

УДК 004.94

Р. Ш. Мусаев, А. А. Трофимов, М. А. Фролов

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ

R. S. Musaev, A. A. Trofimov, M. A. Frolov

SIMULATION TECHNIQUE PICKUP TENZOREZISTIV ABSOLUTE PRESSURE SENSOR

А н н о т а ц и я. Представлен расчет чувствительного элемента датчика абсолютного давления методом конечных элементов с применением модуля Simulation в составе программного обеспечения SolidWorks. Результаты расчета позволили разработать конструкцию датчика, отвечающего жестким эксплуатационным требованиям и заявленным метрологическим характеристикам.

A b s t r a c t. Calculation of a sensing element from an absolute pressure sensor with the help of finite element analysis using Simulation module as part of the SolidWorks software has been given. Calculation results allowed to develop design of a sensor rising to all stringent requirements and stated metrological characteristics.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчик, чувствительный элемент, давление, имитационное моделирование, метод конечных элементов.

K e y w o r d s: sensor, sensing element, pressure, solid stat modeling, finite element analysis.

Современные датчики физических величин (давления, температуры, перемещений и др.), применяемые в изделиях ракетно-космической техники и наземных космических инфраструктурах, представляют собой сложные многокомпонентные динамические системы, в которых протекают взаимосвязанные физические процессы различной природы (тепловые, механические, упругие и термоупругие, электрические, оптические и др.). Основой и ответственной составляющей датчиков физических величин являются чувствительные и воспринимающие элементы. В связи с этим становится актуальным исследование воздействия механических и упругих переходных процессов на чувствительные элементы датчиковой аппаратуры. Механические и упругие переходные процессы во многом определяют не только точность датчиков, но и такие важные характеристики как долговечность, надежность, время готовности и в конечном итоге эффективность их работы. Для ускорения разработки датчиковой аппаратуры необходимо уже на этапе проектирования, не прибегая к дорогостоящим натурным испытаниям, знать влияние реальных условий эксплуатации на выходные характеристики датчика. При использовании имитационного моделирования становится возможным комбинирование различных начальных условий эксплуатации, материалов и временных характеристик воздействия возмущающих факторов.

На базе ОАО «Научно-исследовательский институт физических измерений» (г. Пенза) с помощью программного комплекса SolidWorks [1], был проведен ряд исследований в области имитационного моделирования воздействия возмущающих механических и упругих факторов на чувствительный элемент (ЧЭ) тензорезистивного датчика абсолютного давления (ТДАД), имеющего нестабильные эксплуатационные характеристики.

Целью имитационного моделирования работы ТДАД являлось повышение прочностных и эксплуатационных характеристик данного изделия, полученного в результате вычисления выходного сигнала.

Имитационное моделирование работы ТДАД заключается в воссоздании условий работы датчика, а именно: в имитации подачи жидкого азота под давлением 25 МПа в рабочую полость ЧЭ. Под действием давления тензорезистивная измерительная схема, расположенная на поверхности деформированной мембраны воспринимающего элемента (ВЭ), фиксирует изменение электрического сопротивления схемы ВЭ.

Для реализации поставленной цели была создана твердотельная модель ЧЭ ТДАД. Модель представляет собой сварную конструкцию штуцера и ВЭ с расположенной на ней тензорезистивной схемой (рис. 1). Расчет на прочность конструкции осуществлялся методом конечных элементов с применением модуля Simulation [2]. Для расчета напряженно-деформированного состояния использовались следующие физико-механические свойства прецизионного немагнитного коррозионно-стойкого сплава на железохромоникелевой основе: плотность ρ , коэффициент линейного теплового расширения α , модуль упругости E , предел текучести σ_b , коэффициент Пуассона μ [3, 4].

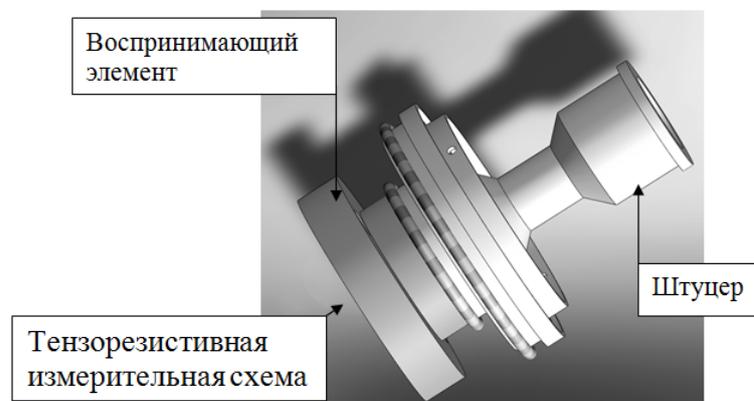


Рис. 1. Чувствительный элемент

Для проведения расчета на прочность методом конечных элементов необходимо выполнение граничных условий, задаваемых исходя из принципа работы датчика. На рис. 2 изображена расчетная схема с заданными граничными условиями: жесткая фиксация в месте крепления штуцера к кожуху посредством сварки и номинальное давление жидкого азота, подаваемого в приемную полость ЭЧ.

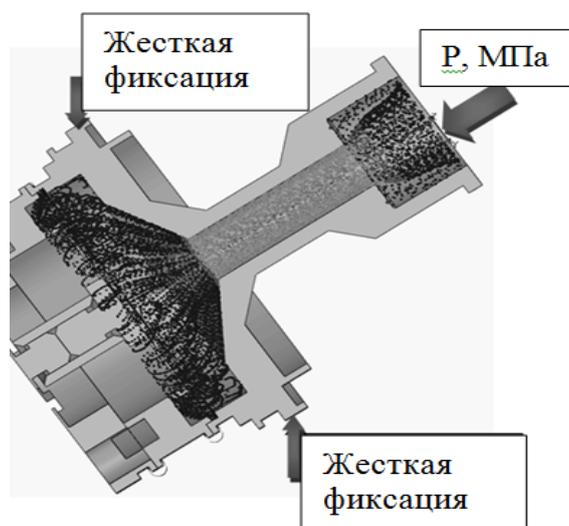


Рис. 2. Граничные условия прочностного расчета

В результате имитационного моделирования были получены эпюры напряженно-деформированного состояния ЧЭ (рис. 3), а также средние значения радиальной относительной деформации (РОД) и тангенциальной относительной деформации (ТОД).

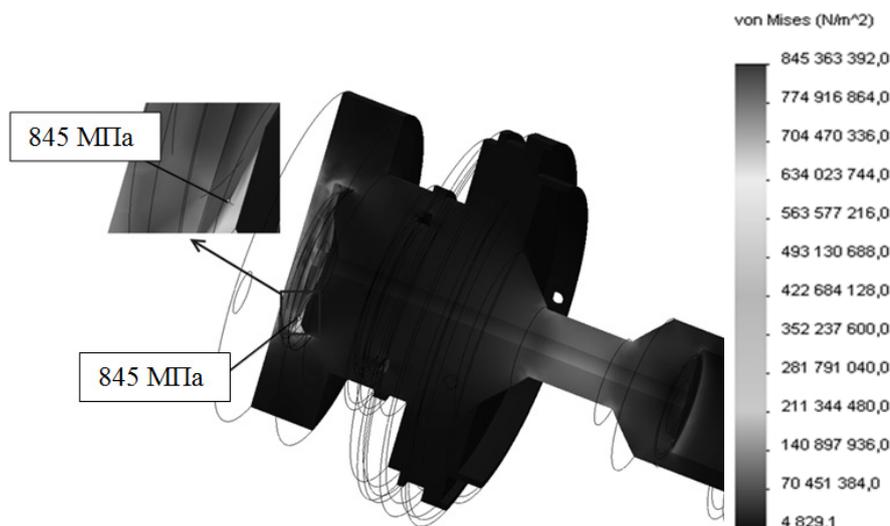


Рис. 3. Эпюра распределения напряжений ЧЭ исходной конструкции

Для подтверждения достоверности полученных значений и дальнейшего их использования при оптимизации конструкции необходимо убедиться в адекватности построенной модели. В настоящее время нет возможности экспериментально измерить значения ТОД и РОД, но, зная полученные экспериментальным путем значения выходного сигнала ТДАД ($U_{2\text{экс}}$), можно сравнить их с расчетным значением выходного сигнала (U_2), подставив средние значения ТОД и РОД в выражение [5]

$$U_1 = U_2 \frac{(R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4) - (R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3)}{[(R_1 - \Delta R_1) + (R_2 - \Delta R_2)][(R_3 - \Delta R_3) + (R_4 - \Delta R_4)]}, \quad (1)$$

где U_2 – напряжение питания измерительной цепи ($U_2 = 6$ В); R_1, R_2, R_3, R_4 – электрическое сопротивление тензорезисторов мостовой схемы, Ом; $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ – изменения сопротивлений тензорезисторов мостовой схемы от воздействия измеряемого давления, Ом.

Значения электрических сопротивлений тензорезисторов рассчитываются исходя из схемы соединения тензорезисторов и находятся в пределах от 656 до 742 Ом. Изменение сопротивлений тензорезисторов от воздействия измеряемого давления определяются выражениями [5]

$$\Delta R_1 = \varepsilon_r S R_1; \quad (2)$$

$$\Delta R_2 = \varepsilon_r S R_2; \quad (3)$$

$$\Delta R_3 = \varepsilon_t S R_3; \quad (4)$$

$$\Delta R_4 = \varepsilon_t S R_4; \quad (5)$$

где ε_r – среднее значение РОД мембраны в зоне размещения тензорезистора; ε_t – среднее значение ТОД мембраны в зоне размещения тензорезистора; S – коэффициент тензочувствительности материала тензорезистора ($S = 2$ [6]).

Принимая во внимание данные средних значений ТОД и РОД, полученных в результате твердотельного моделирования, и расчетных значений выходного сигнала ТДАД, по формуле 1 определено, что расхождение значений выходного сигнала, полученного экспериментально и рассчитанного по построенной модели, составляет около 9 %. Вследствие того, что погрешность результатов расчета и эксперимента не превышает 10 %, созданная модель адекватна. Подтвердив хорошую сходимость результатов, рассмотрим эпюру распределения напряжений (см. рис. 3) ЧЭ при воздействии на него номинального давления.

Для обеспечения надежной и безотказной работы ТДАД необходимо и достаточно, чтобы выполнялось условие прочности [5]:

$$\sigma_b \geq 1,5\sigma, \quad (6)$$

где σ_b – предел текучести материала; σ – максимальное напряжение, создаваемое давлением в рабочей полости датчика.

Предел текучести материала составляет 850 МПа, а максимальное значение напряжения по результатам расчетов составило 845 МПа, что сравнимо с пределом текучести для данного материала. Подставив известные и полученные значения в выражение (6), получим, что условие прочности не выполняется – это свидетельствует о том, что в конструкции ЧЭ существует критический элемент, влияющий на надежность и точность измерений. Поскольку предел текучести является критической величиной оценки на прочность конструкции, необходимо изменить конструктивные параметры ЧЭ таким образом, чтобы они не повлияли на метрологические свойства датчика и в то же время позволили повысить его надежность и качество.

По результатам расчета на прочность ЧЭ ТДАД был выявлен критический элемент – концентратор напряжения, которым является радиус скругления ($R = 0,1$ мм) в рабочей полости ЧЭ. На рис. 4 показана область расположения концентратора напряжения.

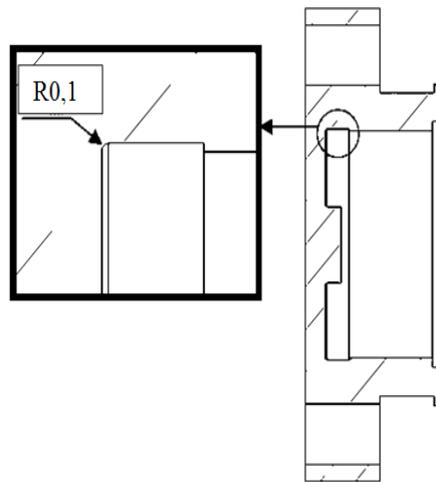


Рис. 4. Схема расположения концентратора напряжений

Исходя из условия (6) для повышения надежности конструкции датчика абсолютного давления была изменена конструкция ЧЭ в части изменения радиуса скругления с 0,1 на 0,3 мм.

За счет увеличения размера радиуса скругления удалось снизить максимальное значение напряжения с 850 до 560 МПа, что удовлетворяет прочностному условию (6).

Для анализа полученных результатов необходимо сравнить средние значения РОД существующей и измененной конструкции ЧЭ под действием давления. На рис. 5 представлена диаграмма средних значений РОД до и после изменения радиуса скругления чувствительного элемента, из которой ясно, что изменение радиуса скругления не оказывает существенного влияния на значение РОД, а следовательно, и на значение выходного сигнала ТДАД, расхождение значений не превышает 3 %.

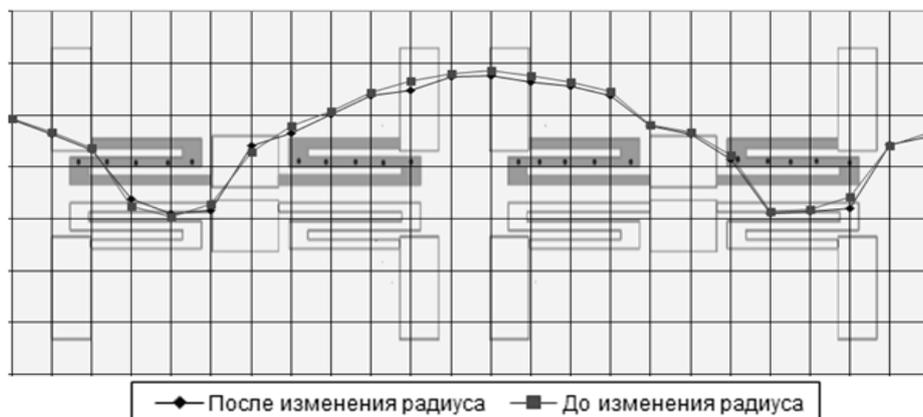


Рис. 5. Диаграмма значений РОД на ЧЭ до и после изменения радиуса скругления

Данный пример наглядно демонстрирует эффективность современных средств проектирования при разработке новых датчиков для особо жестких условий эксплуатации. Проводя такие работы, конструктор может на ранней стадии проектирования избежать ошибок в конструкции. Разработанная конструкция ТДАД отвечает всем заявленным требованиям технического задания и условиям эксплуатации.

Список литературы

1. Алямовский, А. А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2011. – 784 с.
2. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2011. – 464 с.
3. Борисова, А. К. Прецизионные сплавы с особыми свойствами теплового расширения и упругости / А. К. Борисова, С. С. Грацианова. – М. : Изд-во стандартов, 1972. – 156 с.
4. Тихонов, Л. В. Механические свойства металлов и сплавов / Л. В. Тихонов, В. А. Кононенко. – Киев : Наукова думка, 1986. – 300 с.
5. Разработка теории и методов расчета упругих элементов сложной конструкции / Е. П. Осадчий, А. И. Тихонов [и др.]. – Пенза : Пенз. политехн. ин-т, 1978. – 871 с.
6. Новицкий, П. В. Теория измерительных цепей параметрических преобразователей в виде неравновесных мостов // Электрические измерения неэлектрических величин / П. В. Новицкий, Е. П. Осадчий, А. И. Тихонов, А. С. Левшина. – Л. : Энергия, 1975. – 543 с.

Мусаев Руслан Шабанович

кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского конструкторского комплекса, Научно-исследовательский институт физических измерений
E-mail: polim@mail.ru

Musaev Ruslan Shabanovich

candidate of technical sciences, head of the research design complex, Research Institute of Physical Measurements

Трофимов Алексей Анатольевич

доктор технических наук, заместитель начальника УНЦ-37, Научно-исследовательский институт физических измерений
E-mail: umc37@mail.ru

Trofimov Aleksey Anatol'evich

doctor of technical sciences, deputy head of ESC 37, Research Institute of Physical Measurements

Фролов Михаил Алексеевич

начальник научно-исследовательской лаборатории информационных технологий, Научно-исследовательский институт физических измерений
E-mail: skrash1987@mail.ru

Frolov Mikhail Alekseevich

head of the research laboratory of information technologies, Research Institute of Physical Measurements

УДК 004.94

Мусаев, Р. Ш.

Имитационное моделирование чувствительного элемента тензорезистивного датчика абсолютного давления / Р. Ш. Мусаев, А. А. Трофимов, М. А. Фролов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 2. – С. 51–55.