

Система многокритериального проектирования тензорезисторных весоизмерительных датчиков с осесимметричными упругими элементами

© С.И. Гавриленков¹, С.С. Гаврюшин¹, В.А. Годзиковский²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²ЗАО «ВИК «Тензо-М», Московская обл.,

пос. Красково, 140050, Россия

Рассмотрен принцип работы тензорезисторных весоизмерительных тензодатчиков (ТД). Сформулирована задача проектирования ТД, содержащая две подзадачи: подбор формы и размеров упругого элемента (УЭ) и определение оптимальной схемы их наклейки на УЭ. Указаны критерии качества, на которые необходимо ориентироваться при проектировании ТД. Разработана программа для проектирования ТД с осесимметричными УЭ, в которой реализован метод исследования пространства параметров и использован функционал САЕ системы ANSYS. Работа программы продемонстрирована на примере проектирования ТД для системы взвешивания в движении. Определено пространство управляющих параметров и заданы критериальные ограничения. Для решения задачи разработана расчетная модель ТД в системе ANSYS. В результате вычислительных экспериментов получено множество Парето-оптимальных решений, из которых можно выбрать наиболее предпочтительный вариант.

Ключевые слова: многокритериальное проектирование, метод конечных элементов, упругий элемент, метод исследования пространства параметров, тензодатчик

Введение. Тензодатчики широко применяются в электронных весах и устройствах АСУТП вследствие высоких точности и надежности. Одной из лидирующих в России и мире компаний по производству тензодатчиков (ТД) является ЗАО «ВИК «Тензо-М». Несмотря на то, что основные типы ТД были разработаны еще в начале развития тензометрии, компания до сих пор ведет работы по проектированию новых датчиков и оптимизации существующих. САЕ-системы являются мощным инструментом в руках конструктора [1], однако они не ориентированы на решение задач проектирования ТД.

Цель работы — создание системы, позволяющей с использованием функционала системы ANSYS обеспечить процесс проектирования ТД с упругим элементом (УЭ) в виде тел вращения как наиболее технологичных. При этом программа должна не только рассчитывать отдельные ТД, но и решать задачу многокритериального проектирования.

Устройство и принцип работы ТД. ТД относится к классу весоизмерительных датчиков. Согласно документам Международной организации законодательной метрологии (МОЗМ) Р60 [2], весоизме-

рительный датчик — это преобразователь нагрузки, который измеряет массу путем преобразования величины (массы) в другую измеренную величину (выходной сигнал), с учетом значения ускорения силы тяжести и аэростатической силы в месте его применения. Рассмотрим, как работает цепь преобразования физических величин в случае тензодатчика.

Измеряемая сила — вес — через силопередающее устройство или узел встройки ТД действует на тензодатчик и деформирует его. На поверхностях датчика наклеены чувствительные элементы — тензорезисторы, которые под воздействием деформации изменяют свое сопротивление. Деформация тензорезисторов зависит от места наклейки на УЭ. Тензорезисторы соединены в мостовую измерительную схему (МИС) Уитстона, где изменение сопротивления тензорезисторов в плечах МИС приводит к возникновению на выходе МИС электрического сигнала, пропорционального приложенной нагрузке. Сигнал оцифровывается и обрабатывается и далее в зависимости от области применения либо выводится на весовой терминал, либо передается в АСУТП (рис. 1).



Рис. 1. Цепь преобразования физических величин при измерении веса ТД (1 и 3 — номера плеч МИС, работающих на растяжение, 2, 4 — на сжатие)

В работе рассмотрена полная МИС, элементы всех плеч которой чувствительны к прикладываемой нагрузке. Также существуют измерительные полумосты и четвертьмосты [3].

Примем следующие допущения.

1. Все тензорезисторы растяжения наклеены на УЭ так, что их деформация одинакова и равна ϵ_+ . Аналогичное допущение для тензорезисторов сжатия — их деформация равна ϵ_- .

2. В одном плече может быть от одного до четырех тензорезисторов, но они наклеены так, что их деформация одинакова.

Тогда изменения сопротивления плеч МИС определяют по формуле [4]

$$\frac{\Delta R}{R}_{1,3(2,4)} = e^{K_f \varepsilon_{n+}(\varepsilon_{n-})+1}, \quad (1)$$

где K_f — коэффициент тензочувствительности; $\varepsilon_{n+}(\varepsilon_{n-})$ — логарифмическая деформация тензорезисторов растяжения (сжатия).

Логарифмическая деформация связана [4] с конечной деформацией, рассчитываемой в САЕ-системах, следующей зависимостью:

$$\varepsilon_{n+(-)} = \ln(\varepsilon_{+(-)} + 1). \quad (2)$$

Отношение выходного и входного электрических сигналов МИС называется рабочим коэффициентом передачи (РКП) и является важнейшим параметром ТД. РКП рассчитывают [3] по формуле

$$\text{РКП} = \frac{1 + \frac{\Delta R_1}{R_1}}{2 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2}} - \frac{1 + \frac{\Delta R_4}{R_4}}{2 + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4}}, \quad (3)$$

где $\frac{\Delta R_1}{R_1}, \dots, \frac{\Delta R_4}{R_4}$ — изменения сопротивления тензорезисторов плеч 1...4 соответственно. Путем упрощения формулы (3) и подстановки в нее значений $\frac{\Delta R_1}{R_1}, \dots, \frac{\Delta R_4}{R_4}$ из формул (1) и (2) получим окончательное выражение для расчета РКП при определенной нагрузке P :

$$\text{РКП}(P) = \frac{e^{K_f \ln(\varepsilon_{+}(P)+1)} - e^{K_f \ln(\varepsilon_{-}(P)+1)}}{2 + e^{K_f \ln(\varepsilon_{+}(P)+1)} + e^{K_f \ln(\varepsilon_{-}(P)+1)}}. \quad (4)$$

В работе [1] использованы упрощенные формулы расчета, в которых не учтена нелинейность зависимости изменения сопротивления от деформации, а также нелинейность непосредственно МИС. Погрешность упрощенных формул достаточно мала, но при проектировании ТД класса точности С3 и выше [2] необходимо переходить на точные формулы.

Задача проектирования ТД. Точность ТД определяется свойствами зависимости РКП (P) — выходной характеристики УЭ. По МОЗМ Р60 [2], точность ТД определяется его классом точности. Для определения класса точности используются нелинейность, гистерезис, ползучесть, погрешность от температуры и т. д. В работе рассмотрены только те составляющие погрешности, которые прямо или косвенно можно промоделировать методом конечных элементов (МКЭ): нелинейность и гистерезис [5] (рис. 2).

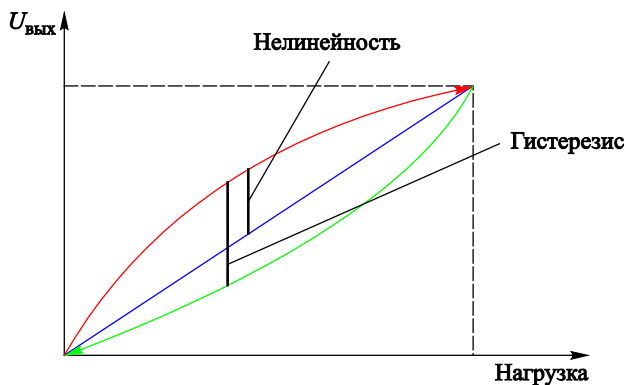


Рис. 2. Иллюстрация явлений нелинейности и гистерезиса (нелинейность — отклонение выходной характеристики при нагружении от прямой линии. Гистерезис — несовпадение выходной характеристики при нагружении и разгрузке)

Таким образом, задачу проектирования ТД можно сформулировать следующим образом. Подобрать такие размеры и форму УЭ, а также места наклейки тензорезисторов, чтобы выполнялись следующие требования:

- 1) значение РКП при номинальной нагрузке должно быть не меньше заданного;
- 2) погрешности нелинейности и гистерезиса должны быть либо минимизированы, либо меньше допустимых значений для требуемого класса точности;
- 3) УЭ должен обладать небольшим запасом прочности, чтобы выдерживать некоторую перегрузку. Пластические деформации в УЭ не должны возникать.

Методика проектирования ТД. В работе использован метод ИПП [6, 7] применительно к проектированию ТД (рис. 3).

В начале проектирования определяется форма УЭ, для нее создается параметризованный расчет УЭ в среде ANSYS, написанный расчетчиком на языке APDL. Методика расчета подробно рассмотрена в работах [8, 9]. Лицо, принимающее решение (ЛПР), выделяет управляющие параметры, которые в процесс проектирования могут изменяться в заданных пределах.

Определенный вариант УЭ зависит от вектора управляющих параметров $\bar{\alpha}$:

$$\bar{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N); \quad (5)$$

$$\alpha_i^* \leq \alpha_i \leq \alpha_i^{**} \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (6)$$

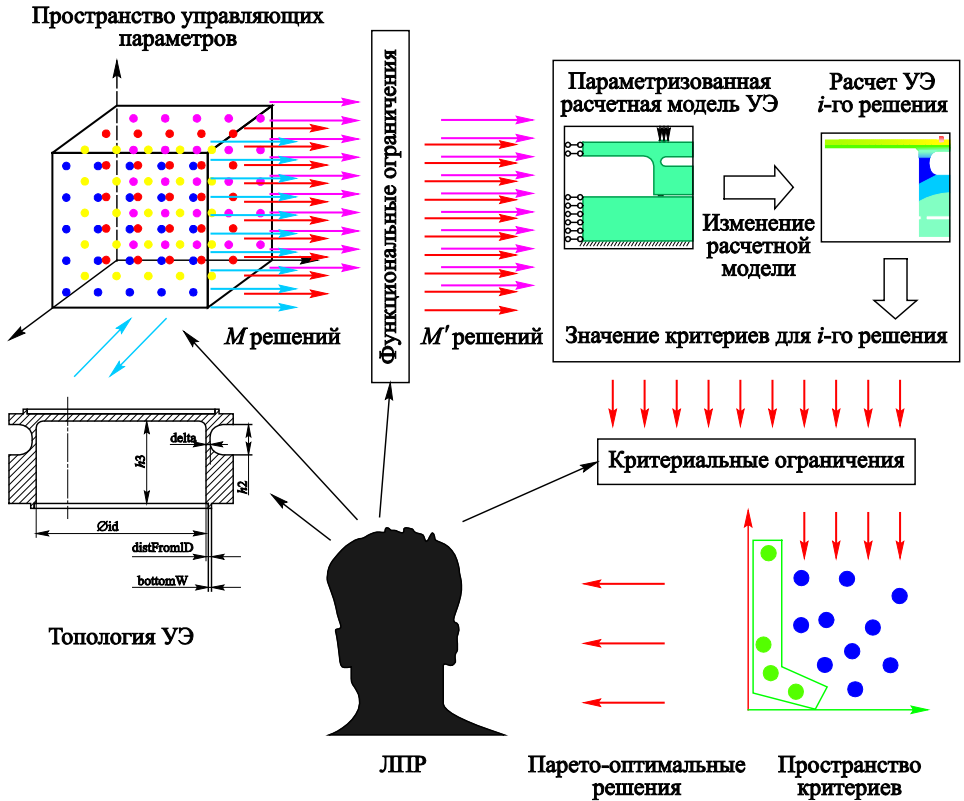


Рис. 3. Методика проектирования ТД

К конструкции могут предъявляться требования конструктивного и технологического толка, реализуемые с помощью функциональных ограничений:

$$c_l^* \leq f_l(\bar{\alpha}) \leq c_l^{**} \quad (l = 1, 2, \dots, t). \quad (7)$$

Таким образом, процесс проектирования сводится к исследованию пространства параметров. Для этого генерируется M решений, равномерно распределенных в пространстве параметров, т. е. используется ЛП_t последовательность [6]. Решения, удовлетворяющие функциональным ограничениям, проходят расчет в системе ANSYS. В результате вычисляются критерии $GF_j(\bar{\alpha})$ ($j = 1, 2, \dots, K$), по которым оценивается пригодность того или иного варианта. После этого решение можно рассматривать как точку в K -мерном пространстве критериев.

На критерии также накладываются ограничения:

$$GF_j^* \leq GF_j(\bar{\alpha}) \leq GF_j^{**} \quad (j = 1, 2, \dots, K). \quad (8)$$

Решения, отвечающие всем критериальным ограничениям, называются допустимыми. Из множества допустимых решений выделяется множество Парето-оптимальных решений, которое передается ЛПР. Часто в процессе проектирования критериальные решения могут изменяться [6], поэтому в методике предусмотрена возможность редактирования критериальных ограничений и переопределение множеств допустимых решений и Парето-оптимальных решений.

Критерии в методике проектирования. Основные критерии, по которым определяется предпочтительность того или иного варианта, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные критерии при проектировании ТД

Обозначение критерия	Наименование критерия	Примечание
$\overline{\text{Stress}}(\alpha)$	Прочность УЭ	Максимальное эквивалентное напряжение в теле УЭ, по четвертой теории прочности, должно быть меньше предельно допустимого
$\overline{\text{Gain}}(\alpha)$	РКП	Рабочий коэффициент передачи ТД должен быть не меньше требуемого значения
$\overline{\text{NonLin}}(\alpha)$	Нелинейность	Нелинейность по МОЗМ Р60
$\overline{\text{Slip}}(\alpha)$	Радиальное проскальзывание	Влияет на нелинейность и гистерезис, необходимо минимизировать

В методике влияние гистерезиса оценивается опосредованно через другие параметры напряженно-деформированного состояния ТД. С технической точки зрения можно провести расчет УЭ с нагрузкой и разгрузкой, а затем формально вычислить гистерезис по определению, приведенному в МОЗМ Р60, хотя этот расчет не вызывает доверия. Известно [10], что радиальное проскальзывание на опорах приводит к нелинейности и гистерезису. По опыту проектирования УЭ на ЗАО «ВИК «Тензо-М», датчики, у которых при расчетах наблюдалось малое проскальзывание на опорах (порядка 2–3 мк), не демонстрировали гистерезиса, вызванного сухим трением. Поэтому в качестве критерия, по которому оценивается гистерезис, выбрали максимальное радиальное проскальзывание на опорах УЭ. Необходимо стремиться к минимизации этой величины. РКП при номинальной нагрузке определяется по формуле, а наибольшая нелинейность выходной характеристики — по МОЗМ Р60. При расчете делается допущение, что по одной точке на середине измерительной решетки тензорезистора

можно судить о его деформации в целом. Места наклейки тензорезисторов определяются с помощью подпрограммы в расчете УЭ, которая для заданных ЛПП поверхностей перебирает различные варианты наклейки тензорезисторов. Оптимальной считается схема наклейки с номинальным РКП, который не меньше заданного, и минимальной абсолютной нелинейностью.

Реализация методики. Данная методика проектирования реализована в прикладной программе, написанной на языке C#. Программа является продолжением исследования, описанного в работе [8]. Для примера на рис. 4 показана часть окон интерфейса разработанной программы многокритериального проектирования ТД.

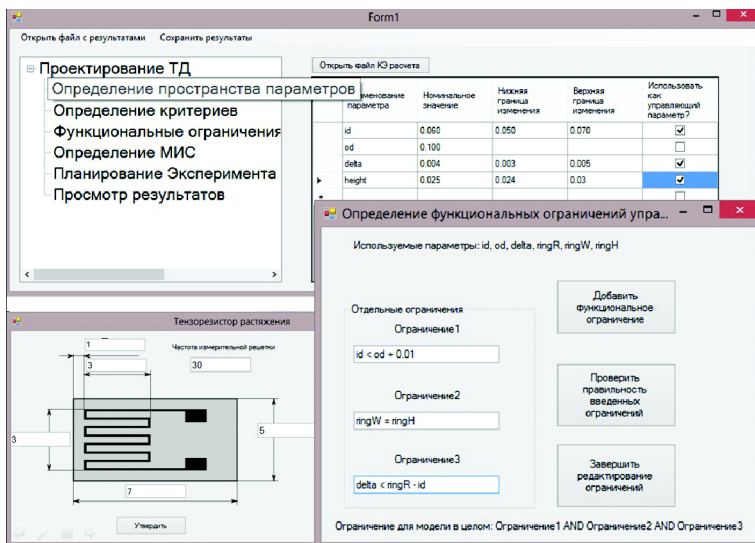


Рис. 4. Часть окон интерфейса разработанной программы многокритериального проектирования ТД: форма определения пространства параметров (сверху), форма задания характеристик тензорезистора (слева), форма задания функциональных ограничений (справа)

Входными данными для программы служат:

- 1) параметризованный расчет упругого элемента на языке APDL (ANSYS Parametric Design Language);
- 2) данные о пространстве управляющих параметров;
- 3) данные о требуемом номинальном РКП и остальных критериальных ограничениях (не обязательно, возможно переопределение);
- 4) данные о функциональных ограничениях (не обязательно, возможно переопределение);
- 5) данные о наборе поверхностей для наклейки тензорезисторов. Поверхности выбираются в интерактивном режиме, после автоматического проведения пробного расчета;

б) данные о геометрических размерах тензорезисторов МИС и их коэффициентах тензочувствительности.

Число критериев не зафиксировано, можно добавлять дополнительные критерии, вычисляемые внутри расчетной модели. На выходе программы ЛПР получает информацию в виде множества допустимых и Парето-оптимальных вариантов. Программа позволяет для каждого из этих вариантов автоматически открыть систему ANSYS и повторно провести расчет выбранного варианта для детального исследования.

Использование программы при проектировании ТД. Возможности программы демонстрируются на примере поиска оптимальной конфигурации ТД, предназначенного для использования в системе взвешивания в движении (СВВД) (рис. 5). Материал датчика — сталь 09Х16Н4Б (модуль Юнга 200 ГПа, коэффициент Пуассона 0,3).

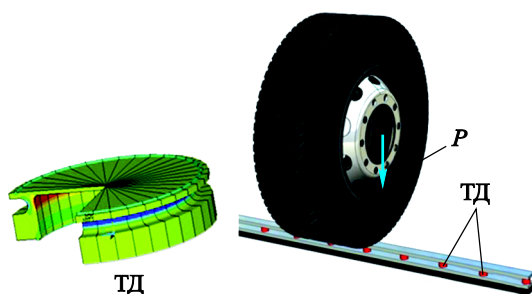


Рис. 5. Вид СВВД и ТД (СВВД конструктивно представляет собой две стальные пластины, между которыми находится ряд ТД)

Требования, предъявляемые к ТД СВВД

Номинальная нагрузка, Н	50 000
Напряжение, МПа, не более	500
Номинальный РКП, мВ/В, не менее	1
Нелинейность, %, не более	0,5
Перемещения на опорах, мкм, не более	2
Внешний диаметр, мм	100
Высота датчика, мм	26

Параметрическая модель УЭ приведена на рис. 6. Тензорезистор растяжения приклеен вертикально на внутренней вертикальной цилиндрической поверхности УЭ, тензорезистор сжатия — на этой же поверхности, но в окружном направлении.

Управляющие параметры и их границы изменения приведены в табл. 2.

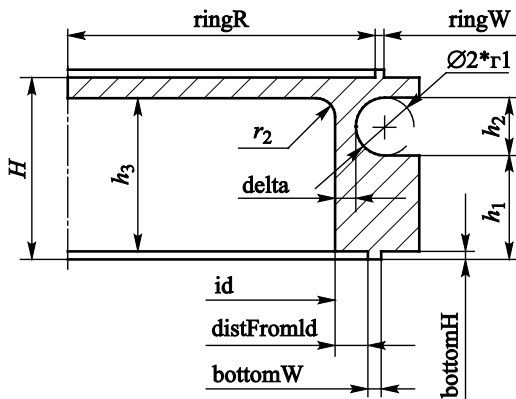


Рис. 6. Параметрическая модель УЭ

Таблица 2

Пространство управляющих параметров

Имя параметра	Значение, мм		
	Номинальное	Минимальное	Максимальное
id	75	67,5	82,5
delta	4	3,6	4,4
h1	14	12,6	15,4
h2	8	7,2	8,8
h3	23	20,7	25,3
r2	2	1,8	2,2
ringR	46	41,4	50,6
ringW	1	0,9	1,1
ringH	1	0,9	1,1
distFromID	1	0,9	1,1
bottomW	1,5	1,35	1,65
bottomH	1	0,9	1,1
id	75	67,5	82,5

Пространство параметров исследовано с помощью 2 000 решений, из которых 86 оказались допустимыми. Из числа допустимых решений Парето-оптимальными являются 46 решений. Зависимости критериев от других критериев (номинального РКП, нелинейности, перемещения на опорах) представлены на рис. 7, наиболее предпочтительный вариант конструкции УЭ — на рис. 8.

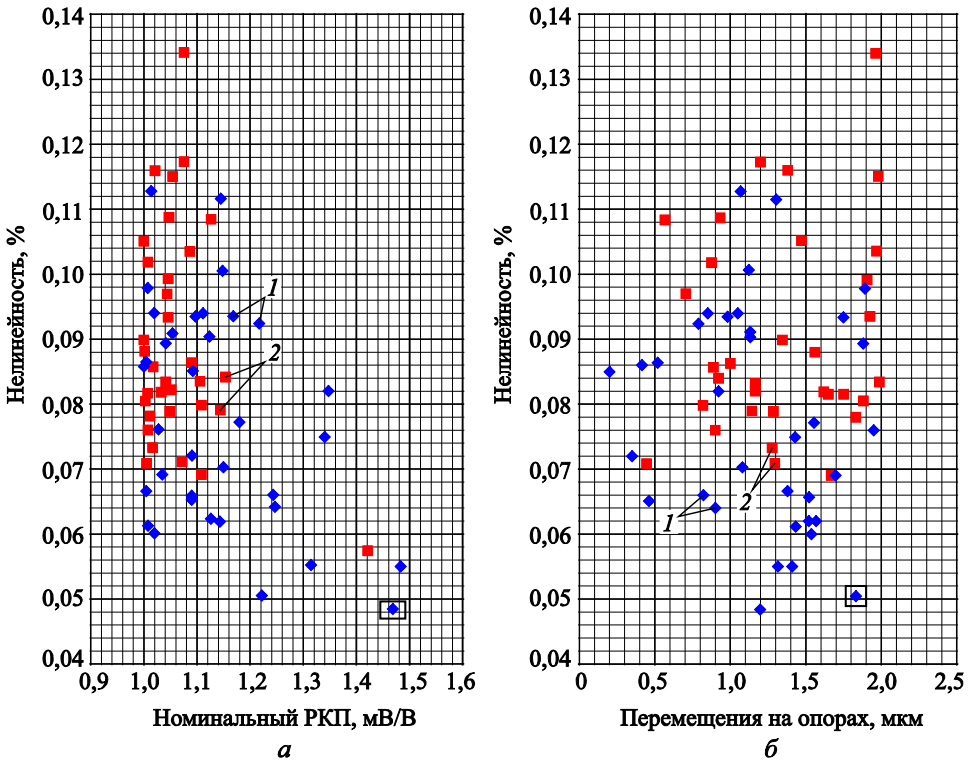


Рис. 7. Зависимости критерия «Нелинейность» от критерия «Номинальный РКП» (а) и критерия «Нелинейность» от критерия «Перемещение на опорах» (б):
 1 — Парето-оптимальные решения; 2 — допустимые решения

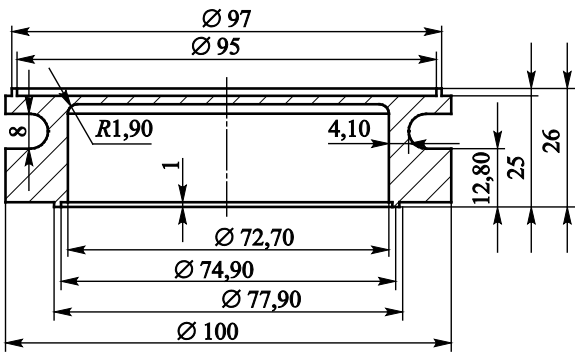


Рис. 8. Наиболее предпочтительная конструкция УЭ (максимальное напряжение 39,12 МПа, номинальный РКП 1,467, нелинейность 0,048, перемещение опор 1,2 мкм)

Заключение. Разработанная прикладная программа может применяться для проектирования ТД с осесимметричными УЭ любой формы. Из множества Парето-оптимальных решений выбран наибо-

лее предпочтительный вариант конструкции. В дальнейшем планируется применить разработанную программу для других типов упругих элементов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гаврюшина Н.Т., Непочатов А.В., Годзиковский В.А. Расчет мембранного упругого элемента тензорезисторного датчика силы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2013, № 2, с. 69–74.
- [2] МОЗМ P60. URL: http://www.fundmetrology.ru/depositary/04_IntDoc_all/R%2060.pdf
- [3] Hoffmann K. *Applying the Wheatstone Bridge Circuit*. URL: <https://www.hbm.com/en/3193/tips-and-tricks-applying-the-wheatstone-bridge-circuit/> (дата обращения 25.10.2016).
- [4] Kreuzer M. *Wheatstone Bridge Circuits Show Almost No Nonlinearity and Sensitivity Errors When Used for Single Strain Gage Measurements*. URL: <https://www.hbm.com/en/3196/tips-and-tricks-wheatstone-bridge-circuits-show-almost-no-nonlinearity-and-sensitivity-errors-when-used-for-single-strain-gage-measurements/> (дата обращения 26.10.2016).
- [5] Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. *Численный анализ элементов конструкции машин и приборов*. 2-е изд. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 479 с.
- [6] Соболев И.М., Статников Р.Б. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, Изд-во Дрофа, 2006, 175 с.
- [7] Statnikov R.B., Gavrushin S.S., Dang M.H., Statnikov A.R. Multicriteria Design of Composite Pressure Vessels. *International Journal of Multicriteria Decision Making*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 252–278.
- [8] Гаврюшин С.С., Непочатов А.В., Годзиковский В.А. Расчет и оптимизация весоизмерительного датчика автомобильных весов. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*, 2014, № 4, с. 88–94.
- [9] Гаврюшин С.С., Гавриленков С.И. Оптимизация упругого элемента тензодатчика М70. *Инженерный вестник*, 2015, вып. 10, с. 538–547. URL: http://engsi.ru/file/825307.html?__s=1 (дата обращения 25.10.2016).
- [10] Robinson G.M. Finite Element Modeling of Load Cell Hysteresis. *Measurement*, 1997, vol. 20, no. 2, pp. 103–107.

Статья поступила в редакцию 14.11.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Гавриленков С.И., Гаврюшин С.С., Годзиковский В.А. Система многокритериального проектирования тензорезисторных весоизмерительных датчиков с осесимметричными упругими элементами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-01-1578>

Гавриленков Сергей Игоревич — студент 2-го курса магистратуры кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных исследований — проектирование и оптимизация тензорезисторных датчиков веса, многокритериальная оптимизация. e-mail: gavrilencov1993@gmail.com

Гаврюшин Сергей Сергеевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: gss@bmstu.ru

Годзиковский Василий Александрович — начальник научно-исследовательского и информационно-аналитического отдела ЗАО «ВИК «Тензо-М». e-mail: weight@tenso-m.ru

System for multicriteria design of strain gauge load cells having axis symmetrical elastic elements

© S.I. Gavrilentov¹, S.S. Gavryushin¹, V.A. Godzikovskiy²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

²JSC Weight Measuring Company Tenso-M, Moscow Region, Kraskovo, 140050, Russia

This paper briefly touches upon the mechanics of strain gauge load cells and states the problem of strain gauge load cell design. The mentioned problem is subdivided into two tasks: picking and choosing the shape and the dimensions of the elastic element, and finding the right spots for mounting strain gauges on the elastic element. We created a system for designing strain gauged load cells having axis symmetrical elastic elements. The system implements the method of parameter space investigation and utilizes capabilities of the CAE system ANSYS. The system's capabilities are demonstrated by designing a load cell for Weigh-In-Motion scales. Solution of this design problem comprises defining the parameter space and setting the values of the criteria constraints. We investigated the parameter space using the system mentioned above. Finally, we developed a finite-element model of the load cell being designed. The numerical experiments resulted in a Pareto-feasible set, which is given to the Decision Maker, so that he could choose the best option.

Keywords: multicriteria design, finite-element method, elastic element, the parameter space investigation method, strain gauge

REFERENCES

- [1] Gavryushina N.T., Nepochatov A.V., Godzikovskiy V.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 2, pp. 69–74.
- [2] *OIML R60*. Available at: http://www.fundmetrology.ru/depository/04_IntDoc_all/R%2060.pdf (accessed October 25, 2016).
- [3] Hoffmann K. *Applying the Wheatstone Bridge Circuit*. Available at: <https://www.hbm.com/en/3193/tips-and-tricks-applying-the-wheatstone-bridge-circuit/> (accessed October 25, 2016).
- [4] Kreuzer M. *Wheatstone Bridge Circuits Show Almost No Nonlinearity and Sensitivity Errors When Used for Single Strain Gage Measurements*. Available at: <https://www.hbm.com/en/3196/tips-and-tricks-wheatstone-bridge-circuits-show-almost-no-nonlinearity-and-sensitivity-errors-when-used-for-single-strain-gage-measurements/> (accessed October 25, 2016).
- [5] Gavryushin S.S., Baryshnikova O.O., Boriskin O.F. *Chislennyy analiz elementov konstruktivnykh mashin i priborov* [Numerical analysis of structural elements of machines and devices]. 2nd ed. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 479 p.
- [6] Sobol I.M., Statnikov R.B. *Vybor optimalnykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami* [Choosing the optimal parameters in problems with many criteria]. 2nd revised edition. Moscow, Drofa Publ., 2006, 175 p.
- [7] Statnikov R.B., Gavryushin S.S., Dang M.H., Statnikov A.R. Multicriteria Design of Composite Pressure Vessels. *International Journal of Multicriteria Decision Making*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 252–278.

- [8] Gavryushin S.S., Nepochatov A.V., Godzikovskiy V.A. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI — Proceedings of Moscow State Technical University MAMI*, 2014, no. 4, 2014, pp. 88–94.
- [9] Gavryushin S.S., Gavrilentov S.I. *Inzhenernyy vestnik — Engineering bulletin*, 2015, no. 10, pp. 538–547. Available at: http://engsi.ru/file/825307.html?_s=1 (accessed October 25, 2016).
- [10] Robinson G. M. Finite element modeling of load cell hysteresis. *Measurement*, 1997, vol. 20, no. 2, pp. 103–107.

Gavrilentov S.I., 2nd year Master student of the Department of Computer Systems of Manufacture Automation, Bauman Moscow State Technical University. The area of research is design and optimization of strain gauge load cells, multicriteria optimization. e-mail: gavrilentov1993@gmail.com

Gavryushin S.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Computer Systems of Manufacture Automation, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: gss@bmstu.ru

Godzikovskiy V.A., Head of the Research and Information Department, JSC Weight Measuring Company Tenso-M. e-mail: weight@tenso-m.ru