

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 681.586.2

doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-7

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В. Н. Пономарев¹, А. А. Трофимов², Д. В. Дерябин³, Е. А. Фокина⁴, А. А. Максов⁵

^{1, 2, 4, 5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

³ Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия

¹ revik2296@gmail.com, ² alex.t1978@mail.ru, ³ info@niiemp.ru, ⁴ iit@pnzgu.ru, ⁵ maksov.01@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Роль и объем температурных измерений в современной технике чрезвычайно значительны, поэтому и весьма велико разнообразие самих задач температурных измерений. Температурные измерения – основа для изучения энергетических и прочностных характеристик агрегатов и систем, оптимизации их эффективности и надежности. К числу наиболее емких областей техники, характеризующихся исключительным разнообразием задач температурных измерений, относится ракетно-космическая техника. Она органично включает в себя большинство задач температурных измерений, решаемых в авиационной технике, общепромышленной технике и энергетике, надводном и подводном судостроении и других областях техники. Поэтому особенно актуально стоит вопрос по повышению требований к надежности, предъявляемых к изделиям ракетно-космической техники и их составным частям в условиях жесткой эксплуатации и внешних воздействий. *Материалы и методы.* В качестве метода исследования использовалось имитационное моделирование, при котором изучаемый датчик заменяется его моделью, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этом объекте. В эксперименте применялось специализированное программное обеспечение Solidworks, позволяющее избежать дорогостоящих и длительных циклов испытаний. *Результаты.* В результате моделирования были получены эпюры полей распределения температур при критических температурах с целью исследования влияния данных условий на входящие в состав исследуемого объекта детали.

Ключевые слова: датчик температуры, имитационное моделирование, критические температуры

Для цитирования: Пономарев В. Н., Трофимов А. А., Дерябин Д. В., Фокина Е. А., Максов А. А. Проектирование датчика температуры методом имитационного моделирования // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 55–61. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-7

DESIGN OF THE TEMPERATURE SENSOR BY SIMULATION MODELING

V.N. Ponomarev¹, A.A. Trofimov², D.V. Deryabin³, E.A. Fokina⁴, A.A. Maksov⁵^{1, 2, 4, 5} Penza State University, Penza, Russia³ Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia¹ revik2296@gmail.com, ² alex.t1978@mail.ru, ³ info@niiemp.ru, ⁴ iit@pnzgu.ru, ⁵ maksov.01@mail.ru

Abstract. *Background.* The role and scope of temperature measurements in modern technology is extremely significant, and therefore the diversity of the problems of temperature measurements themselves is very large. Temperature measurements are the basis for studying the energy and strength characteristics of units and systems, optimizing their efficiency and reliability. Rocket and space technology is one of the most capacious areas of technology, characterized by an exceptional variety of problems of temperature measurements. It organically includes most of the problems of temperature measurements solved in aviation technology, general industrial technology and power engineering, surface and underwater shipbuilding, and other areas of technology. Therefore, the issue of increasing the reliability requirements for products of rocket and space technology and their components under conditions of harsh operation and external influences is of particular relevance. *Materials and methods.* Simulation modeling was used as a research method, in which its model, with which experiments are carried out in order to obtain information about this object, replaces the studied sensor. In the experiment, specialized software Solidworks was used, which avoids expensive and lengthy test cycles. *Results.* As a result of the simulation, diagrams of the temperature distribution fields at critical temperatures were obtained in order to study the influence of these conditions on the parts included in the object under study.

Keywords: temperature sensor, simulation modeling, critical temperatures

For citation: Ponomarev V.N., Trofimov A.A., Deryabin D.V., Fokina E.A., Maksov A.A. Design of the temperature sensor by simulation modeling. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(3):55–61. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-7

Введение

Современные датчики как основные источники информации определяют уровень и технические характеристики информационно-измерительных и управляющих систем ракетно-космической техники, вооружения и военной техники [1, 2].

Для проверки физико-механических характеристик, надежности, быстродействия и других параметров датчиков зачастую приходится проводить технически сложные и дорогостоящие испытания. Расчеты указанных параметров датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА) аналитическим методом, проводимые до испытаний, в большинстве своем занимают месяцы и требуют от сотрудников специализированных навыков, поэтому провести аналитический расчет сборочной единицы сложной конфигурации перед проведением дорогостоящих испытаний затруднительно.

Современный подход к решению данной задачи предполагает использование синтеза CALS-технологий и систем автоматизированного проектирования (САПР). Данный подход заключается в построении компьютерной 3D-модели и проведении исследований с применением методов инженерного анализа [3–6]. Методы инженерного анализа основаны на построении адекватной математической модели объекта и предусматривают расчет динамических или статических режимов воздействия внешних факторов с помощью численных методов (чаще всего, метода конечных элементов). Кроме того, имитационное моделирование позволяет учитывать влияние комплексного воздействия внешних факторов, таких как давление, тепло, электрический ток и т.д., что в аналитическом расчете невозможно. Такие методы анализа позволяют определить оптимальные конструктивные и схематические параметры будущего изделия [3].

Основная часть

Задачей имитационного моделирования является определение теплопередачи при воздействии на датчик температуры критических температур + 300 °С и минус 253 °С с целью исследования влияния данного условия на входящие в состав исследуемого объекта детали и определение времени, за которое чувствительный элемент достигает измеряемой температуры [4].

В ходе моделирования была построена твердотельная модель, представленная на рис. 1. Граничные условия для имитационного моделирования: температура + 300 °С и минус 253 °С, время воздействия температуры 1400 с и место ее приложения. Граничные условия представлены на рис. 2. В табл. 1 и 2 приведены физико-механические свойства используемых материалов, необходимых для проведения анализа в модуле Simulation [5, 6].

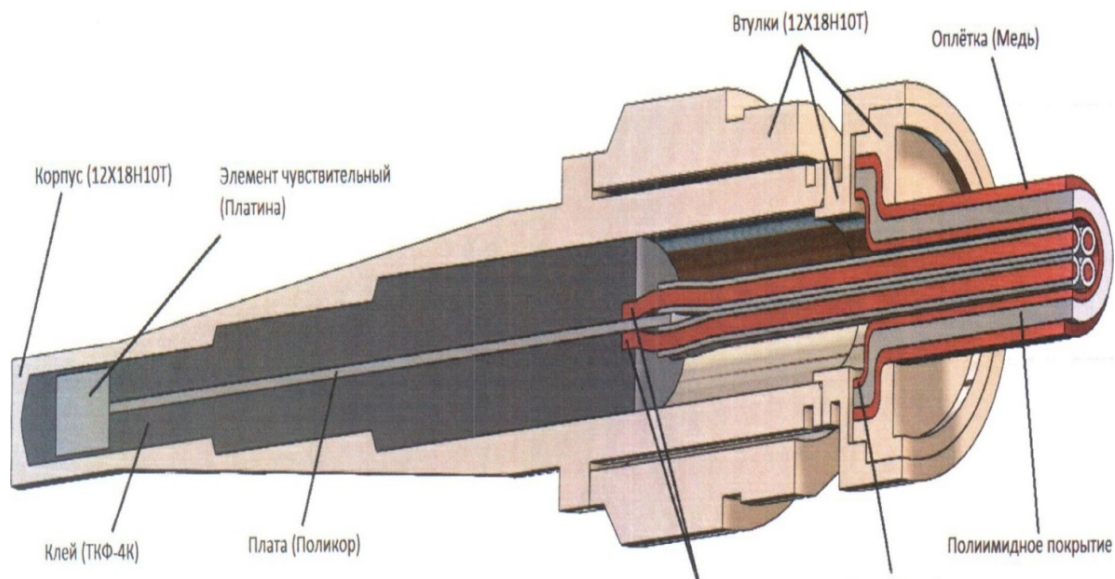


Рис. 1. Твердотельная модель датчика

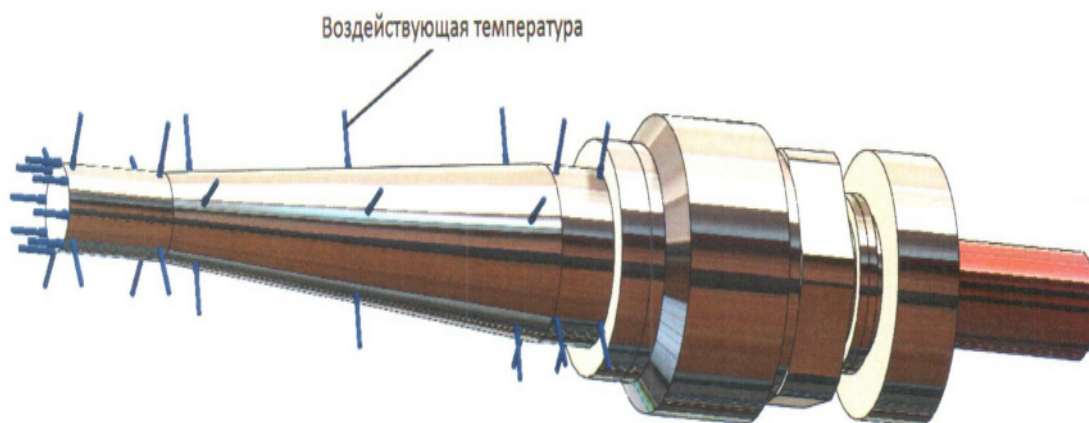


Рис. 2. Схема граничных условий

Таблица 1

Физико-механические свойства используемых материалов

Марка материала	12Х18Н10Т	ТКФ-4К	поликор вк-94
Тип материала	Линейный – упругий – изотропный	Линейный – упругий – изотропный	Линейный – упругий – изотропный
Критерий прочности	Максимальное напряжение по Мизесу	Максимальное напряжение по Мизесу	Максимальное напряжение по Мизесу
Предел текучести	270 МПа	–	–
Модуль упругости	205 ГПа	–	–
Коэффициент Пуассона	0,28	–	–
Массовая плотность	7900 кг/м ³	2810 кг/м ³	3800 кг/м ³
Коэффициент теплового расширения	$1,66 \cdot 10^{-5}$ 1/к	$2 \cdot 10^{-6}$ 1/К	$8,5 \cdot 10^{-6}$ 1/К
Теплопроводность	15 Вт/(м · К)	0,1Вт/(м · К)	23 Вт/(м · К)
Удельная теплоемкость	462 Дж/(кг · К)	250 Дж/(кг · К)	120 Дж/(кг · К)

Таблица 2

Физико-механические свойства используемых материалов

Марка материала	Медь	Платина	Полиимид
Тип материала	Линейный – упругий – изотропный	Линейный – упругий – изотропный	Линейный – упругий – изотропный
Критерий прочности	Максимальное напряжение по Мизесу	Максимальное напряжение по Мизесу	Максимальное напряжение по Мизесу
Предел текучести	258,64 МПа	125 МПа	–
Модуль Юнга	110 ГПа	167 ГПа	–
Коэффициент Пуассона	0,37	0,38	–
Массовая плотность	8900 кг/м ³	21450 кг/м ³	1900 кг/м ³
Коэффициент теплового расширения	$2,4 \cdot 10^{-5}$ 1/К	$8,8 \cdot 10^{-6}$ 1/К	$1,5 \cdot 10^{-5}$ 1/К
Теплопроводность	390 Вт/(м · К)	72 Вт/(м · К)	0,17 Вт/(м · К)
Удельная теплоемкость	390 Дж/(кг · К)	133 ж/(кг · К)	$10^{14}-10^{15}$ Дж/(кг · К)

Результаты исследования

В результате имитационного моделирования были получены и представлены на рис. 3 и 4 эпюры распределения температурных полей при воздействии на рабочую часть датчика температур + 300 °С и минус 253 °С в течение 25 и 10 с соответственно. На диаграммах 1–6 представлены графики зависимости температуры элемента чувствительного от времени ее воздействия. Исходя из рис. 3–6 видно, что чувствительный элемент датчика нагревается до температуры 300 °С за 12 с и охлаждается до температуры минус 253 °С за 14 с [7–9].

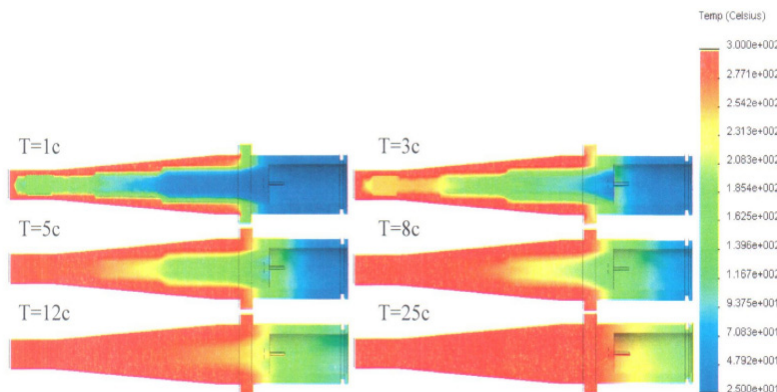


Рис. 3. Эпюра полей распределения температур при воздействии на рабочую часть датчика температуры + 300 °С в течение времени $T = 25$ с

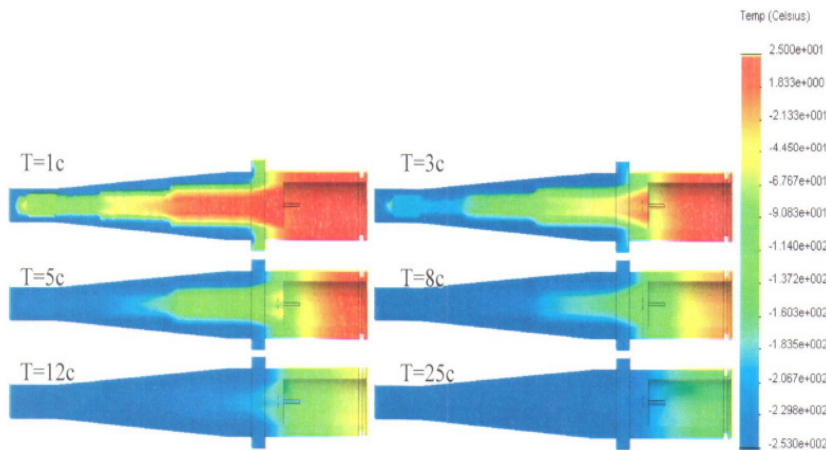


Рис. 4. Эпюра полей распределения температур при воздействии на рабочую часть датчика температуры минус 253 °С в течение времени $T = 25$ с

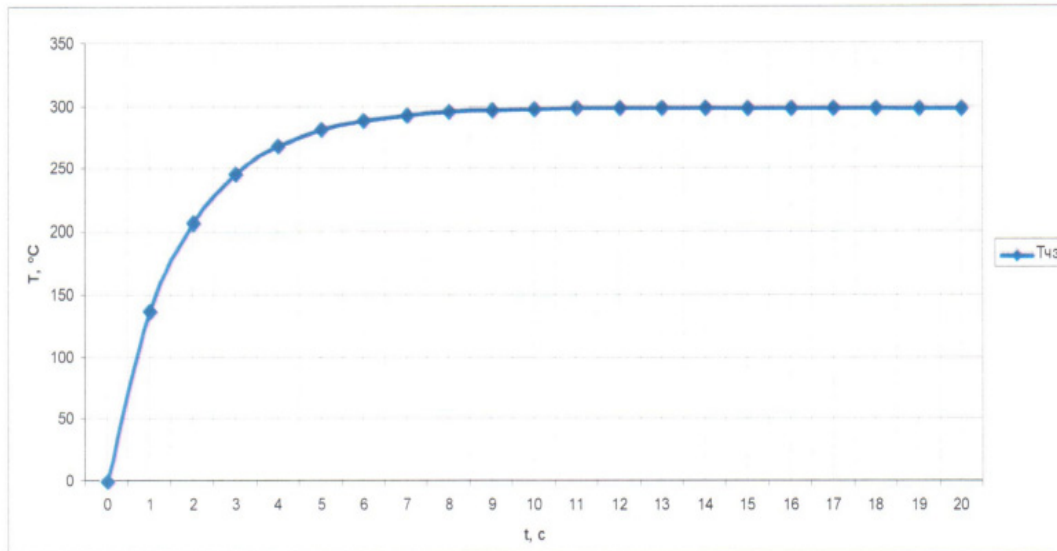


Рис. 5. График зависимости температуры элемента чувствительного ($T_{чз}$) от времени (t) при воздействии на датчик температуры $300\text{ }^{\circ}\text{C}$

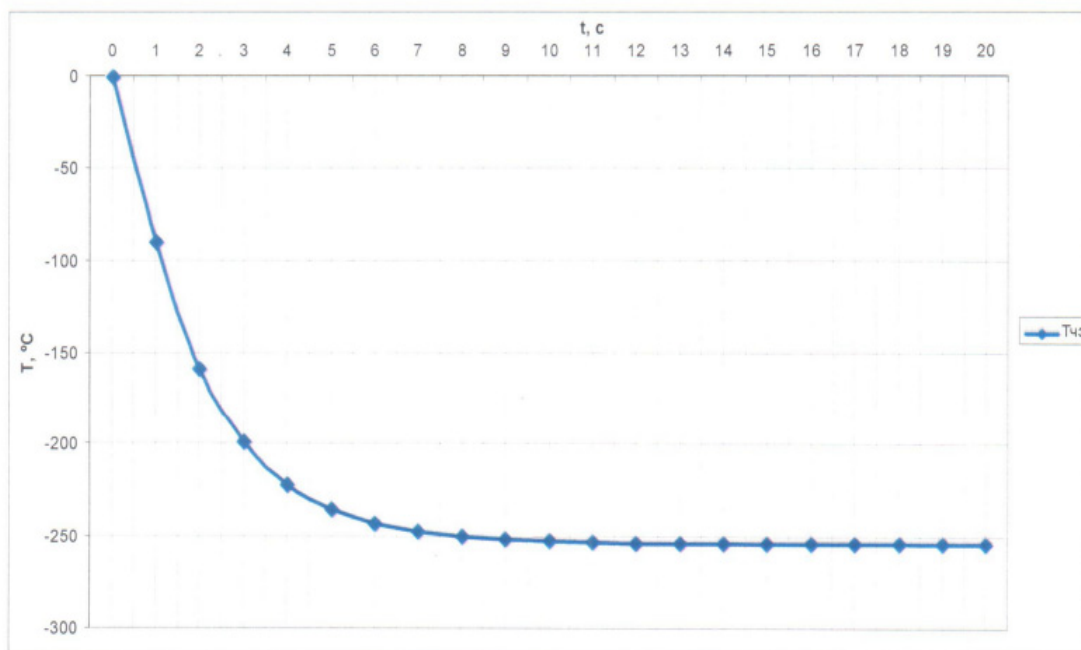


Рис. 6. График зависимости температуры элемента чувствительного ($T_{чз}$) от времени (t) при воздействии на датчик температуры $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$

Для определения времени термической реакции согласно ГОСТ 6651–2009 п. 8.10 было проведено моделирование датчика, при воздействии на его рабочую часть температуры $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результат моделирования представлен на рис. 7.

Исходя из рис. 7, видно, что время термической реакции, т.е. время нагрева элемента чувствительного до температуры равной $63\text{ }^{\circ}\text{C}$ (до температуры равной 90 % от $70\text{ }^{\circ}\text{C}$) составляет 3 с, что является удовлетворительным результатом.

В результате моделирования были получены эпюры полей распределения температур (см. рис. 3 и 4) и диаграммы на рис. 5–7; было определено время нагрева/охлаждения элемента чувствительного до измеряемых температур $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$; было определено время термической реакции.

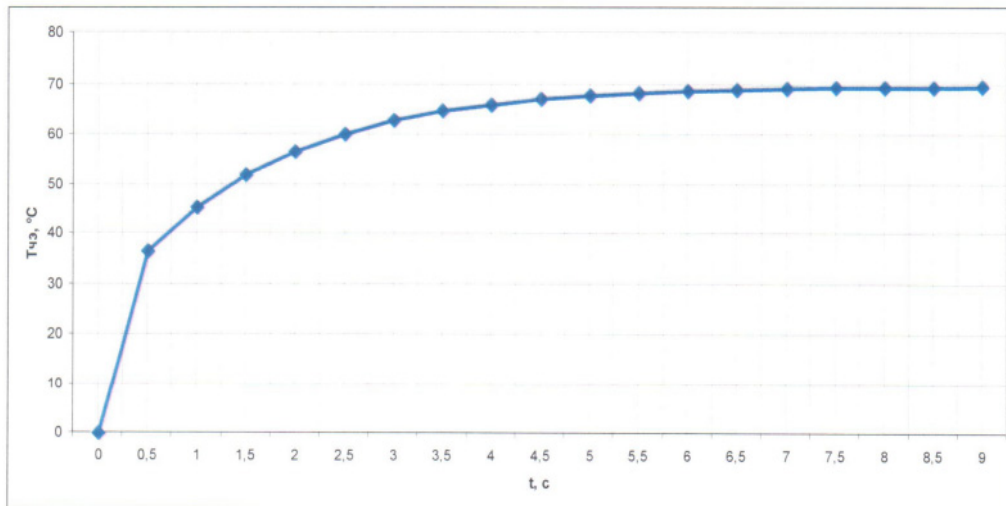


Рис. 7. График зависимости температуры элемента чувствительного ($T_{чз}$) от времени (t) при воздействии на датчик температуры $70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Список литературы

1. Дмитриенко А. Г., Блинов А. В., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетно-космической техники // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 4–6.
2. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3. С. 18–25.
3. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента датчика давления струнного типа // Датчики и системы. 2014. № 7. С. 22–25.
4. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента тензорезистивного датчика абсолютного давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2012. № 2. С. 51–55.
5. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М. : ДМК Пресс, 2010. 464 с.
6. Рыбаков И. М. Модели и методы измерения электрических параметров в сложных системах электроники // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 44–50.
7. Перевертов В. П., Андрончев И. К., Юрков Н. К. Порошковые композиты и наноматериалы в гибких технологиях формообразования деталей // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 85–95. doi: 10.21685/2307-4205-2020-2-9
8. Герасимов О. Н., Доросинский А. Ю., Березин М. Н. Исследование влияния воздействия вибрационных нагрузок на конструкционные материалы изделий электронной техники // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3. С. 37–42. doi: 10.21685/2307-4205-2017-3-6
9. Разоренов А. Г., Медведев А. М. Электрохимическая модель отказов электроизоляционных конструкций из композиционных материалов // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 3. С. 11–14. doi: 10.21685/2307-4205-2016-3-2

References

1. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, transducers and measurement systems based on them, monitoring and control of technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and system*. 2012;(9):4–6. (In Russ.)
2. Bastrygin K.I., Trofimov A.A. System of measurement, monitoring, control and diagnostics of rocket engine parameters. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(3): 18–25. (In Russ.)
3. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation modeling of a sensitive element of a string-type pressure sensor. *Datchiki i sistemy = Sensors and system*. 2014;(7):22–25. (In Russ.)
4. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation modeling of a sensitive element of a strain-resistant absolute pressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2012;(2):51–55. (In Russ.)
5. Alyamovskiy A.A. *Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation = Engineering calculations in SolidWorks Simulation*. Moscow: DMK Press, 2010:464. (In Russ.)

6. Rybakov I.M. Models and methods of measuring electrical parameters in complex systems of electronics. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):44–50. (In Russ.)
7. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Yurkov N.K. Powder composites and nanomaterials in flexible technologies of forming parts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(2):85–95. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-2-9
8. Gerasimov O.N., Dorosinskiy A.Yu., Berezin M.N. Investigation of the impact of vibration loads on structural materials of electronic equipment products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(3):37–42. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2017-3-6
9. Razorenov A.G., Medvedev A.M. Electrochemical model of failures of electrical insulating structures made of composite materials. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(3):11–14. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2016-3-2

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Николаевич Пономарев

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: revik2296@gmail.com

Vladislav N. Ponomarev

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alex.t1978@mail.ru

Aleksei A. Trofimov

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

Денис Викторович Дерябин

заместитель генерального директора по производству,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: info@niiemp.ru

Denis V. Deryabin

Deputy production general manager,
Research Institute of Electronic and Mechanical Devices
(44 Karakozov street, Penza, Russia)

Екатерина Александровна Фокина

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Ekaterina A. Fokina

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Андрей Анатольевич Максов

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: maksov.01@mail.ru

Andrey A. Maksov

Student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 24.07.2023

Поступила после рецензирования / Revised 21.08.2023

Принята к публикации / Accepted 18.09.2023