

## Моделирование вибраций круговых цилиндрических оболочек радиоэлектронных средств

Н. К. Юрков<sup>✉</sup>, Е. А. Данилова, И. И. Кочегаров, Н. В. Горячев, А. В. Лысенко

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>✉</sup> [yurkov\\_nk@mail.ru](mailto:yurkov_nk@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** Одним из подходов к анализу сложных конструкций радиоэлектронных средств является подход, основанный на построении конечно-разностных моделей нестационарных процессов в конструктивных элементах. Цель создания подобного рода моделей – получение удобного и простого в использовании алгоритма расчета основных прочностных характеристик объекта, таких, как перемещения, деформации и напряжения. Основой для разработки алгоритма служит взаимосвязь между физическими моделями, представленными в виде дискретных структур, и их расчетными схемами. Поскольку основные конструктивные элементы радиоэлектронных средств отличаются значительным превышением двух координат (ширина, высота) над толщиной, процесс расчета связан с определенными трудностями, выраженными в значительном объеме вычислений при равных шагах дискретизации по всем координатам либо в снижении точности расчетов при различных значениях шага.

**Цель работы.** Исследование и разработка подхода к прочностной оценке круговых цилиндрических оболочек при динамическом внешнем воздействии.

**Материалы и методы.** Использование метода конечных разностей позволяет осуществить переход от уравнений динамического равновесия в дифференциальной форме к разностной форме.

**Результаты.** Предложена методика расчета напряженно-деформированного состояния оболочки с использованием конечно-разностных моделей. Полученная явная разностная схема позволяет изменять граничные и начальные условия, а следовательно, автоматизировать процесс вычислений. На конкретном примере рассмотрена реализация предложенной методики для случая непрерывно действующей пульсирующей цилиндрической волны, деформирующей оболочку.

**Заключение.** Показано, что предложенная методика позволит в дальнейшем проводить анализ сложных конструкций за счет совершенствования расчетных моделей и включения дополнительных условий и характеристик, а также может стать основой для проектирования модулей инженерных расчетов радиоэлектронных средств.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, перемещения, оболочка, разностная схема, теория упругости, динамическое воздействие, переменные напряжения, перемещения

**Для цитирования:** Моделирование вибраций круговых цилиндрических оболочек радиоэлектронных средств / Н. К. Юрков, Е. А. Данилова, И. И. Кочегаров, Н. В. Горячев, А. В. Лысенко // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 6. С. 71–79.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-6-71-79

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.05.2025; принята к публикации после рецензирования 08.07.2025; опубликована онлайн 29.12.2025



## Simulation of Circular Cylindrical Shell Vibrations in Radioelectronic Equipment

Nikolay K. Yurkov<sup>✉</sup>, Evgeniya A. Danilova,  
Igor I. Kochegarov, Nikolay V. Goryachev, Alexey V. Lysenko

Penza State University, Penza, Russia

<sup>✉</sup> yurkov\_nk@mail.ru

### Abstract

**Introduction.** One approach to the analysis of complex structures of radioelectronic equipment is based on the construction of finite-difference models of non-stationary processes in structural elements. Such models are aimed at obtaining a convenient and easy-to-use algorithm for calculating the main strength characteristics of an object, such as displacements, deformations, and stresses. The basis for developing such an algorithm is the relationship between physical models presented in the form of discrete structures and their calculation schemes. Since the main structural elements of radioelectronic equipment are distinguished by a significant excess of two coordinates (width and height) over thickness, the calculation process is associated with certain difficulties. These are expressed in a significant volume of calculations with equal discretization steps for all coordinates, or in a decrease in the accuracy of calculations with different step values.

**Aim.** Research and development of an approach to strength assessment of circular cylindrical shells under dynamic external disturbances.

**Materials and methods.** The finite difference method was used to transfer from the equations of dynamic equilibrium in differential form to those in difference form.

**Results.** A method for calculating the stress–strain state of a shell using finite difference models is proposed. The resulting explicit difference scheme allows changing the boundary and initial conditions, thus enabling automatization of the calculation process. A specific example is used to consider the implementation of the proposed method for the case of a continuously acting pulsating cylindrical wave deforming the shell.

**Conclusion.** Future research can use the proposed method to analyze complex structures by improving the calculation models and including additional conditions and characteristics, thereby forming the basis for designing modules for engineering calculations of radioelectronic equipment.

**Keywords:** mathematical simulation, displacements, shell, difference scheme, theory of elasticity, dynamic action, alternating stresses, displacements

**For citation:** Yurkov N. K., Danilova E. A., Kochegarov I. I., Goryachev N. V., Lysenko A. V. Simulation of Circular Cylindrical Shell Vibrations in Radioelectronic Equipment. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 6, pp. 71–79.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-6-71-79

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 19.05.2025; accepted 08.07.2025; published online 29.12.2025

**Введение.** Вопросам динамического расчета оболочек посвящено небольшое количество специальной литературы. В основном в этих работах рассматриваются свободные колебания замкнутых оболочек, металлических труб и т. д. [1, 2].

При проектировании радиоэлектронных средств важными являются вопросы прочности конструкции при действии внешних механических воздействий. Анализ отклика конструкции в целом и ее составных частей позволяет на этапе проектирования вносить изменения в изделие для предотвращения разрушения и отка-

за на этапе эксплуатации [3–8]. В статье рассмотрены некоторые вопросы прочностного расчета на примере круговых цилиндрических оболочек, находящихся под воздействием периодических внешних возмущений.

**Материалы и методы.** Как правило, статический и динамический расчет оболочек строится либо на прямом интегрировании известных дифференциальных уравнений теории упругости, либо на применении вариационных методов [1, 2, 9].

При разработке алгоритма и методики автоматизированного расчета появляется необходимость

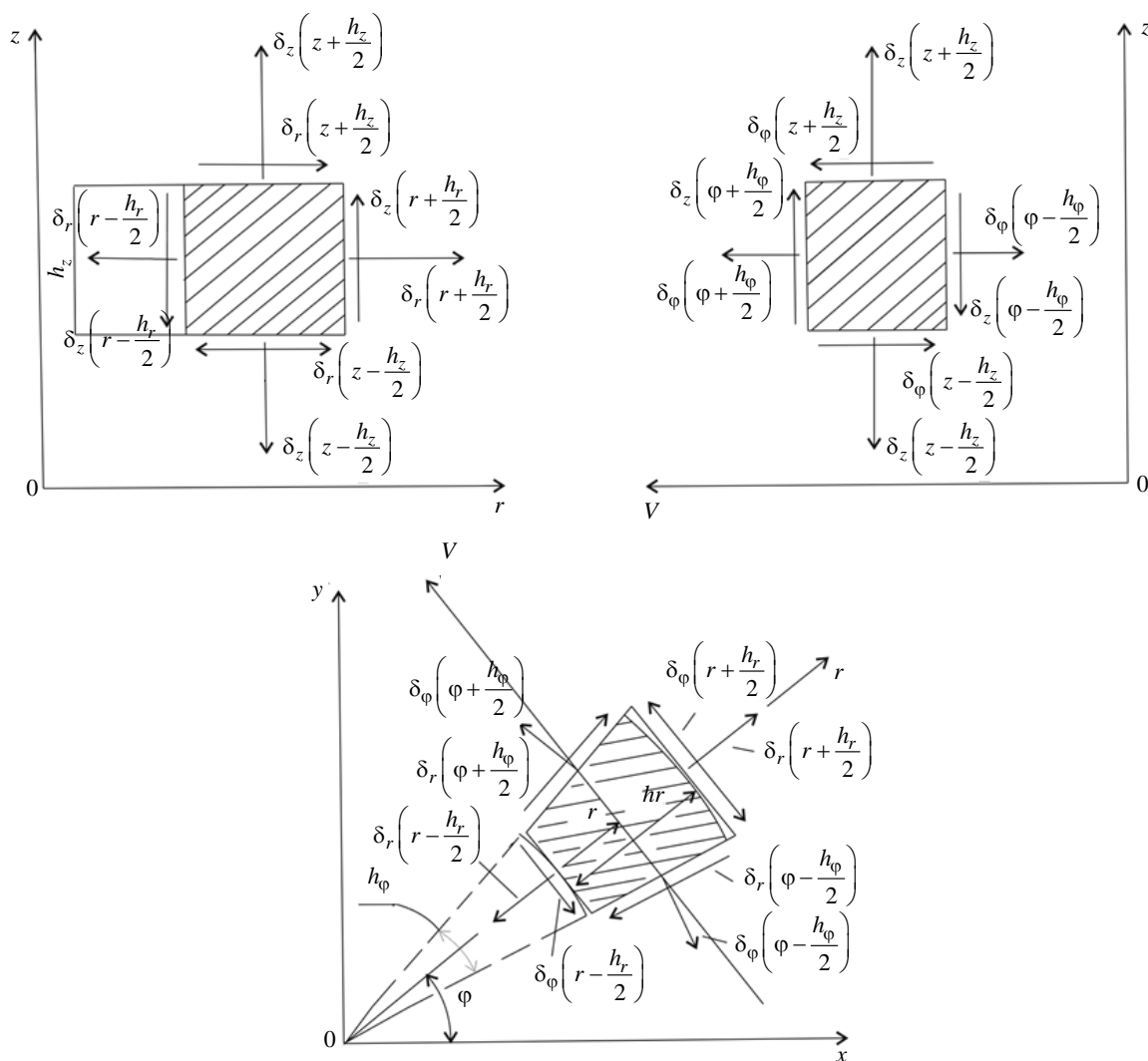


Рис. 1. Схема составления уравнений равновесия  
 Fig. 1. Scheme of composition of equilibrium equations

выбора численного метода решения задачи. В таких случаях удобно использовать метод конечных разностей, основанный на замене частных производных, входящих в дифференциальные уравнения равновесия, их разностными аналогами [10].

В описываемой работе исходные уравнения динамического равновесия выведены из физических представлений непосредственно в разностной форме.

Такой подход позволяет более полно учесть свойства, связанные с геометрией конечного элемента, и дает возможность точнее аппроксимировать напряженно-деформированное состояние упругого тела.

Рассмотрим круговую цилиндрическую оболочку с внутренним радиусом  $e$  и внешним радиусом  $f$ . Материал оболочки изотропен, например сталь.

В цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$  выделим конечный элемент из стенки оболочки (рис. 1) и все силы, действующие на элемент, спроектируем на направление радиуса  $r$ , перпендикуляр к радиусу  $V$  и на ось  $z$  с учетом инерционной составляющей.

Получим 3 уравнения динамического равновесия в конечно-разностной форме в напряжениях:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{h_r} \left[ \sigma_r \left( r + \frac{h_r}{2} \right) - \sigma_r \left( r - \frac{h_r}{2} \right) \right] + \\ & + \frac{1}{2r} \left[ \sigma_r \left( r + \frac{h_r}{2} \right) + \sigma_r \left( r - \frac{h_r}{2} \right) \right] - \\ & - \frac{1}{2r} \left[ \sigma_\varphi \left( \varphi + \frac{h_\varphi}{2} \right) + \sigma_\varphi \left( \varphi - \frac{h_\varphi}{2} \right) \right] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2r \operatorname{tg} \frac{h_\varphi}{2}} \left[ \sigma_r \left( \varphi + \frac{h_\varphi}{2} \right) - \sigma_r \left( \varphi - \frac{h_\varphi}{2} \right) \right] + \\
 & + \frac{1}{h_z} \left[ \sigma_r \left( z + \frac{h_z}{2} \right) - \sigma_r \left( z - \frac{h_z}{2} \right) \right] = \rho a_r; \\
 & \frac{1}{2r \operatorname{tg} \frac{h_\varphi}{2}} \left[ \sigma_\varphi \left( \varphi + \frac{h_\varphi}{2} \right) - \sigma_\varphi \left( \varphi - \frac{h_\varphi}{2} \right) \right] + \\
 & + \frac{1}{2r} \left[ \sigma_r \left( \varphi + \frac{h_\varphi}{2} \right) + \sigma_r \left( \varphi - \frac{h_\varphi}{2} \right) \right] + \\
 & + \frac{1}{2r} \left[ \sigma_\varphi \left( r + \frac{h_r}{2} \right) + \sigma_\varphi \left( r - \frac{h_r}{2} \right) \right] + \\
 & + \frac{1}{h_r} \left[ \sigma_\varphi \left( r + \frac{h_r}{2} \right) - \sigma_r \left( r - \frac{h_r}{2} \right) \right] + \\
 & + \frac{1}{h_z} \left[ \sigma_\varphi \left( z + \frac{h_z}{2} \right) - \sigma_\varphi \left( z - \frac{h_z}{2} \right) \right] = \rho a_V; \\
 & \frac{1}{h_z} \left[ \sigma_z \left( z + \frac{h_z}{2} \right) - \sigma_z \left( z - \frac{h_z}{2} \right) \right] + \\
 & + \frac{1}{h_r} \left[ \sigma_z \left( r + \frac{h_r}{2} \right) - \sigma_z \left( r - \frac{h_r}{2} \right) \right] + \\
 & + \frac{1}{2r} \left[ \sigma_z \left( r + \frac{h_r}{2} \right) + \sigma_z \left( r - \frac{h_r}{2} \right) \right] + \\
 & + \frac{1}{2r \sin \frac{h_\varphi}{2}} \left[ \sigma_z \left( \varphi + \frac{h_\varphi}{2} \right) - \sigma_z \left( \varphi - \frac{h_\varphi}{2} \right) \right] = \rho a_z,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\sigma_{ii}$  – нормальные напряжения;  $\sigma_{ij}$  – касательные напряжения;  $h_r, h_\varphi, h_z$  – размеры элемента (в дальнейшем – координатные шаги сетки на рис. 2);  $a_r, a_V, a_z$  – проекции ускорения на направления  $r, V$  и  $z$  соответственно;  $r$  – радиус;  $\rho$  – плотность вещества.

По внутренней поверхности оболочки моделируется непрерывно действующая цилиндрическая волна деформаций, пульсирующая по закону  $u_r = U_0 \sin \omega t$ , где  $u_r$  – перемещения точек в направлении радиуса;  $U_0 = 10$  мкм;  $\omega$  – частота внешних возмущений (выбирается близкой частоте собственных колебаний оболочки на первой гармонике).

Подобный характер нагружения позволяет свести задачу к одномерной. Из трех уравнений системы (1) остается первое, которое имеет вид

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{h_r} \left[ \sigma_r \left( r + \frac{h_r}{2} \right) - \sigma_r \left( r - \frac{h_r}{2} \right) \right] + \\
 & + \frac{1}{2r} \left[ \sigma_r \left( r + \frac{h_r}{2} \right) + \sigma_r \left( r - \frac{h_r}{2} \right) \right] - \\
 & - \frac{1}{2r} \left[ \sigma_\varphi \left( \varphi + \frac{h_\varphi}{2} \right) + \sigma_\varphi \left( \varphi - \frac{h_\varphi}{2} \right) \right] = \rho a_r. \tag{2}
 \end{aligned}$$

Для проведения вычислений и с учетом характера граничных условий данный алгоритм удобнее представить в перемещениях.

Выражения напряжений через деформации можно записать для данного случая следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{rr} &= (\lambda + 2\mu) \varepsilon_{rr} + \lambda \varepsilon_{\varphi\varphi}; \\
 \sigma_{\varphi\varphi} &= (\lambda + 2\mu) \varepsilon_{\varphi\varphi} + \lambda \varepsilon_{rr},
 \end{aligned} \tag{3}$$

где  $\lambda$  и  $\mu$  – постоянные Ламе;  $\varepsilon_{rr}, \varepsilon_{\varphi\varphi}$  – относительные деформации конечного элемента в направлениях  $r$  и  $V$ , отнесенные к центру его граней (точки  $a, b, c, d$  на рис. 2).

Деформации центров граней можно выразить через перемещения окружающих узлов, например (рис. 2):

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_r \left( r + \frac{h_r}{2} \right) &= \frac{1}{h_r} \left[ u_{(r+h_r)} - u_r \right]; \\
 \varepsilon_r \left( r - \frac{h_r}{2} \right) &= \frac{1}{h_r} \left[ u_r - u_{(r-h_r)} \right].
 \end{aligned} \tag{4}$$

Подставив (4) в (3), а затем в (2) и представив правую часть (2) в виде

$$\rho a_r = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\rho}{\tau^2} \left[ u_{(t+\tau)} - 2u + u_{(t-\tau)} \right],$$

где  $\tau$  – шаг по времени, после соответствующих преобразований получим искомый алгоритм счета в виде рекуррентного соотношения

$$\begin{aligned}
 u_{(t+\tau)} &= Au_{(r+hr),t} + Bu_{r,t} + \\
 & + Cu_{(r-hr),t} - u_{(t-\tau)},
 \end{aligned} \tag{5}$$

где безразмерные коэффициенты  $A, B, C$  имеют вид

$$\begin{aligned}
 A &= \left\{ \frac{\lambda + 2\mu}{h_r^2} \frac{2r + h_r}{2r} + \right. \\
 & \left. + \frac{\lambda}{2h_r} \left[ \frac{2r + (h_r - r) \cos h_\varphi}{r(r + h_r) \cos h_\varphi} - \frac{1}{r} \right] \right\} \frac{\tau^2}{\rho};
 \end{aligned}$$

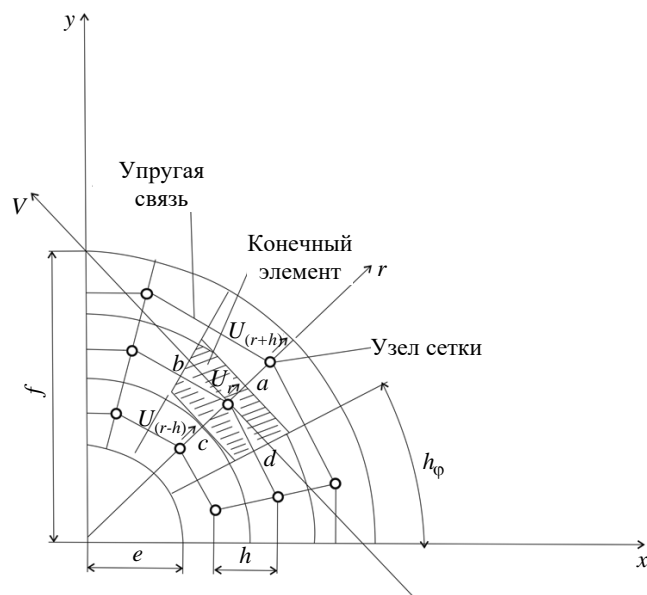


Рис. 2. Модель-сетка оболочки

Fig. 2. Shellmeshmodel

$$B = \left[ -\frac{\lambda + 2\mu}{h_r^2} \frac{r^2 + h_r^2}{r^2} \frac{\tau^2}{\rho} \right] - 2;$$

$$C = \left\{ \frac{\lambda + 2\mu}{h_r^2} \frac{2r - h_r}{2r} + \frac{\lambda}{2h_r} \left[ \frac{-2r + (h_r + r) \cos h_\phi}{r(r - h_r) \cos h_\phi} + \frac{1}{r} \right] \right\} \frac{\tau^2}{\rho}.$$

Соотношение (5) с учетом граничных и начальных условий представляет собой явную разностную схему, которая весьма удобна при реализации решения на любом языке программирования: она проста, обеспечивает минимально возможный объем вычислений, позволяет просто вводить начальные и граничные условия [11] и дает возможность легко организовать вычислительный процесс [12].

Однако при использовании явной схемы для решения задачи возникает вопрос о ее устойчивости и о том, какими критериями пользоваться, чтобы получить устойчивую разностную схему.

В описываемой работе исследована возможность применения критерия так называемого динамического упреждения к разностным уравнениям с переменными коэффициентами (5). Суть критерия заключается в том, что "скорость расчета" по разностной схеме, выражаемая соотношением  $h/\tau$ , принимается большей или равной скорости распространения упругих волн в дан-

ной среде. Отношение  $h/\tau$  определяет максимальную скорость распространения возмущений, которую может обеспечить явная схема. Поэтому условно ее называют "скоростью расчета".

**Результаты.** Решение проводилось для оболочки с размерами  $e = 18 \cdot 10^{-3}$  м;  $f = 42 \cdot 10^{-3}$  м. Шаги сетки по координатам  $h_r = 2 \cdot 10^{-3}$  м;  $h_\phi = 15^\circ$  (рис. 2). Физические свойства материалов соответствуют коррозионно-стойкой стали. Шаг по времени выбирался исходя из вышеуказанного критерия: скорость цилиндрических волн расширения в упругой среде определяется формулой [13]

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}};$$

при известных  $\lambda$ ,  $\rho$  и  $\mu$  для стали получаем

$$c_1 = 5852 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Положим, что  $c_1^2 = v_p^2$ , где  $v_p$  – "скорость расчета"; тогда  $c_1^2/v_p^2 = K = 1$ , откуда найдем шаг по времени  $\tau = 0.34153$  мкс.

Поскольку частота внешних возмущений  $\omega$  близка к частоте собственных колебаний, период в первом приближении можно определить из формулы:  $T = 2l/c_1$ , где  $l$  – толщина оболочки [14, 15].

При  $l = 24 \cdot 10^{-3}$  м получаем  $T = 0.082051 \cdot 10^{-4}$  с.

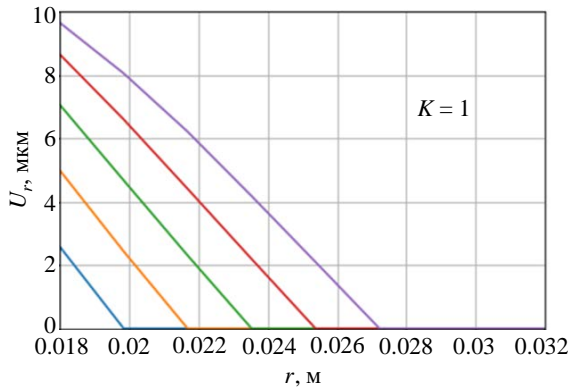


Рис. 3. Устойчивое решение  
 Fig. 3. Sustainable solution

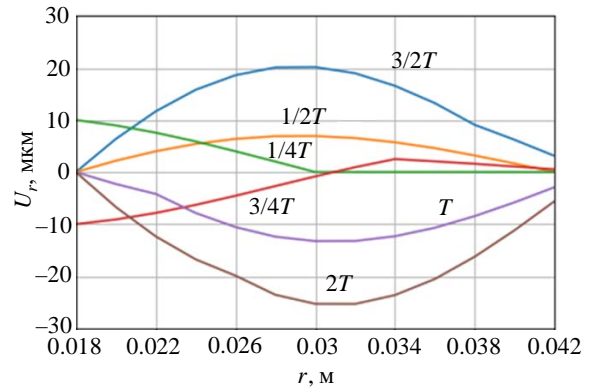


Рис. 6. Радиальные перемещения  
 Fig. 6. Radial movements

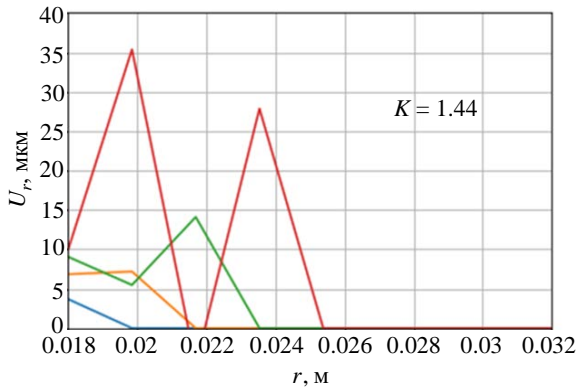


Рис. 4. Неустойчивое решение  
 Fig. 4. Unstable solution

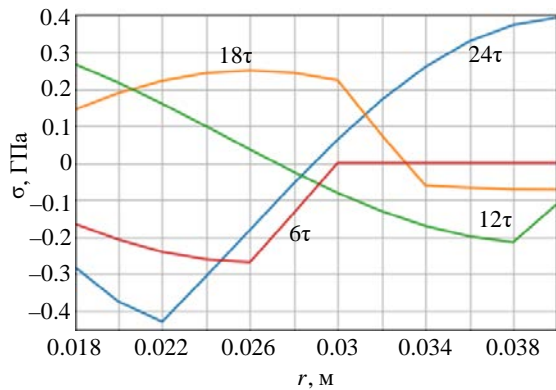


Рис. 7. Переменные напряжения  
 Fig. 7. Variable stresses

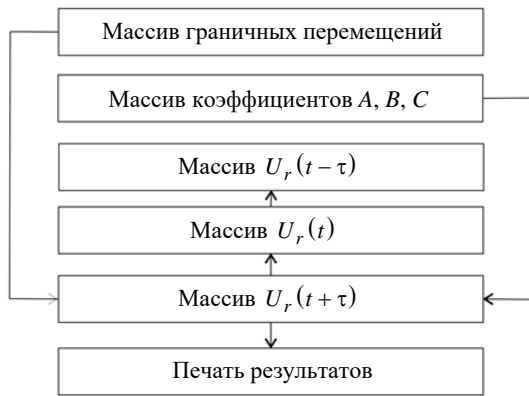


Рис. 5. Укрупненный алгоритм реализации  
 Fig. 5. Extended implementation algorithm

Циклическая частота колебаний при этом составит  $f_{\text{ц}} = 120$  кГц, а угловая частота  $\omega = 766\,000$  рад/с.

При полученном  $\tau$  на весь период приходится  $T/\tau = 24$  шага по времени, т. е.  $6\tau$  на  $1/4$  периода.

Как видно из рис. 3, решение при таком соотношении скоростей получилось устойчивым. Примем  $c_1^2 > v_p^2$ , для чего возьмем на четверть

периода колебаний 5 шагов по времени. Это дает  $\tau = 0.4103$  мкс. При этом отношение  $c_1^2/v_p^2$  становится больше единицы:  $K = 1.44$ . На рис. 4 приведено решение для  $K = 1.44$ , из которого видно, что уже в третьем шаге вычислений по времени решение становится неустойчивым.

Весь расчет был произведен на 2 периода колебаний. Укрупненный алгоритм программы представлен на рис. 5.

На рис. 6 представлены графики радиальных перемещений, из которых видно, что синусоидальные волны внешней нагрузки возбуждают в оболочке низкочастотную резонансную волну (так как близка к частоте собственных колебаний), амплитуда которой растет в расширяющейся области. Все это совпадает с теоретическими выводами работы [9].

На рис. 7 представлен процесс возникновения и развития переменных радиальных напряжений в цилиндрической оболочке для моментов времени, равных  $1/4$  периода,  $1/2$  пе-

риода,  $3/4$  периода и 1 периоду. Для вычисления напряжений использовались значения перемещений из рис. 6.

**Заключение.** Используемые соотношения можно перенести на реальные радиоэлектронные блоки с толщиной стенок, меньшей диаметра цилиндра. Полученные решения позволяют рассчитывать нестационарные процессы в круговых цилиндрических оболочках и та-

ким образом оценить вибропрочность на стадии проектирования изделия. Разработанная методика позволит в дальнейшем проводить анализ сложных конструкций за счет совершенствования расчетных моделей и включения дополнительных условий и характеристик, а также стать основой для проектирования модулей инженерных расчетов радиоэлектронных средств.

#### Авторский вклад

**Юрков Николай Кондратьевич** – постановка задачи; руководство научным исследованием.  
**Данилова Евгения Анатольевна** – программная реализация методики; подготовка экспериментальных данных.  
**Кочегаров Игорь Иванович** – разработка алгоритма; проведение численных экспериментов.  
**Горячев Николай Владимирович** – подбор и корректировка начальных и граничных условий.  
**Лысенко Алексей Владимирович** – анализ результатов; написание статьи.

#### Author's contribution

**Nikolay K. Yurkov**, problem statement; leadership of scientific research.  
**Evgeniya A. Danilova**, software implementation of the methodology; verification of experimental data.  
**Igor I. Kochegarov**, algorithm development; experimental formulation of the problem.  
**Nikolay V. Goryachev**, selection and correction of initial and boundary conditions.  
**Alexey V. Lysenko**, analysis of the results; writing an article.

#### Список литературы

1. Ониашвили О. Д. Некоторые динамические задачи теории оболочек. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 195 с.
2. Динамика и устойчивость сооружений: учеб. / В. В. Болотин, А. Н. Виноградов, Ю. Н. Горшков и др.; под ред. Ю. Н. Горшкова. М.: АСВ, 2017. 171 с.
3. Методы обнаружения и локализации латентных технологических дефектов бортовой радиоэлектронной аппаратуры / Н. К. Юрков, В. Б. Алмаметов, А. В. Загылкин, А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров; Пензенский гос. ун-т. Пенза, 2013. 184 с.
4. Методы автоматизированного синтеза компоновки блоков бортовой РЭС / С. И. Фролов, В. А. Трусов, Г. В. Таньков, Е. А. Данилова, Н. К. Юрков // Тр. междунар. симп. "Надежность и качество". 2018. Т. 2. С. 334–335.
5. Юрков Н. К., Михайлов В. С. Анализ возможностей по снижению объема испытаний на надежность // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 4 (28). С. 149–156. doi: 10.21685/2307-4205-2019-4-17
6. Фролов С. И., Данилова Е. А., Кочегаров И. И. Компоновка безрезонансных блоков БРЭС с использованием двухслойных печатных плат с жесткой основой // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 3. С. 73–81. doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-8
7. К вопросу моделирования собственных частот колебаний многогранных призм безрезонансных конструкций бортовых радиоэлектронных средств / С. И. Фролов, Е. А. Данилова, В. А. Трусов, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков // Вестн. Рязанского гос. радиотехн. ун-та. 2022. № 80. С. 151–162. doi: 10.21667/1995-4565-2022-80-151-162
8. Разработка методов проектирования безрезонансных тонкостенных цилиндрических конструкций бортовых радиоэлектронных систем / С. И. Фролов, Е. А. Данилова, Г. В. Таньков, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 14–24. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-2
9. Баженов В. А., Потапов В. И., Филатов И. А. Устойчивость и посткритическое поведение упругих систем. М.: АСВ, 2019. 322 с.
10. Методы решения задач упругости и пластичности: сб. ст. / ГГУ им. Н. И. Лобачевского; под ред. А. Г. Угодчикова. 1969. Вып. 89. 312 с.
11. Маквецов Е. Н. Математические основы цифрового моделирования вибраций в радиоконструкциях // Вопр. проектирования специальных радиоэлектронных устройств. 1972. Вып. 2. 254 с.
12. Каган Б. М., Тер-Микаэлян Т. М. Решение инженерных задач на цифровых вычислительных машинах. М.; Л.: Энергия, 1964. 592 с.
13. Слепян Л. И. Нестационарные упругие волны. Л.: Судостроение, 1972. 374 с.
14. Определение резонансных частот тонкостенных коробчатых конструкций бортовых радиоэлектронных средств методом конечных разностей / С. И. Фролов, Г. В. Таньков, И. И. Кочегаров, Е. А. Данилова, В. А. Трусов // Тр. междунар. симп. "Надежность и качество". 2020. Т. 1. С. 120–123.
15. Разработка методики определения резонансных частот тонкостенных цилиндрических конструкций бортовых радиоэлектронных средств / С. И. Фролов, Е. А. Данилова, Г. В. Таньков, И. И. Кочегаров, А. В. Григорьев // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1 (33). С. 102–113. doi: 10.21685/2307-4205-2021-1-10

### Информация об авторах

**Юрков Николай Кондратьевич** – доктор технических наук (2003), профессор (2001), заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры Пензенского государственного университета. Автор 833 научных работ. Сфера научных интересов – системный анализ; технология производства аппаратуры.

Адрес: Пензенский государственный университет, ул. Красная, д. 40, Пенза, 440026, Россия

E-mail: yurkov\_NK@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2425-3470>

**Данилова Евгения Анатольевна** – кандидат технических наук (2017), доцент (2023) кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры Пензенского государственного университета. Автор 158 научных работ. Сфера научных интересов – надежность радиоэлектронных средств; защита радиоэлектронных средств от внешних воздействий; численное моделирование.

Адрес: Пензенский государственный университет, ул. Красная, д. 40, Пенза, 440026, Россия

E-mail: siori@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4426-3668>

**Кочегаров Игорь Иванович** – кандидат технических наук (2005), доцент (2016) кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры Пензенского государственного университета. Автор 331 научной работы. Сфера научных интересов – информационные технологии проектирования; моделирование электронной аппаратуры; системный анализ; разработка встраиваемых систем.

Адрес: Пензенский государственный университет, ул. Красная, д. 40, Пенза, 440026, Россия

E-mail: kipra@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6821-5353>

**Горячев Николай Владимирович** – кандидат технических наук (2014), доцент (2023) кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры Пензенского государственного университета. Автор 248 научных работ. Сфера научных интересов – информационные технологии проектирования; тепловое моделирование электронной аппаратуры; разработка встраиваемых систем.

Адрес: Пензенский государственный университет, ул. Красная, д. 40, Пенза, 440026, Россия

E-mail: ra4foc@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5944-9636>

**Лысенко Алексей Владимирович** – кандидат технических наук (2014), доцент (2023) кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры Пензенского государственного университета. Автор 273 научных работ. Сфера научных интересов – моделирование механических воздействий на радиоэлектронные средства; системный анализ; надежность электронных средств.

Адрес: Пензенский государственный университет, ул. Красная, д. 40, Пенза, 440026, Россия

E-mail: lysenko\_av@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7324-0190>

---

### References

1. Oniashvili O. D. *Nekotorye dinamicheskie zadachi teorii obolochek* [Some Dynamic Problems of Shell Theory]. Moscow, *Izd-vo AN SSSR*, 1957, 195 p. (In Russ.)
2. Bolotin V. V., Vinogradov A. N., Gorshkov Yu. N. et al. *Dinamika i ustoychivost' sooruzhenii: uchebnik* [Dynamics and Stability of Structures]. Moscow, ASV Publishing House, 2017, 171 p. (In Russ.)
3. Yurkov N. K., Almametov V. B., Zatylnik A. V., Grigor'ev A. V., Kochegarov I. I. *Metody obnaruzheniya i lokalizatsii latentnykh tekhnologicheskikh defektov bortovoi radio-elektronnoi apparatury* [Methods for Detecting and Localizing Latent Technological Defects in Onboard Radio-Electronic Equipment]. Penza, *Penzenskii gosudarstvennyi universitet*, 2013, 184 p. (In Russ.)
4. Frolov S. I., Trusov V. A., Tan'kov G. V., Danilova E. A., Yurkov N. K. *Metody avtomatizirovannogo sinteza komponovki blokov bortovoi RES* [Methods of Automated Synthesis of the Layout of Onboard RES Units]. Proc. of the Intern. Symp. "Reliability and Quality". 2018, vol. 2, pp. 334–335. (In Russ.)
5. Yurkov N. K., Mikhailov V. S. Analysis of Opportunities to Reduce the Amount of Reliability Tests. Reliability and Quality of Complex Systems. 2019, no. 4 (28), pp. 149–156. (In Russ.) doi: 10.21685/2307-4205-2019-4-17
6. Frolov S. I., Danilova E. A., Kochegarov I. I. The Layout of on-Board Electronic Systems without Resonant Blocks Using Double-Layer Printed Circuit Boards with a Rigid Base. Reliability and Quality of Complex Systems. 2024, no. 3, pp. 73–81. (In Russ.) doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-8
7. Frolov S. I., Danilova E. A., Trusov V. A., Kochegarov I. I., Yurkov N. K. To the Question of Simulation of Natural Frequencies of Oscillations of Multifaced Prisms of Resonantless Structures of Onboard Radio-Electronic Equipment. *Vestnik of RSREU*. 2022, no. 80, pp. 151–162. doi: 10.21667/1995-4565-2022-80-151-162
8. Frolov S. I., Danilova E. A., Tankov G. V., Kochegarov I. I., Lysenko A. V. Development of Design Methods for Resonant Thin-Walled Cylindrical Structures of on-Board Electronic Systems. Reliability and Quality of Complex Systems. 2022, no. 2, pp. 14–24. (In Russ.)

doi:10.21685/2307-4205-2022-2-2

9. Bazhenov V. A., Potapov V. I., Filatov I. A. *Ustoichivost' i postkriticheskoe povedenie uprugikh sistem* [Stability and Postcritical Behavior of Elastic Systems]. Moscow, ASV Publishing House, 2019, 322 p. (In Russ.)

10. *Metody resheniya zadach uprugosti i plastichnosti* [Methods for Solving Elasticity and Plasticity Problems]. Collection of articles. Ed by A. G. Ugodchikova. *GGU im. N. I. Lobachevskogo*. 1969, vol. 89, 312 p. (In Russ.)

11. Makvetsov E. N. *Matematicheskie osnovy tsifrovogo modelirovaniya vibratsii v radiokonstruktsiyakh* [Mathematical Foundations of Digital Modeling of Vibrations in Radio Structures]. Design Issues of Special Electronic Devices. 1972, vol. 2, 254 p. (In Russ.)

12. Kagan B. M., Ter-Mikaelyan T. M. *Reshenie inzhenernykh zadach na tsifrovyykh vychislitel'nykh mashinakh* [Solving Engineering Problems on Digital Computers]. Moscow, Leningrad, *Energiya*, 1964, 592 p. (In Russ.)

13. Slepyan L. I. *Nestatsionarnye uprugie volny* [Unsteady Elastic Waves]. Leningrad, *Sudostroenie*, 1972, 374 p. (In Russ.)

14. Frolov S. I., Tan'kov G. V., Kochegarov I. I., Danilova E. A., Trusov V. A. *Opredelenie rezonansnykh chastot tonkostennykh korobchatykh konstruktivnykh sredstv radioelektronnykh sredstv metodom konechnykh raznostei* [Determination of Resonant Frequencies of Thin-Walled Box-Shaped Structures of Onboard Electronic Equipment Using the Finite Difference Method]. Proc. of the Intern. Symp. "Reliability and Quality". 2020, vol. 1, pp. 120–123. (In Russ.)

15. Frolov S. I., Danilova E. A., Tan'kov G. V., Kochegarov I. I., Grigor'ev A. V. Development of a Method for Determining the Resonant Frequencies of Thin-Walled Cylindrical Structures on-Board Electronic Equipment. Reliability and Quality of Complex Systems. 2021, no. 1 (33), pp. 102–113. (In Russ.)  
doi: 10.21685/2307-4205-2021-1-10

### Information about the authors

**Nikolay K. Yurkov**, Dr Sci. (2003), Professor (2001), Honored Scientist of the Russian Federation, Head of the Department of Design and Production of Radio Equipment of Penza State University. The author of 833 scientific publications. Area of expertise: systems analysis; radio equipment manufacturing technology.

Address: Penza State University, 40, Krasnaya St., Penza 440026, Russia

E-mail: yurkov\_NK@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2425-3470>

**Evgeniya A. Danilova**, Cand. Sci. (2017), Associate Professor (2023) of the Department of Design and Production of Radio Equipment of Penza State University. The author of 158 scientific publications. Area of expertise: reliability of electronic equipment; protection of electronic equipment from external influences; numerical modeling.

Address: Penza State University, 40, Krasnaya St., Penza 440026, Russia

E-mail: siori@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4426-3668>

**Igor I. Kochegarov**, Cand. Sci. (2005), Associate Professor (2016) of the Department of Design and Production of Radio Equipment of Penza State University. The author of 331 scientific publications. Area of expertise: information technologies in design; electronic equipment modeling; systems analysis; embedded systems development.

Address: Penza State University, 40, Krasnaya St., Penza 440026, Russia

E-mail: kipra@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6821-5353>

**Nikolay V. Goryachev**, Cand. Sci. (2014), Associate Professor (2023) of the Department of Design and Production of Radio Equipment of Penza State University. The author of 248 scientific publications. Area of expertise: information technology in design; thermal electronic equipment modeling; embedded systems development.

Address: Penza State University, 40, Krasnaya St., Penza 440026, Russia

E-mail: ra4foc@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5944-9636>

**Alexey V. Lysenko**, Cand. Sci. (2014) and Associate Professor (2023) of the Department of Design and Production of Radio Equipment of Penza State University. The author of 273 scientific publications. Area of expertise: modeling of mechanical effects on electronic devices; systems analysis; reliability of electronic devices.

Address: Penza State University, 40, Krasnaya St., Penza 440026, Russia

E-mail: lysenko\_av@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7324-0190>