96. EDN MRGIFShh. (In Russ.)

5. Ivanov S. D. Stend dlja izuchenija raboty ogranichitelja gruzopod'emnosti i registratora parametrov raboty mostovogo krana [A stand for studying the operation of the load capacity limiter and the recorder of the parameters of the bridge crane]. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2012; 8 (818): 32-37. EDN PEShhNOL. (In Russ.)

6. Brom A. E., Ivanov S. D., Shakarov K. K. Ispol'zovanie registratorov parametrov pri jekspluatacii mostovyh kranov [Use of parameter recorders in the operation of overhead cranes]. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2016; T. 77, 6: 36 – 40. EDN VZYBZX. (In Russ.)

7. Skosyrskij N. P., Dan'shin V. V., Budanov D. S. Primenenie priborov bezopasnosti ZAO "ITC "KROS" [Application of safety devices of CJSC "RDC KROS"]. *Promyshlennye i stroitel'nye tehnologii*. 2016; 8 (10): 5. EDN VTPROD. (In Russ.)

8. Timin Ju. F., Sushinskij V. A. Opyt primenenija registratorov parametrov v Kranah mostovogo tipa [Experience in the application of parameter recorders in bridge-type cranes]. Pod'emno-transportnoe delo. 2009; 3 (53):12 – 14. EDN NDIICZ. (In Russ.)

9. Skosyrskij N. P., Dan'shin V. V., Budanov D. S. Vlijanie predvaritel'nyh porogov srabatyvanija ogranichitelja gruzopod'emnosti na dinamiku mostovogo krana [Influence of the preliminary thresholds of the capacity limiter operation on the dynamics of the overhead crane]. *Promyshlennye i stroitel'nye tehnologii*. 2016; 7 (9): 8. EDN VTPRKH. (In Russ.)

10. Ivanov S. D., Mihal'chik N. L. Sozdanie i jeksperimental'noe obosnovanie algoritma raboty vesoizmeritel'noj sistemy na baze registratora parametrov [Creation and experimental substantiation of the algorithm of the weight-measuring system based on the parameter recorde]. Pod'emno-transportnoe delo. 2019; 3-4 (97): 27 – 30. EDN WRJTFW. (In Russ.)

11. Ivanov S., D. Nazarov A. N., Mikhalchik 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 марта 2021 года. Vol. 1926. Belgorod: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012047. DOI 10.1088/1742-6596/1926/1/012047. EDN JIUUGG.

12. Pereverzev A. L. Adaptivnyj cifrovoj fil'tr na osnove skol'zjashhego srednego [Adaptive digital filter based on the moving average]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jelektronika*. 2005; 2: 70-72. EDN HZNLZN. (In Russ.)

13. Mihalev A. V., Nazarov A. N. Primenenie algoritma skol'zjashhego srednego dlja zadachi opredelenija massy gruza [Application of the moving average algorithm for the problem of the cargo mass determination]. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i jekspluatacija*. 2023; 2: 44 – 57. EDN XLXJRI. (In Russ.)

14. Ivanov S.D., Nazarov A.N. Drive electrical parameters applicability evaluation to determine loads on bridge crane lifting mechanism. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19 (1): 36 – 47. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-1-36-47

15. Nazarov A.N. Motor driving force of bridge-type crane lifting mechanism under real operating use. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023;20(1):34 – 50. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-34-50

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Назаров А. Н. Разработка алгоритма весоизмерения, проведение эксперимента, анализ результатов, оформление статьи.

Иванов С. Д. Постановка задачи, анализ результатов.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Alexander N. Nazarov. Development of weight measurement algorithm, experimentation, analysis of results, paper design.

Sergey D. Ivanov. Problem statement, analysis of the results.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Назаров Александр Николаевич – аспирант кафедры «Подъёмно-транспортные системы». SPIN-код: 2028-7651.

Иванов Сергей Дмитриевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Подъёмно-транспортные системы».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander N. Nazarov. Postgraduate student of the Hoisting and Transport Systems Department. SPIN-код: 2028-7651.

Sergey D. Ivanov. Cand. of Sci., Associate Professor of the Hoisting and Transport Systems Department.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal