

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

УДК 681.586.773

*К. И. Бастрыгин, А. А. Трофимов, А. С. Баранов,
А. А. Громова, П. Н. Ефимов*

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

K. I. Bastrygin, A. A. Trofimov, A. S. Baranov, A. A. Gromova, P. N. Efimov

IMITATING MODELING OF THE PIEZOELECTRIC SENSOR OF PRESSURE

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Имитационное моделирование является мощным инструментом исследования поведения реальных систем. Методы имитационного моделирования позволяют собрать необходимую информацию о поведении системы путем имитационного эксперимента. Целью имитационного моделирования является определение влияния воздействия внешних факторов на работоспособность пьезоэлектрического датчика давления, предназначенного для преобразования в электрический сигнал быстропеременных давлений в жидких и газообразных средах («оксид» или «нафтил»).

Материалы и методы. В качестве метода исследования использовалось имитационное моделирование, при котором изучаемый объект (датчик) заменяется его моделью, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этом объекте. В эксперименте применялось специализированное программное обеспечение Ansys и Solidworks, позволяющее избежать дорогостоящих и длительных циклов «проектирование – изготовление – испытания». **Результаты.** В результате моделирования влияния внешних факторов на работоспособность датчика определены: коэффициент запаса прочности по пластической деформации при воздействии статических давлений и давления с перегрузкой для корпуса чувствительного элемента; коэффициент запаса прочности по разрушению при воздействии статических давлений и давления с перегрузкой; время полного выравнивания температурных полей; коэффициент запаса прочности по разрушению при воздействии синусоидальной вибрации; напряжения, возникающие при воздействии механических ударов в каждом направлении. **Выводы.** Заложенные конструктивные решения датчика быстропеременных давлений подтверждают стойкость датчика к таким дестабилизирующим факторам, как резкий перепад температур, перепады давлений, высокие уровни вибрационных и ударных нагрузок.

A b s t r a c t. Background. Imitating modeling is the powerful instrument of research of behavior of real systems. Methods of imitating modeling allow to collect necessary information on behavior of system by imitating experiment. The purpose of imitating modeling is definition of influence of impact of external factors on operability of the piezoelectric sensor of pressure intended for transformation to an electric signal of fast-variable pressure in liquid and gaseous

environments ("oxide" or "naftit"). **Materials and methods.** As a method of research simulation modeling in case of which the studied object (sensor) is replaced with its model with which experiments for the purpose of obtaining information on this object are made was used. In experiment the specialized software of Ansys and Solidworks allowing to avoid the expensive and long cycles «design-manufacture-test» was applied. **Results.** As a result of modeling of influence of external factors on operability of the sensor are determined: coefficient of margin of safety on plastic deformation in case of impact of static pressure and pressure with an overload for the case of a sensitive element; coefficient of margin of safety on destruction in case of impact of static pressure and pressure with an overload; time of complete equalization of temperature fields; coefficient of margin of safety on destruction in case of impact of sinusoidal vibration; tension arising in case of impact of mechanical blows in each direction. **Conclusions.** The put constructive solutions of the sensor of fast-variable pressure confirm resistance of the sensor to such destabilizing factors as sharp difference of temperatures, differences of pressure, high levels of vibration and shock loadings.

К л ю ч е в ы е с л о в а: имитационное моделирование, пьезоэлектрический датчик, давление, внешние воздействующие факторы, стойкость, температура, вибрация, чувствительный элемент.

Key words: imitating modeling, the piezoelectric sensor, pressure, the external influencing factors, firmness, temperature, vibration, sensitive element.

Введение

Как правило, в большинстве случаев при контроле давлений на датчик воздействуют нестационарные тепловые процессы, так как внешняя и измеряемая среды имеют существенно неоднородные характеристики, синусоидальную вибрацию, механические удары, статические давления. Отличительной особенностью нестационарного воздействия температуры (от минус 196 до плюс 700 °С) являются серьезные затруднения как по защите от их воздействия, так и по компенсации возникающих температурных погрешностей измерения.

Для определения правильного выбора заложенных конструкторских расчетов и технологических решений при проектировании датчика, работающего в жестких условиях эксплуатации, было проведено имитационное моделирование [1].

Целью проведения имитационного моделирования является определение влияния воздействия внешних факторов на работоспособность пьезоэлектрического датчика давления, предназначенного для преобразования в электрический сигнал быстропеременных давлений с амплитудой от 0,05 до 5,6 МПа (от 0,5 до 56 кгс/см²) в частотном диапазоне от 20 до 20 000 Гц в жидких и газообразных средах («оксид» или «нафтил») [2], а именно:

- статического давления ($P_{\text{ном}}$) 63 МПа и давления перегрузки ($P_{\text{пер}}$) 70,5 МПа;
- температуры от минус 196 до плюс 700 °С;
- синусоидальной вибрации с амплитудой ускорения до 1000 g в двух взаимно перпендикулярных направлениях в диапазоне частот от 20 до 20 000 Гц;
- механических ударов однократного действия с амплитудой ускорения 500 g в каждом направлении; продолжительность воздействия удара 3 мс [2].

Граничные условия были приняты исходя из реальных условий работы датчика и крепления его на объекте (рис. 1):

- физико-механические характеристики используемых материалов представлены в табл. 1 [3–5];
- воздействие давления 63 МПа с перегрузкой до 70,5 МПа. Направление нагрузки представлено на рис. 2;
- воздействие температуры от минус 196 до плюс 700 °С. Направление нагрузки представлено на рис. 2;
- воздействие синусоидальной вибрации с амплитудой ускорения 1000 g задавалось в направлении осей X и Y;

- воздействие механических ударов с амплитудой ускорения 500 g задавалось в направлении осей X , Y и Z ;
- коэффициент демпфирования для гармонического анализа был принят равным 0,02 [6].

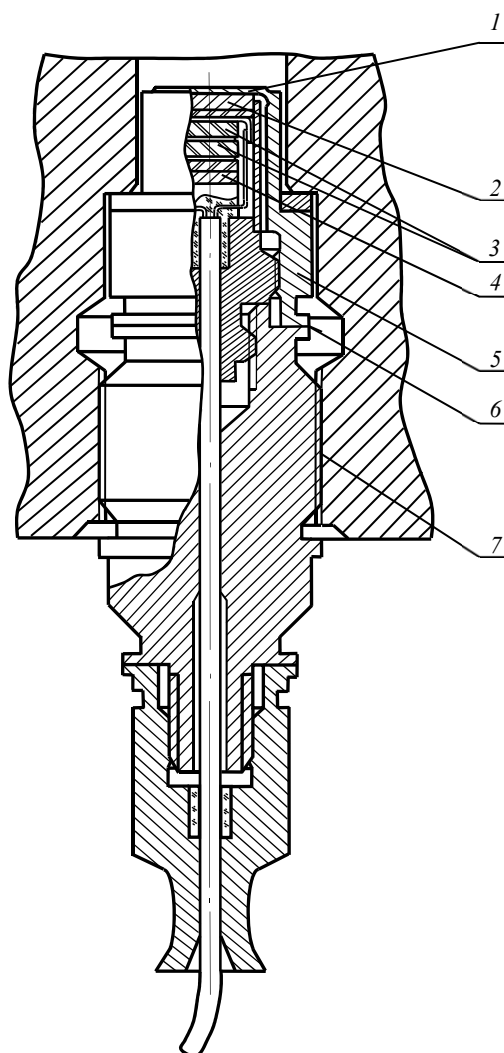


Рис. 1. Схема крепления датчика давления на объекте:

1 – мембрана; 2 – силопередающая прокладка; 3 – пьезоэлементы; 4 – прокладка нижняя (диск);
5 – корпус; 6 – сварной шов; 7 – резьбовое соединение втулки датчика с посадочным гнездом

Таблица 1

Физико-механические характеристики используемых материалов

Параметр	Материал			
	ХН67МВТЮ-ВД	12Х18Н10Т	Керамика ВК-94	ПЭСД-22
Модуль Юнга, Па	$1,9 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{11}$	$2,55 \cdot 10^{11}$	$19 \cdot 10^{10}$
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3	0,26	0,32
Плотность, кг/м ³	8360	7900	3750	2650
ТКЛР, К ⁻¹	$11,96 \cdot 10^{-6}$	$16,7 \cdot 10^{-6}$	$60 \cdot 10^{-7}$ при 200°C; $77 \cdot 10^{-7}$ при 800°C;	$6,13 \cdot 10^{-6}$ при 25 °C $8,0 \cdot 10^{-6}$ при 700°C;
Предел текучести	550	270	–	–
Предел прочности	930	600	–	–
Теплопроводность, Вт/(м·К)	14	16,4	13,4	1,7 при 25 °C 1,5 при 700°C;

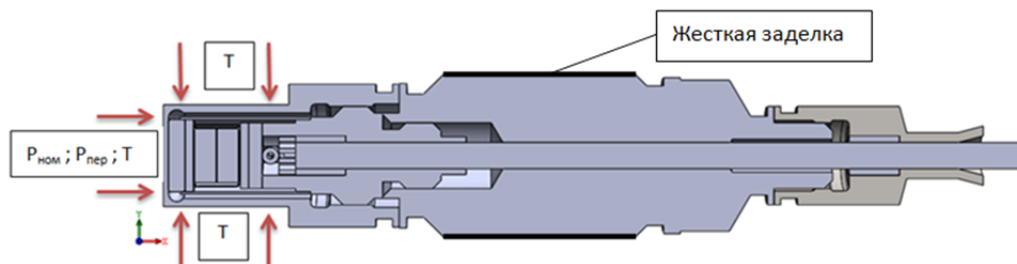


Рис. 2. Схема граничных условий

Основная часть

В результате моделирования воздействия статического давления величиной 63 и 70,5 МПа получены эпюры распределения напряжений, представленные на рис. 3 и 4 соответственно.

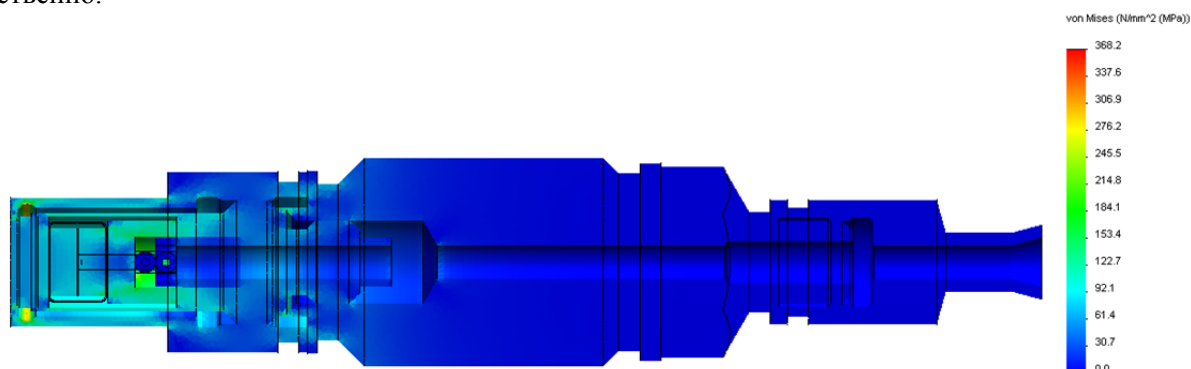


Рис. 3. Эпюра напряжений при воздействии статического давления 63 МПа

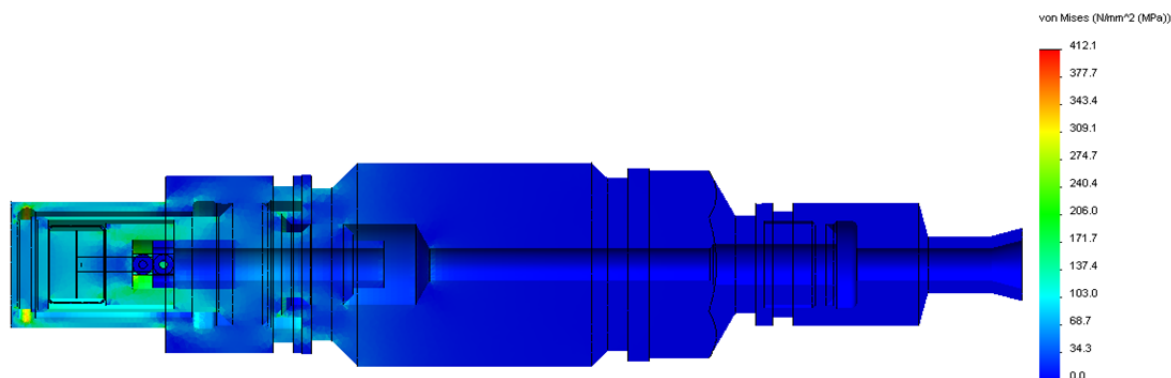


Рис. 4. Эпюра напряжений при воздействии статического давления с перегрузкой 70,5 МПа

Из рис. 3 и 4 видно, что максимальные напряжения, возникающие на корпусе чувствительного элемента при воздействии статических давлений 63 и 70,5 МПа, составляют ~347 и 388 МПа соответственно. Максимальные значения напряжения 369 МПа (рис. 3) и 413 МПа (рис. 4) возникают на токосъемниках. Для оценки работоспособности конструкции полученные напряжения для корпуса сравниваются с пределом текучести материала (табл. 1), а для токосъемников – с пределом прочности материала. Таким образом, коэффициент запаса прочности по пластической деформации при воздействии статических давлений 63 и 70,5 МПа для корпуса чувствительного элемента из материала ХН67МВТЮ-ВД составляет 1,59 и 1,41 соответственно, а коэффициент запаса прочности по разрушению для токосъемников из материала 12Х18Н10Т – 1,63 и 1,45 соответственно [3].

В результате моделирования воздействия температур от минус 196 до плюс 700 °С в течение 1 ч (3600 с) получены эпюры распределения температур в различные моменты времени, представленные на рис. 5 и 6 соответственно [7].

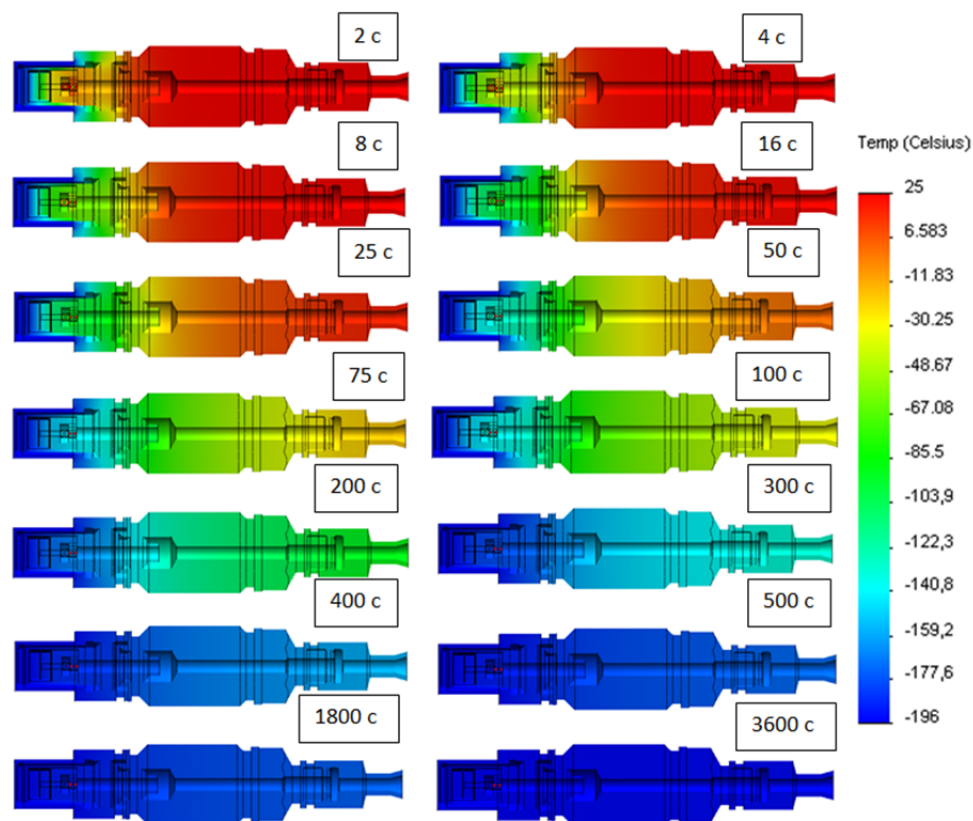


Рис. 5. Эпюры распределения температур в различные моменты времени при воздействии температуры минус 196 °С

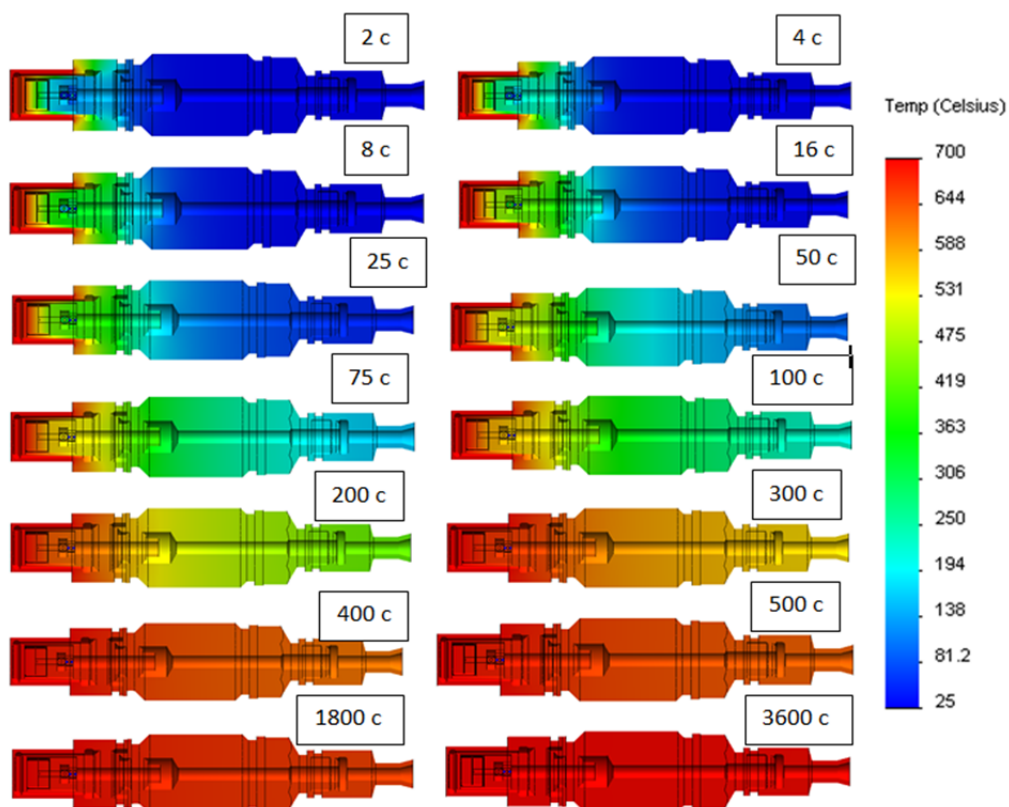


Рис. 6. Эпюры распределения температур в различные моменты времени при воздействии температуры 700 °С

Из эпюр распределения температур (рис. 5, 6) видно, что полное выравнивание температурных полей происходит спустя 1 ч (3600 с) работы.

В результате моделирования воздействия синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 20 до 20 000 Гц с амплитудой ускорения 1000 g в двух взаимно перпендикулярных направлениях получены эпюры распределения напряжений, представленные на рис. 7 и 8.

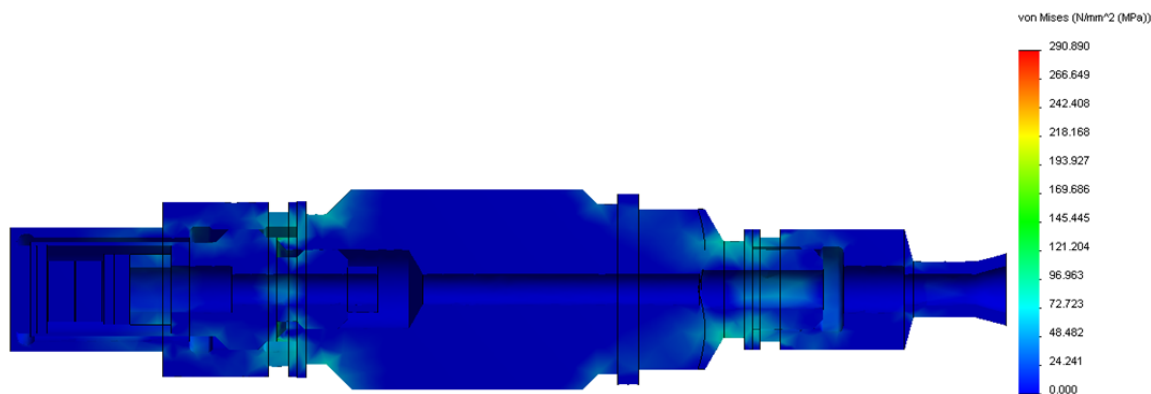


Рис. 7. Эпюра напряжений при воздействии синусоидальной вибрации вдоль оси Z

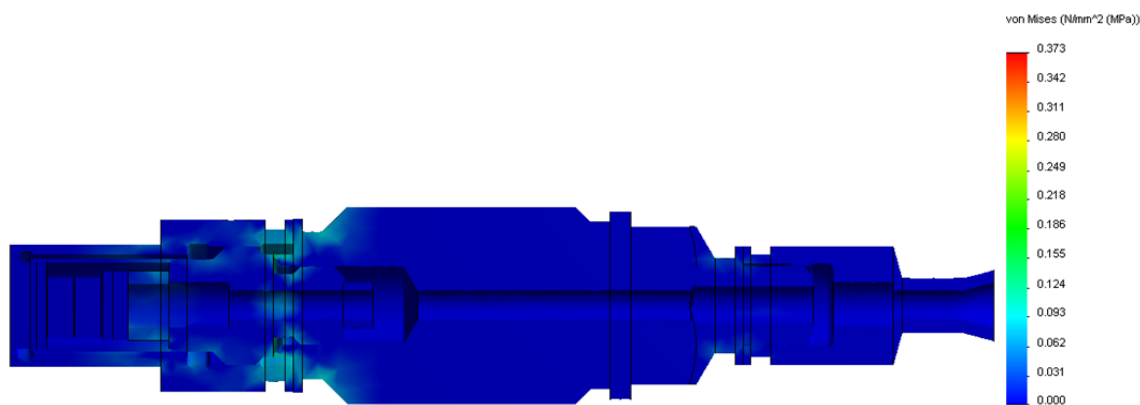


Рис. 8. Эпюра напряжений при воздействии синусоидальной вибрации вдоль оси X

Из рис. 7 и 8 видно, что максимальное напряжение составляет 291 МПа в направлении оси Z и возникает на основании из материала 12X18H10T, предел прочности которого составляет 600 МПа (см. табл. 1). Коэффициент запаса прочности по разрушению – 2,06.

В результате моделирования 20 механических ударов однократного действия с амплитудой ускорения 500 g в каждом направлении и длительностью воздействия удара 3 мс получены эпюры распределения напряжений, представленные на рис. 9–11.

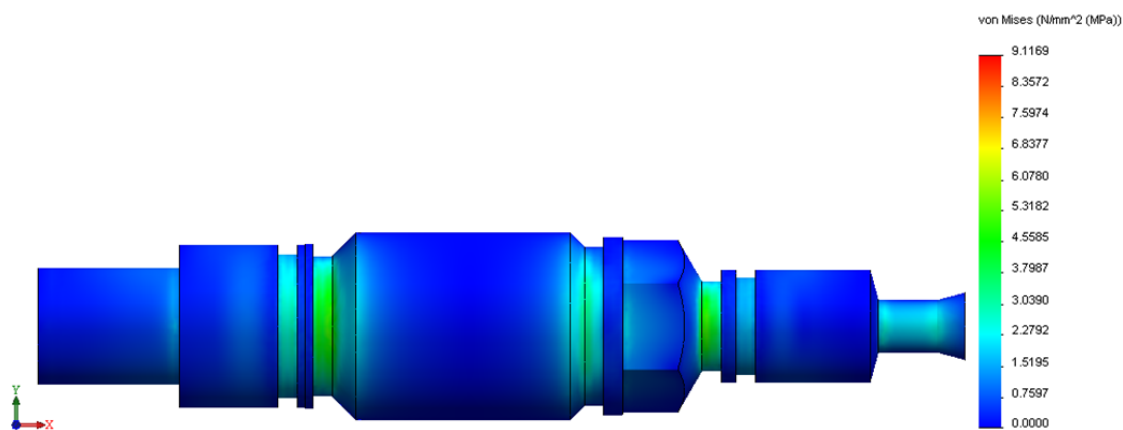
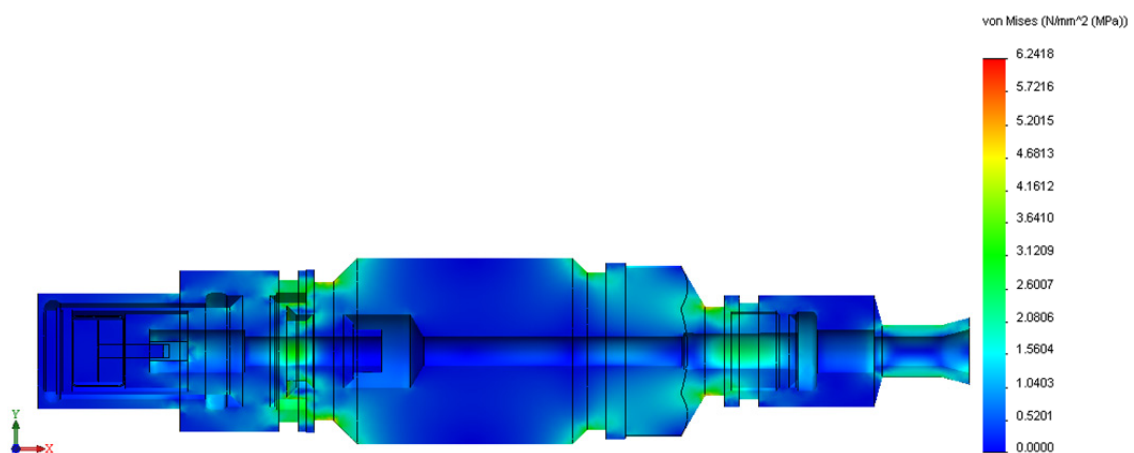
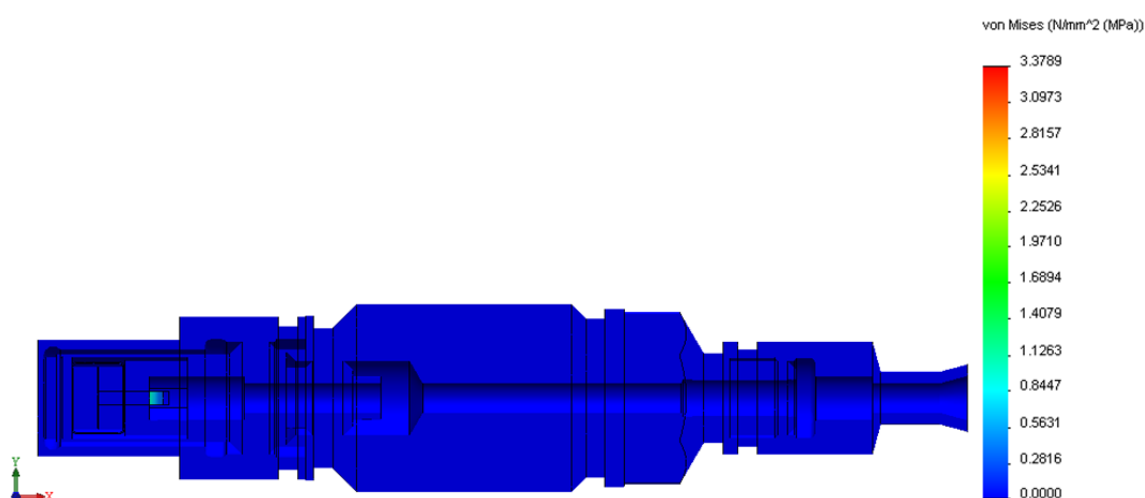


Рис. 9. Эпюра напряжений при воздействии механических ударов вдоль оси Z

Рис. 10. Эпюра напряжений при воздействии механических ударов вдоль оси Y Рис. 11. Эпюра напряжений при воздействии механических ударов вдоль оси X

Из эпюр на рис. 9–11 видно, что возникающие напряжения незначительны, и максимальная величина напряжений составляет 9,2; 6,3 и 3,4 МПа при воздействии механических ударов вдоль осей Z , Y и X соответственно [8].

Заключение

В результате проведения моделирования влияния внешних факторов на работоспособность датчика определены:

- коэффициент запаса прочности по пластической деформации при воздействии статических давлений 63 МПа и давления с перегрузкой 70,5 МПа для корпуса чувствительного элемента из материала ХН67МВТЮ-ВД составляет 1,59 и 1,41 соответственно;
- коэффициент запаса прочности по разрушению при воздействии статических давлений 63 МПа и давления с перегрузкой 70,5 МПа для токосъемников из материала 12Х18Н10Т – 1,63 и 1,45 соответственно;
- время полного выравнивания температурных полей (см. рис. 5, 6) составило ~3600 с;
- при воздействии синусоидальной вибрации в направлении осей Z коэффициент запаса прочности по разрушению 2,06;
- напряжения, возникающие при воздействии механических ударов в каждом направлении, незначительны и не превышает предельно допустимого значения напряжений материала.

Проведенное имитационное моделирование подтверждает правильность заложенных конструктивных решений датчика быстропеременных давлений при воздействии на него дестабилизирующих факторов, таких как резкий перепад температур, перепады давлений, высокие уровни вибрационных и ударных нагрузок.

Библиографический список

1. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
2. Бастрыгин, К. И. Высокотемпературный пьезоэлектрический датчик давления / К. И. Бастрыгин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1 (15). – С. 76.
3. ГОСТ 1133–71. Сталь кованая круглая и квадратная. – М. : Изд-во стандартов, 1971.
4. Керамические материалы / под ред. Г. Н. Масленниковой. – М. : Стройиздат, 1991.
5. Богуш, М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей / М. В. Богуш. – М. : Техносфера, 2014. – 312 с.
6. Фролов, К. В. Динамика и прочность машин / К. В. Фролов. – М. : Машиностроение, 1995. – Т. 1-3, кн. 2.
7. Бастрыгин, К. И. К вопросу коррекции температурной погрешности в пьезоэлектрических датчиках давления / К. И. Бастрыгин, В. В. Кикот // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2. – С. 25–30.
8. Конюхов, А. В. Основы анализа конструкций в Ansys / А. В. Конюхов. – Казань : Казан. гос. ун-т, 2001. – 102 с.

Бастрыгин Кирилл Игоревич

начальник лаборатории,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: nik2@niifi.ru

Bastrygin Kirill Igorevich

head of laboratory,
Research Institute of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Трофимов Алексей Анатольевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Trofimov Aleksei Anatol'evich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information and measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Баранов Александр Сергеевич

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: Kamitte11@gmail.com

Baranov Aleksandr Sergeevich

design engineer,
Research Institute of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Громова Анна Андреевна

инженер-регулирующий,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: sensor@niifi.ru

Gromova Anna Andreevna

engineer-adjuster,
Research Institute of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Ефимов Павел Николаевич

начальник лаборатории,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: sensor@niifi.ru

Efimov Pavel Nikolaevich

head of laboratory,
Research Institute of Physical Measurement
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 681.586.773

Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления / К. И. Бастрыгин, А. А. Трофимов, А. С. Баранов, А. А. Громова, П. Н. Ефимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 20–28.