

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИНУСОИДАЛЬНОЙ ВИБРАЦИИ

Г. А. Ануар<sup>1</sup>, А. А. Трофимов<sup>2</sup>, И. М. Рыбаков<sup>3</sup>, С. А. Бростилов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан

<sup>2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> galym\_rma@mail.ru, <sup>2</sup> alex.t1978@mail.ru, <sup>3</sup> rybakov\_im@mail.ru, <sup>4</sup> ser-brostilov@yandex.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Электроника, информационные технологии, управление, приборная автоматика, средства обработки и хранения информации, телекоммуникации стали технической базой высоких технологий. Вооруженность этими средствами, полнота их использования определяют облик современного общества. Отдельно в этом ряду стоят системы управления аэрокосмическими объектами, где к общим проблемам развития электроники добавляются увеличенная плотность компоновки в сочетании с большим быстродействием и увеличенной функциональностью, повышенная надежность в условиях экстремальных внешних воздействий. Эти дополнительные требования обусловили индивидуальные черты развития производства электроники и в основополагающей его составной части – датчиковой аппаратуры. *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:** датчики физических величин, имитационное моделирование

**Для цитирования:** Ануар Г. А., Трофимов А. А., Рыбаков И. М., Бростилов С. А. Определение амплитуды резонансных частот датчика температуры при воздействии синусоидальной вибрации // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 1. С. 53–58. doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-7

## DETERMINATION AMPLITUDE RESONANT FREQUENCIES TEMPERATURE SENSOR UNDER ACTION OF SINUSOIDAL VIBRATION

G.A. Anuar<sup>1</sup>, A.A. Trofimov<sup>2</sup>, I.M. Rybakov<sup>3</sup>, S.A. Brostilov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

<sup>2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> galym\_rma@mail.ru, <sup>2</sup> alex.t1978@mail.ru, <sup>3</sup> rybakov\_im@mail.ru, <sup>4</sup> ser-brostilov@yandex.ru

**Abstract.** *Background.* Electronics, information technology, control, instrumentation, information processing and storage, telecommunications have become the technical base of high technologies. The armament of these means, the completeness of their use determines the appearance modern society. Separately in this row are aerospace object control systems, where increased layout density in combination with high speed and increased functionality, increased reliability in conditions of extreme external influences are added to the general problems electronics development. These additional requirements determined the individual features of the development electronics production and in its fundamental part – sensor equipment. *Materials and methods.* As a research method, simulation modeling was used, in which the studied sensor is replaced by its model, with which experiments are carried out in order to obtain information about this object. The experiment used specialized Solidworks software to avoid expensive and lengthy test cycles. *Results.* As a result of modeling, diagrams of temperature distribution fields at critical temperatures were obtained in order to study the effect of these conditions on the parts included in the studied object.

**Keywords:** physical quantity sensors, simulation modeling

**For citation:** Anuar G.A., Trofimov A.A., Rybakov I.M., Brostilov S.A. Determination amplitude resonant frequencies temperature sensor under action of sinusoidal vibration. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2025;(1):53–58. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2025-1-7

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, в том числе синусоидальной вибрации [1, 2].

Целью проведения имитационного моделирования является определение изменения амплитуды резонансных частот конструкции датчика температуры.

В процессе моделирования определяются амплитуды колебаний при воздействии виброускорений в зависимости от типа крепления датчика (горизонтально или вертикально). Имитационное моделирование проводилось с применением программы ANSYS.

Для проведения имитационного моделирования построены две твердотельные 3D-модели сборки датчиков с приспособлением в горизонтальном и вертикальном положении. Расчетные модели и схема граничных условий представлены на рис. 1.

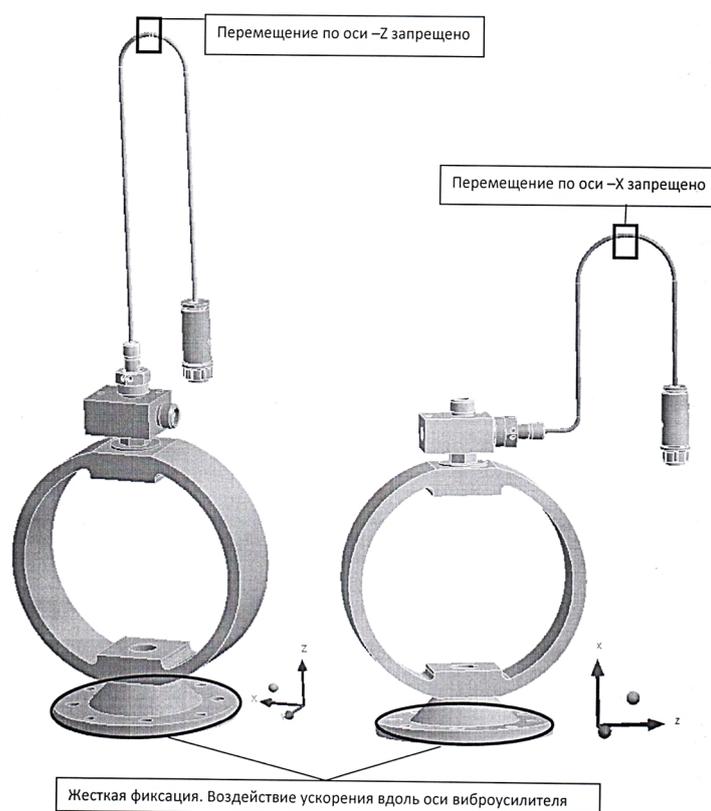


Рис. 1. Твердотельные расчетные модели и схема граничных условий

Физико-механические характеристики используемых при расчете материалов представлены в табл. 1.

В результате гармонического анализа в программном комплексе ANSYS определены зависимости амплитуды виброускорения в зависимости от частоты. Результаты моделирования представлены на рис. 2, 3.

Таблица 1

Физико-механические характеристики материалов

Материал	Характеристики		
	Модуль упругости, Па	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент Пуассона
Сталь 45	$2,04 \cdot 10^{11}$	7826	0,3
Клей ВК9	$6 \cdot 10^7$	1200	0,2
Д16	$6,9 \cdot 10^{10}$	2780	0,33
30ХГСА	$2,15 \cdot 10^{11}$	7850	0,3
12Х18Н10Т	$2,814 \cdot 10^{11}$	7920	0,3
Медь	$1,1 \cdot 10^{11}$	8300	0,34

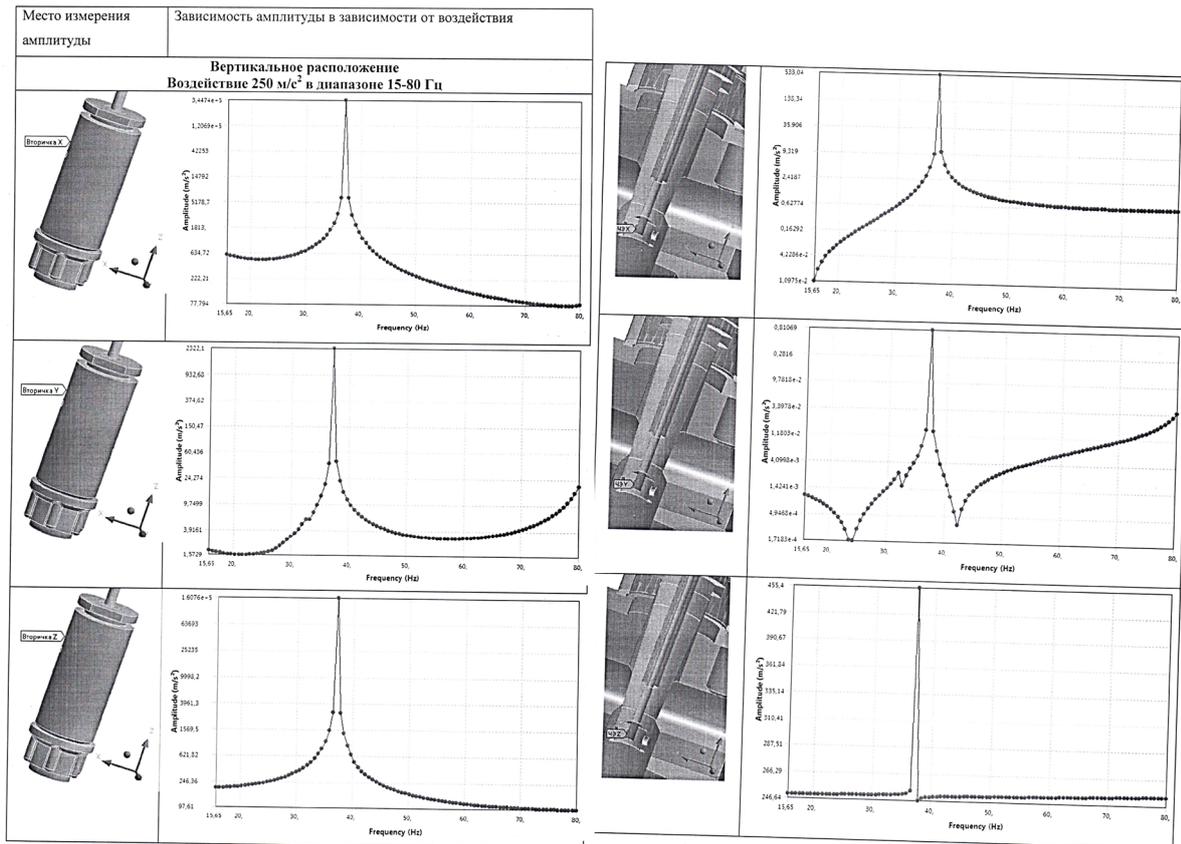


Рис. 2. Внешний вид и графики зависимости частоты от амплитуды при воздействии ускорения  $250 \text{ м/с}^2$

Согласно рис. 2 следует, что в области разъема при ускорении вдоль оси  $x$  максимальное значение амплитуды составляет  $3,4 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$ , вдоль оси  $y$  максимальное ускорение составляет  $2322 \text{ м/с}^2$ , а вдоль оси  $z$  максимальное ускорение составляет  $1,6 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$ . В свою очередь в области чувствительного элемента при ускорении вдоль оси  $x$  максимальное значение амплитуды составляет  $533 \text{ м/с}^2$ , вдоль оси  $y$  максимальное ускорение составляет  $0,81 \text{ м/с}^2$ , а вдоль оси  $z$  максимальное ускорение составляет  $455 \text{ м/с}^2$ . Обобщив результаты моделирования, сделаем вывод о корректности и адекватности полученных данных. Так как при ускорении в трех взаимно перпендикулярных направлениях при воздействии ускорения  $250 \text{ м/с}^2$  не нарушается целостность конструкции и не превышаются максимальные значения амплитуды для данной конструкции [3–5].

Согласно рис. 3 следует, что в области разъема при ускорении вдоль оси  $x$  максимальное значение амплитуды составляет  $1,9 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$ , вдоль оси  $y$  максимальное ускорение составляет  $1 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$ , а вдоль оси  $z$  максимальное ускорение составляет  $1,3 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$ . В свою очередь в области чувствительного элемента при ускорении вдоль оси  $x$  максимальное значение амплитуды составляет  $18186 \text{ м/с}^2$ , вдоль оси  $y$  максимальное ускорение составляет  $6190 \text{ м/с}^2$ , а вдоль оси  $z$  максимальное ускорение составляет  $93\,562 \text{ м/с}^2$ . Обобщив результаты моделирования,

сделаем вывод о корректности и адекватности полученных данных. Так как при ускорении в трех взаимно перпендикулярных направлениях при воздействии ускорения  $1000 \text{ м/с}^2$  не нарушается целостность конструкции и не превышаются максимальные значения амплитуды для данной конструкции.

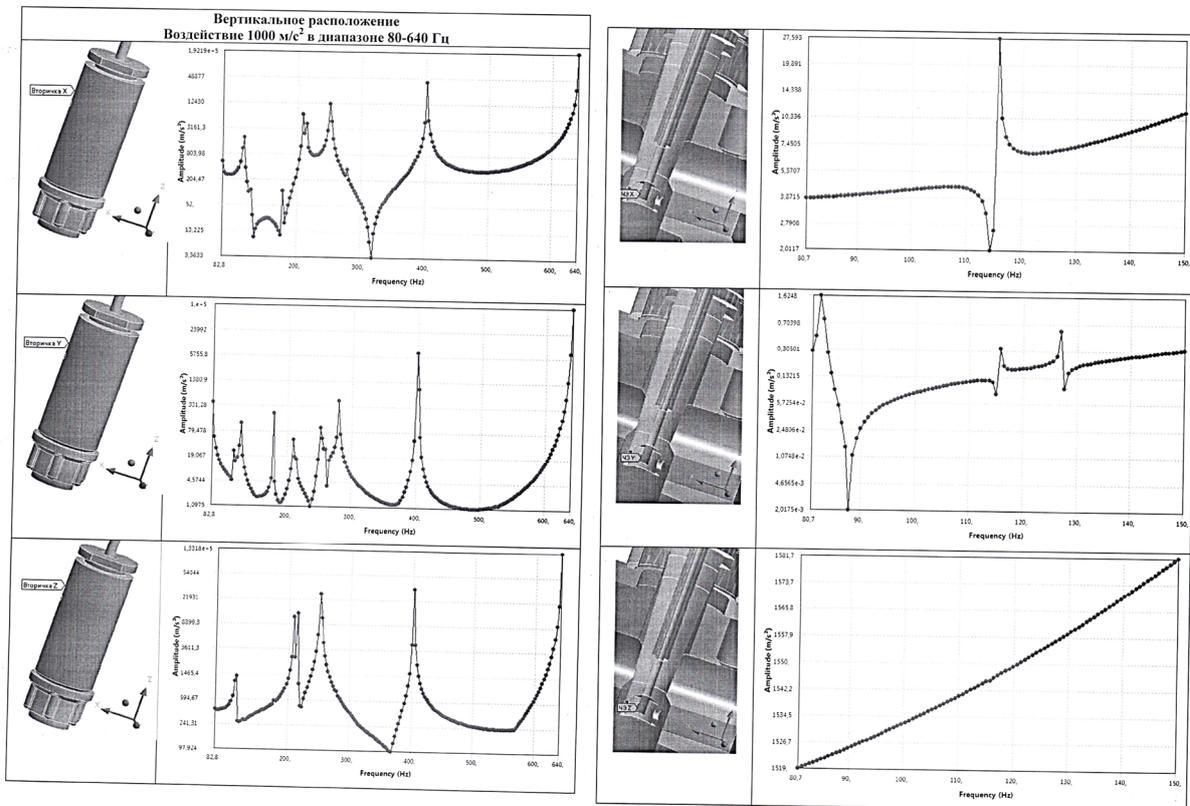


Рис. 3. Внешний вид и графики зависимости частоты от амплитуды при воздействии ускорения  $1000 \text{ м/с}^2$

### Заключение

В результате моделирования воздействия ускорения вдоль оси виброусилителя на датчик температуры определены изменения амплитуды виброускорения в зависимости от амплитуды. Моделирование показало корректность и адекватность полученных данных, так как при ускорении в трех взаимно перпендикулярных направлениях при воздействии заданного ускорения не нарушается целостность конструкции и не превышаются максимальные значения амплитуды для данной конструкции [6, 7].

### Список литературы

1. 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.
2. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование тензорезисторного датчика избыточных давлений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 56–63.
3. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М. : ДМК Пресс, 2010. 464 с.
4. Рыбаков И. М. Модели и методы измерения электрических параметров в сложных системах электроники // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 44–50.
5. Рязанцев Д. А., Тимонин Р. М., Трофимов А. А. Имитационное моделирование датчика температуры // Датчики и системы. 2019. № 6. С. 11–14.
6. Трофимов А. А., Пономарев В. Н., Дерябин Д. В. [и др.]. Проектирование датчика температуры методом имитационного моделирования // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 54–61.
7. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А., Баранов А. С. [и др.]. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 1. С. 20–28.

## References

1. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation of a sensitive element of a string-type pressure sensor. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2014;(7):22–25. (In Russ.)
2. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation modeling of a tensoresistor overpressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2022;(1):56–63. (In Russ.)
3. Alyamovskiy A.A. *Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation = Engineering calculations in SolidWorks Simulation*. Moscow: DMK Press, 2010:464. (In Russ.)
4. Rybakov I.M. Models and methods of measuring electrical parameters in complex electronic systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):44–50. (In Russ.)
5. Ryazantsev D.A., Timonin R.M., Trofimov A.A. Simulation modeling of a temperature sensor. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2019;(6):11–14. (In Russ.)
6. Trofimov A.A., Ponomarev V.N., Deryabin D.V. et al. Designing a temperature sensor by simulation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):54–61. (In Russ.)
7. Bastrygin K.I., Trofimov A.A., Baranov A.S. et al. Simulation modeling of a piezoelectric pressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(1): 20–28. (In Russ.)

## Информация об авторах / Information about the authors

**Галымжан Амандыкович Ануар**

старший преподаватель кафедры космической  
техники и технологии,  
Евразийский национальный университет  
имени Л. Н. Гумилева  
(Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2)  
E-mail: galym\_rma@mail.ru

**Galymzhan A. Anuar**

Senior lecturer of the sub-department  
of space engineering and technology,  
Gumilyov Eurasian National University  
(2 Satpayev street, Astana, Kazakhstan)

**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

**Aleksey A. Trofimov**

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

**Илья Михайлович Рыбаков**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rybakov\_im@mail.ru

**Илья М. Rybakov**

Candidate of technical sciences, associate professor  
of the sub-department of design and production  
of radio equipment,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Сергей Александрович Бростилов**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: ser-brostilov@yandex.ru

**Sergey A. Brostilov**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of design and production of radio equipment,  
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 26.11.2024

Поступила после рецензирования/Revised 20.12.2024

Принята к публикации/Accepted 13.01.2025