

Машины и Установки проектирование, разработка и эксплуатация

Сетевое издание
МОО "Стратегия объединения"
<http://maplants-journal.ru>

Ссылка на статью:

//Машины и установки: проектирование,
разработка и эксплуатация.

Электрон. журн. 2025. № 3. С. 1 – 10

DOI:

Представлена в редакцию: 11.09.2025

Принята к публикации: 01.10.2025

© МОО «Стратегия объединения»

УДК 621.86

Совершенствование тензометрической оси для ограничителей грузоподъемности

Рощин В. А.¹

Назаров А. Н.^{2*}

*alexnazavr@yandex.ru

¹ООО «Инженерно-технический центр
«КРОС» (Московская обл., Россия)

²МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, Россия)

В статье представлено усовершенствование конструкции тензометрической оси для ограничителей грузоподъемности. Анализируется серийный датчик с расположением тензорезисторов на цилиндрической поверхности сквозного отверстия, что вызывает их предварительную деформацию и снижает чувствительность. Предложена новая конструкция с размещением тензорезисторов на плоской стенке между двумя глухими отверстиями.

Методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS проведен расчет напряженно-деформированного состояния, подтвердивший возможность значительного увеличения рабочих напряжений и, как следствие, чувствительности датчика за счет изменения толщины плоской стенки без ущерба для общей прочности оси.

Изготовлен опытный образец, проведены натурные испытания. Результаты эксперимента показали, что новая конструкция обеспечивает чувствительность в 4,3 раза выше, чем у серийного образца. Это позволяет значительно повысить точность измерений и безопасность эксплуатации грузоподъемных машин.

Ключевые слова: тензометрическая ось, ограничитель грузоподъемности, тензорезистор, чувствительность, повторяемость, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.

Введение

ООО «ИТЦ «КРОС» выпускает широкую линейку многофункциональных приборов безопасности серии «ОГШ», применяемых в качестве ограничителей грузоподъемности и регистраторов параметров на грузоподъемных машинах различного типа. С целью повышения эксплуатационных характеристик и защищённости ГПМ данные приборы постоянно совершенствуются.

В связи с тем, что показания данных приборов могут значительно отличаться от реальных нагрузок [1-3] и, следовательно, приводить к неправильному расчёту остаточного

ресурса механизмов, одним из направлений совершенствования приборов является повышение точности определения нагрузок. Наиболее существенным составным элементом прибора, определяющим точность показаний, является датчик, поскольку он является источником первичной информации.

Качество первичной информации является общим вопросом для всех отечественных производителей приборов безопасности, что показано в статьях [4-6]. Согласно требованиям¹ допустимая ошибка регистрации параметров составляет 3%, на что, кроме характеристик непосредственно датчика влияют динамические нагрузки, алгоритмы обработки [7-9], отклонения при установке. Поэтому наряду с разработкой наиболее совершенных алгоритмов ставится задача отыскания конструктивных схем датчиков, позволяющих получать первичную информацию достаточного качества.

Около 40% выпускаемых ЗАО «ИТЦ «КРОС» датчиков нагрузки относятся к классу тензоосей, так как данный тип датчиков обладает существенными преимуществами: технологичностью конструкции, меньшими габаритными размерами узлов встройки. Тензооси состоят из упругого элемента, деформация которого прямо пропорциональна приложенной нагрузке, и чувствительных элементов (тензорезисторов), сопротивление изменяется в зависимости от деформации, что и даёт возможность определить приложенную к датчику нагрузку. В связи с отличием напряжённо-деформированного состояния на различных участках упругого элемента место наклейки тензорезисторов может существенно влиять на качество его показаний [10-12].

Целью работы является определение параметров тензометрической оси, превосходящей существующие серийные образцы по чувствительности и повторяемости.

Материалы и методы

Качество показаний тензометрического датчика определяется его чувствительностью и повторяемостью². В серийно-выпускаемых тензоосях ООО «ИТЦ «КРОС» тензорезисторы наклеиваются на цилиндрическую поверхность сквозного отверстия, что приводит к их предварительной деформации и снижению чувствительности датчика.

В целях повышения чувствительности путем устранения предварительной деформации тензорезистора была предложена конструкция тензооси с наклейкой тензорезисторов на плоскую стенку между двумя цилиндрическими глухими отверстиями. Серийно выпускаемая и предложенная конструкции тензооси с указанными местами наклейки тензорезисторов представлены на рис. 1.

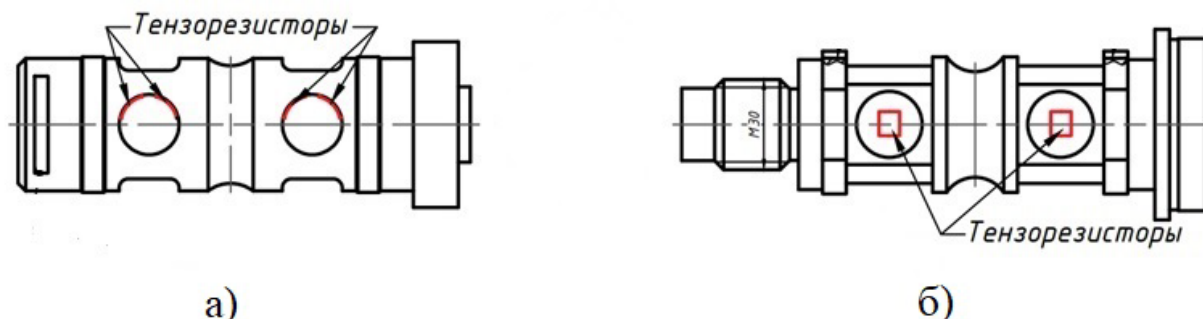


Рис. 1. а) Серийно выпускаемая конструкция; б) Предложенная конструкция

¹ ГОСТ 33713 - 2015. Краны грузоподъемные. Регистраторы параметров работы. Общие требования.

² ГОСТ OIML R-76-1-2011. Весы неавтоматического действия. Часть 1. Метрологические и технические требования. Испытания

Расчет, проведенный методом конечных элементов программного комплекса ANSYS показал, что значения напряжений в местах наклейки на конструкции с плоской стенкой в зависимости от её толщины могут значительно превышать напряжения на цилиндрической поверхности отверстия [13]. При этом толщину плоской стенки можно изменять в широком диапазоне, добиваясь необходимой чувствительности датчика.

Задача соблюдения баланса между противоречащими требованиями получения наибольшей чувствительности датчика и обеспечения прочности на уровне остальных элементов силовой цепи является ключевой при разработке тензометрических датчиков. Повышение прочности ведет к снижению деформаций и, как следствие, его чувствительности. Предложенная конструкция позволяет разделить выполнение данных требований между различными частями одного датчика, что позволяет одновременно добиться требуемого уровня напряжений в области наклейки тензорезисторов (на плоской стенке) и высокой прочности оси – коэффициент запаса равен 2,5 (так как большая часть силового потока воспринимается цилиндрическими элементами оси).

Пример расчета напряженно деформированного состояния методом конечных элементов в области наклейки тензорезисторов приведен на рис. 2.

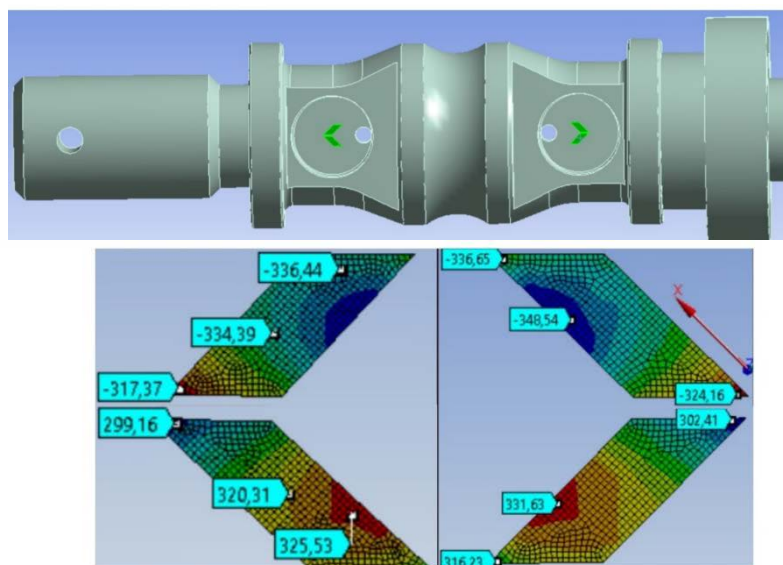


Рис. 2. Модель разрабатываемой тензооси в программном комплексе ANSYS и напряженно-деформированное состояние о области наклейки тензорезисторов

На основе проведенных расчетов был изготовлен опытный образец тензооси (рис. 3) с наклейкой тензорезисторов на плоскую стенку.



Рис. 3. Опытный образец разрабатываемой тензооси

Для проверки эксплуатационных характеристик разрабатываемой тензооси и сравнения её с серийно выпускаемыми образцами был проведен натурный эксперимент. Груз массой 2 т поднимали мостовым краном через крюковую скобу с установленной в неё тензоосью. Запись показаний обоих датчиков проводилась с помощью специальной платы сбора данных с частотой опроса 250 Гц и разрешением АЦП 16 бит. Полученные данные передавались на персональный компьютер, где производилась обработка первичной информации (рис. 4).

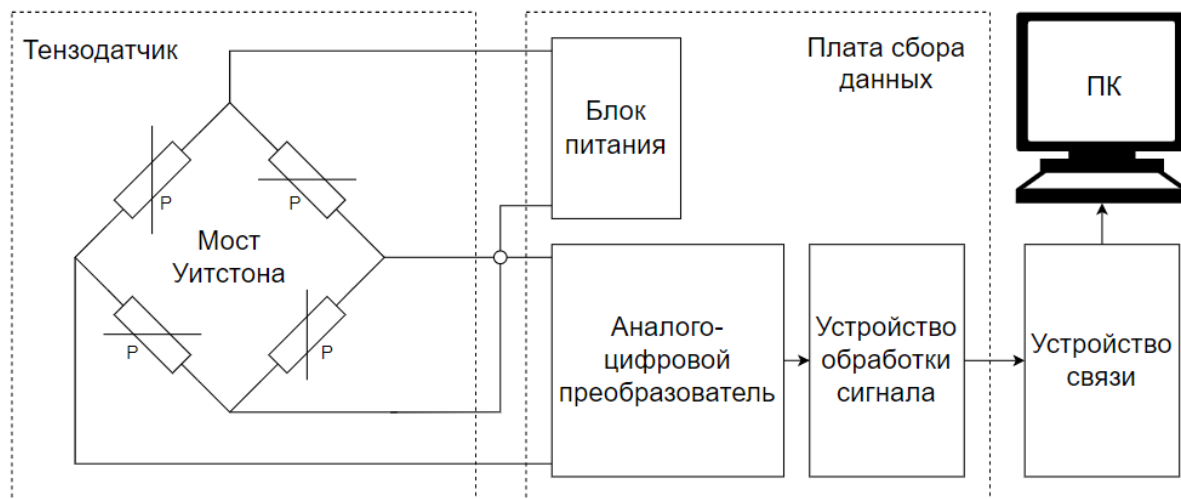


Рис. 4. Схема системы сбора и обработки данных усилия в механизме подъема

За измеренное значение массы груза принималось количество кодов АЦП, полученное непосредственным осреднением показаний, снятых в течении 6,8 секунды (определяется размером буфера платы сбора данных) после успокоения динамических колебаний (1 минута после отключения привода механизма подъема крана) [14]. Для оценки повторяемости измерение повторялись 10 раз.

Результаты

Результаты эксперимента представлены на рис. 5.

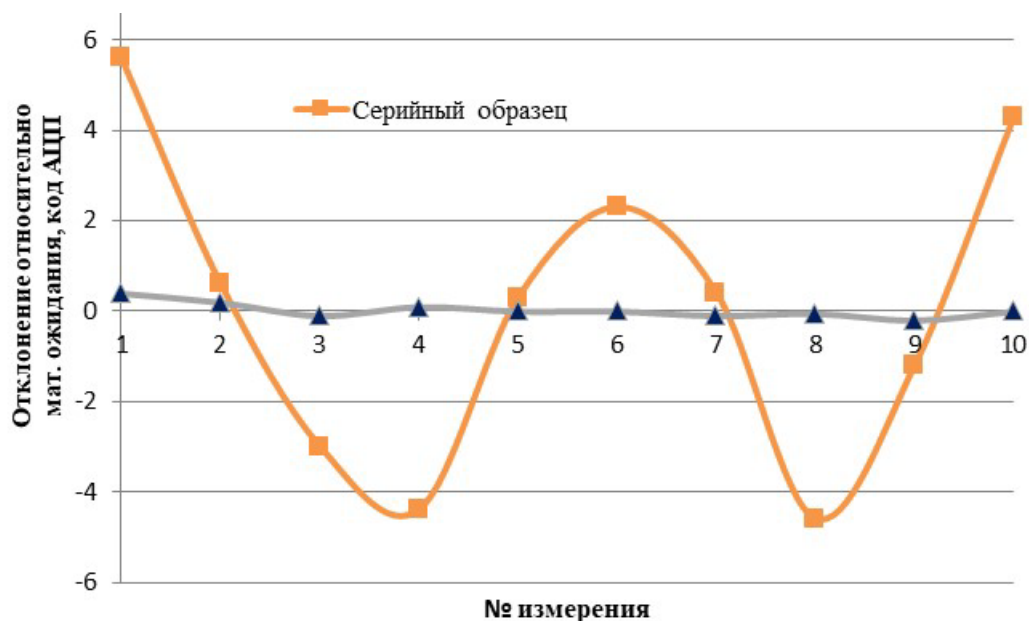


Рис. 5. Повторяемость показаний исследуемых тензоосей при нагрузке 2 т

Разброс показаний серийно-выпускаемого датчика относительно среднего значения составил 10,1 кодов АЦП, а вновь разработанного – 0,5. При этом чувствительность датчика составила 1550 и 820 кодов АЦП соответственно.

Так как повторяемость в отличие от чувствительности не зависит от места наклейки, непосредственное сравнение полученных сигналов не позволяет корректно сравнить особенности конструкции. Для выявления датчика с более качественным сигналом была произведена корректировка чувствительности серийного образца таким образом, чтобы повторяемость показаний стала такой же, как у опытного.

Скорректированная чувствительность датчика составила 190 кодов АЦП при нагрузке 2 тонны (при новой конструкции 820 кодов АЦП). Приведенная чувствительность датчиков представлена на рис. 6.

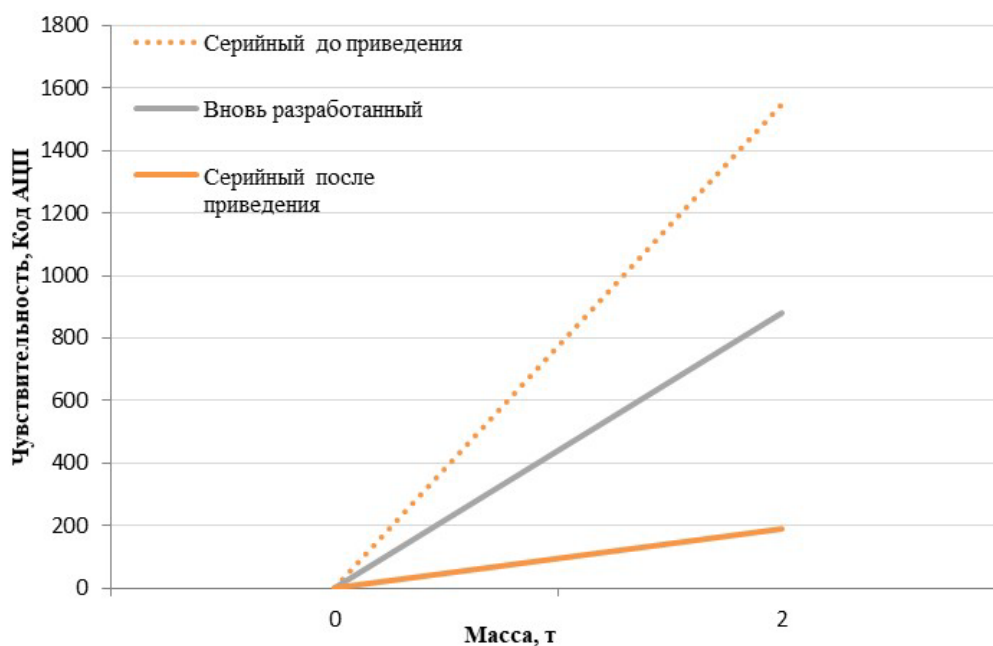


Рис. 6. Приведенная чувствительность датчиков

Заключение

Таким образом, экспериментально подтверждено, что усовершенствованная конструкция тензооси, изготовленной из условия равнопрочности серийному образцу, при обеспечении одинаковой повторяемости показаний обеспечивает чувствительность в 4,3 раза выше.

Такой результат получен вследствие решения использовать в конструкции вертикальную стенку в качестве ослабленного места для наклейки тензорезисторов, что позволило без ущерба для общей прочности оси локально повысить напряжения в зоне измерения.

Основным конструктивным параметром является толщина стенки, которая ограничена технологическими возможностями производства и пределом текучести материала (при малой толщине напряжения превысят предел текучести, что повлечет возникновение постоянной составляющей ошибки измерения, обусловленной пластической деформацией материала стенки).

В комплексе с совершенствованием алгоритмов [15-17] обработки данных регистратором параметров применение данной конструкции датчика способно повысить точность расчета эксплуатационных показателей крана и механизма подъема. При этом технический и экономический эффект будет проявляться в снижении простоев, повышении точности планирования и качества проведения технических обслуживаний и ремонтов грузоподъемных кранов [18, 19].

Благодарности

Авторы статьи выражают свою благодарность сотрудникам кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана и коллективу ООО «ИТЦ «КРОС» за их помощь, рекомендации, ценные замечания и критику.

Список литературы

1. Иванов С.Д., Бром А.Е., Шакаров К.К. Использование регистраторов параметров при эксплуатации мостовых кранов // Механизация строительства. 2016. – №6. – С. 15-21.
2. Иванов С.Д., Иванова Н.Ю. Техничко-экономические показатели эффективности подъемно-транспортных работ // Механизация строительства. 2016. – №6. – С. 15-21.
3. Иванов С.Д., Михальчик Н.Л. Создание и экспериментальное обоснования алгоритма работы весоизмерительной системы на базе регистратора параметров // Подъемно-транспортное дело. 2019. – №3-4. – С. 27-30.
4. Akpan V. A. An experimental configuration of strain gauges for weighing systems design. International Journal of Pure and Applied Science, 2008, *1*(2).
5. Глазков С.А., Горбушин А.Р., Козик А.Е., Крапивина Е.А., Семенов А.В., Якушев В.А. Методы определения массы грузов в движении с использованием однокомпонентного тензометрического динамометра. Izmeritel'naya Tekhnika. 2025;74(3):49-58. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2025-3-49-58>
6. Объективная информация о работе подъемно-транспортных машин как основа повышения качества информационных систем грузообработывающих 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.
7. Назаров А. Н. Алгоритмическая обработка объективной информации о характере работы кранов мостового типа / А. Н. Назаров, С. Д. Иванов // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в машиностроительной, дорожной и строительной отраслях - 2023 : Материалы международной научно-практической конференции, Белгород, 21–23 сентября 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 178-184. – EDN WGOGHA.
8. Михалев А. В. Применение алгоритма скользящего среднего для задачи определения массы груза / А. В. Михалев, А. Н. Назаров // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2023. – № 2. – С. 44-57. – EDN XLXJRI.
9. Ivanov S. D. Selection of a rational algorithm for data processing of the weight measuring system of a hoisting crane / S. D. Ivanov, A. N. Nazarov, N. L. Mikhalechik // 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.
10. Пушкарев Михаил. Нормализация сигналов мостовых чувствительных элементов // Компоненты и Технологии. 2005. №46. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/normalizatsiya-signalov-mostovykh-chuvstvitelnykh-elementov> (дата обращения: 05.09.2025).
11. Боряняк Леонид, Непочатов Юрий. Разработка конструкции и технологии изготовления тензодатчика с повышенной чувствительностью и точностью измерений для электронных весов // Компоненты и Технологии. 2006. №63. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-konstruktsii-i-tehnologii-izgotovleniya-tenzodatchika-s-povyshennoy-chuvstvitelnostyu-i-tochnostyu-izmereniy-dlya> (дата обращения: 13.06.2023).
12. Сушников В. А. Оценка влияния колебаний температуры на точность измерений тензорезистивных и емкостных преобразователей // Наука и современность. 2011. №8-2. URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vliyaniya-kolebaniy-temperatury-na-tochnost-izmereniy-tenzorezistivnyh-i-emkostnyh-preobrazovateley> (дата обращения: 13.06.2023).

13. Егоров Г.Р. Влияние погрешности позиционирования тензорезистора на чувствительность датчика нагрузки в канате. Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2025;(2):15-30.

14. Назаров А.Н., Иванов С.Д. Использование алгоритма весоизмерения на основе фильтра скользящего среднего в регистраторе параметров работы мостового крана. Научный рецензируемый журнал "Вестник СибАДИ". 2023;20(4):418-431. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-418-431>. EDN: СВІJMP

15. Иванов С.Д. Развитие направления «промышленная безопасность подъемных сооружений» на кафедре РК4 «Подъемно-транспортные системы». Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2024;(4):11-24.

16. Mikhalev A. V. Development of the load pin for the crane scales / A. V. Mikhalev // European Journal of Technical and Natural Sciences. – 2022. – No. 6. – P. 62-68. – DOI 10.29013/EJTNS-22-6-62-68. – EDN WPUFWR.

17. Агейчева М. М. Оценка остаточного ресурса козлового крана на основе качественной подготовки исходных данных о его фактических условиях работы / М. М. Агейчева // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы (Молодой инженер) : Материалы XXVIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 24–26 апреля 2024 года. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. – С. 11-14. – EDN FDJFOU.

18. Михальчик Н. Л. Построение весоизмерительной системы путем расширения функционала электронного регистратора параметров работы мостового крана / Н. Л. Михальчик, С. Д. Иванов // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта, Екатеринбург, 06 декабря 2019 года / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2020. – С. 169-171. – EDN HAFJBZ.

19. 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) / С. Д. Иванов, Н. Ю. Иванова // Цифровая экономика: технологии, управление, человеческий капитал: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Сборник докладов в области экономики и менеджмента, а также производственных технологий, информационных технологий и технологического менеджмента, Москва, 28 мая 2019 года. – Москва: Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", 2019. – С. 236-241. – EDN OAZGZT.

АВТОРЫ

Рощин Виталий Андреевич, инженер ООО «ИТЦ «КРОС» 141281, Московская область, г.о.Пушкинский, г.Ивантеевка, Санаторный проезд, д.1/1Б, оф. 415. roshchinva@mail.ru

Назаров Александр Николаевич, к.т.н., доцент каф. «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, 105005, Россия, alexnazavr@yandex.ru, ORCID 0000-0002-8039-4331.

Upgrading the Strain-Gauge Axle for Load Limiters

Vitaly A. Roshchin¹,
Alexander N. Nazarov^{2*}

[*alexnazavr@yandex.ru](mailto:alexnazavr@yandex.ru)

¹Engineer ITC "KROS" LLC

²Bauman Moscow State Technical University
(Moscow, Russia)

The article presents an improvement in the design of a strain gauge axle for load limiters. It analyzes a serial sensor with strain gauges mounted on the cylindrical surface of a through hole, which causes their pre-deformation and reduces sensitivity. A new design is proposed, with strain gauges placed on a flat wall between two blind holes.

A finite element analysis in the ANSYS software package calculated the stress-strain state, confirming the possibility of a significant increase in working stresses and, consequently, the sensor's sensitivity by changing the thickness of the flat wall without compromising the overall strength of the axle.

A prototype was manufactured and field tests were conducted. The experimental results showed that the new design provides a sensitivity 4.3 times higher than that of the serial sample. This allows for a significant increase in measurement accuracy and the safety of crane operation.

Keywords: strain gauge axle, load limiter, sensitivity, repeatability, stress-strain state, finite element method.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to employees of the Department "Lifting and Transport Systems" of N.E. Bauman Moscow State Technical University and the team of LLC «ITC «KROS» for their help, recommendations, valuable comments and criticism.

References

1. Ivanov S.D., Brom A.E., Shkarov K.K. Use of parameter recorders during the operation of overhead cranes Mechanization of Construction. 2016, no. 6, pp. 15-21.
2. Ivanov S.D., Ivanova N.Yu. Technical and economic performance indicators of handling operations Mechanization of Construction. 2016, no. 6, pp. 15-21.
3. Ivanov S.D., Mikhalechik N.L. Development and experimental substantiation of the operating algorithm for a weighing system based on a parameter recorder Hoisting and Transport Engineering. 2019, no. 3-4, pp. 27-30.
4. Akpan, V. A. An experimental configuration of strain gauges for weighing systems design. International Journal of Pure and Applied Science, 2008, *1*(2).

5. Glazkov S.A., Gorbushin A.R., Kozik A.E., Krapivina E.A., Semenov A.V., Yakyshev V.A. Methods for determining the mass of objects in motion using a one-component strain-gauge dynamometer. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2025;74(3):49-58. (In Russ.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2025-3-49-58>
6. Ivanova, N. Yu., Ivanov, S. D., Nadezhenkov, S. A., Nazarov, A. N. Objective Information on the Operation of Hoisting-and-Transport Machines as a Basis for Improving the Quality of Information Systems at Cargo-Handling Enterprises. // *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2023. № 2. pp. 81 – 96.
7. Nazarov, A. N., & Ivanov, S. D. (2023). Algorithmic processing of objective information on the nature of overhead cranes operation Energy and resource-saving technologies and equipment in mechanical engineering, road and construction industries 2023: Proceedings of the international scientific-practical conference, Belgorod, September 21–23, 2023 (pp. 178-184). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. EDN WGOGHA.
8. 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.)
9. Ivanov, S. D. Selection of a rational algorithm for data processing of the weight measuring system of a hoisting crane / S. D. Ivanov, A. N. Nazarov, N. L. Mikhalev // *Journal of Physics: Conference Series*, Belgorod, 09–10th March 2021. Vol. 1926. – Belgorod: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 012047. – DOI 10.1088/1742-6596/1926/1/012047. – EDN JIUUGG.
10. Pushkarev, M. Normalization of signals from bridge sensing elements [Normalizatsiya signalov mostovykh chuvstvitelnykh elementov]. *Komponenty i Tekhnologii* [Components and Technologies], 2005, no. 46. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/normalizatsiya-signalov-mostovykh-chuvstvitelnykh-elementov> (accessed: 05.09.2025).
11. Borynyak, L., Nepochatov, Yu. Development of the design and manufacturing technology of a strain gauge with increased sensitivity and measurement accuracy for electronic scales [Razrabotka konstruksii i tekhnologii izgotovleniya tenzodatchika s povyshennoy chuvstvitelnostyu i tochnostyu izmereniy dlya elektronnykh vesov]. *Komponenty i Tekhnologii* [Components and Technologies], 2006, no. 63. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-konstruksii-i-tehnologii-izgotovleniya-tenzodatchika-s-povyshennoy-chuvstvitelnostyu-i-tochnostyu-izmereniy-dlya> (accessed: 13.06.2023).
12. Sushnikov, V.A. Evaluation of the influence of temperature fluctuations on the measurement accuracy of strain-resistive and capacitive transducers [Otsenka vliyaniya kolebaniy temperatury na tochnost izmereniy tenzorezistivnykh i emkostnykh preobrazovateley]. *Nauka i sovremennost* [Science and Modernity], 2011, no. 8-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vliyaniya-kolebaniy-temperatury-na-tochnost-izmereniy-tenzorezistivnykh-i-emkostnykh-preobrazovateley> (accessed: 13.06.2023).
13. Egorov G. The effect of the strain gauge placement error on the sensitivity of the cable force sensor. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2025;(2):15-30. (In Russ.)
14. 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
15. Ivanov S.D. Development of the direction "Industrial safety of lifting structures" at the Department of RC4 "Lifting and transport systems". *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2024;(4):11-24. (In Russ.)
16. Mikhalev, A. V. Development of the load pin for the crane scales / A. V. Mikhalev // *European Journal of Technical and Natural Sciences*. – 2022. – No. 6. – P. 62-68. – DOI 10.29013/EJTNS-22-6-62-68. – EDN WPUFWR.

17. Ageicheva, M.M. (2024). Residual life assessment of a gantry crane based on high-quality preparation of initial data on its actual operating conditions [Otsenka ostatochnogo resursa kozlovogo krana na osnove kachestvennoy podgotovki iskhodnykh dannykh o ego fakticheskikh usloviyakh raboty]. Hoisting-transport, construction, road, track, reclamation machines and robotic complexes (Young engineer): Proceedings of the XXVIII Moscow International Interuniversity Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, Moscow, April 24-26, 2024* (pp. 11-14). Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. EDN FDJFOU.

18. Mikhalechik, N.L. & Ivanov, S.D. (2020). Building a weighing system by expanding the functionality of an electronic parameter recorder for overhead crane operation [Postroenie vesoizmeritelnoi sistemy putem rasshireniya funktsionala elektronnoho registratora parametrov raboty mostovogo krana]. In Innovative development of ground transport equipment and technologies: Proceedings of the conference, Yekaterinburg, December 6, 2019 (pp. 169-171). Yekaterinburg: Ural University Press. EDN HAFJBZ.

19. Ivanov, S.D. & Ivanova, N.Yu. Formation of an information base for clarifying the calculation of the residual life and improving the methodology for planning repairs of hoisting-and-transport equipment using safety devices - parameter recorders (on the example of cranes) Digital economy: technologies, management, human capital: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Collection of reports in the field of economics and management, as well as production technologies, information technologies and technological management, Moscow, May 28, 2019* (pp. 236-241). Moscow: Moscow State Technological University "STANKIN". EDN OAZGZT.

AUTHORS

Vitaly A. Roshchin, Engineer ITC "KROS" LLC Office 415, 1/1B Sanatorny Proezd Ivanteevka, Pushkinsky Urban District Moscow Region, 141281 Russia. roshchinva@mail.ru

Alexander N. Nazarov, Cand. Tech. Sc., Associate Professor of the department "Lifting and transport systems" of Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 2nd Baumanskaya str. 1, 105005, Russia, alexnazavr@yandex.ru, ORCID 0000-0002-8039-4331.