

УДК 531.781.2.087.92

Влияние погрешности позиционирования тензорезистора на чувствительность датчика нагрузки в канате

Егоров Г.Р.

glebegoroff2012@yandex.ru

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

Для тензорезисторного датчика силы, устанавливаемого в грузоподъемных машинах, методом Монте-Карло с привлечением конечноэлементного моделирования проведено исследование влияния технологических факторов – ошибок позиционирования тензорезистора – на чувствительность датчика. Представленный материал позволяет оценить характер зависимости уровня выходного сигнала датчика от точности наклейки чувствительных элементов.

Ключевые слова: тензорезисторный датчик силы, накладной тензодатчик, рабочий коэффициент передачи, погрешность позиционирования, анализ чувствительности, ограничитель нагрузки, приборы безопасности кранов.

Источником тематики данной работы послужили исследования, проводимые на кафедре «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках направления промышленной безопасности [1-3]. Выполнение требований, закрепленных в нормативной документации, потребовало разработки более совершенных методов обеспечения безопасности подъемных сооружений. Технические средства, реализующие такие методы, предъявляют повышенные требования к качеству обрабатываемой информации. Главным источником первичной информации применительно к грузоподъемным кранам является тензометрический датчик нагрузки [4-6].

Основными эксплуатационными характеристиками тензодатчиков являются: электрические параметры мостовой измерительной схемы (входное и выходное сопротивление), величина внешней нагрузки (номинальная, предельно допустимая при кратковременном воздействии и разрушающая), а также рабочий коэффициент передачи (собственно, чувствительность датчика), представляющий собой отношение выходного напряжения датчика при номинальной нагрузке к входному напряжению. Чувствительность датчика, помимо номинального значения, характеризуется начальным коэффициентом передачи (наличие выходного сигнала при отсутствии нагрузки), ползучестью (изменение

сигнала с течением времени при постоянной нагрузке) и степенью влияния температуры на начальный и рабочий коэффициенты передачи.

Одними из основных требований, предъявляемых к тензодатчику, являются максимизация чувствительности к номинальной нагрузке и минимизация отклонений от них (преимущественно рабочего коэффициента передачи). Факторы, от которых зависят эти параметры, можно разделить на три основные группы:

конструктивные – тип и исполнение упругого элемента, форма поверхности для размещения чувствительных элементов, их тип и конфигурация мостовой измерительной схемы;

внешние (условия работы датчика). Механические, климатические и электрические – характер измеряемой нагрузки, диапазон ее изменения, температурные условия, наличие электрических помех, влияющих на сигнал датчика;

технологические – вариации размеров упругого элемента, формы поверхности для наклейки тензорезисторов; погрешности размещения тензорезисторов на упругом элементе, неравномерность клеевого слоя и прижима тензорезисторов при наклейке, начальные деформации тензорезисторов (возникающие при их размещении на цилиндрической поверхности).

Конструктивная группа факторов определяет преимущественно номинальные характеристики тензодатчика, и по этой причине пользуется популярностью в прикладных работах, направленных на синтез или оптимизацию конструкции с наилучшими параметрами [7-9]. Несмотря на важность подобных исследований, также представляет интерес и анализ влияния случайных факторов на характеристики уже существующих моделей тензодатчиков.

В статьях [10,11] проводятся численные расчеты гистерезиса нагрузочной характеристики цилиндрического упругого элемента с целью валидации методик и оценки характеристик датчиков. Вопросам влияния температуры на чувствительность датчиков посвящены работы [12,13]. В публикации [14] рассмотрено влияние ошибок при наклейке тензорезисторов мостовой схемы на чувствительность датчика с балочным упругим элементом. Схожий вопрос затронут и в работах [15,16], в которых исследуется чувствительность мембранного датчика к паразитным силовым факторам с учетом погрешностей изготовления упругого элемента и наклейки чувствительных элементов соответственно. В статье [17] приведено экспериментальное сравнение повторяемости показаний тензоосей крановых весов с разными типами упругих элементов.

Таким образом, в литературе уделено сравнительно мало внимания вопросам влияния погрешностей различного рода на чувствительность датчиков, применяющихся в грузоподъемной технике. В качестве предмета исследования данной статьи выступает влияние неточности размещения тензорезистора на чувствительность накладного тензодатчика силы натяжения каната из состава ограничителя грузоподъемности крана. Размещение датчика осуществляется на неподвижной ветви грузового каната при помощи регулируемого винтового зажима, задающего небольшой прогиб h . Расчетная схема упругого элемента приведена на рис. 1. Канат и зажим в расчетную модель не включаются, трение между поверхностями упоров и канатом не учитывается. Из геометрической модели упругого элемента исключаются элементы, очень слабо влияющие на деформированное состояние в области размещения тензорезистора (фаски, резьба, отверстия под кабели, заглушки и герметик, защищающие чувствительный элемент от внешних воздействий). Нагрузка R , передающаяся на упоры датчика вследствие натяжения каната (со стороны скобы зажима на упругий элемент действует сила $2R$), определяется по формуле:

$$R = \frac{2Th}{a}, \quad (1)$$

где T – сила натяжения каната, Н;

h – прогиб каната, мм;

a – расстояние между упорами упругого элемента, мм.

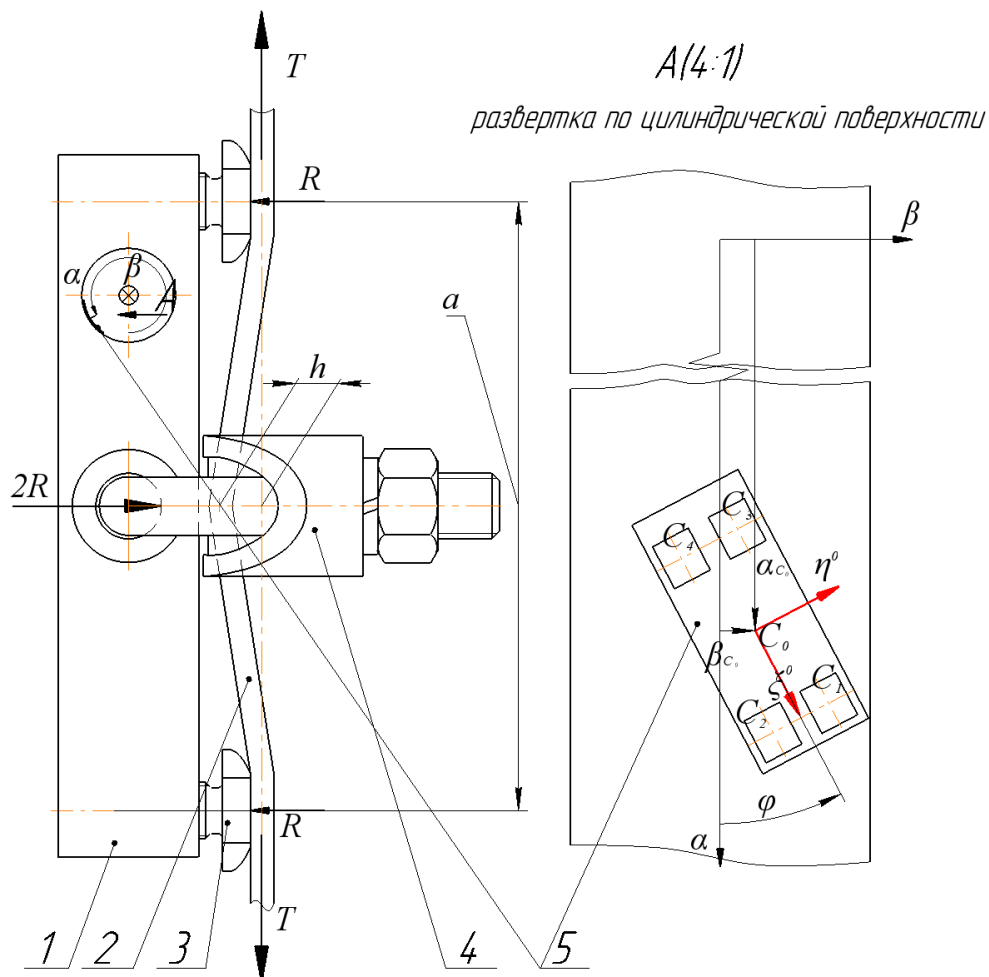


Рис. 1. Общий вид тензодатчика с наклеенным на него тензорезистором:

1 – упругий элемент; 2 – грузовой канат; 3 – упор под канат; 4 – винтовой зажим; 5 – тензорезистор

С отверстием для размещения тензорезистора связываются криволинейные координаты (рис. 1) с размерностью длины (далее будем называть их естественными): дуговая α (отсчитывается вдоль дуги поперечного сечения отверстия) и поперечная β (отсчитывается вдоль образующей цилиндрической поверхности отверстия от плоскости продольной симметрии датчика). В рассматриваемой модели датчика используется полномостовой тензорезистор BF350-2FG-10(11)N2 (ZEMIC) с четырьмя одинаковыми чувствительными решетками с базой l мм, шириной b и коэффициентом тензочувствительности K .

Рассмотрим тензорезистор до наклейки на упругий элемент (когда он имеет плоскую форму, рис. 2). С центром i -ой чувствительной решетки связывается система координат $C_i \xi^i \eta^i$, $i = 1, 2, 3, 4$, а положение решеток определяется в системе координат $C_0 \xi^0 \eta^0$, помещенной в центр подложки тензорезистора. В системах координат решеток задаются точки интегрирования, представляющие собой равномерную сетку с 15-ю узлами по осям $C_i \xi^i$, $C_i \eta^i$, и используемые для вычисления деформации, считываемой решеткой.

Размещение тензорезистора на поверхности отверстия упругого элемента с учетом случайной ошибки будет определяться естественными координатами точки C_0 и углом φ между главной осью тензорезистора $C_0 \xi^0$ и касательной к цилиндрической поверхности отверстия в точке C_0 , перпендикулярной ее образующей (рис. 2). Если пренебречь толщиной клеевого слоя и самого тензорезистора, то естественные координаты α_M, β_M некоторой точки M , лежащей в пределах i -ой чувствительной решетки, будут выражаться формулами:

$$\begin{cases} \alpha_M = \alpha_{C_0} + (\xi_{C_i}^0 + \xi_M^i) \cos \varphi - (\eta_{C_i}^0 + \eta_M^i) \sin \varphi, \\ \beta_M = \beta_{C_0} + (\xi_{C_i}^0 + \xi_M^i) \sin \varphi + (\eta_{C_i}^0 + \eta_M^i) \cos \varphi, \end{cases} \quad (2)$$

где $\alpha_{C_0}, \beta_{C_0}$ – естественные координаты центра тензорезистора C_0 ;

$\xi_{C_i}^0, \eta_{C_i}^0$ – координаты центра i -ой решетки в системе координат тензорезистора;

ξ_M^i, η_M^i – координаты точки M в системе координат i -ой решетки.

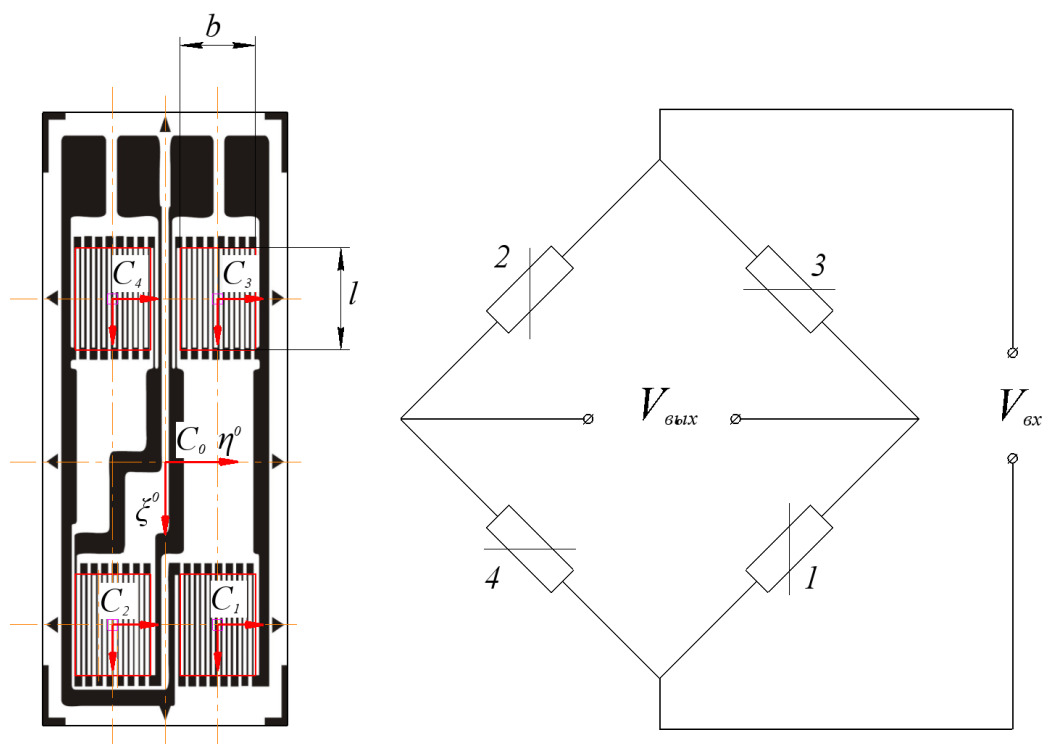


Рис. 2. Системы координат тензорезистора и его электрическая схема

Деформации поверхности упругого элемента в направлении главной оси тензорезистора $C_0 \xi^0$ при действии внешней нагрузки определяются выражением:

$$\varepsilon_\xi = \varepsilon_\alpha \cos^2 \varphi + \varepsilon_\beta \sin^2 \varphi + \gamma_{\alpha\beta} \sin \varphi \cos \varphi, \quad (3)$$

где $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta$ – нормальные деформации в направлении координатных линий α и β соответственно;

$\gamma_{\alpha\beta}$ – сдвиговая деформация поверхности.

Если пренебречь механическими характеристиками клеевого слоя, то изменение сопротивления чувствительной решетки тензорезистора будет определяться средней деформацией по ее площади [17]

$$\varepsilon^{(i)} = \frac{1}{bl} \int_{\alpha_1^i}^{\alpha_2^i} \int_{\beta_1^i}^{\beta_2^i} \varepsilon_{\xi} d\alpha d\beta, \quad (4)$$

где $\alpha_1^i, \alpha_2^i, \beta_1^i, \beta_2^i$ – координаты угловых точек решетки, определяемые по выражениям (2).

Так как чувствительные решетки расположены на одной подложке, разбросом их коэффициентов тензочувствительности пренебрегаем. Тогда рабочий коэффициент передачи с учетом нумерации решеток (рис. 2) можно рассчитать по формуле [19]

$$v = \frac{V_{\text{ВЫХ}}}{V_{\text{ВХ}}} = \frac{K}{4} (\varepsilon^{(1)} + \varepsilon^{(2)} - \varepsilon^{(3)} - \varepsilon^{(4)}), \quad (5)$$

где v – чувствительность тензомоста, В/В;

$V_{\text{ВЫХ}}$ – выходное напряжение тензомоста, В;

$V_{\text{ВХ}}$ – входное напряжение тензомоста, В;

K – коэффициент тензочувствительности решетки.

Таким образом, формулы (2-5) позволяют по полям деформаций $\varepsilon_{\alpha}(\alpha, \beta)$, $\varepsilon_{\beta}(\alpha, \beta)$, $\gamma_{\alpha\beta}(\alpha, \beta)$, возникающим при нагрузке T на упругий элемент, определить отклик датчика v как функцию положения тензорезистора на цилиндрической поверхности.

Для определения напряженно-деформированного состояния упругого элемента при описанных допущениях проводится расчет методом конечных элементов, полученные распределения деформаций приведены на рис. 3.

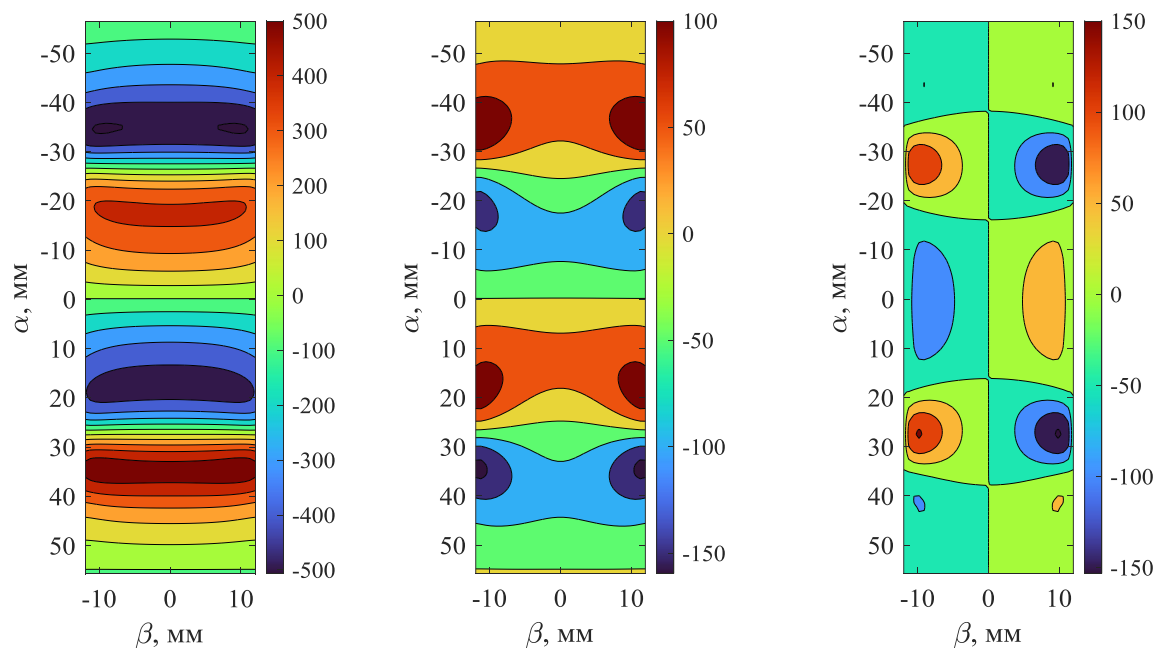


Рис. 3. Карты распределения деформаций по поверхности для размещения тензорезистора (развертку поверхности см. на виде «А» рис. 1), мкм/м:

(а) ε_{α} ; (б) ε_{β} ; (в) $\gamma_{\alpha\beta}$

Значения деформаций ε_α , ε_β и $\gamma_{\alpha\beta}$ в узлах конечноэлементной модели, лежащих на цилиндрической поверхности (плотность сетки составляет 144 узла по дуговой координате и 32 по поперечной) экспортируются из конечноэлементного комплекса и используются в качестве опорных значений для кусочно-линейной интерполяции деформаций как функций естественных координат. Для исследования влияния погрешности наклейки на уровень сигнала датчика используется процедура анализа чувствительности [20], в роли входных параметров математической модели (факторов) выступают отклонения от идеального позиционирования тензорезистора.

$$\delta\alpha = \alpha_{c_0} - \alpha_0, \quad \delta\beta = \beta_{c_0} - \beta_0, \quad \delta\varphi = \varphi - \varphi_0, \quad (6)$$

где α_0 , β_0 , φ_0 – номинальные значения координат тензорезистора,
а в роли выходного параметра (отклика) – вариация коэффициента передачи датчика

$$\delta v = \frac{v - v_0}{v_0}, \quad (7)$$

где v – коэффициент передачи при координатах тензорезистора с учетом ошибки;
 v_0 – номинальный коэффициент передачи при $\delta\alpha = 0$, $\delta\beta = 0$, $\delta\varphi = 0$ (тензорезистор позиционируется идеально).

Основным способом анализа чувствительности является проведение N вычислительных экспериментов, при которых для псевдослучайных выборок значений факторов $\delta\alpha^j$, $\delta\beta^j$, $\delta\varphi^j$, $j = 1, 2, \dots, N$ определяется набор откликов (6) (метод Монте-Карло). В настоящей работе значения для факторов брались из первых N точек квазислучайной последовательности Соболя в трехмерном пространстве (эта последовательность относится к классу последовательностей с низким расхождением, которые обладают более высокой плотностью точек, чем созданные при помощи генераторов случайных чисел). Пригодность сгенерированных выборок оценивалась по критериям [19]

$$\frac{1}{N\Delta_i} \sum_{j=1}^N (x_i^j - x_{i0}) \approx 0, \quad \frac{1}{N\Delta_i\Delta_n} \sum_{j=1}^2 (x_i^j - x_{i0})(x_n^j - x_{n0}) \approx 0 \quad (8)$$

где x_i^j – j -е значение из выборки для i -го фактора ($\delta\alpha^j$, $\delta\beta^j$, или $\delta\varphi^j$ соответственно);
 Δ_i – длина диапазона варьирования i -го фактора;
 x_{i0} – номинальное значение i -го фактора.

Вычисления отклика датчика проводились следующим образом:

для заданной вариации $\delta\alpha^j$, $\delta\beta^j$, $\delta\varphi^j$ координат тензорезистора по формулам (6), (2) определяются естественные координаты точек интегрирования на чувствительной решетке;

по результатам конечноэлементного расчета в точках интегрирования вычисляются деформации (3) в направлении главной оси тензорезистора (используется линейная интерполяция по деформациям в ближайших к точке интегрирования узлах конечноэлементной модели) и определяется средняя деформация (4), интеграл по поверхности решетки вычисляется приближенно методом трапеций;

пункты а) и б) повторяются для всех четырех чувствительных решеток тензорезистора, после чего рассчитывается коэффициент передачи датчика (5) и его вариация (7). Переход к следующему набору вариаций, алгоритм повторяется.

С технологической точки зрения удобнее всего наклеивать тензорезистор на координате $\alpha_0/R = -\pi/2$ ($\alpha_0 \approx -28.27$ мм), т. к. для нее разметка может быть нанесена с большей точностью, что снизит общую погрешность. Однако расчеты показали, что наибольшая чувствительность датчика при идеальной наклейке соответствует смещению чувствительного

элемента на 1.5 мм от указанной координаты. Исходные данные приведены в табл. 1 (так как чувствительные решетки расположены симметрично относительно центра подложки C_0 , в таблице приведены координаты только одной решетки).

Таблица 1. Исходные данные для расчета

Наименование параметра	Значение
Нагрузка в канате T , тс	10.34
Прогиб каната h , мм	9
Расстояние между упорами упругого элемента a , мм	200
База чувствительной решетки тензорезистора l , мм	2.0
Ширина чувствительной решетки b , мм	2.7
Коэффициент тензочувствительности решеток тензорезистора K	2.1
Координаты $(\xi_{C_1}^0; \eta_{C_1}^0)$ центра чувствительной решетки № 1, мм	(5.25; 1.4)
Диапазон варьирования дуговой координаты Δ_α , мм	5
Диапазон варьирования поперечной координаты Δ_β , мм	5
Диапазон варьирования угла ориентации тензорезистора Δ_φ	10°
Номинальные координаты тензорезистора на поверхности упругого элемента $(\alpha_0; \beta_0)$, мм	(-26.9; 0)
Номинальный угол φ_0 , определяющий направление главной оси тензорезистора	0°
Количество вычислительных экспериментов (размер выборки) N	3000

Низкая вычислительная сложность задачи позволила использовать сравнительно крупную выборку для такого типа задач.

Качественно о выборках можно судить по двумерным графикам, представляющим собой проекцию точек из многомерного (в нашем случае трехмерного) пространства факторов на плоскость. Такие диаграммы распределения факторов приведены на рис. 4, цвет точек ранжирован по уровню отклонения отклика от номинального значения. Требования к точности силоизмерительных датчиков грузоподъемных машин сравнительно мягкие, а позиционирование тензорезисторов (осуществляющееся вручную) не позволяет серьезным образом ужесточить допуски, обусловленные естественными пределами глазомера и мелкой моторики человека. По этим причинам в качестве граничных значений отклонений чувствительности датчика были выбраны 2% (удовлетворительное снижение чувствительности), 5% (неудовлетворительное снижение чувствительности) и 10% (недопустимое снижение чувствительности), являющиеся достаточно грубыми для сило- и весоизмерительных датчиков. Например, ГОСТ 28836–90 «Датчики силоизмерительные тензорезисторные. Общие технические требования и методы испытаний» устанавливает предельное значение систематической составляющей погрешности для низших категорий точности датчиков равным 2% от номинальной чувствительности.

Отсутствие явных границ между двумерными проекциями областей с разными значениями отклика на диаграммах рис. 4 (а), (б) говорит о том, что чувствительность тензодатчика практически не зависит от поперечной координаты тензорезистора. Это объясняется принятой расчетной схемой упругого элемента, в которой не учитываются особенности взаимодействия каната с поверхностью упоров, что приводит к однородности деформированного состояния вдоль поперечной координаты.

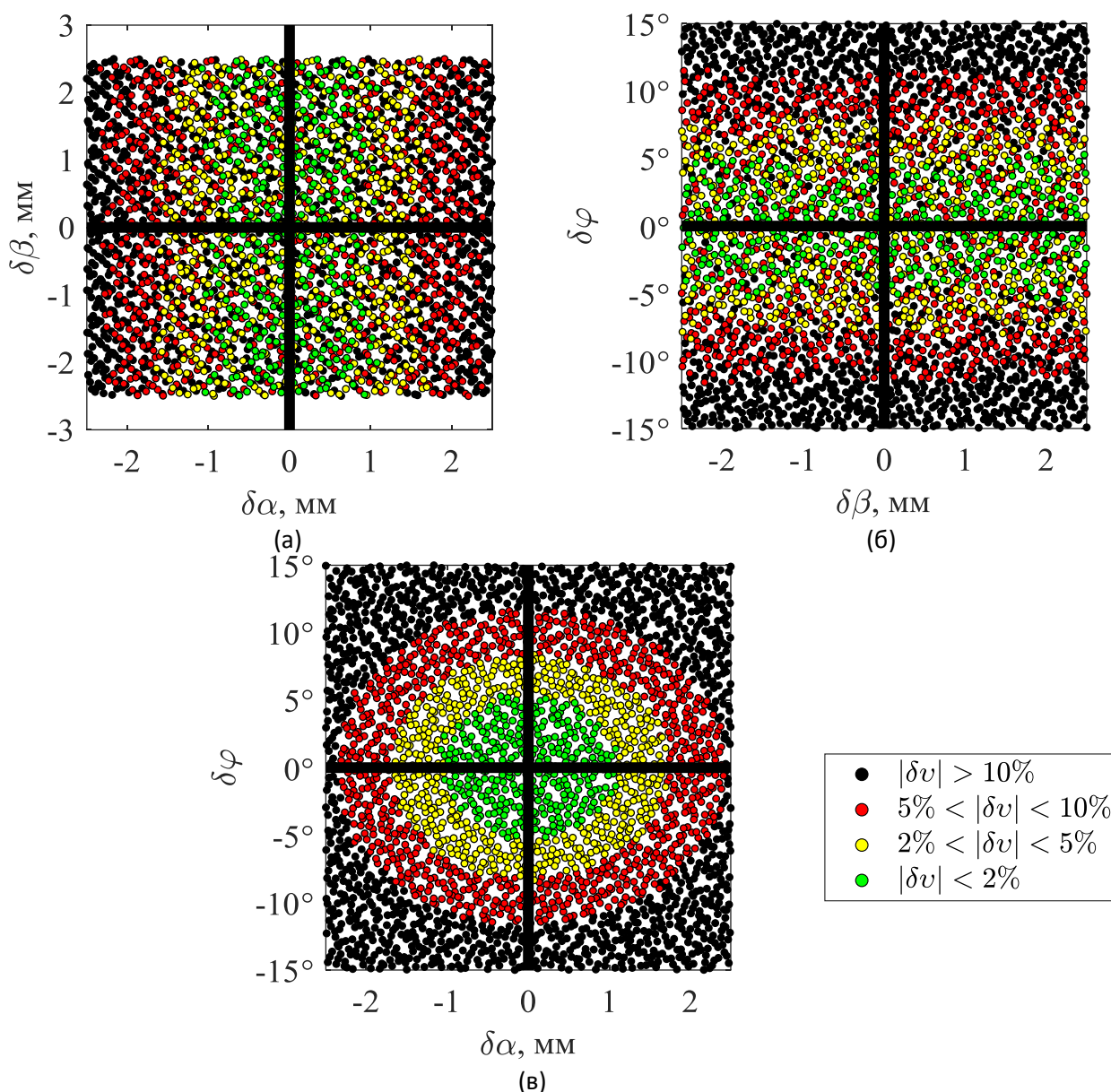


Рис. 4. Двумерные представления выборок факторов в осях:
 (а) вариации поперечной координаты – вариации дуговой координаты;
 (б) вариации угла – вариации поперечной координаты;
 (в) вариации угла – вариации дуговой координаты

Распределение вариаций коэффициента передачи тензодатчика в зависимости от каждого фактора приведено на рис. 5 (легенда к данным аналогична рис. 4). Рис. 5 (б) подтверждает отсутствие значимой зависимости чувствительности датчика от поперечного смещения тензорезистора, тогда как диаграммы рис. 5 (а), (в) отражают значительное (вплоть до 25%) влияние ориентации тензорезистора и его положения вдоль дуговой координаты. Подобные диаграммы можно интерпретировать следующим образом: чем меньше рассеяние данных на графике вдоль оси ординат (т. е. чем больше облако точек принимает определенную форму), тем сильнее зависимость отклика от значений фактора, отложенных вдоль оси абсцисс.

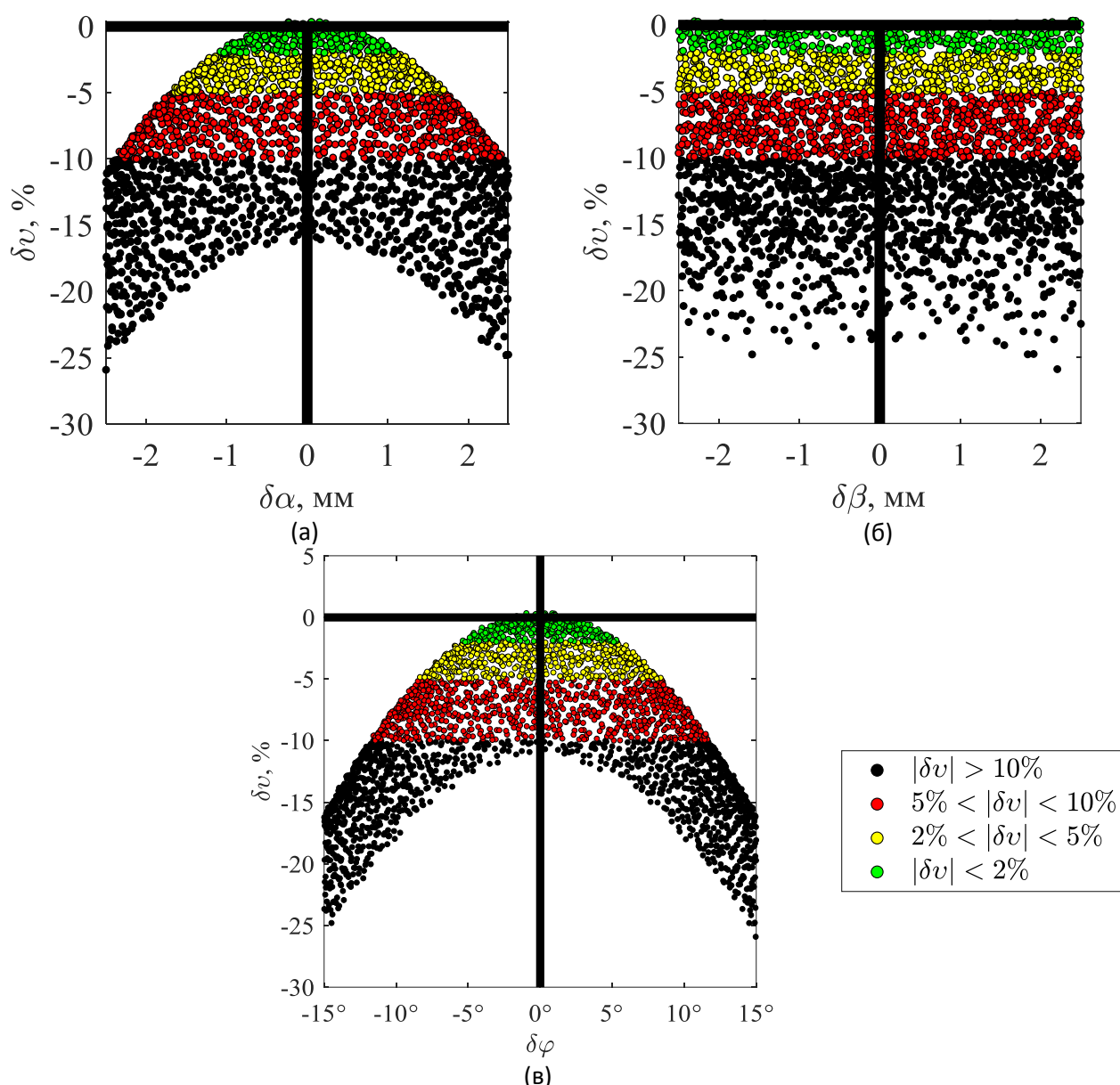


Рис. 5. Двумерные представления распределения расчетных отклонений чувствительности датчика, и соответствующие им значения:

- (а) вариаций дуговой координаты тензорезистора, мм;
- (б) вариаций поперечной координаты тензорезистора, мм;
- (в) вариаций угла поворота тензорезистора

Естественно, существуют и количественные меры оценки степени влияния факторов [20] на отклик (например, коэффициенты чувствительности – sensitivity indices, под чувствительностью здесь понимается свойство математических моделей, а не характеристика датчика). Однако в текущей постановке вопрос их применения не приносит качественно новой информации относительно представленных результатов: дело в том, что точечные оценки зависят от диапазонов варьирования факторов Δ_i , а установить их можно только задавшись допусками на позиционирование тензорезистора, что и является предметом данной работы.

Из рис. 4 (в) видно, что линии уровня поверхности отклика $\delta v(\delta\alpha, \delta\beta)$ близки к эллипсам. Тогда оценки допусков, обеспечивающих заданный уровень отклонения чувствительности датчика от номинального, можно определить как стороны прямоугольника, вписанного в эллипс (рис. 6).

$$\left(\frac{T_{\alpha}^k}{2h_{\alpha}^k}\right)^2 + \left(\frac{T_{\varphi}^k}{2h_{\varphi}^k}\right)^2 = 1, \quad (9)$$

где $h_{\alpha}^k, h_{\varphi}^k$ – полуоси линии уровня $\delta v = k\%$,
 $T_{\alpha}^k, T_{\varphi}^k$ – предельные допуски на координаты α и φ тензорезистора соответственно, обеспечивающие отклонения чувствительности $\delta v = k\%$.

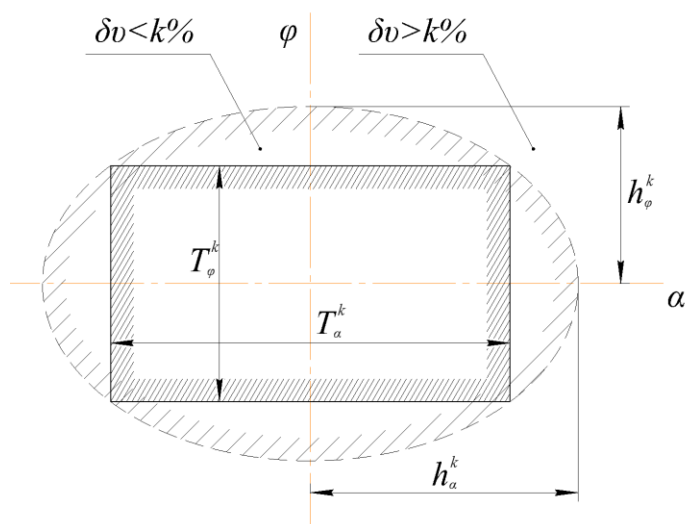


Рис. 6. К оценке допусков позиционирования тензорезистора

Участки кривых, построенных по уравнению (9), приведены на рис. 7. Точки, лежащие в области, ограниченной осями координат и k -й кривой, соответствуют величинам допусков, обеспечивающих отклонения чувствительности датчика от номинальных значений не более чем на $k\%$. По рисунку видно, что допуски порядка $T_{\alpha} = 1.5$ мм и $T_{\varphi} = 6^{\circ}$ обеспечивают вариацию менее 2%.

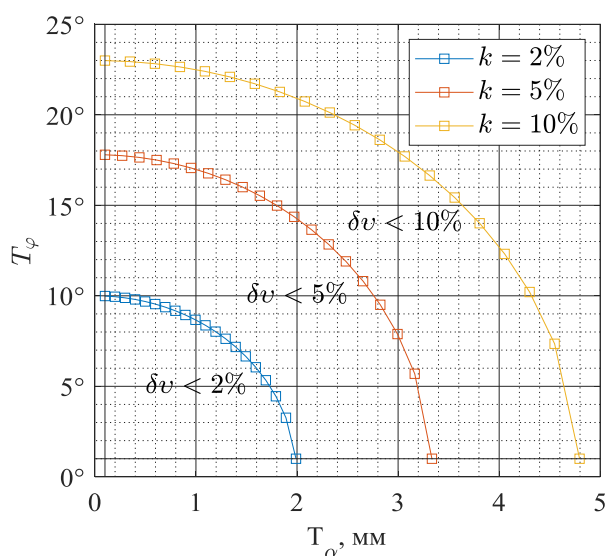


Рис. 7. Множества возможных допусков на позиционирование тензорезистора

Заключение

В данной работе на основании математической модели, связывающей коэффициент передачи тензодатчика силы натяжения в канате с погрешностями размещения тензорезистора на поверхности датчика, была проведена оценка влияния технологических факторов на качество датчика – величину отклонения от номинального коэффициента передачи.

Использованную методику и полученные результаты рекомендуется применять при разработке и модификации конструкции упругих элементов силоизмерительных датчиков грузоподъемных кранов. Моделирование влияния неточности позиционирования тензорезисторов позволит выбирать наиболее удачные решения уже на этапе разработки конструкторской документации, сократить затраты на испытание опытных образцов, а также выпускать датчики более высокого качества.

При необходимости, изложенные в работе геометрические и физические соотношения могут быть легко обобщены для применения к датчикам других типов и (или) с другими конфигурациями чувствительных элементов. Также результаты настоящего исследования полезны для верификации более сложных и подробных математических моделей, учитывающих другие факторы, оказывающие влияние на чувствительность тензометрических датчиков усилий.

Литература

1. Назаров, А. Н. Исследования и разработки кафедры РК4 «Подъемно-транспортные системы» для создания современных приборов безопасности грузоподъемной техники / А. Н. Назаров // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2024. – № 4. – С. 34-40. – EDN JIQKE.
2. Назаров, А. Н. Разработка перспективного прибора безопасности кранов мостового типа / А. Н. Назаров, С. Д. Иванов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2024. – Т. 21, № 6(100). – С. 826-843. – DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843. – EDN TYGGUV.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Назаров, А. Н. Исследование влияния работы ограничителя грузоподъемности с промежуточными порогами на безопасность кранов мостового типа / А. Н. Назаров, С. Д. Иванов // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2023. – № 1. – С. 41-52. – EDN SZRVVB.

7. Михалев, А. В. Расчёт напряженно-деформированного состояния тензометрического датчика / А. В. Михалев // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы : Сборник статей 26-ой Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 12–13 мая 2022 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022. – С. 451-455. – EDN EJYPOR.
8. 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.
9. Chao, L. Shape optimal design and force sensitivity evaluation of six-axis force sensors / L. Chao, Kuen-Tzong Chen // Sensors and Actuators A: Physical. – 1997. – Vol. 63. – № 2. – P. 105-112. – DOI 10.1016/S0924-4247(97)01534-3.
10. Гаврюшин, С. С. К вопросу расчета гистерезиса тензорезисторных датчиков силы в системах инженерного анализа / С. С. Гаврюшин, С. И. Гавриленков // Математическое моделирование и экспериментальная механика деформируемого твердого тела : МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ / Тверской государственный технический университет. Т. 2. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2018. – С. 16-20. – EDN XZBRWX.
11. Robinson, G. M. Finite element modelling of load cell hysteresis / G. M. Robinson // Measurement. – 1997. – Vol 20. – № 2. – P. 103-107. – DOI 10.1016/S0263-2241(97)00021-3.
12. Сушников, В. А. Оценка влияния колебаний температуры на точность измерений тензорезистивных и емкостных преобразователей / В. А. Сушников // Наука и современность. – 2011. – № 8-2. – С. 205-209.
13. Gavrilencov, S. I. Method of simulating temperature effect on sensitivity of strain gauge force sensor in non-uniform temperature field / S. I. Gavrilencov // AIP Conference proceedings : XLIII ACADEMIC SPACE CONFERENCE: dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding Russian scientists – Pioneers of space exploration, Moscow, Russia, 28.01-01.02, 2019. – Vol. 2171. – Moscow, Russia: American Institute of Physics Inc., 2019. – P. 110020. – DOI 10.1063/1.5133254. – EDN DZUIHV.
14. Кудряшов, Э. А. Оценка вариаций чувствительности тензорезистивных каналов датчиков силы / Э. А. Кудряшов, В. А. Сушников // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2011. – № 3(126). – С. 135-140. – EDN NXVPWZ.
15. Gavrilencov, S. I. Method of modeling the influence of manufacturing errors on characteristics of strain gauge force sensors / S. I. Gavrilencov // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2019. – Vol. 2195. – № 1. – DOI 10.1063/1.5140151.
16. Gavryushin, S. S. Investigation of the sensitivity of a strain gauge force sensor to bending moment / S. S. Gavryushin, S. I. Gavrilencov, V. A. Godzikovsky // AIP Conference proceedings : XLIII ACADEMIC SPACE CONFERENCE: dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding Russian scientists – Pioneers of space exploration, Moscow, Russia, 28.01 – 01.02, 2019. – Vol. 2171. – Moscow, Russia: American Institute of Physics Inc., 2019. – P. 170006. – DOI 10.1063/1.5133317. – EDN CTLWWA.
17. Михалев, А. В. Оценка влияния места наклейки чувствительного элемента тензооси на её эксплуатационные характеристики / А. В. Михалев, А. Н. Назаров, С. Д. Иванов // Семьдесят пятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием: Сборник материалов конференции. В 3-х частях,

Ярославль, 20–21 апреля 2022 года. – Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2022. – С. 489-492. – EDN PIPBVY.

18. Клокова, Н. П. Тензорезисторы: теория, методики расчета, разработки / Н. П. Клокова. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.: ил. – ISBN 5-217-00990-X.

19. Мехеда, В. А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В. А. Мехеда. – Самара: Издательство Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2011. – 56 с. – ISBN 978-5-7883-0838-8.

20. Saltelli, A. Global sensitivity analysis. The primer / A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres [et al.]. – John Wiley & Sons. – 2008. – 292 p. – ISBN 978-0-470-05997-5.

АВТОР

Егоров Глеб Ростиславович, МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5), glebegoroff2012@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0002-8224-7068, SPIN-код 6781-7700.

The effect of the strain gauge placement error on the sensitivity of the cable force sensor

Gleb R. Egorov

glebegoroff2012@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University
(Moscow, Russia)

For a strain gauged force sensor installed in hoisting machines, the Monte Carlo method based on the results of finite element analysis is used to study the influence of manufacturing factors – strain gauge positioning errors – on the sensitivity of the sensor. The presented graphical material allows to assess the kind of the sensor's output level dependence on the sensitive elements gluing accuracy.

Keywords: strain gauged force sensor, cable force sensor, sensor rated output, positioning error, sensitivity analysis, load limiter, crane safety devices.

References

1. Nazarov, A. N. Research and development of the RC4 chair "Lifting and transport systems" for the creation of modern safety devices for lifting equipment / A. N. Nazarov // *Machines and installations: design, development and operation.* - 2024. – No. 4. – pp. 34-40. – EDN JIIQKE.
2. Nazarov, A. N. Development of a promising safety device for overhead cranes / A. N. Nazarov, S. D. Ivanov // *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University.* – 2024. – Vol. 21, No. 6(100). – pp. 826-843. – DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-6-826-843. – EDN TYGGUV
3. Nazarov, A. N. Algorithmic processing of objective information about the operation of bridge cranes / A. N. Nazarov, S. D. Ivanov // *Energy-resource-saving technologies and equipment in the machine-building, road and construction industries - 2023 : Proceedings of the international scientific and practical conference, Belgorod, September 21-23, 2023.* Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2023. pp. 178-184. - EDN WGOGHA.
4. 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.
5. Objective information about the operation of lifting and transport machines as a basis for improving the quality of information systems of cargo handling enterprises / N. Y. Ivanova, S. D. Ivanov, S. A. Reliable, A. N. Nazarov // *Machines and installations: design, development and operation.* – 2023. – No. 2. – pp. 81-96. – EDN MRGIFW.

6. Nazarov, A. N. Investigation of the effect of the load capacity limiter with intermediate thresholds on the safety of overhead cranes / A. N. Nazarov, S. D. Ivanov // *Machines and installations: design, development and operation*. – 2023. – No. 1. – pp. 41-52. – EDN SZRVVB
7. Mikhalev, A.V. Calculation of the stress-strain state of a strain gauge / A.V. Mikhalev // *Lifting, transport, construction, road, track, reclamation machines and robotic complexes : Collection of articles of the 26th Moscow International Interuniversity Scientific and Technical Conference of students, undergraduates, postgraduates and young scientists, Moscow, May 12-13 In 2022*. – Moscow: Russian State Agrarian University - Timiryazev Agricultural Academy, 2022. – pp. 451-455. – EDN EJYPOR.
8. 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.
9. Chao, L. Shape optimal design and force sensitivity evaluation of six-axis force sensors / L. Chao, Kuen-Tzong Chen // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 1997. – Vol. 63. – № 2. – P. 105-112. – DOI 10.1016/S0924-4247(97)01534-3.
10. Gavryushin, S. S. On the calculation of hysteresis of strain-gauge force sensors in engineering analysis systems / S. S. Gavryushin, S. I. Gavrilentov // *Mathematical modeling and experimental solid mechanics: Interuniversity collection of scientific papers / Tver State Technical University*. Vol. 2. – Tver: Tver State Technical University, 2018. – P. 16-20. – EDN XZBRWX (in Russian).
11. Robinson, G. M. Finite element modelling of load cell hysteresis / G. M. Robinson // *Measurement*. – 1997. – Vol 20. – № 2. – P. 103-107. – DOI 10.1016/S0263-2241(97)00021-3.
12. Sushnikov, V. A. Evaluation of the influence of temperature fluctuations on the measurement accuracy of strain and capacitive transducers / V. A. Sushnikov // *Science and modernity*. – 2011. – № 8-2. – P. 205-209 (in Russian).
13. Gavrilentov, S. I. Method of simulating temperature effect on sensitivity of strain gauge force sensor in non-uniform temperature field / S. I. Gavrilentov // *AIP Conference proceedings : XLIII ACADEMIC SPACE CONFERENCE: dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding Russian scientists – Pioneers of space exploration, Moscow, Russia, 28.01-01.02, 2019*. – Vol. 2171. – Moscow, Russia: American Institute of Physics Inc., 2019. – P. 110020. – DOI 10.1063/1.5133254. – EDN DZUIHV.
14. Kudryashov, E. A. Estimation of sensitivity variations of strain-resistive channels of force sensors / E. A. Kudryashov, V. A. Sushnikov // *Scientific and Technical Bulletins of St. Petersburg State Polytechnic University. Computer science. Telecommunications. Control*. – 2011. – № 3(126). – P. 135-140. – EDN NXVPWZ (in Russian).
15. Gavrilentov, S. I. Method of modeling the influence of manufacturing errors on characteristics of strain gauge force sensors / S. I. Gavrilentov // *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing, 2019. – Vol. 2195. – № 1. – DOI 10.1063/1.5140151.
16. Gavryushin, S. S. Investigation of the sensitivity of a strain gauge force sensor to bending moment / S. S. Gavryushin, S. I. Gavrilentov, V. A. Godzikovsky // *AIP Conference proceedings : XLIII ACADEMIC SPACE CONFERENCE: dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding Russian scientists – Pioneers of space exploration, Moscow, Russia, 28.01 – 01.02, 2019*. – Vol. 2171. – Moscow, Russia: American Institute of Physics Inc., 2019. – P. 170006. – DOI 10.1063/1.5133317. – EDN CTLWWA.
17. Mikhalev A. V. Evaluation of the influence of strain gauge placement in the performance characteristics of the force sensor / A. V. Mikhalev, A. N. Nazarov, S. D. Ivanov // *The seventy-fifth scientific and technical conference of students, master's degree candidates, and postgraduates with international participation: Conference Proceedings. In 3 volumes, Yaroslavl, April 20–21, 2022*. – Yaroslavl: Yaroslavl State Technical University, 2022. – P. 489-492. – EDN PIPBVY (in Russian).

18. Klokova, N. P. Strain gauges: theory, methods of calculations, design / N. P. Klokova – Moscow: Mashinostroyeniye, 1990. – 224 p. – ISBN 5-217-00990-X (in Russian).
19. Mekheda, V. A. Tensometric methods of strain measurement / V. A. Mekheda. – Samara: Publishing of the Samara University. – 2011. – 56 p. – ISBN 978-5-7883-0838-8 (in Russian).
20. Saltelli, A. Global sensitivity analysis. The primer / A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres [et al.]. – John Wiley & Sons. – 2008. – 292 p. – ISBN 978-0-470-05997-5.
-

AUTHOR

Gleb R. Egorov, Bauman Moscow State University (105005, Moscow, 2nd Bauman str., 5), glebegoroff2012@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0002-8224-7068, SPIN-code 6781-7700.