



Научная статья

УДК 669.713.7:669.054.83

<https://elibrary.ru/bigrip><https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-241-249>

Трехкомпонентный тензометрический датчик для точного измерения колебания нагрузок

В.В. Жавыркин¹, Л.А. Сладкова^{2✉}^{1,2}Российский университет транспорта, г. Москва, Россия

Резюме. Цель – определение и оценка нагруженности большемерных элементов конструкций машин с использованием универсальных тензометрических датчиков. При создании универсального тензодатчика использовались системный анализ отказов и недостатков при изготовлении и эксплуатации большемерных конструкций, тензометрирование, методы сопротивления материалов и теории упругости кольцевых упругих элементов. Для расчета рациональных параметров датчика был использован программный продукт ANSYS. На основе исследования упругого деформирования колец (определение жесткости и напряженно-деформированного состояния) предложена замена кольцевой формы на восьмигранный многоугольник. Показано, что выбранная форма дает возможность проводить на восьмиграннике размещение тензодатчиков для одновременного измерения усилий растяжения-сжатия, изгиба и кручения, возникающих в элементе конструкции машины, либо при изготовлении большемерных поверхностей. На основании полученных результатов предложены зависимости, позволяющие определять погрешность измерений датчиком. Сравнительный анализ работы кольцевых и восьмигранных датчиков позволил отметить уникальные особенности восьмигранного (октаэдного) датчика, возможность оценки с высокой степенью точности измеряемых величин по трем координатным осям. Проведенные исследования показали, что предполагаемые датчики напряжений позволяют фиксировать величину и колебания нагрузок с высокой точностью измерения. Предлагаемая схема размещения датчиков дает возможность находить вертикальную и горизонтальные составляющие усилий, возникающих в элементе конструкции, и показывает отклонения в процессе измерений. Также предлагаемая схема измерений позволяет минимизировать погрешность взаимного влияния датчиков. Разработанный силоизмеритель является универсальной конструкцией и может использоваться для фиксирования статических и динамических воздействий и применяться для цифрового контроля силовых параметров в диапазоне действия до 5 мм.

Ключевые слова: тензодатчик, силоизмеритель, нагруженность конструкций, испытания, измерение, компенсация погрешности измерений

Для цитирования: Жавыркин В.В., Сладкова Л.А. Трехкомпонентный тензометрический датчик для точного измерения колебания нагрузок // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 241–249. EDN: BIGRIP, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-241-249>.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Three-component strain gauge for precise measurement of load fluctuations

Vadim V. Zhavyrkin¹, Liubov A. Sladkova^{2✉}^{1,2}Russian University of Transport, Moscow, Russia

Abstract. The aim was to assess the loading of large-size elements of machine structures using versatile strain gauges. A strain gauge was developed using a system analysis of failures and deficiencies in the manufacture and operation of large-scale structures, strain gauging, strength of materials methods, as well as the theory of elasticity of ring elastic elements. The ANSYS software package was used to calculate rational sensor parameters. The conducted study

of ring elastic deformation (determination of stiffness and stress-strain state) allowed the authors to propose that the ring shape should be replaced by an octahedral polygon. This form is suitable for mounting strain gauges for simultaneous measurement of tension and compression, as well as bending and torsion, i.e., forces arising in a machine structural element or in the manufacture of large-size surfaces. The obtained results were used to derive dependences to determine the measurement error of the gauge under study. A comparative analysis of ring and octahedral gauges identified unique features of the latter, consisting in the possibility of assessing the measured values along the three coordinate axes with a high degree of accuracy. The conducted research shows that the proposed strain gauges are capable of registering the magnitude and fluctuations of loads with a high measurement accuracy. The proposed scheme of gauge placement makes it possible to determine the vertical and horizontal components of the forces arising in a structural element and to assess deviations in the process of measurement. In addition, the proposed measuring scheme minimizes the error of mutual influence of sensors. The developed force meter is a versatile device that can be used for registering static and dynamic impacts, as well as for digital control of force parameters in the range of up to 5 mm.

Keywords: strain gauge meter, force gauge, structure load, tests, measurement, measurement error compensation

For citation: Zhavyrkin V.V., Sladkova L.A. Three-component strain gauge for precise measurement of load fluctuations. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):241-249. (In Russ.). EDN: BIGRIP, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-241-249>.

ВВЕДЕНИЕ

Выход из строя элементов металлоконструкций транспортных средств во многом определяется не только на этапе проектирования, но и при их изготовлении и последующих испытаниях на нагрузочную способность, что особенно значимо для большемерных деталей (поворотный круг, реборды колес и т.п.). Изготовление таких конструкций сопряжено со сложностями изготовления, связанными с определением их плоскостности, которая обеспечивается, например, фрезерованием поверхности [1, 2]. Опыт показывает, что даже современное оборудование не может обеспечить плоскостность поверхности, заданную при проектировании, что ведет к расхождению результатов испытаний с расчетными данными [3]. Существующие измерительные устройства и их расположение на поверхности изделий не позволяют обеспечить точность оценки изменения усилий и деформаций (изгиб, кручение, растяжение-сжатие), возникающих, например, при фрезеровании или при испытаниях [4–6], так как при оценке напряженно-деформированного состояния конструкций тензометрированием используются тензодатчики, устанавливаемые в наиболее нагруженных точках конструкций. Несмотря на незначительные размеры существующих тензодатчиков, возникают определенные трудности при их размещении на элементе конструкции [7]: наблюдается получаемый разброс данных из-за невозможности разместить датчики для определения различных видов напряженно-деформированного состо-

яния в одной точке, особенно, если диапазон пространства для работы определен большими размерами исследуемого объекта [8, 9]. Для устранения этого недостатка требуется разработка конструкции универсального тензодатчика, позволяющего оценивать изменение усилий в элементе конструкции при наличии площади контакта с датчиком не более 5 мм².

ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. На базе кольцевого упругого элемента и тензометрических датчиков разработать конструкцию универсального октаэдного тензодатчика, позволяющего повысить точность определения напряженного деформированного состояния большемерных элементов конструкций.

2. Определение параметров универсальных тензодатчиков, способ их размещения на поверхности и методика оценки нагруженности большемерных элементов конструкций машин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из приборов, способным определить направление и величину изменения нагруженного состояния элементов конструкций, служит трехкомпонентный динамометр, основанный на получении сигналов от изменения нагрузок, которые воспринимаются датчиками напряжения. Для этого в конструкции динамометра предусмотрены уже имеющиеся в наличии тензодатчики [10]. Методы исследований базируются на основных критериях предлагаемого силоизмерителя:

жесткости и упругости, которые являются основными показателями обеспечения чувствительности разработанного устройства. Основным недостатком используемого устройства является то, что оценка, например жесткости, искажается собственной частотой колебаний силоизмерителя. Учитывая, что все конструкции подвержены собственным и вынужденным колебаниям, необходимо, чтобы собственная частота силоизмерителя была значительно выше частот колебания объекта измерения, например станка [11]. В этом случае в силоизмерителе возникает область напряжений, которые фиксируются датчиками напряжений. При этом составляющие силового воздействия фиксируются упругим элементом. Однако показания силоизмерителя, как правило, занижены за счет совместного действия усилий, возникающих на обрабатываемой поверхности, а также возникающих со стороны режущего инструмента усилий. Для повышения точности измерений и исключения взаимовлияния при измерениях отклонений необходимо применять упругие элементы в виде кольца, так как в нем величина деформации в упругой зоне пропорциональна прилагаемому усилию.

Механические свойства разрабатываемого кольца определены из диаграммы растяжения-сжатия. Зона упругости материала определяет диапазон измерения усилий. Учитывая действие на кольцо динамических

и знакопеременных нагрузок, изготовленное кольцо и используемый датчик должны проверяться на отсутствие дефектов при изготовлении [12, 13].

Перед выбором кольцевого датчика измерения усилий определим величину деформации от действия прикладываемых усилий. При этом из запаса прочности, считаем, что кольцо должно воспринимать деформации и усилия, превышающие ожидаемые в 1,5...2 раза.

Схема измерения усилий на кольце приведена на рис. 1. Для определения геометрических параметров колец рассмотрим трехмерное приложение сил, возникающих в процессе фрезерования. Основными измеряемыми кольцом параметрами являются усилия резания и точность измерения.

При выборе формы силоизмерителя рассматривались различные варианты исполнения упругих элементов, влияющих на точность измерения. Для сравнения первоначально был рассмотрен вариант формы в виде кольца.

Для измерения деформации кольца (см. рис. 1 а) оценим его геометрические параметры (радиус r , толщину стенки кольца t) от действия усилий F_r и F_t . Очевидно, что под действием указанного радиального усилия F_r кольцо будет деформироваться вдоль оси А – А (рис. 1 б), а от действия касательного (тангенциального) усилия возникает момент M , поворачивающий кольцо (рис. 1 с).

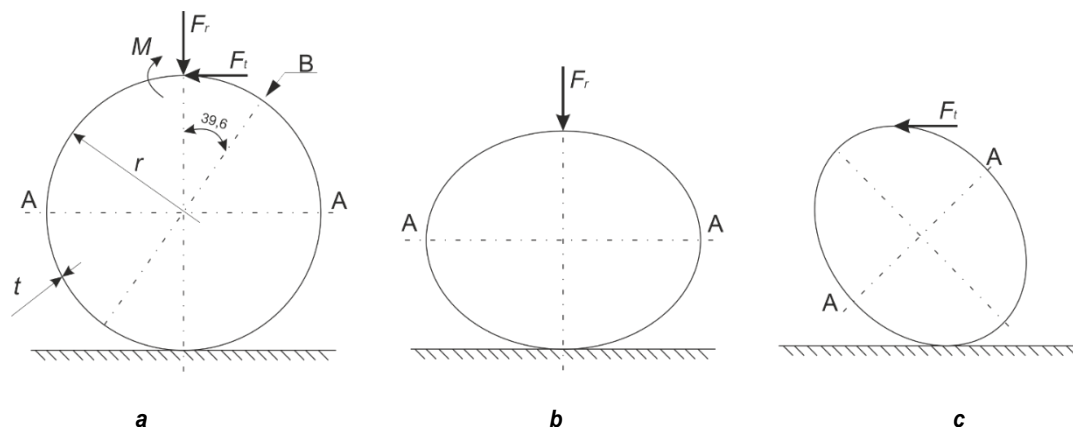


Рис. 1. Деформация кольца в зависимости от приложенных сил (r – радиус кольца; t – толщина кольца; b – ширина кольца): а – измерение деформации кольца; б – действие радиального усилия; с – действие касательного усилия

Fig. 1. Ring deformation depending on the applied forces (r – ring radius; t – ring thickness; b – ring width): а – ring deformation measurement; б – radial force action; с – tangential force action

Согласно теории пластичности, напряжения на внутренней и внешней поверхностях кольца смещаются от точки *A* к точке *B* под углом 39,6° от вертикальной оси [14], принятой за ноль. Величины относительных деформаций будут равны и станут изменяться от точки *A* к точке *B* от нуля до соответствующих величин, не изменяя линейности:

$$\varepsilon_A = \pm \frac{1,09F_r r}{Ebt^2}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_A = \pm \frac{2,18F_t r}{Ebt^2}. \quad (2)$$

Преимущества использования круглых колец при действии радиальных и тангенциальных усилий очевидны из вышеприведенных формул. Их погрешность оценивается по зависимостям:

$$k_r = \frac{F_r}{\delta_r} = \frac{Ebt^3}{1,8r^3}; \quad (3)$$

$$k_t = \frac{F_t}{\delta_t} = \frac{Ebt^3}{3,6r^3}. \quad (4)$$

Восьмиугольные кольца из условий прочности отличаются большей жесткостью по минимальному измерению момента инерции сечения. Наружная и внутренняя стороны кольца выполнены несколько вогнутыми для удобства наклейки датчиков. При этом толщину колец принимаем равной от 3 до 20 мм. Датчики наклеены таким образом, что позволяют одновременно фиксировать напряжения F_r и F_t , как показано на рис. 2. Для компенсации внешних влияний датчики *T2* и *C2* устанавливаются строго симметрично относительно центральных осей восьмиугольника. Величина относительного отклонения в радиальном направлении от действия силы F_r выражается зависимостью:

$$\frac{e_A}{\delta_r} = \frac{1,09t}{1,8r} = 0,61 \frac{t}{r}. \quad (5)$$

Аналогичным образом оценивается отклонение и при действии тангенциальной силы. Очевидно, что для обеспечения максимальной чувствительности и жесткости вели-

чина отношения e_A / dr должна быть максимально большой.

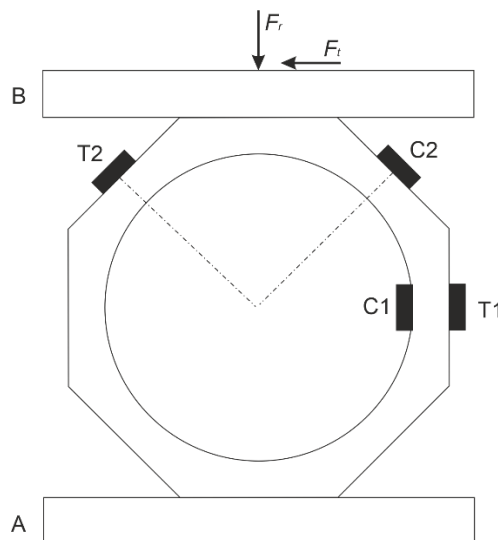


Рис. 2. Схема установки датчиков на кольцо
Fig. 2. Diagram of sensor installation on the ring

Проведенные авторами в Японии исследования с использованием метода конечных элементов [14] показали, что восьмигранное кольцо обладает максимальной жесткостью по отношению к круглому при отношении толщины кольца к его радиусу t/r равному 0,05 и при 10%-м отклонении при отношении t/r равному 0,25. Кроме того, восьмиугольные кольца имеют значительные преимущества по сравнению с круглыми для различных соотношений t/r . Выше было сказано, что угол смещения от точки *A* к точке *B* для круглого кольца, при котором радиальная нагрузка равна нулю, а тангенциальная достигает максимума при 39,60°, что весьма близко к 45°, характерно для восьмиугольного кольца (см. рис. 2). Поэтому фактические погрешности при измерениях будут компенсироваться калибровкой динамометра.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим работу силоизмерительного стола (пластины) с установленными восьмигранными кольцами, как показано на рис. 3. При действии вертикальной нагрузки F_z используются четыре динамометрических кольца, воспринимающие эту нагрузку, которая фиксируется датчиками *C1* и *T1*. Для из-

мерения вертикальной нагрузки $C1$ и $T1$ каждого кольца соединены таким образом, что каждый восьмигранник образует замкнутый мост Уитстона [15]. Сила в направлении оси x определяется одним из четырех замкнутых мостов Уитстона при помощи датчиков $C2$ и $T2$, располагающихся на наклонных гранях колес A и C . Аналогично силы в направлении оси y измеряются датчиками на кольцах B и D , расположенных также на их наклонных поверхностях. При этом направление осей кольца должно совпадать с направлением действия сил. Замером подлежит площадь, ограниченная продольными осями колец. Любая сила, действующая в зоне ограниченной площади, будет показывать одинаковые усилия.

В предлагаемом силоизмерителе датчики, расположенные на наклонной поверхности кольца A , полностью компенсируют погреш-

ности измерений, производимые кольцом C в направлении оси z .

Восьмигранное кольцо жестко крепится между двумя параллельными пластинами. Сопротивление каждого тензодатчика определяется по формуле:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_S(N-1)}, \quad (6)$$

где R_T – сопротивление для оценки силы F_x , H ; R_S – сопротивление для оценки силы F_y , H ; N – номер датчика напряжений в каждом мосту.

Силовое воздействие, передаваемое динамометром (таблица) производится по следующему алгоритму:

- тарировка динамометра;
- регулировка датчиков внутренних блоков;
- вывод сигналов силовых воздействий.

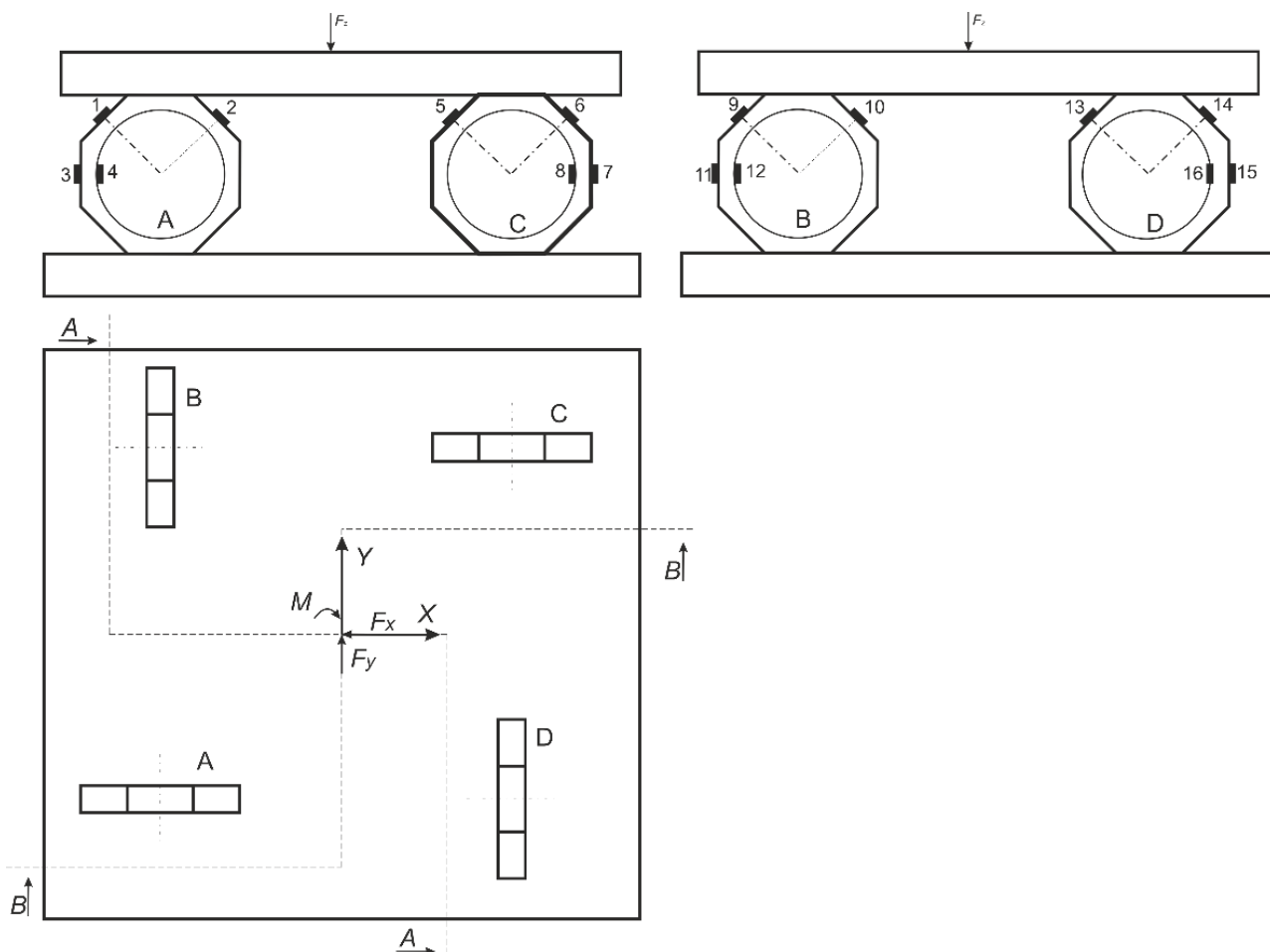


Рис. 3. Размещение колец на силоизмерительном столе
Fig. 3. Ring locations on the force-measuring table

Технические характеристики силоизмерителя
 Force meter specifications

Наименование	Обозначение	Величина
Тип кольца	—	Восьмигранник
Радиус кольца по средней линии, мм	r	30
Отношение толщины кольца к радиусу	t/r	0,40
Ширина кольца, мм	b	30
Модуль упругости, Па	E	$2,06 \cdot 10^{11}$
Радиальная сила, Н	F_r	8000
Тангенциальная сила, Н	F_t	3000
Деформации	—	—
—	e_A	$2,94 \cdot 10^{-4}$
—	e_B	$3,67 \cdot 10^{-4}$
—	K_t	21973 Н/мм
—	K_r	109866 Н/мм
Толщина кольца, мм	t	12

Перед использованием силоизмерителя рекомендуется провести его линейную тарировку [16–20]. После чего он может использоваться в течение длительного времени при разных температурах и влажности. При этом производится нагружение тарировочных колец от 0 до 2 кН.

Первоначально для калибрования нагрузки F_x по оси x калибровочное кольцо располагается между вертикальной направляющей станины и прикрепленной к ней зажимами прибора. Затем станина движется в поперечном оси кольца направлении, и показания считываются последовательно шаг за шагом, а именно – сигналы от силовых воздействий считываются по оси x от действия силы F_x , затем по оси y от действия силы F_y и по оси z от действия силы F_z . Эта информация постоянно отражается и фиксируется в базе данных. Затем ось направления действия силы F_y разворачивают параллельно оси от направления действия силы F_x , поворачивая динамометр. Аналогичным образом проводят тарировку по оси x от действия силы F_x . Далее для тарировки по оси z от действия силы F_z калибровочное кольцо располагают между корпусом станка и зажимами, и кольцо начинает деформироваться до того момента, пока не начнется считывание сигнала. Общая оценка алгебраически суммируется по трем осям и записывается. Величины приложенных нагрузок и полученные оценочные результаты показаны графически на рис. 4.

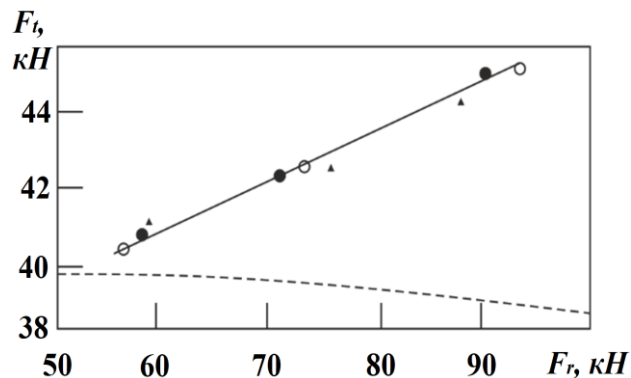


Рис. 4. Отклонение между касательным и радиальным направлениями сил: о – октаэдральное кольцо; • – эксперимент; ▲ – круглое кольцо
Fig. 4. Deviation between the tangent and radial directions of forces: o – octahedral ring; • – experiment; ▲ – circle ring

После построения и анализа тарировочных графиков можно убедиться, что погрешность измерений настолько незначительна, что ею можно пренебречь и утверждать, что динамометр имеет весьма высокую точность измерений. Так как направления действия F_x и F_y симметричны, то полученные результаты можно считать достоверными. Для повышения точности измерений необходимо, чтобы в течение всего процесса тарировки нагрузка прикладывалась к определенной точке силоизмерителя в процессе измерения. Иначе говоря, для тарировки по осям x и y точка приложения нагрузки к деформированному кольцу должна быть удалена на такое же расстояние, что и высота между станиной и срезаемой поверхностью детали. Однако при повторном измерении полученные результаты могут быть не абсолютно эквивалентны, и может произойти незначительное отклонение при тарировке.

Предлагаемая схема размещения датчиков позволяет измерять вертикальную и горизонтальные составляющие усилий, возникающих в элементе конструкции, а также показывает отклонения в процессе измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемые октаэдральные датчики напряжения, используемые в процессе замеров, позволяют повысить точность определения напряженного деформированного состояния большемерных элементов конструкций.

Способ размещения датчиков на исследуемых поверхностях позволяет с высокой степенью точности оценить изменение большемерных элементов конструкций машин.

Динамометр предлагаемой конструкции можно считать универсальным прибором, он

может использоваться для измерения статических и динамических нагрузок при работе машин и механизмов. Предназначен он для точного измерения колебания нагрузок, а также может применяться в адаптивном контроле и управлении с применением соответствующих цифровых средств.

Список источников

1. Беззубов А.А., Шорин В.А. Остаточные напряжения в элементах конструкций и их влияние на прочность // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте: сб. статей VII Всероссийской науч.-техн. конф. для молодых ученых и студентов с международным участием (г. Пенза, 16–17 марта 2021 г.). Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2021. С. 33–37.
2. Климов С.О., Аносов А.П., Восковщук Н.И., Бессонова В.О. Экспериментальное определение крутящего момента, действующего на корпус судна // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2021. № 62-63. С. 100–105.
3. Баутин А.А. Мониторинг элементов авиационных конструкций по данным тензометрии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1-1. С. 57–63. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-1-1-57-63>.
4. Локтионов А.П. Об измерении навесными датчиками поперечных сил и изгибающих моментов на звеньях машин и приборов // Методы и приборы для измерения и воспроизведения силы момента в приборостроении: тез. докл. к областному семинару (г. Пенза, 22–23 октября 1981 г.). Пенза: Пензенский Дом научно-технической пропаганды, 1981. С. 18–19.
5. Неумоин М.И., Столяров А.С. Разработка установки для измерения силовых параметров в затягиваемом резьбовом соединении // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2019. Т. 1. № 1. С. 136.
6. Batra A., Shankar K., Swarnamani S. Propulsion shaft alignment measurements on warships afloat and alignment solution using multiobjective optimization // Journal of Marine Engineering & Technology. 2007. Vol. 6. Iss. 1. P. 39–49. <https://doi.org/10.1080/20464177.2007.11020200>.
7. Шубарев В., Мельников В., Иванов Н., Калинин В., Силаков Д., Лукьянов В. [и др.]. Математическое моделирование процесса сборки силоизмерительной шайбы // Электроника: наука, технология, бизнес. 2013. № S. С. 32–39.
8. Лаврушин М.Ю. Датчик для измерения ударных контактных сил // Инженерно-физические проблемы новой техники: сб. матер. XIV Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, посвящ. 85-летию со дня рождения заслуженного работника ВШ РФ, доктора физико-математических наук, профессора М.И. Киселёва (г. Москва, 17–19 марта 2020 г.). М.: ООО «Диона», 2020. С. 51–55.
9. Голованов В.К., Елхов В.В. Конструкция бескорпусного датчика силы // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. № 8. С. 18–20.
10. Micheletti G.F., Koenig W., Victor H.R. In-process tool wear sensors for cutting operations // CIRP Annals. 1976. Vol. 25. P. 483–496.
11. Shaw M.C. Metal Cutting Principles. Oxford: Clarendon Press, 1996. 594 p.
12. Болсуновский С., Вермель В., Губанов Г. Применение специальных гасителей вибраций при чистовом фрезеровании тонкостенных деталей // САПР и графика. 2014. № 8. С. 110–112.
13. Проценко И.Г., Брусенцов Ю.А. Определение механических деформаций и напряжений полупроводниковыми тензочувствительными элементами // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2014. № 1. С. 272–280.
14. Tanimura M., Uryû N. Influence of the field strength and direction on the magnetic phases of an antiferromagnet with uniaxial anisotropy // Journal of the Physical Society of Japan. 1980. Vol. 49. Iss. 6. P. 2152–2158.
15. Михеев Р.Е., Зуева Е.С., Котряхова Е.А. Мост Уитстона и его применение на железной дороге // Актуальные проблемы математики, механики, естествознания и образования: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию профессора А.А. Шестакова (г. Москва, 23–24 апреля 2020 г.). М.: Российский университет транспорта, 2021. С. 102–105.
16. Максимов Н.М., Корнякова О.Ю., Головань И.Н. О методах повышения динамической точности многомассовых электромеханических систем с учетом упругих податливостей // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 10-10. С. 57–60.
17. Калмыкова А.В., Дхар П., Узинцев О.Е. Тарировка электротензометра // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2012. № 2. С. 5–15.
18. Savage P.G. Strapdown system performance analysis // RTO Lecture Series 232, Advances in Navigation Sensors and Integration Technology. St. Petersburg, 2004. P. 4-1–4-33.

19. Zhang Hongliang, Wu Yuanxin, Wu Wenqi, Wu Meiping, Hu Xiaoping. Improved multi-position calibration for inertial measurement units // *Measurement Science and Technology*. 2009. Vol. 21. Iss. 1. P. 015107. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/1/015107>.
20. Wu Qiuping, Wu Ruonan, Han Feng Tian, Zhang Rong. A three-stage accelerometer self-calibration technique for space-stable inertial navigation systems // *Sensors*. 2018. Vol. 18. Iss. 9. P. 2888. <https://doi.org/10.3390/s18092888>.

References

1. Bezzubov A.A., Shorin V.A. Structural element residual stresses and their influence on strength. In: *Innovacii tekhnicheskikh reshenij v mashinostroenii i transporte: sbornik statej VII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii dlya molodyh uchenykh i studentov s mezhdunarodnym uchastiem = Innovative engineering solutions in mechanical engineering and transport: Collected articles of the 7th All-Russian scientific and technical conference for young scientists and students with international participation*. 16–17 March 2021, Penza. Penza: Penza State Agrarian University; 2021, p. 33-37. (In Russ.).
2. Klimov S.O., Anosov A.P., Voskovshchuk N.I., Bessonova V.O. Experimental determination of torque acting on a ship hull. *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva = Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021;62-63:100-105. (In Russ.).
3. Bautin A.A. Monitoring of the elements of aviation structures using strain-gauge measurement. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2019;85(1-1):57-63. (In Russ.). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-1-1-57-63>.
4. Loktionov A.P. On measurement of transverse forces and bending moments on machine and device links by attached sensors. In: *Metody i pribory dlya izmereniya i vosпроизvedeniya sily momenta v priborostroenii: tezisy докладов k oblastnomu seminaru = Methods and devices for measuring and reproducing the moment force in tool engineering: report abstracts to the regional seminar*. 22–23 October 1981, Penza. Penza: Penzenskij Dom nauchno-tekhnicheskoy propagandy; 1981, p. 18-19. (In Russ.).
5. Neumoin M.I., Stolyarov A.S. Development of test stand for measurements of forces and torques in threaded joints. *Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019;1(1):136. (In Russ.).
6. Batra A., Shankar K., Swarnamani S. Propulsion shaft alignment measurements on warships afloat and alignment solution using multiobjective optimization. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2007;6(1):39-49. <https://doi.org/10.1080/20464177.2007.11020200>.
7. Shubarev V., Mel'nikov V., Ivanov N., Kalinin V., Silakov D., Luk'yanov V., et al. Mathematical modeling of force-measuring washer assembling process. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2013;S:32-39. (In Russ.).
8. Lavrushin M.Yu. Sensor for shock contact force measurement. *Inzhenerno-fizicheskie problemy novoj tekhniki: sbornik materialov XIV Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchyonnoj 85-letiyu so dnya rozhdeniya zaslužennogo rabotnika VSh RF, doktora fiziko-matematicheskikh nauk, professora M.I. Kiselyova = Engineering and physical problems of new equipment: Collected materials of the 14th All-Russian scientific and technical conference with international participation, dedicated to the 85th birth anniversary of the Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor M.I. Kiselev*. 17–19 March 2020, Moscow. Moscow: OOO "Diona"; 2020, p. 51-55. (In Russ.).
9. Golovanov V.K., Elhov V.V. The design of the unpackaged force sensor. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014;8:18-20. (In Russ.).
10. Micheletti G.F., Koenig W., Victor H.R. In-process tool wear sensors for cutting operations. *CIRP Annals*. 1976;25:483-496.
11. Shaw M.C. *Metal Cutting Principles*. Oxford: Clarendon Press; 1996, 594 p.
12. Bolsunovskij S., Vermel' V., Gubanov G. Using special vibration dampers in thin-walled part finishing milling. *SAPR i grafika*. 2014;8:110-112. (In Russ.).
13. Protsenko I.G., Brusentsov Yu.A. Measuring mechanical strains and stresses by semiconductor gage elements. *Vo-prosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo*. 2014;1:272-280. (In Russ.).
14. Tanimura M., Uryû N. Influence of the field strength and direction on the magnetic phases of an antiferromagnet with uniaxial anisotropy. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1980;49(6):2152-2158.
15. Mikheev R.E., Zueva E.S., Kotryahova E.A. Wheatstone bridge and its application on the railway. *Aktual'nye problemy matematiki, mekhaniki, estestvoznaniya i obrazovaniya: sbornik statej Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 100-letiyu professora A.A. Shestakova = Topical problems of mathematics, mechanics, natural sciences and education: collected articles of All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 100th birth anniversary of the Professor A.A. Shestakov*. 23–24 April 2020, Moscow. Moscow: Russian University of Transport; 2021, p. 102-105. (In Russ.).
16. Maksimov N.M., Kornyakova O.Yu., Golovan I.N. Methods of increasing the dynamic accuracy of multi-mass electromechanical systems taking into account elastic compliance. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*. 2021;10-10:57-60. (In Russ.).

17. Kalmakova A., Dkhar P., Uzintsev O. Calibration of stress meter. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = Rudn Journal of Engineering Research*. 2012;2:5-15.
18. Savage P.G. Strapdown system performance analysis. In: *RTO Lecture Series 232, Advances in Navigation Sensors and Integration Technology*. St. Petersburg; 2004, p. 4-1–4-33.
19. Zhang Hongliang, Wu Yuanxin, Wu Wenqi, Wu Meiping, Hu Xiaoping. Improved multi-position calibration for inertial measurement units. *Measurement Science and Technology*. 2009;21(1):015107. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/1/015107>.
20. Wu Qiuping, Wu Ruonan, Han Feng Tian, Zhang Rong. A three-stage accelerometer self-calibration technique for space-stable inertial navigation systems. *Sensors*. 2018;18(9):2888. <https://doi.org/10.3390/s18092888>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жавыркин Вадим Витальевич,
аспирант,
Российский университет транспорта,
127994, г. Москва, ул. Образцова, 9/9, Россия
zhavyrkinv@mail.ru

Сладкова Любовь Александровна,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры «Наземные
транспортно-технологические средства»,
Российский университет транспорта,
127994, г. Москва, ул. Образцова, 9/9, Россия
✉ rich.cat2012@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.02.2023; одобрена после рецензирования 10.03.2023; принята к публикации 19.04.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vadim V. Zhavyrkin,
Postgraduate Student,
Russian University of Transport,
9/9, Obraztsov St., Moscow 127994, Russia
zhavyrkinv@mail.ru

Liubov A. Sladkova,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Ground
Transportation and Technological Vehicles,
Russian University of Transport,
9/9, Obraztsov St., Moscow 127994, Russia
✉ rich.cat2012@yandex.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 06.02.2023; approved after reviewing 10.03.2023; accepted for publication 19.04.2023.