

Оптимизация упругого элемента тензодатчика М70

10, октябрь 2015

Гаврюшин С.С.¹, Гавриленков С.И.^{1,*}

УДК 531.7:62-27

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

*gavrilencovBMSTU@yandex.ru

Введение

Весоизмерительная техника, использующая тензодатчики, широко используется в народном хозяйстве и обеспечивает высокую точность и надежность измерений. В частности, задача уменьшения погрешности измерений тензодатчика уже решалась [1]. Однако, проектирование упругого элемента тензодатчика – задача со многими критериями, так как кроме обеспечения требуемой точности измерений необходимо выполнять требования по прочности тензодатчика и его ресурсоемкости (металлоемкость). Критерии пригодности изделия часто противоречат друг другу и необходимо идти на компромисс для получения изделий, способных успешно конкурировать на рынке.

1. Описание конструкции тензодатчика

В данной работе рассматривается оптимизация упругого элемента тензодатчика М70, производимого компанией ЗАО «ВИК «Тензо-М». Этот тензодатчик входит в ряд мембранных тензодатчиков серии «М», на который приходится наибольшее количество произведенной продукции. Тензодатчики серии «М» применяются в автомобильных и вагонных весах, а также весах для взвешивания баков (рис. 1). Недостаток тензодатчиков серии «М» кроется в их металлоемкости: в определенные моменты вставал вопрос о снятии их с производства по причине неэкономичности. Следовательно, уменьшение металлоемкости является критически важной задачей при проектировании тензодатчика.

Тензодатчик представляет собой силопередающее устройство (рис. 2. а) и упругий элемент (рис. 2. б), на поверхности которого наклеены тензорезисторы, соединенные в мостовую измерительную схему. Под действием веса измеряемого объекта упругий элемент деформируется, при этом изменяется сопротивление тензорезисторов. Относительное изменение сопротивления тензорезистора прямо пропорционально величине относительной деформации. При изменении сопротивления тензорезисторов изменяется выходной сигнал измерительного моста, который в дальнейшем оцифровывается и обрабатывается. Значение выходного сигнала моста может быть рассчитано [2] по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ПИТ}} * \frac{\left(\frac{\Delta R_{\text{пл1}}}{R_{\text{пл1}}} + \frac{\Delta R_{\text{пл3}}}{R_{\text{пл3}}}\right) - \left(\frac{\Delta R_{\text{пл2}}}{R_{\text{пл2}}} + \frac{\Delta R_{\text{пл4}}}{R_{\text{пл4}}}\right)}{4}, \quad (1)$$

где $U_{пит}$ - опорное напряжение измерительной схемы, $\frac{\Delta R_{Пл1}}{R_{Пл1}} \dots \frac{\Delta R_{Пл4}}{R_{Пл4}}$ - относительное изменение сопротивления тензорезисторов, входящих в соответствующее плечо измерительной схемы (рис. 3.). Относительное изменение сопротивления можно рассчитать [3] по следующей формуле:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_F * \epsilon, \quad (2)$$

где ϵ - деформация тензорезистора, K_F - коэффициент тензочувствительности. В работе принимается, что используются фольговые константановые тензорезисторы, значение коэффициента тензочувствительности которых принимается равным двум - это значение тензочувствительности для тензорезисторов из константана [2].



Рис. 1. Автомобильные (а) и вагонные (б) весы производства компании «Тензо-М»

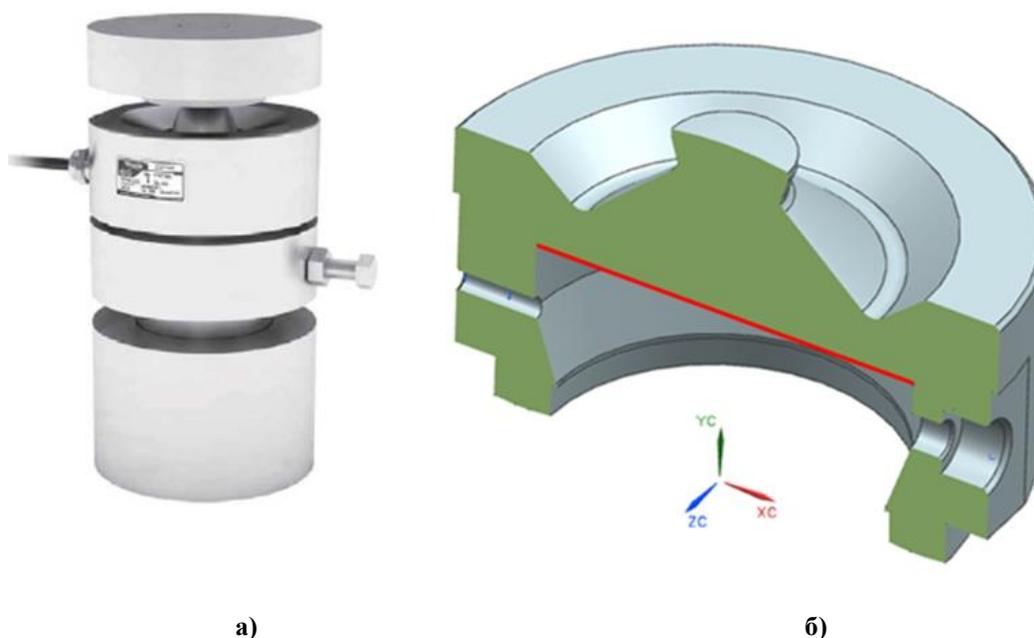


Рис. 2. Силопередающее устройство (а) и упругий элемент (б) тензодатчика М70. На упругом элементе красной линией отмечено «донце», где наклеиваются тензорезисторы

2. Методика выбора мест наклейки тензодатчиков

При размещении тензорезисторов необходимо руководствоваться следующими правилами.

- 1) Относительная деформация тензорезистора должна быть примерно равна его номинальной деформации. При превышении номинала возможно разрушение тензорезистора. Если деформация меньше номинала, то на выходе измерительной схемы получается слабый сигнал.
- 2) Как видно из формулы (1) и рис.3 б., половина тензорезисторов работает на растяжение, другая половина – на сжатие. Для получения максимально возможного сигнала в измерительной схеме необходимо, чтобы абсолютное значение относительной деформации тензорезисторов, работающих на растяжение, было равно абсолютному значению относительной деформации тензорезисторов, работающих на сжатие.
- 3) Тензорезисторы следует размещать так, чтобы можно было герметизировать полость, в которой они находятся. Это делается для минимизации воздействия внешней среды на датчики. Для М70 это достигается привариванием крышки к нижней части упругого элемента.

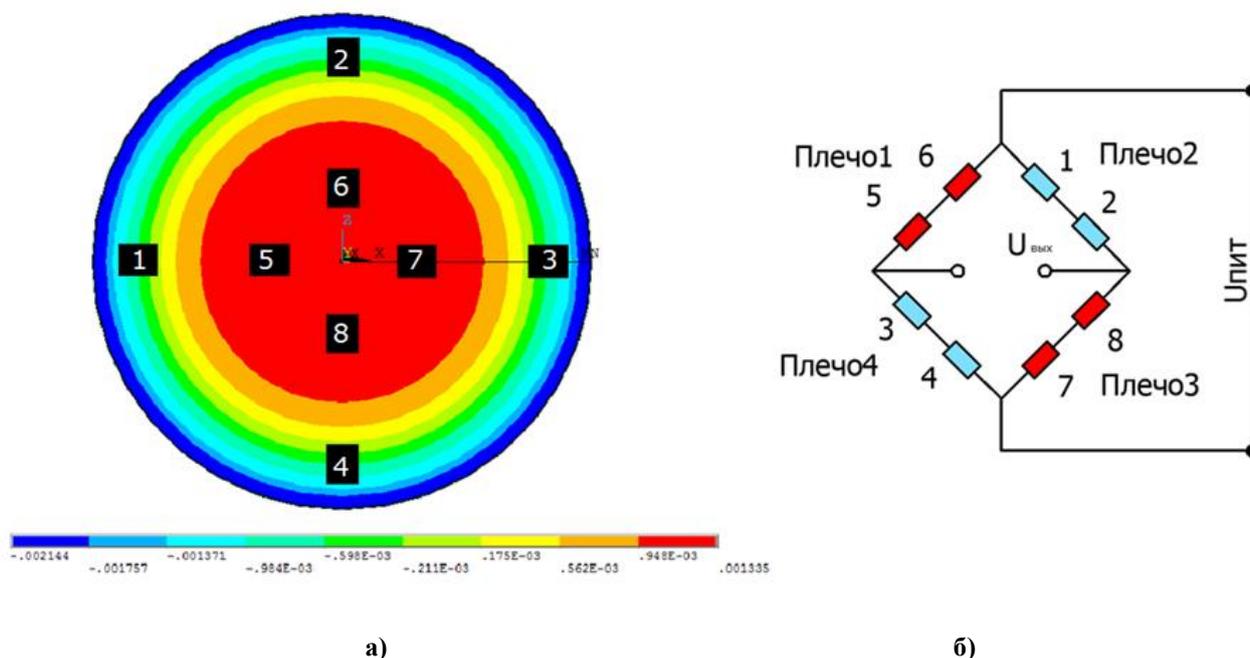


Рис. 3. Измерительная схема тензодатчика М70 (б) и схема расположения тензорезисторов на «донце» упругого элемента (а). На схеме не указаны различные элементы для калибровки и компенсации влияющих воздействий. Красным цветом отмечены тензорезисторы, чье сопротивление увеличивается, голубым – тензорезисторы, чье сопротивление уменьшается. Тензорезисторы расположены таким образом, чтобы воспринимать радиальную деформацию. При первом приближении можно считать, что тензорезистор работает только на продольную деформацию, а поперечной деформацией можно пренебречь

3. Погрешности измерения тензодатчика

Точность прибора в основном определяется нелинейностью выходной характеристики – зависимости выходного сигнала от нагрузки на тензодатчик. Нелинейность можно определить как максимальное отклонение выходной характеристики от идеальной линейной характеристики, отнесенное к максимальному сигналу измерительной схемы (рис. 4.). Нелинейность рассчитывается [4] по формуле:

$$\eta = \frac{\Delta U_{max}}{U_{max}} * 100\%, \quad (3)$$

где ΔU_{max} – максимальное отклонение выходной характеристики от идеальной линейной характеристики, U_{max} – максимальный сигнал на выходе измерительной схемы (рис.3-б.).

Нелинейность выходной характеристики может быть вызвана следующими факторами.

- 1) Геометрическая нелинейность упругого элемента. Данную нелинейность можно интерпретировать как невыполнение принципа неизменности начальных размеров.
- 2) Внутреннее трение в металле – в работе не учитывается из-за малого вклада в общую погрешность
- 3) Нелинейность, вызванная трением при скольжении упругого элемента по опорной плите (рис. 7).

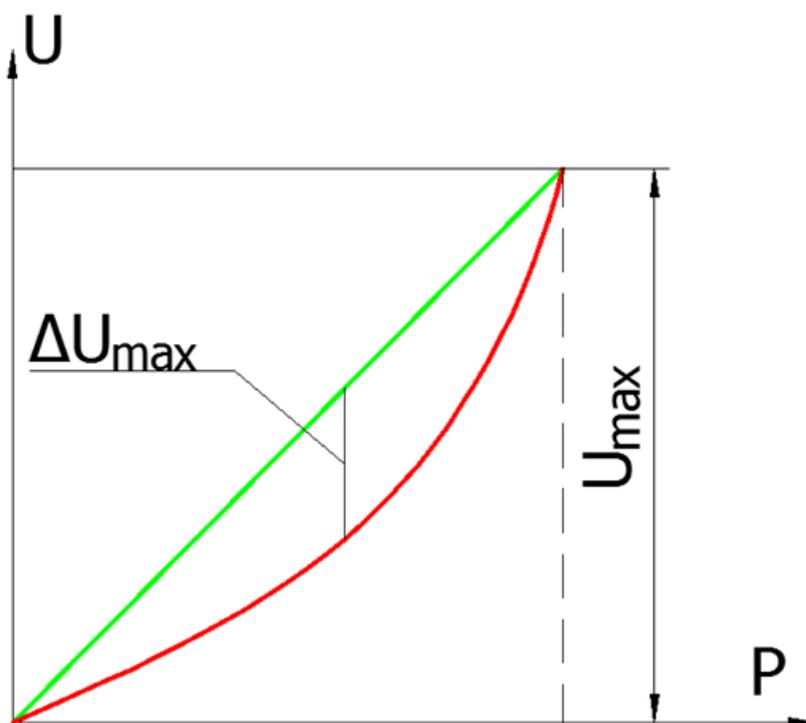


Рис. 4. Схематичное отображение выходной характеристики тензодатчика:
красная линия - реальная выходная характеристика тензодатчика,
зеленая линия - идеальная линейная характеристика

4. Описание процесса оптимизации упругого элемента

Главной целью при проектировании тензодатчика является обеспечение высокого уровня точности. Однако необходимо также обеспечить малую материалоемкость прибора и необходимую прочность. Работа по улучшению свойств тензодатчика проводится по схеме многокритериальной оптимизации [5, 6]. Схема процесса показана на рис. 5.

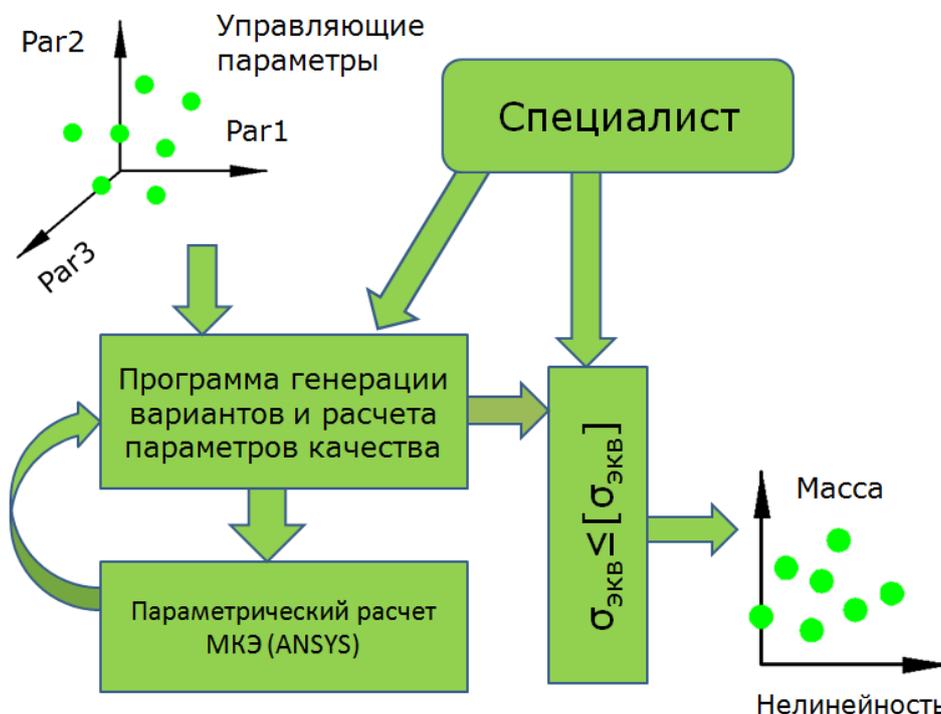


Рис. 5. Схема оптимизации конструкции упругого элемента

Имеется ряд изменяемых параметров, который составляет пространство управляющих параметров. Управляющие параметры встроены в математическую модель (расчет упругого элемента методом конечных элементов). При помощи функциональных ограничений по эквивалентным напряжениям отсекаются заведомо неработоспособные решения.

Вариант изделия оценивается по двум критериям: металлоемкость (в данном случае заменяется массой, так как материал остается неизменным) и нелинейность выходной характеристики. Специалист по оптимизации вместе с заказчиков проверяют математическую модель, задают функциональные ограничения, а также определяют пространство управляющих параметров.

В данной работе в роли управляющих параметров выступают геометрические параметры (рис. 6) и места наклейки тензорезисторов, которые выбираются из условия обеспечения нужного рабочего коэффициента передачи. Рабочий коэффициент передачи – максимальный выходной сигнал при уровне опорного напряжения, равном 1В. Во всех вариантах конструкции, получаемых в ходе оптимизации, рабочий коэффициент передачи равен 2мВ/В.

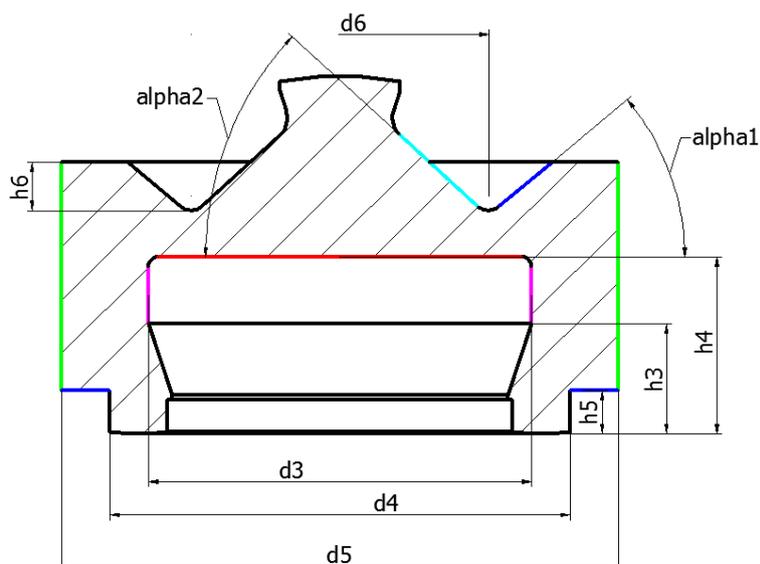


Рис. 6. Управляющие параметры

Материал упругого элемента – сталь 09Х16Н4Б ГОСТ 5949-75. Характеристики материала приведены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства стали 09Х16Н4Б ГОСТ 5949-75

Характеристика	Значение
Модуль Юнга, ГПа	200,0
Коэффициент Пуассона	0,3
Временное сопротивление, МПа	1200,0
Предел текучести, МПа	935,0

Функциональное ограничение формируется из требования по усталостной прочности тензодатчика как прибора, работающего при изменяющихся нагрузках. Здесь не рассматриваются подробно вопросы ресурса тензодатчика, поэтому ограничение определяется [7] следующим образом:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} \leq [\sigma_{-1}] \quad (4)$$

$$[\sigma_{-1}] = 0,55 * \sigma_B = 1200 * 0,55 = 660 \text{ МПа} \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} \leq 660 \text{ МПа} \quad (6)$$

Безусловно, реальный предел усталостной прочности будет ниже расчетного из-за поправочных коэффициентов. Значит, ресурс тензодатчика может быть несколько ниже базы испытаний [7], что составляет 10^6 - 10^7 циклов – большой ресурс для тензодатчика. Так, для выпускаемой модификации тензодатчика М70 еще не было рекламаций из-за усталостного разрушения самого упругого элемента.

Для оптимизации был проведен расчет упругого элемента методом конечных элементов в программе ANSYS. Допускается, что лыски и технологические отверстия для проверки герметизации и провода кабеля (рис. 2-б) слабо влияют на напряженное состояние упругого элемента, что позволяет перейти к осесимметричной постановке задачи (рис. 7. а).

Задача решается в нелинейной постановке [8, 9, 11], моделируется работа упругого элемента на нагрузке и разгрузке. Важной особенностью расчета является реалистичное моделирование контакта [1, 10, 11] между упругими элементами и силопередающим устройством (рис. 7. б).

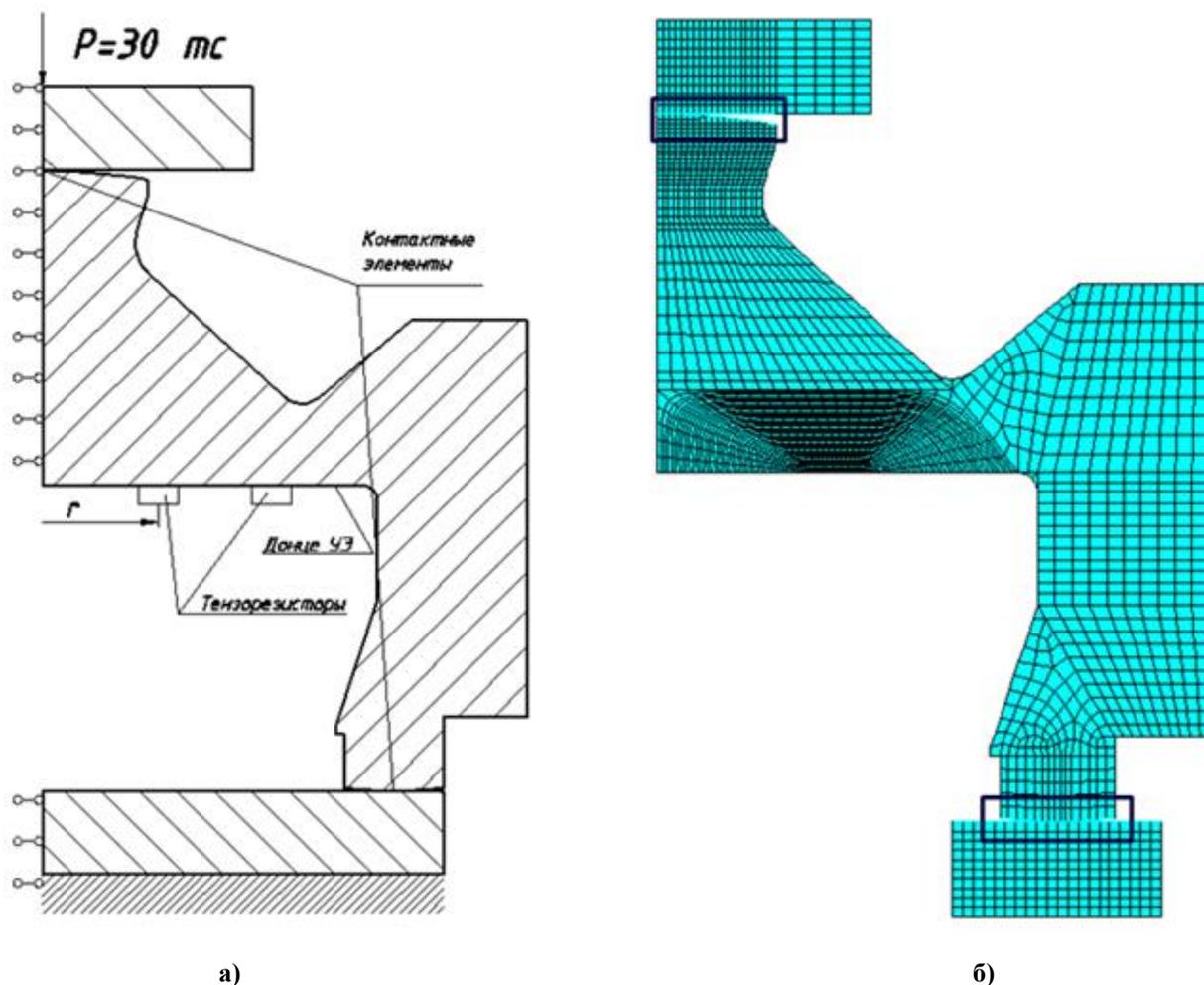


Рис. 7. Расчетная схема (а) и конечно-элементная модель расчета (б). На конечно-элементной модели прямоугольниками обозначены зоны контактного взаимодействия.

Параметры расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры расчета упругого элемента

Тип КЭ	Количество шагов, за которое решается задача	Количество конечных элементов	Номинальная нагрузка
Plane182 Plane183	50	6823	30 тс

Расчетная модель была полностью параметризована для использования в процессе оптимизации. Для автоматической генерации вариантов расчета и оценки параметров качества упругого элемента была разработана специальная программа на языке C++. Данная программа позволяет следующее:

- 1) Задавать вариацию отдельных параметров и формировать макрос этой вариации на языке APDL. Для работы программе необходима параметризованная модель расчета, что было проделано ранее.
- 2) Запускать макрос вариации на расчет в ANSYS в пакетном режиме без участия пользователя. Результаты вариации подхватываются программой также в автоматическом режиме
- 3) Оценивать параметры качества: объем и нелинейность выходной характеристики. Полученные результаты представляются пользователю в виде графиков. Также результаты можно сохранить для дальнейшей обработки.

Разработанная программа вместе с расчетом упругого элемента позволили провести выбор рациональных параметров конструкции упругого элемента. Было рассчитано 160 вариаций, 132 из 160 вариаций прошли фильтр функциональных ограничений. Расположение решений в пространстве параметров качества показано на Рис. 8. При отображении результатов нелинейность бралась по модулю для удобства отображения.

Далее определяется область Парето-оптимальных решений (таблица 3). Как видно из таблицы 3, Парето-оптимальные варианты конструкции упругого элемента превосходят базовый вариант по всем параметрам качества.

Таблица 3. Сравнение параметров базовой конструкции и Парето-оптимальных решений

Вариант конструкции	Базовый вариант	Парето-оптимальный вариант А	Парето-оптимальный вариант В
$\sigma_{\text{экв_макс}}$, МПа	620	572	645
Масса, кг	2,9	2,7	2,6
Изменение массы по сравнению с базовым вариантом, %	-	-6,9	-10,3
Нелинейность выходной характеристики, %	-0,034	-0,021	-0,030
Изменение модуля нелинейности по сравнению с базовым вариантом, %	-	-38,2	-11,8

Так как критерии металлоемкости и нелинейности противоречат друг другу, то окончательное решение по запуску того или иного варианта упругого элемента в производство делает Лицо, Принимающее Решение (ЛПР).

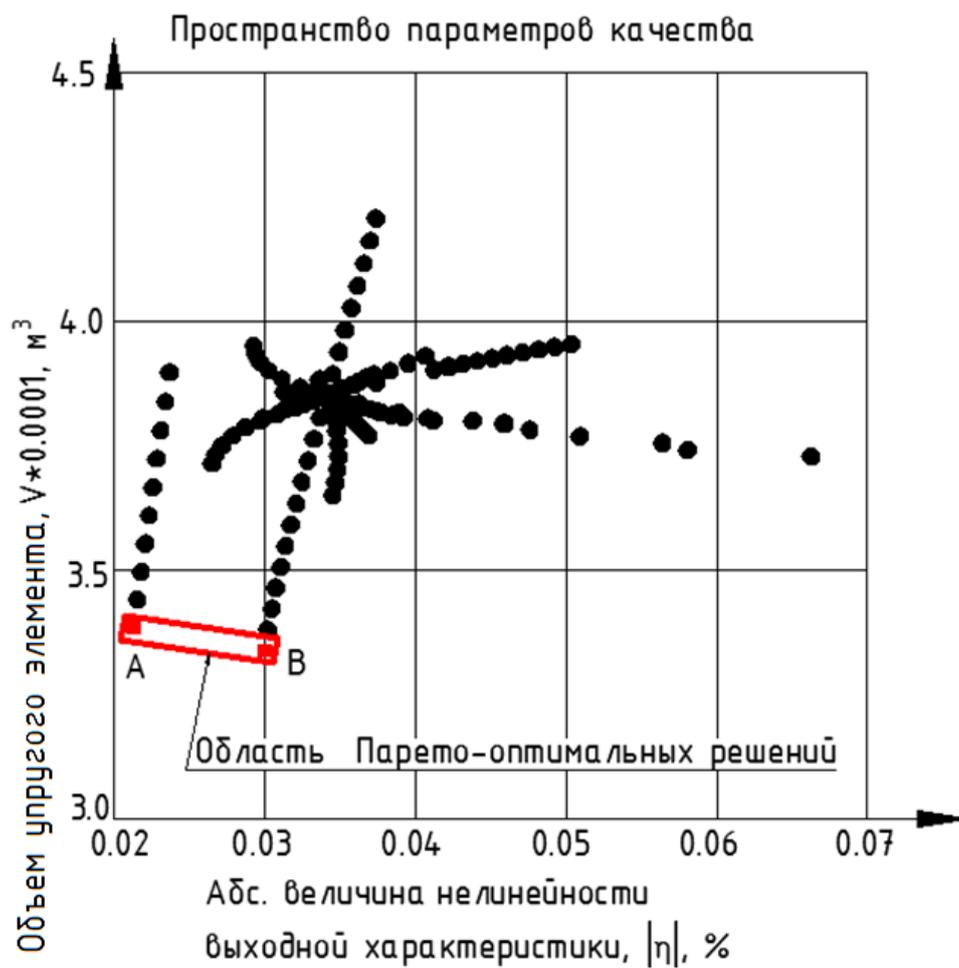


Рис. 8. Пространство параметров качества

Заключение

В данной работе было рассмотрено устройство тензодатчика и его составных компонентов. Рассмотрена основная составляющая погрешности измерений – нелинейность. Предложена методика оптимизации упругих элементов тензодатчиков, выполненных в виде тел вращения и составлена параметрическая модель расчета упругого элемента методом конечных элементов. Были получены варианты конструкции, превосходящие базовый вариант по всем параметрам качества.

В данной работе было сделано только первое приближение в решении задачи по усовершенствованию тензодатчиков. Следующим шагом является введение дополнительных критериев качества, которые косвенно влияют на стоимость изделия. В роли таких критериев могут выступать: коэффициент обработки материала и машинное время обработки на станке. Также следует спланировать работу по оптимизации так, чтобы равномерно распределить варианты решений по пространству управляющих параметров. Для этого необходимо получить ЛП_τ последовательность[5].

Список литературы

- [1]. Гаврюшина Н.Т., Непочатов А.В., Годзиковский В.А. Расчет мембранного упругого элемента тензорезисторного датчика силы. // Известия высших учебных заведений. 2013. №10. стр. 69-74.
- [2]. Stefanescu D.M. Handbook of force transducers: principles and components. Berlin: Springer-Verlag. 2011. 612 p.
- [3]. Yang S., Lu N. Gauge Factor and Stretchability of Silicon-on-Polymer Strain Gauges. // Sensors 2013, Vol. 13. Is. 7. P. 8577-8594. DOI: [10.3390/s130708577](https://doi.org/10.3390/s130708577)
- [4]. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов М.: Машгиз. 1962. 456 с.
- [5]. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., пер. и доп. М.: Дрофа. 2006. 175 с.
- [6]. 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. P. 252-278
- [7]. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учеб. для ВУЗов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1999. 592с.
- [8]. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. Численный анализ элементов конструкций машин и приборов. 2-е изд., испр. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. 479 с.
- [9]. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Едиториал, УРСС. 2003. 272 с.
- [10]. Sezer S. An evaluation of ANSYS contact elements. / A Thesis for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering. Yildiz Technical University. Yildiz. 2005. 44 p.
- [11]. Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. Engineering Analysis with Ansys Software. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. 2010. 453 p.