

Р. Ш. Мусаев, А. В. Ляшенко, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева

**ПРИМЕНЕНИЕ CALS-ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ПРИ СОЗДАНИИ ДАТЧИКО-ПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ
И СИСТЕМ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ
И НАЗЕМНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

R. Sh. Musaev, A. V. Lyashenko, M. V. Tyurin, D. A. Yaroslavtseva

**APPLICATION OF CALS-TECHNOLOGIES AND COMPUTER-AIDED DESIGN
SYSTEMS WHEN DEVELOPING SENSING-AND-TRANSDUCING
DEVICES AND SYSTEMS FOR ROCKET AND SPACE EQUIPMENT
AND GROUND-BASED SPACE INFRASTRUCTURE**

Аннотация. *Актуальность и цели.* Показано использование передовых подходов к разработке и изготовлению датчико-преобразующей аппаратуры (ДПА) для ракетно-космической техники (РКТ). Цель работы представить несколько примеров использования CALS-технологий при разработке ДПА, нормализующих преобразователей и систем на их основе. *Материалы и методы.* Перспективным направлением в разработке ДПА является использование методов CALS-технологий – систем автоматизированного проектирования (САПР): SolidWorks, Ansys Workbench, Simulink, Matlab, Electronics Workbench. *Результаты.* Представлены 3D-модель датчика абсолютного давления с использованием программы SolidWorks для последующего расчета в модуле Simulation, расчет деформаций чувствительного элемента от действующего на него давления потока жидкости моделируется с помощью модуля Flow Simulation. Следующий пример моделирования – определение влияния внешних воздействующих факторов (температура от минус 196 °С и 700 °С, статическое давление 63 МПа, перегрузка статического давления 70,5 МПа и др.) на работоспособность пьезоэлектрического датчика давления. Также показана 3D-модель аккумуляторного модуля при воздействии на него ударных и вибрационных нагрузок, рассчитанная с помощью модуля Simulation с учетом физико-механических характеристик материала аккумуляторного модуля. *Выводы.* Показана целесообразность применения моделирования датчико-преобразующей аппаратуры с использованием CALS-технологий, программного обеспечения SolidWorks, Ansys Workbench, Simulink, Matlab, Electronics Workbench, эмпирического моделирования, что позволяет сократить сроки, повысить надежность ДПА и оптимизировать экономические показатели разработки.

Abstract. *Background.* Advanced approaches to development and manufacture of sensing and transducing devices (STD) for rocket and space equipment (RSE) have been illustrated. The work objective is to present several examples of CALS-technologies application while developing STD, normalizing transducers and systems based on them. *Materials and methods.* Advanced perspectives for STD development include application of CALS-technologies - computer-aided design systems (CAD): Solid Works, Ansys Workbench, Simulink, Matlab, Electronics Workbench. *Results.* 3D-model of absolute pressure sensor based on SolidWorks for the following calculation in Simulation module has been presented, analysis of sensing element deformation due to fluid flow pressure is simulated by means of Flow Simulation module. Another display of simulation is to define the impact of external influencing factors (temperature from minus 196 °C and 700 °C, static pressure 63 MPa, static overpressure 70.5 MPa, etc.) on durability of piezoelectric pressure sensor. 3D-model of battery module under shock and vibration load has been also presented, the model having been calculated by means of Simulation module with provision for physical and mechanical characteristics of battery module material. *Conclusions.* Applicability of sensing-and-transducing devices simulation involving CALS-technologies, SolidWorks, AnsysWorkbench, Simulink, Matlab, ElectronicsWorkbench software and empirical simulation has been presented considering that it provides time reduction, reliability improvement of sensing and transducing devices, and enhancement of economic performance for R&D product.

Ключевые слова: CALS-технологии, датчик абсолютного давления, пьезоэлектрический датчик давления, датчик линейных перемещений, аккумуляторный модуль, многоканальный измерительный преобразователь.

Keywords: CALS-technologies, absolute pressure sensor, piezoelectric pressure sensor, linear displacement transducer, battery module, multichannel instrument converter.

Введение

Для предприятий ракетно-космической отрасли, одной из наукоемких отраслей экономики, характерно использование самых передовых подходов к разработке и изготовлению как масштабных изделий в целом, так и их составных частей и аппаратуры, входящей в их комплектацию. В частности, для проектирования и производства датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА) для ракетно-космической техники (РКТ) используются CALS-технологии и системы автоматизированного проектирования (САПР).

АО «НИИФИ» (входит в корпорацию АО «РКС») – головное предприятие ГК «Роскосмос» в области проектирования и производства датчиков физических величин и систем на их основе, в своем арсенале имеет и успешно использует следующее программное обеспечение CALS-технологий: SolidWorks, Ansys Workbench, Simulink, Matlab, Electronics Workbench и др.

В данной статье представлены несколько примеров использования программного обеспечения CALS-технологий при разработке датчиков-преобразующей аппаратуры.

САПР классифицируют (рис. 1) по [1–3]:

- типу/разновидности и сложности объекта проектирования;
- уровню и комплексности автоматизации проектирования;
- характеру и количеству выпускаемых документов;
- количеству уровней в структуре технического обеспечения.

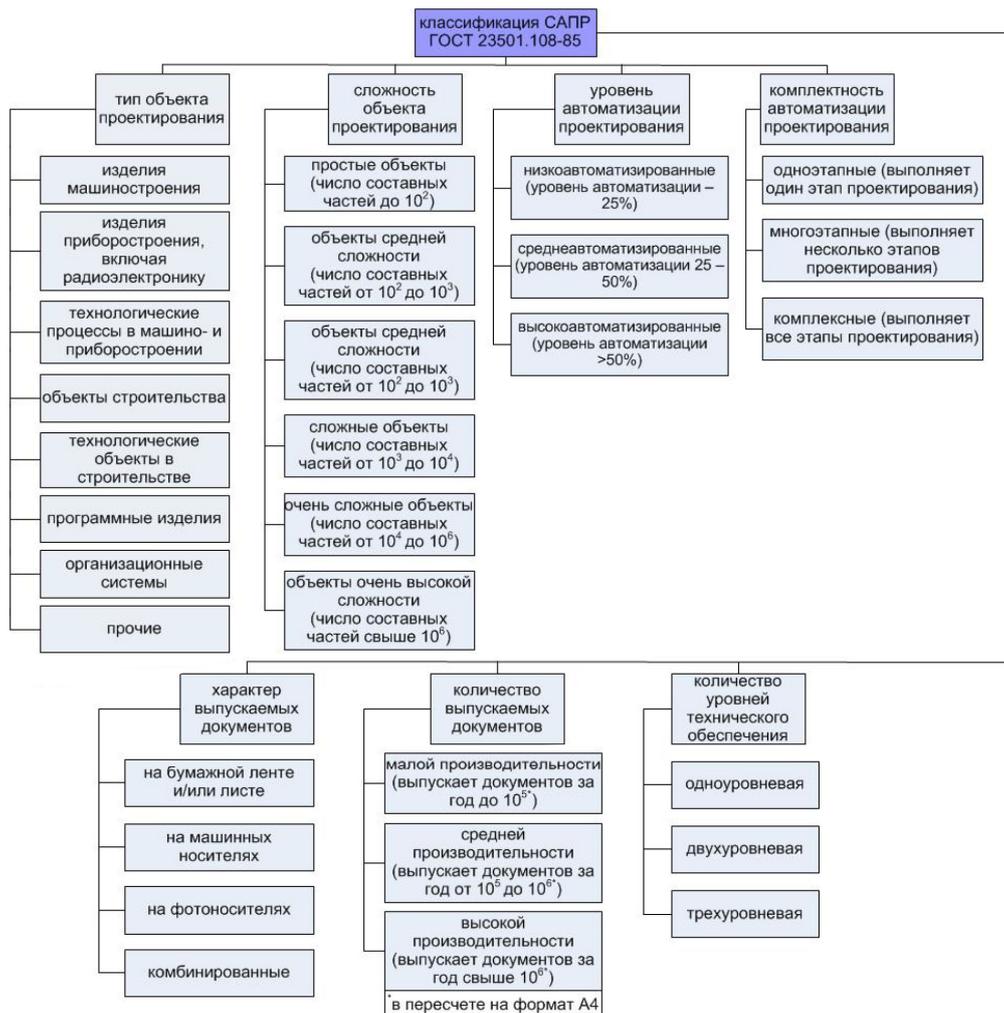


Рис. 1. Классификация САПР

Несмотря на высокий современный уровень развития науки и техники, проблемы измерения физических величин остаются актуальными из-за экстремальных условий эксплуатации первичных средств измерений (датчиков), какие имеют место в РКТ и наземной космической инфраструктуре (НКИ) [4, 5].

Дальнейшее развитие ДПА для РКТ и НКИ как в России, так и в ведущих зарубежных странах сводится в конечном счете к совершенствованию эксплуатационно-технических характеристик, сокращению сроков разработки и оптимизации экономических показателей. Учитывая современные требования к ДПА, работающей в жестких условиях эксплуатации, основным направлением ее совершенствования будет значительное улучшение характеристик по точности, надежности, расширению эксплуатационных возможностей и существенному улучшению габаритно-массовых характеристик и энергопотребления за счет внедрения новейших достижений микроэлектроники и критических технологий, использования перспективных высокостабильных материалов, микропроцессорных модулей.

Основная часть

Для создания 3D-модели датчика абсолютного давления используется программа SolidWorks с последующим расчетом в модуле Simulation [6]. Процесс создания 3D-модели датчика абсолютного давления осуществлялся на основании технического задания и пояснительной записки на конкретное изделие. В библиотеке материалов SolidWorks на этапе создания деталей вносятся все необходимые материалы с физико-механическими свойствами согласно ГОСТам, поскольку для выполнения прочностных расчетов они крайне важны. Каждой детали и сборке соответствует файл с номером и наименованием согласно конструкторской документации (КД). На рис. 2 представлены фрагменты созданной 3D-модели датчика давления в различных видах и сечениях для наглядного понимания ее конструктивных особенностей.

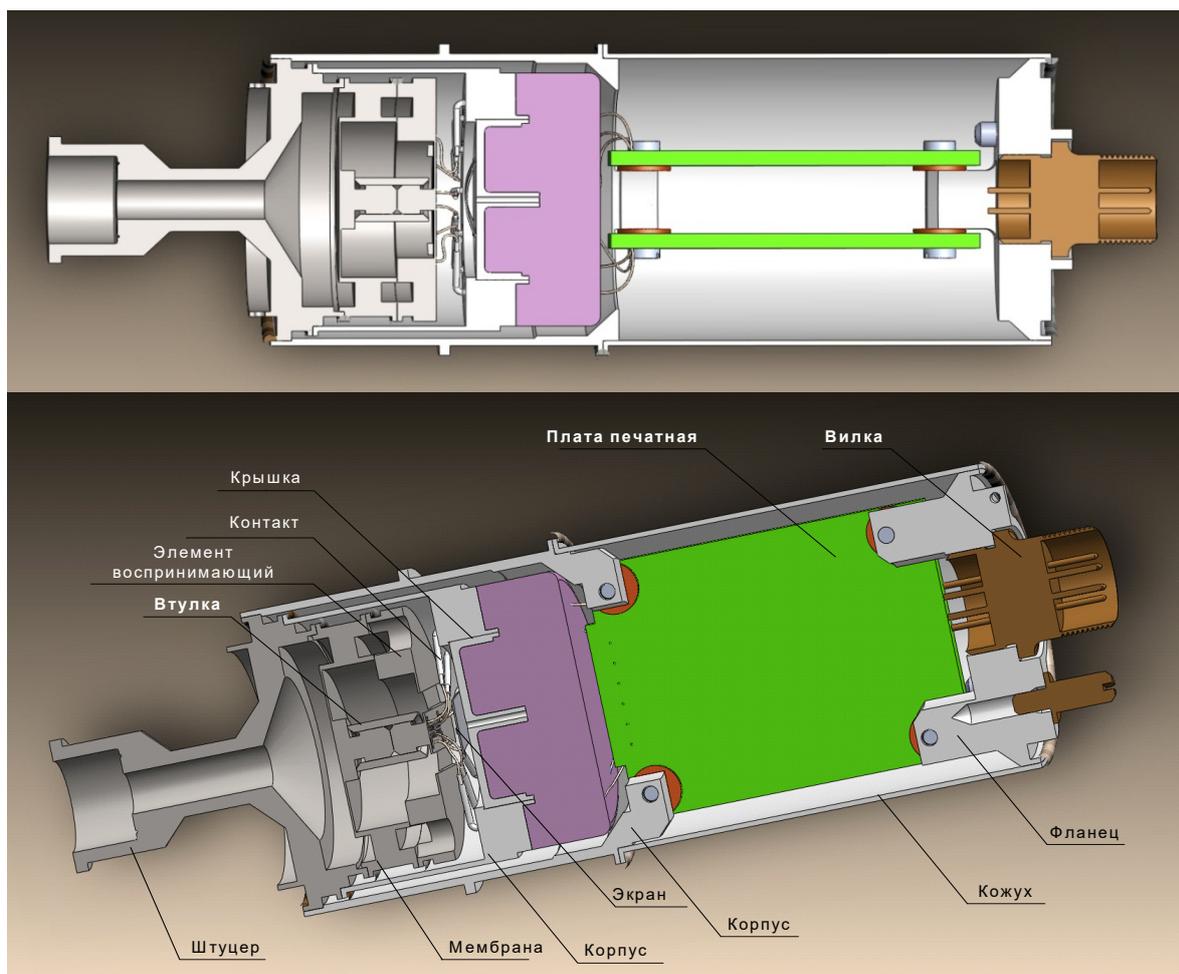


Рис. 2. 3D-модель датчика абсолютного давления в разрезе

Процесс моделирования работы датчика разделен на два этапа:

1. Расчет деформации чувствительного элемента от действующего на него давления проводится с помощью программного обеспечения SolidWorks и Ansys Workbench.
2. Расчет зависимости выходного сигнала от величины деформации чувствительного элемента производится с помощью программного обеспечения MathLab.

Объектом исследования является чувствительный элемент, моделирование которого позволяет исследовать работу датчика абсолютного давления в различных условиях эксплуатации. С помощью программного обеспечения:

- расчет деформации чувствительного элемента;
- моделирование потока жидкости в приемной полости датчика абсолютного давления;
- расчет деформации чувствительного элемента от действующего на него давления с учетом температурной нагрузки;
- расчет функциональной зависимости выходного сигнала от величины деформации чувствительного элемента.

Для выполнения расчета деформации чувствительного элемента от действующего на него давления строится сетка конечных элементов, исходя из параметров геометрической формы модели, ее размеров и места прилагаемых нагрузок. Проводится инженерный статистический анализ полученной модели в виде эпюры деформации (рис. 3), который позволяет определить значения деформаций на топологии чувствительного элемента различных диапазонов датчика абсолютного давления. Эти данные позволяют оптимизировать процесс настройки датчиков абсолютного давления. Для получения более полной информации о чувствительном элементе проводят моделирование потока жидкости в приемной полости датчика абсолютного давления. Для учета деформации от воздействия потока жидкости моделируется движение данного потока с помощью программного обеспечения SolidWorks модуля Flow Simulation (рис. 4).

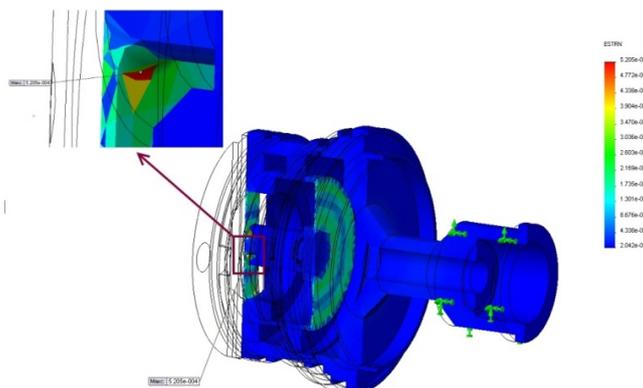


Рис. 3. Эпюра деформации чувствительного элемента датчика абсолютного давления

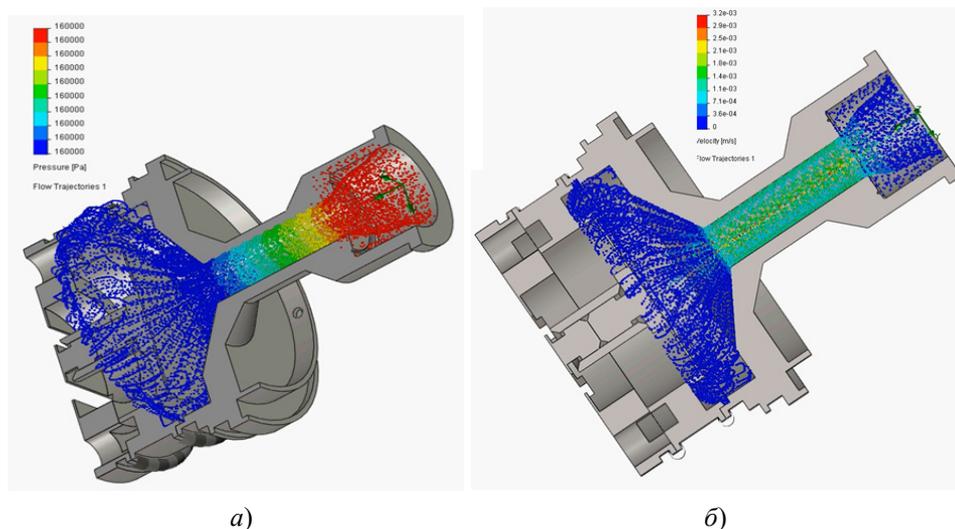


Рис. 4. Пространственное распределение динамического давления (а) и скорости потока жидкости (б) в чувствительном элементе датчика абсолютного давления

Чтобы оценить влияние потока жидкости на деформацию чувствительного элемента, необходимо импортировать данные потока, полученные в результате исследования в модуле Flow Simulation, в произведенный ранее инженерный статический анализ данной модели в модуле Simulation. В результате получаем эпюру деформации с учетом потока жидкости (рис. 5).

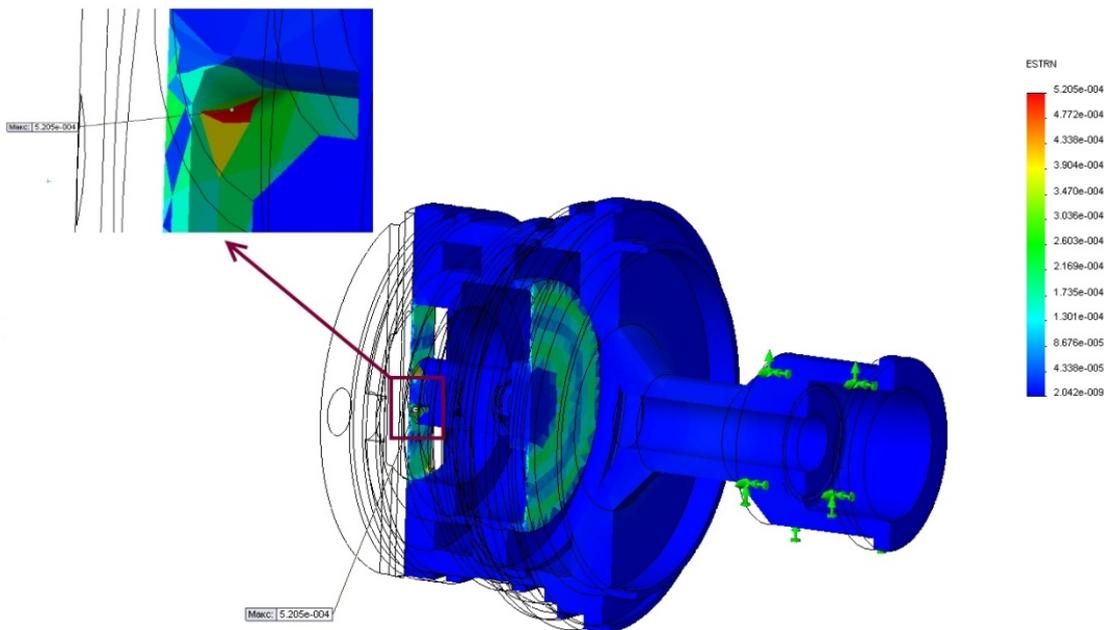


Рис. 5. Эпюра деформации с учетом потока жидкости в чувствительном элементе датчика абсолютного давления

Сравнение полученной эпюры деформации (см. рис. 5) с предыдущей (см. рис. 3) показало, что конечный результат не зависит от динамики потока жидкости.

С учетом вышеизложенного получаем эпюры напряжения, перемещения и интересующую нас деформацию топологии чувствительного элемента датчика абсолютного давления.

Результаты, полученные в ходе исследования, дают представление о том, что для получения равнозначного сигнала на выходе датчика абсолютного давления необходимо привести результаты деформаций чувствительного элемента к одному ряду значений деформации. Это позволит оптимизировать процедуру настройки датчика абсолютного давления.

Следующий пример применения моделирования – определение влияния внешних воздействующих факторов (температура от минус 196 °С и 700 °С, статическое давление 63 МПа, перегрузка статического давления 70,5 МПа и др.) на работоспособность пьезоэлектрического датчика давления [7, 8].

Для определения выбора конструкции и технологических решений пьезоэлектрического датчика давления, работающего в «жестких» условиях эксплуатации, было проведено моделирование. На рис. 6 представлена схема граничных условий внешних воздействующих факторов на пьезоэлектрический датчик давления.

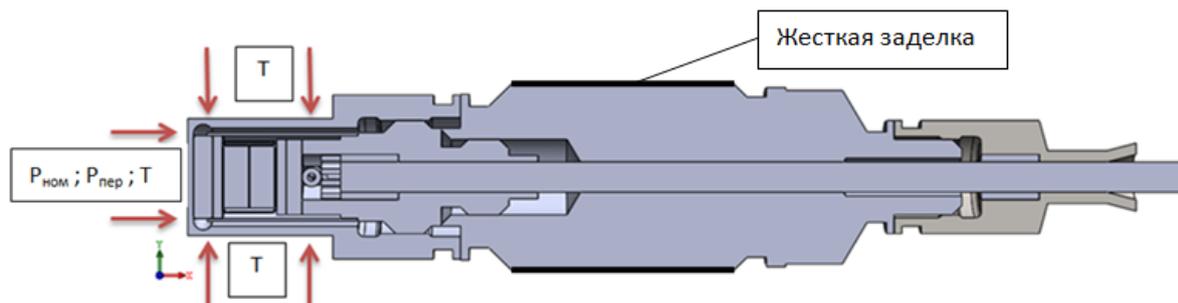


Рис. 6. Схема граничных условий

В результате моделирования воздействия статического давления величиной 63 МПа и перегрузки статического давления 70,5 МПа получены эпюры распределения напряжений, представленные на рис. 7 и 8 соответственно.

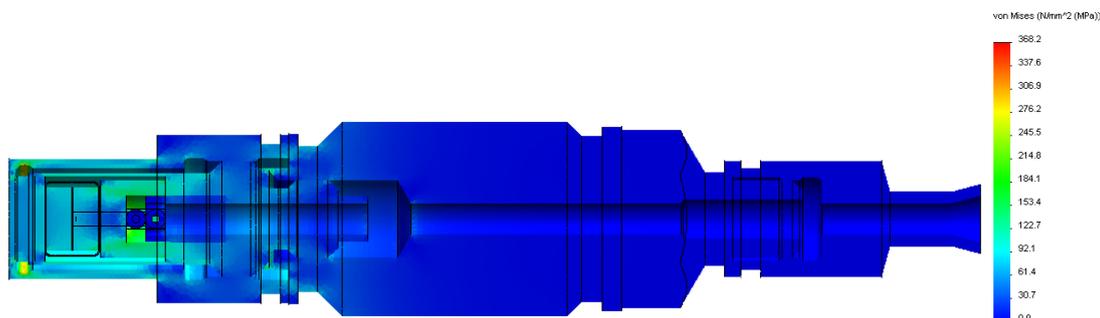


Рис. 7. Эпюра напряжений при воздействии статического давления 63 МПа

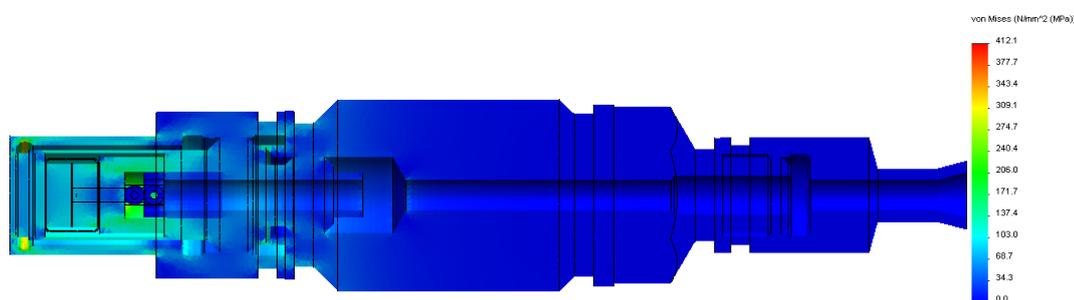


Рис. 8. Эпюра напряжений при воздействии перегрузки статического давления 70,5 МПа

Из рис. 7 и 8 видно, что максимальные напряжения, возникающие на корпусе датчика при воздействии статических давлений 63 МПа и 70,5 МПа, составляют ~ 347 и 388 МПа соответственно. Максимальные значения напряжения 369 МПа (см. рис. 7) и 413 МПа (см. рис. 8) возникают на токоотъемниках. Для оценки работоспособности конструкции полученные напряжения для корпуса сравниваются с пределом текучести материала (табл. 1), а для токоотъемников – с пределом прочности материала. Таким образом, коэффициент запаса прочности по пластической деформации при воздействии статических давлений 63 МПа и перегрузки статического давления 70,5 МПа для корпуса датчика из материала ХН67МВТЮ-ВД составляет 1,59 и 1,41 соответственно, а коэффициент запаса прочности по разрушению для токоотъемников из материала 12Х18Н10Т – 1,63 и 1,45 соответственно.

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 °С; $77 \cdot 10^{-7}$ при 800 °С	$6,13 \cdot 10^{-6}$ при 25 °С; $8,0 \cdot 10^{-6}$ при 700 °С
Предел текучести	550	270	–	–
Предел прочности	930	600	–	–
Теплопроводность, Вт/(м·К)	14	16,4	13,4	1,7 при 25 °С; 1,5 при 700 °С

В результате моделирования воздействия температур минус 196 °С и 700 °С в течение 1 ч (3600 с) получены эпюры распределения температур в различные моменты времени, представленные на рис. 9.

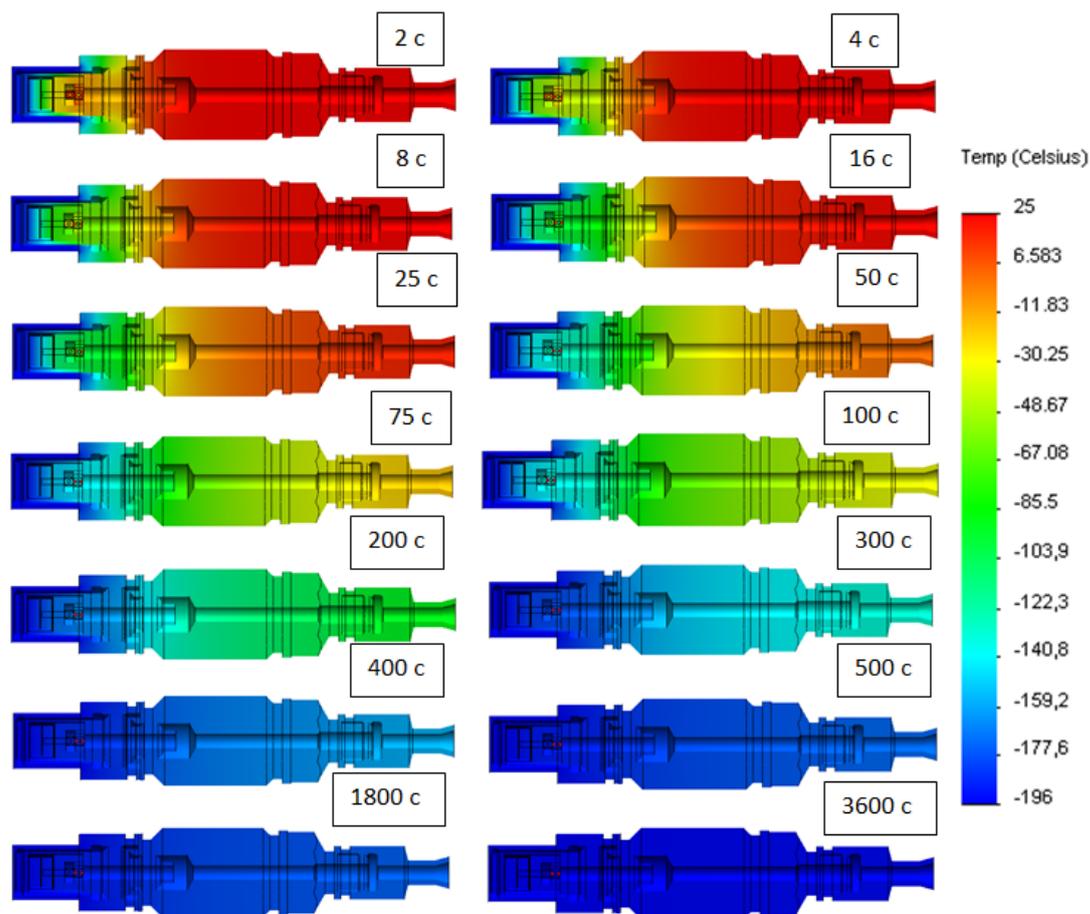


Рис. 9. Эпюры распределения температур в различные моменты времени при воздействии температуры минус 196 °С

Моделирование влияния внешних воздействующих факторов на работоспособность пьезоэлектрического датчика давления позволило определить:

- коэффициент запаса прочности по пластической деформации при воздействии статических давлений 63 МПа и давления с перегрузкой 70,5 МПа для корпуса датчика 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 (рис. 9) 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 превышают предельно допустимого значения напряжений материала.

Проведенное моделирование подтверждает правильность заложенных конструктивных решений пьезоэлектрического датчика давлений при воздействии на него внешних воздействующих факторов для «жестких» условий эксплуатации.

Следующий пример применения моделирования – подтверждение правильности выбранных конструктивных решений и проверка соблюдения тепловых режимов эксплуатации электрорадиоизделий (ЭРИ), влияющих на работоспособность датчика линейных перемещений в условиях пониженного давления; выполнен расчет и проведено моделирование тепловых потоков, возникающих при его работе.

Конструкция датчика линейных перемещений в виде 3D-модели представлена на рис. 10, а принцип работы описан в работе [10]. По условиям эксплуатации датчик линейных перемещений должен непрерывно работать в течение 7200 с в условиях пониженного давления $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па.

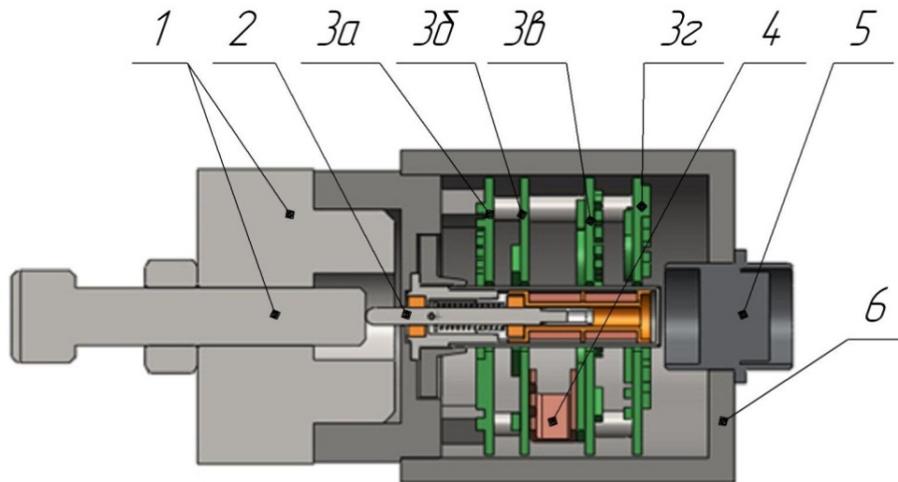


Рис. 10. 3D-модель датчика линейных перемещений:

1 – приспособление для задания перемещений; 2 – чувствительный элемент;
3а, б, в, г – платы с ЭРИ; 4 – радиатор; 5 – разъем; 6 – корпус

Для имитации работы датчика линейных перемещений была создана 3D-модель с приспособлением для задания перемещения, представленная на рис. 10. Моделирование проводилось исходя из условий эксплуатации датчика и крепления его на объекте. Начальная температура корпуса и элементов датчика линейных перемещений принята равной 20 °С.

Датчик линейных перемещений по результатам моделирования выдержал испытание на воздействие пониженного давления $1,3 \cdot 10^4$ Па, при этом дополнительная погрешность составила $\pm 0,544$ %, что говорит о его работоспособности в этих условиях. Полученные экспериментальные данные и результаты моделирования подтверждают правильность выбранных конструктивных решений, обеспечивающих его работоспособность в условиях воздействия пониженного давления.

Таким образом, подтверждена возможность определения работоспособности датчика линейных перемещений в условиях воздействия пониженного давления моделированием тепловых потоков в зависимости от рассеиваемой мощности тепловыделяющих элементов с применением программного обеспечения Solidworks и модуля FlowSimulation.

Одной из последних разработок АО «НИИФИ» с применением CALS-технологий является информационно-измерительная система (ИИС) корабельной установки, предназначенная для удаленного измерения и мониторинга динамических процессов в труднодоступных местах. Рассматриваемая ИИС состоит из автономных блоков первичного преобразования физических величин в аналоговую форму сигнала и последующего аналого-цифрового преобразования с сохранением в энергонезависимой памяти [9].

Одним из автономных модулей данной ИИС, испытывающим значительные вибрационные нагрузки и имеющим наибольшие габаритные размеры и массу по сравнению с другими модулями, является аккумуляторный модуль. Значительная масса и габаритные размеры при длительном воздействии вибрационных нагрузок в процессе эксплуатации системы могут привести к возникновению различных дефектов. Учитывая специфику геометрии конструкции аккумуляторного модуля и в целях обеспечения работоспособности в «жестких» условиях эксплуатации необходимо оценивать механическую надежность при воздействии ударов и вибрационных нагрузок.

В процессе моделирования была создана 3D-модель аккумуляторного модуля, представленная на рис. 11. Моделирование воздействия ударов и вибрационных нагрузок проводилось на базе модуля Simulation с учетом следующих физико-механических характеристик материала: плотности, модуля упругости 2-го рода, предела текучести и коэффициента Пуассона.

В результате оценки механической прочности с применением метода конечных элементов были получены эпюры максимальных напряжений, представленные на рис. 12, из которых видно, что в элементе аккумуляторного модуля максимальные напряжения, возникающие при воздействии ускорения 4000 м/с^2 в направлениях вдоль осей X и Y , составляют 423,6 и 462,7 МПа соответственно и возникают на крепежных винтах, изготовленных из материала Сталь 20, предел текучести которого составляет 250 МПа. Следовательно, условие прочности не выполняется, так как $k = 250 \text{ МПа} / 462,7 \text{ МПа} = 0,54 \geq 1,5$.

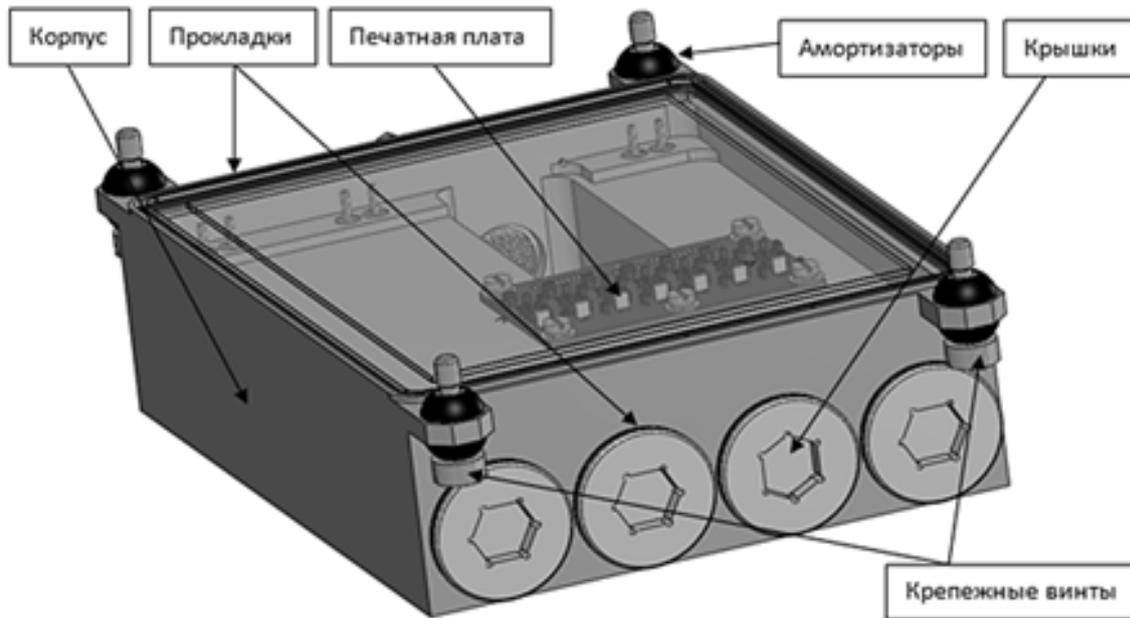


Рис. 11. 3D-модель аккумуляторного модуля

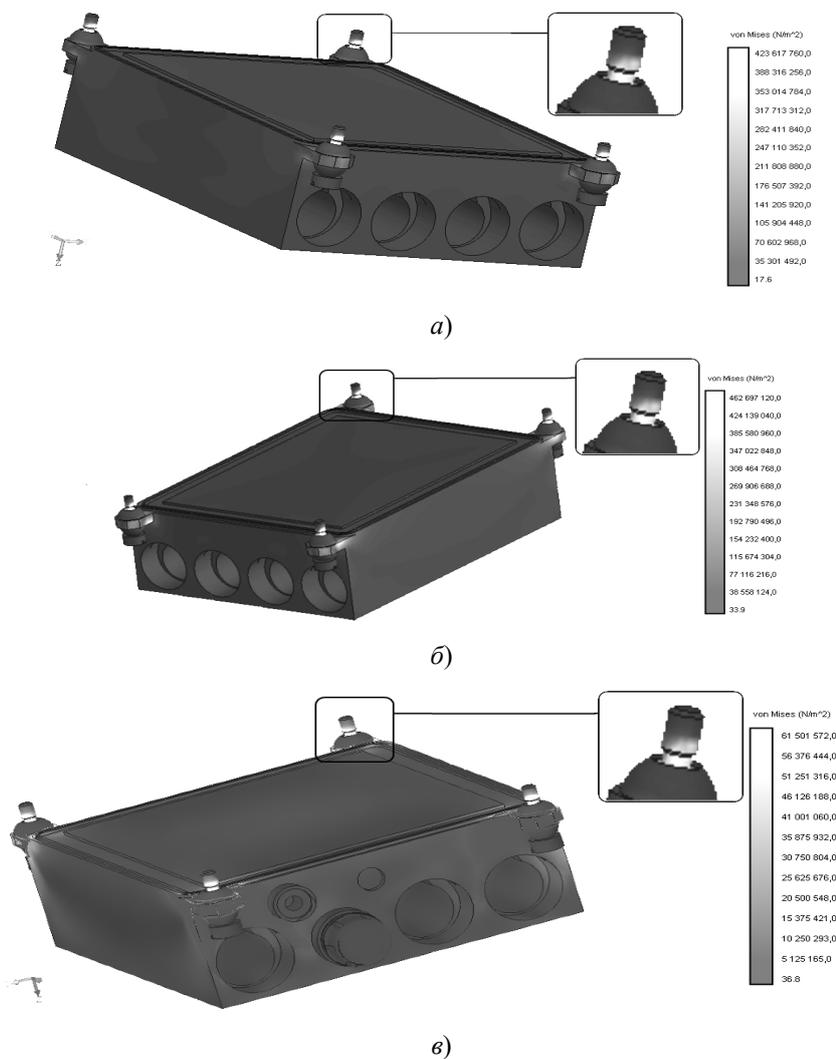


Рис. 12. Эпюра максимальных напряжений на аккумуляторном модуле при воздействии ускорения 4000 м/с^2 , направленного вдоль оси X (а), оси Y (б) и оси Z (в)

Экспериментальные данные по результатам испытаний на надежность аккумуляторного модуля ИИС подтвердили расчетные значения вероятности безотказной работы в условиях внешних воздействующих факторов.

Пример моделирования работы многоканального измерительного преобразователя с датчиками абсолютного давления с помощью программного обеспечения Electronics Workbench представлен на рис. 13.

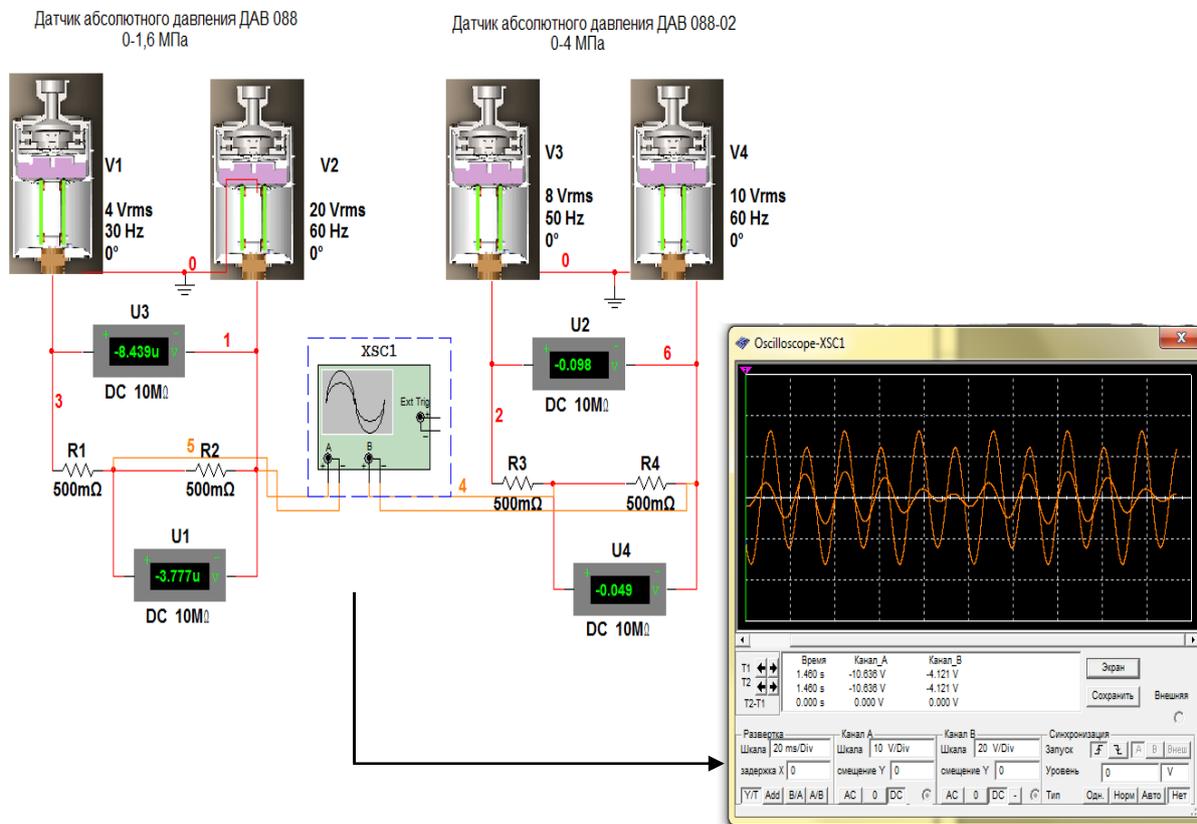


Рис. 13. Электрическая схема многоканального измерительного преобразователя с датчиками абсолютного давления в Electronics Workbench

Заключение

Методы CALS-технологий носят универсальный характер и применяются для моделирования широкой номенклатуры датчиков-преобразующей аппаратуры и систем.

Применение программного обеспечения Simulation, SolidWorks, Ansys Workbench, Simulink, Matlab, Electronics Workbench, эмпирического моделирования и CALS-технологий позволяет существенно сократить сроки разработки, повысить качество, надежность и выпускать современную конкурентоспособную датчиков-преобразующую аппаратуру и системы на ее основе [10].

Библиографический список

1. Ушаков, Д. М. Введение в математические основы САПР : курс лекций / Д. М. Ушаков. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 192 с.
2. Большаков, В. П. Твердотельное моделирование деталей в CAD-системах : AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, Creo / В. П. Большаков, А. Л. Бочков, Ю. Т. Лячек. – Санкт-Петербург : Питер, 2015. – 480 с.
3. ГОСТ 23501.108-85 Системы автоматизированного проектирования. Классификация и обозначения. – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. – 16 с.
4. Элементы концепции построения интеллектуальных систем мониторинга и контроля изделий ракетно-космической техники и объектов наземно-космической инфраструктуры / А. Г. Дмитриенко, А. В. Николаев, А. В. Ляшенко, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2 (24). – С. 5–13.

5. Направления развития базовых технологий создания перспективных датчиков физических величин / И. В. Волохов, Е. В. Ефремов, В. В. Корнев, С. И. Торгашин, А. В. Федулов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. – 2012. – № 04. – С. 27–40.
6. Мусаев, Р. Ш. Расчет чувствительного элемента датчика абсолютного давления методом конечных элементов / Р. Ш. Мусаев, М. А. Фролов // Датчики и системы. – 2012. – № 9 (160). – С. 32–33.
7. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления / К. И. Баstryгин, А. А. Трофимов, А. С. Баранов, А. А. Громова, П. Н. Ефимов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 20–28.
8. Трофимов, А. А. Моделирование воздействия пониженного давления на датчик линейных перемещений / А. А. Трофимов, Д. А. Рязанцев, Р. М. Тимонин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 67–73.
9. Фролов, М. А. Оценка механической надежности дополнительного аккумуляторного модуля информационно-измерительной системы / М. А. Фролов, А. В. Салмин, Р. Ш. Мусаев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 47–51.
10. Дмитриенко, А. Г. Центр проектирования унифицированных датчиков для работы в особо жестких условиях эксплуатации / А. Г. Дмитриенко, А. В. Блинов, И. Н. Баринов, Р. Ш. Мусаев // Датчики и системы. – 2012. – № 10 (161). – С. 42–44.

References

1. Ushakov D. M. *Vvedenie v matematicheskie osnovy SAPR: kurs lektsiy* [Introduction to the mathematical foundations of CAD : lectures]. Moscow: DMK Press, 2010, 192 p. [In Russian]
2. Bol'shakov V. P., Bochkov A. L., Lyachek Yu. T. *Tverdotel'noe modelirovanie detaley v CAD-sistemakh: AutoCAD, KOMPAS-3D, SolidWorks, Inventor, Creo* [Solid modeling of parts in CAD systems : AutoCAD, COMPASS-3D, SolidWorks, Inventor, Creo]. Saint-Petersburg: Piter, 2015, 480 p. [In Russian]
3. *GOST 23501.108-85 Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya. Klassifikatsiya i oboznacheniya* [GOST 23501.108-85 Computer aided design. Classification and designation of]. Moscow: Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam, 1986, 16 p. [In Russian]
4. Dmitrienko A. G., Nikolaev A. V., Lyashenko A. V., Tyurin M. V., Yaroslavtseva D. A. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2018, no. 2 (24), pp. 5–13. [In Russian]
5. Volokhov I. V., Efremov E. V., Kornev V. V., Torgashin S. I., Fedulov A. V. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego* [XXI century: the past and the present]. 2012, no. 04, pp. 27–40. [In Russian]
6. Musaev R. Sh., Frolov M. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2012, no. 9 (160), pp. 32–33. [In Russian]
7. Bastrygin K. I., Trofimov A. A., Baranov A. S., Gromova A. A., Efimov P. N. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 1 (19), pp. 20–28. [In Russian]
8. Trofimov A. A., Ryazantsev D. A., Timonin R. M. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 3 (21), pp. 67–73. [In Russian]
9. Frolov M. A., Salmin A. V., Musaev R. Sh. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2016, no. 4 (18), pp. 47–51. [In Russian]
10. Dmitrienko A. G., Blinov A. V., Barinov I. N., Musaev R. Sh. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2012, no. 10 (161), pp. 42–44. [In Russian]

Мусаев Руслан Шабанович

кандидат технических наук,
заместитель генерального директора –
главный конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Ляшенко Антон Валерьевич

кандидат технических наук,
начальник конструкторского бюро,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Musaev Ruslan Shabanovich

candidate of technical sciences,
deputy general director – chief designer,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(440026, 8/10, Volodarskogo street, Penza, Russia)

Lyashenko Anton Valerjevich

candidate of technical sciences,
head of design engineering department,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(440026, 8/10, Volodarskogo street, Penza, Russia)

Тюрин Михаил Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Ярославцева Дарья Александровна

аспирант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: levik_92@mail.ru

Tyurin Mihail Vladimirovich

candidate of technical sciences, senior researcher,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(440026, 8/10, Volodarskogo street, Penza, Russia)

Yaroslavtseva Daria Aleksandrovna

postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia);
design engineer,
Scientific Research Institute
of Physical Measurements
(440026, 8/10, Volodarskogo street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Мусаев, Р. Ш. Применение cals-технологий и систем автоматизированного проектирования при создании датчиков-преобразующей аппаратуры и систем для ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры / Р. Ш. Мусаев, А. В. Ляшенко, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 2 (26). – С. 91–102. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-2-11.