

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕЗРЕЗОНАНСНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

С. И. Фролов<sup>1</sup>, Е. А. Данилова<sup>2</sup>, Г. В. Таньков<sup>3</sup>, И. И. Кочегаров<sup>4</sup>, А. В. Лысенко<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1</sup> sfrolov46@mail.ru, <sup>2</sup> siori@list.ru, <sup>3</sup> g.tankov43@mail.ru, <sup>4</sup> kipra@pnzgu.ru, <sup>5</sup> lysenko\_av@bk.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Основу несущих конструкций бортовых радиоэлектронных средств (БРЭС), как и многих других изделий машиностроения, составляют тонкостенные элементы – стержни, пластины, оболочки, которые должны обеспечить необходимую прочность, устойчивость и жесткость конструкции при заданных ограничениях по массе. При этом выбор конструктивных запасов всех параметров работоспособности элементов таких конструкций (коэффициентов безопасности, запасов прочности) должен обеспечить надежность равную или выше требуемой, которая может достигаться созданием безрезонансных конструкций в заданном диапазоне частот вибрации. Целью работы является разработка инженерной методики расчета необходимого запаса отстройки собственной частоты колебаний (СЧК) и ее практическое использование. *Материалы и методы.* В работе используются положения теории механических колебаний для получения аналитических выражений собственной частоты колебаний цилиндрической оболочки. Для численного решения используются методы конечных элементов и программный пакет ANSYS. *Результаты.* Предложены результаты расчетов СЧК тонкостенных конструкций БРЭС, позволяющие обоснованно выбрать размеры конструкции с точки зрения защиты от резонанса. Выполнены численные решения тестовых задач с использованием комплекса программ ANSYS, сделаны выводы и даны рекомендации по созданию безрезонансных в заданном диапазоне частот вибрации тонкостенных конструкций блоков БРЭС в форме круговых бочек. *Вывод.* Результаты работы представлены в виде рекомендаций по определению основных СЧК кожухов в виде круговых бочек и выбору на ранних стадиях проектирования конструктивных решений по созданию безрезонансных конструкций.

**Ключевые слова:** цилиндрическая оболочка, многогранная призма, собственная частота колебаний, математическое моделирование, вибрация, резонанс, защита от механических воздействий, тонкостенные конструкции

**Для цитирования:** Фролов С. И., Данилова Е. А., Таньков Г. В., Кочегаров И. И., Лысенко А. В. Разработка методов проектирования безрезонансных тонкостенных цилиндрических конструкций бортовых радиоэлектронных систем // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 14–24. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-2

## DEVELOPMENT OF DESIGN METHODS FOR RESONANT THIN-WALLED CYLINDRICAL STRUCTURES OF ON-BOARD ELECTRONIC SYSTEMS

S.I. Frolov<sup>1</sup>, E.A. Danilova<sup>2</sup>, G.V. Tan'kov<sup>3</sup>, I.I. Kochegarov<sup>4</sup>, A.V. Lysenko<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Penza State University, Penza, Russia  
<sup>1</sup> sfrolov46@mail.ru, <sup>2</sup> siori@list.ru, <sup>3</sup> g.tankov43@mail.ru, <sup>4</sup> kipra@pnzgu.ru, <sup>5</sup> lysenko\_av@bk.ru

**Abstract.** *Background.* The basis of the load-bearing structures of on-board electronic systems (OES), as well as many other engineering products, are thin-walled elements – rods, plates, shells, which should provide the necessary strength, stability and rigidity of the structure under given weight restrictions. At the same time, the choice of design margins for all performance parameters of elements of such structures (safety factors, safety margins) should ensure reliability equal to or higher than the required one, which can be achieved by creating resonance-free structures in a given vibration frequency range. The aim of the work is to develop an engineering methodology for calculating the necessary margin for detuning the natural frequency of oscillations and its practical use. *Materials and methods.* The paper uses the provisions of the theory of mechanical vibrations to obtain analytical expressions for the natural vibration frequency of a cylindrical shell. For the numerical solution, finite element methods and the ANSYS software

package are used. *Results.* The results of calculations of the natural frequency of vibrations of thin-walled structures of on-board radio-electronic equipment are proposed, which make it possible to reasonably select the dimensions of the structure in terms of protection against Numerical solutions of test problems are performed using the ANSYS software package, conclusions are drawn and recommendations are given for the creation of resonance-free in a given vibration frequency range of thin-walled structures of on-board radio-electronic equipment units in the form of circular barrels. *Conclusion.* The results of the work are presented in the form of recommendations for determining the main natural vibration frequencies of casings in the form of circular barrels and choosing design solutions for creating non-resonant structures at the early stages of designing.

**Keywords:** cylindrical shell, polyhedral prism, natural oscillation frequency, mathematical modeling, vibration, resonance, protection against mechanical impacts, thin-walled structures

**For citation:** Frolov S.I., Danilova E.A., Tan'kov G.V., Kochegarov I.I., Lysenko A.V. Development of design methods for resonant thin-walled cylindrical structures of on-board electronic systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(2):14–24. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-2

### Введение

Как известно, вибрации конструкции являются причиной 30–40 % всех отказов БРЭС главным образом из-за наличия резонансов тонкостенных элементов их конструкции и недостаточной эффективности применяемых методов снижения амплитуды вибрации с использованием амортизации и/или демпфирования, что следует отнести к конструктивным недоработкам. В то же время незаслуженно мало используется на практике метод отстройки резонансных частот конструкций за пределы частот вибрации.

Это, в частности, объясняется тем, что в качестве запаса отстройки принято использовать частотное отношение  $f_0/f \geq 2$ , где  $f_0$  – основная (минимальная) собственная частота колебаний, а  $f$  – частота возбуждения колебаний [1]. Обеспечение такого большого запаса отстройки делает конструирование безрезонансных тонкостенных конструкций крайне сложным. В частности, это относится к таким объемным конструкциям, как тонкостенные кожухи блоков БРЭС различной формы.

В данной статье приведены результаты исследований СЧК тонкостенных конструкций БРЭС в виде цилиндрических оболочек и рассмотрена возможность обеспечения необходимого запаса отстройки СЧК с использованием формы блока в виде круговой бочки (образующая – дуга окружности) [2]. Тестовые задачи с применением пакета программ ANSYS дают возможность предоставить рекомендации по конструированию безрезонансных кожухов БРЭС на ранних стадиях проектирования.

### Основная часть

Кожухи блоков БРЭС ограничивают их внутренний объем, защищая от воздействия факторов окружающей среды, и по технологическим соображениям обычно выполняются в виде прямоугольных параллелепипедов или других форм из плоских тонких пластин. Такие кожухи имеют резонансы в широком диапазоне частот, что во многих случаях отрицательно сказывается на надежности аппаратуры. Отстроить СЧК такого кожуха на практике оказывается трудной задачей, решение которой, как правило, достигается увеличением массы кожуха, например, увеличением толщины стенок кожуха или добавлением перемычек, как это показано на рис. 1 [3].

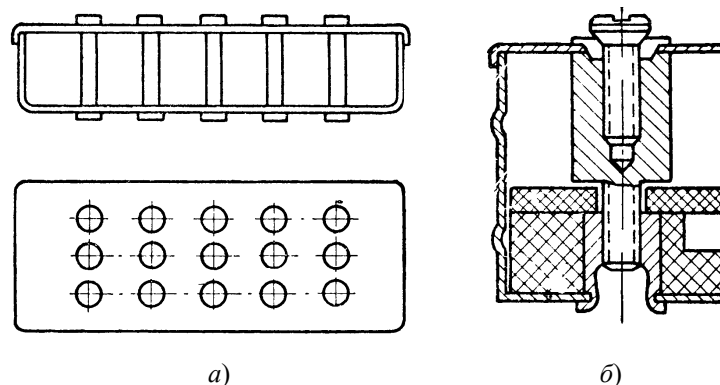


Рис. 1. Коробчатая конструкция кожуха блока с жесткими перемычками между стенками (а), конструкция перемычки (б)

В обоснованных случаях кожухи могут иметь формы отличные от параллелепипеда, в том числе с использованием оболочек различной кривизны. Например, это часто бывает в случае приборных отсеков авиационных ракет малой и средней дальности, где цилиндрический защитный кожух одновременно является обшивкой приборного отсека (рис. 2).



Рис. 2. Цилиндрическая форма блока БРЭС

Здесь важно отметить, что с точки зрения отстройки резонансных частот, цилиндрическая форма блока в сравнении с коробчатой формой и плоскими гранями, при сопоставимых по величине объемах и массе, обладает большей жесткостью, что позволяет создать безрезонансную конструкцию с меньшим весом и габаритами.

Действительно, в этом легко убедиться, выполнив расчеты СЧК кожухов с заземленными торцами в виде тонкостенного правильного параллелепипеда и тонкостенного цилиндра, имеющих одинаковую площадь поверхности (одинаковую массу при одинаковом материале одной толщины).

Задача нахождения СЧК правильного параллелепипеда сводится к определению СЧК прямоугольной пластины толщиной  $h$  со сторонами  $l$  и  $a$  ( $l \geq a$ ), аналитическое решение которой известно [4]:

$$f = \frac{\alpha_i h}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\mu^2)}}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\rho$  – плотность материала;  $l$ ,  $a$  – длина и ширина боковой грани параллелепипеда.

Частотный коэффициент  $\alpha_i$  основного обертона такой прямоугольной пластины определяется по формуле

$$\alpha_1 = 22,37 \sqrt{1 + 0,48l^2/a^2 + 0,19l^4/a^4}. \quad (2)$$

Для определения СЧК замкнутых круговых цилиндрических оболочек используется формула [4]

$$f_{и} = \frac{K_{mn}}{2\pi R} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad (3)$$

где  $R$  – радиус цилиндра;  $E$  – модуль Юнга;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\rho$  – плотность материала цилиндра.

Частотный коэффициент  $K_{mn}$  при  $\mu = 0,3$  определяется по формуле

$$K_{mn} = 2,33 \cdot \left(\frac{l}{R}\right)^{-0,935} \cdot \left(\frac{R}{h}\right)^{-0,45},$$

где  $l$  – длина цилиндра;  $h$  – толщина стенок цилиндра.

Для всех расчетов принимаем: периметр 600 мм; длина  $l = 240$  мм; толщина стенки  $h = 1$  мм; механические характеристики материала:

$$E = 1,96 \cdot 10^{11} \text{ Па}, \mu = 0,3, \rho = 7700 \text{ кг/м}^3.$$

Результаты расчетов основных СЧК и соответствующих собственных форм колебаний, найденных методом конечных элементов (МКЭ) программного комплекса *ANSYS*, приведены ниже (рис. 3).

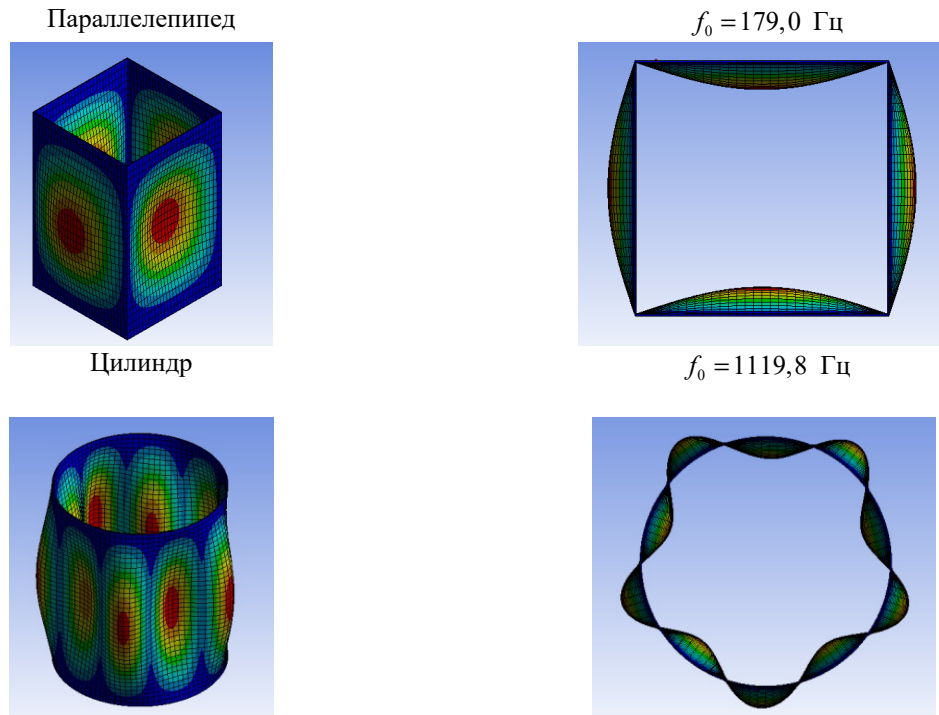


Рис. 3. СЧК и соответствующие им формы собственных колебаний

Найденные значения СЧК сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов СЧК

Параметры параллелепипеда			$f$ , гц		
К-во граней	Сторона, мм	Угол, °	Формула	Ансис	%
4	150	90	175,9	179,0	1,71
Цилиндр			1114,7	1119,8	0,46

Как следует из результатов расчетов, основные СЧК тонкостенных конструкций в виде цилиндра примерно в 6 раз больше, чем СЧК в виде параллелепипеда той же массы, что надо учитывать при проектировании объемных безрезонансных конструкций.

Однако из-за требуемого запаса отстройки и жестких ограничений по массе использование цилиндрической формы кожуха блоков при конструировании БРЭС не всегда обеспечивает создание безрезонансной конструкции, что делает актуальным поиск способов дальнейшего повышения жесткости кожуха путем подбора ему более жесткой формы с минимальным увеличением массы.

Здесь уместно обратиться к результатам эволюционного решения этой задачи в природе. Множество даже самых современных технических достижений человечества тем или иным образом берут свое начало из того, что встречается в природе. Как говорится: «Что бы вы не делали, природа это уже сделала, причем лучше». Эволюция – это крайне длительный и сложный процесс, и адаптационные изменения, приобретенные в ходе эволюции, всегда оправданы и имеют вполне практическое применение. В нашем случае наиболее подходящий пример – жуки и форма их тела.

Необычайная приспособляемость жуков к самым различным условиям жизни во многом объясняется строением их тела.

На рис. 4 приведены примеры типичного строения тела жуков, особенностью которого является форма защитного покрова (кожуха), обеспечивающая необходимую его жесткость при минимальной массе. Эта подсказка природы приводит нас к мысли об актуальности исследований основных СЧК кожухов БРЭС в форме круговой бочки как наиболее близкого аналога формы строения тела жуков с учетом требований технологичности изготовления на производстве.



Рис. 4. Типичное строение тела жуков

Из известных авторам работ похожие исследования приведены в работе [5], где определялись основные СЧК круговых цилиндрических оболочек с начальными искривлениями продольных образующих в виде параболы (рис. 5). Исходя из условия, что амплитуда отклонения от формы цилиндра  $a \ll r_1$ , и используя уравнения колебаний цилиндрических оболочек, получены результаты, на основе которых сделан вывод, что для выпуклых оболочек с увеличением амплитуды отклонения их минимальная СЧК растет.

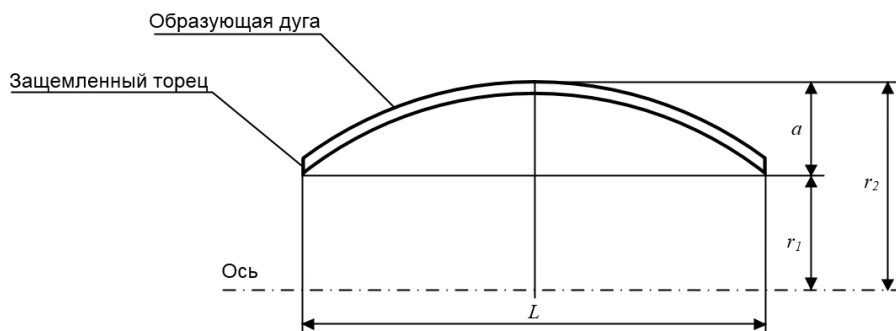


Рис. 5. Цилиндрические оболочки с начальными искривлениями образующей

Хотя этот результат сам по себе не имеет для конструктора практического значения, но для нас он подтверждает целесообразность проведения дальнейших исследований СЧК круговых бочек.

В настоящей работе исследования СЧК кожухов БРЭС в виде круговых бочек проводились на основе метода МКЭ с использованием комплекса программ ANSYS. Эскиз исследованных круговых бочек представлен на рис. 6. Расчеты выполнены для стальных кожухов трех вариантов длины с одинаковым радиусом  $r_1 = 100$  мм и толщиной стенок  $h = 1$  мм.

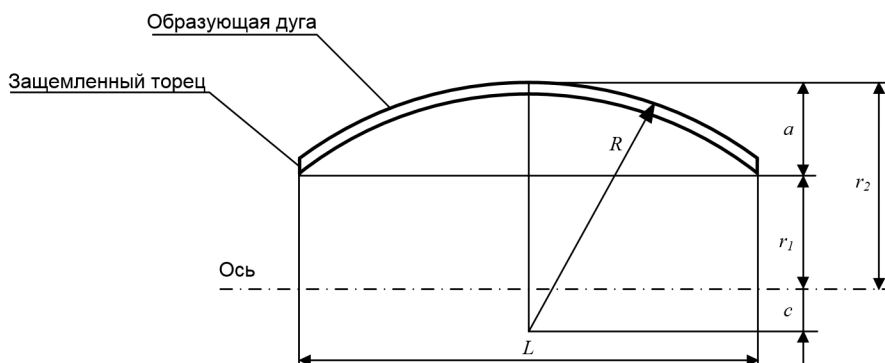


Рис. 6. Эскиз кожухов БРЭС в виде круговых бочек

Остальные размеры приведены ниже в табл. 2–4 (размеры в таблицах приведены в см), где  $R = \left(a^2 + (L/2)^2\right) / 2a$ .

Таблица 2

 Геометрические характеристики кожуха длиной  $L = 18$  см

Номер кожуха	$r_2$	$a = r_2 - r_1$	$R$	$c = R - r_2$
0	10	0		
1	10,5	0,5	81,25	70,75
2	11	1	41,00	30,00
3	11,5	1,5	27,75	16,25
4	12	2	21,25	9,25

Таблица 3

 Геометрические характеристики кожуха длиной  $L = 24$  см

Номер кожуха	$r_2$	$a = r_2 - r_1$	$R$	$c = R - r_2$
0	10	0		
1	10,5	0,5	144,25	133,75
2	11	1	72,50	61,50
3	11,5	1,5	48,75	37,25
4	12	2	37,00	25,00

Таблица 4

 Геометрические характеристики кожуха длиной  $L = 30$  см

Номер кожуха	$r_2$	$a = r_2 - r_1$	$R$	$c = R - r_2$
0	10	0		
1	10,5	0,5	225,25	214,75
2	11	1	113,00	102,00
3	11,5	1,5	75,75	64,25
4	12	2	57,25	45,25

Максимальное значение  $r_2 = 120$  мм выбрано из условия ограничений по увеличению массы кожуха в пределах до 20 %.

Результат расчета с использованием комплекса программ *ANSYS* для одного из вариантов круговой бочки приведен на рис. 7.

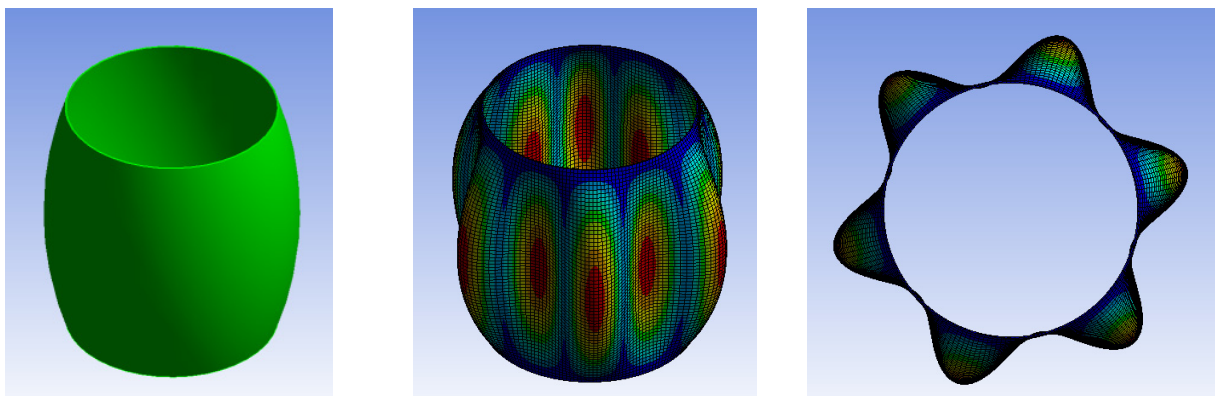


Рис. 7. Форма круговой бочки с размерами  $L = 240$  мм,  $r_1 = 100$  мм,  $r_2 = 120$  мм и собственная форма колебаний ее основной СЧК равной  $f_6 = 2460,3$  Гц

Все результаты расчетов основных СЧК круговых бочек приведены в табл. 5–7 ниже, где вариант № 0 соответствует цилиндру и его основная СЧК обозначена  $f_{ц}$ .

Таблица 5

Результаты расчетов основных СЧК для кожуха длиной  $L = 18$  см

Номер кожуха	$r_2$ , см	$r_2/r_1$	Масса, кг	СЧК, Гц	$f_6/f_{ц}$
0	10	1,00	0,871	1425,1	1,00
1	10,5	1,05	0,897	1850,9	1,30
2	11	1,10	0,932	2529,0	1,77
3	11,5	1,15	0,971	3273,0	2,30
4	12	1,20	1,014	4016,8	2,82

Таблица 6

Результаты расчетов основных СЧК для кожуха длиной  $L = 24$  см

Номер кожуха	$r_2$ , см	$r_2/r_1$	Масса, кг	СЧК, Гц	$f_6/f_{ц}$
0	10	1,00	1,161	1089,0	1,00
1	10,5	1,05	1,195	1306,2	1,20
2	11	1,10	1,238	1637,0	1,50
3	11,5	1,15	1,285	2037,0	1,87
4	12	1,20	1,334	2460,3	2,26

Таблица 7

Результаты расчетов основных СЧК для кожуха длиной  $L = 30$  см

Номер кожуха	$r_2$ , см	$r_2/r_1$	Масса, кг	СЧК, Гц	$f_6/f_{ц}$
0	10	1,00	1,451	884,0	1,00
1	10,5	1,05	1,494	997,5	1,13
2	11	1,10	1,545	1198,8	1,36
3	11,5	1,15	1,6	1443,6	1,63
4	12	1,20	1,678	1707,7	1,93

Как следует из вышеприведенных таблиц, кожух блоков БРЭС в виде круговой бочки с приемлемым на практике отношением  $r_2/r_1 = 1,2$  при незначительном увеличении массы имеет основную СЧК в 2–3 раза выше, чем у цилиндрической формы.

Полученные результаты позволяют построить полуэмпирическое выражение для расчета СЧК круговых бочек.

Так, введя обозначение  $K_6 = f_6/f_{ц}$  и с учетом выражения (3), формула для расчета СЧК круговых бочек будет выглядеть следующим образом:

$$f_{ц} = K_6 \frac{K_{mn}}{2\pi R} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad (4)$$

где для круговых бочек с  $R = r_1$  и отношением размеров  $r_1/h = 100$  могут быть использованы значения  $K_6$ , приведенные в табл. 8.

Анализ вышеприведенных результатов расчета СЧК стальных кожухов блоков БРЭС в виде круговой бочки с отношением  $r_2/r_1 = 1,2$  при  $r_1 = 100$  мм показывает, что при верхней границе диапазона вибрации 2000 Гц и запасе отстройки  $f_0/f \geq 2$ , считать безрезонансным можно только вариант кожуха с длиной  $L = 180$  мм. Для кожухов при  $L > 180$  мм повышение СЧК может быть достигнуто увеличением отношения  $r_2/r_1$  или, например, с использованием кольцевого ребра, расположенного в середине длины круговой бочки.

Пробный расчет СЧК с использованием комплекса программ ANSYS выполнен для круговой бочки с поперечным кольцевым ребром, эскиз которой представлен на рис. 8.

Значение  $K_6$  для различных соотношений  $r_2/r_1$  и  $L/r_1$

$K_6 = f_6/f_u$	$r_1/h = 100$	$r_2/r_1$				
		1	1,05	1,1	1,15	1,2
$L/r_1$	1,5	1	1,359	1,956	2,585	3,185
	1,6	1	1,338	1,891	2,484	3,056
	1,7	1	1,318	1,830	2,388	2,934
	1,8	1	1,298	1,773	2,297	2,818
	1,9	1	1,280	1,719	2,212	2,709
	2,0	1	1,262	1,668	2,132	2,606
	2,1	1	1,245	1,621	2,057	2,510
	2,2	1	1,229	1,577	1,988	2,419
	2,3	1	1,213	1,537	1,924	2,336
	2,4	1	1,199	1,500	1,865	2,259
	2,5	1	1,185	1,467	1,812	2,188
	2,6	1	1,172	1,437	1,764	2,124
	2,7	1	1,159	1,410	1,721	2,066
	2,8	1	1,148	1,387	1,684	2,014
	2,9	1	1,137	1,367	1,652	1,970
3	1	1,127	1,351	1,625	1,931	

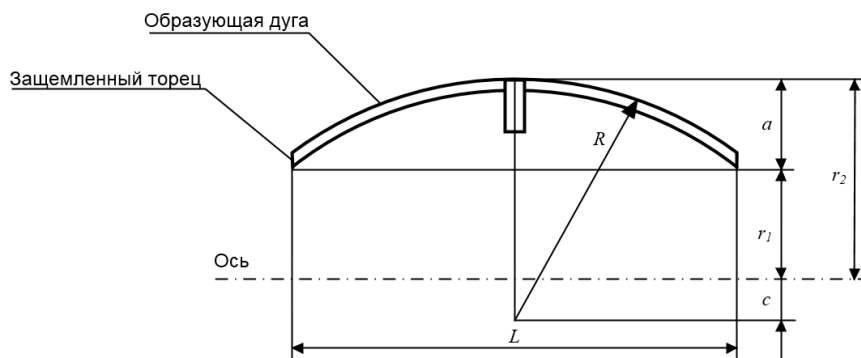


Рис. 8. Эскиз круговой бочки с ребром

На рис. 9 приведены результаты расчетов для ранее приведенной круговой бочки 2-го варианта при  $L = 240$  мм,  $r_2/r_1 = 1,2$  и ребром с толщиной  $H = 2$  мм и высотой ребра  $l = 20$  мм.

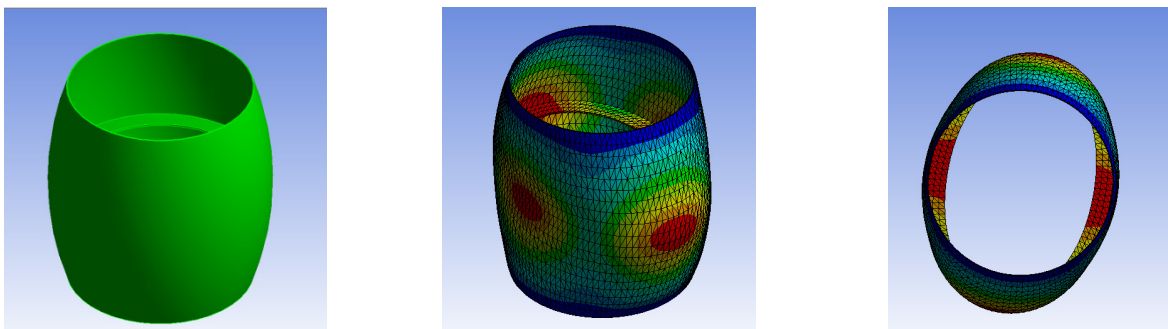


Рис. 9. Форма круговой бочки с кольцевым ребром и собственная форма колебаний ее основной СЧК равной  $f_6 = 2878,7$  Гц

Исходя из результатов расчета, можно сделать вывод, что при верхней границе диапазона вибрации 2000 Гц и запасе отстройки  $f_0/f \geq 2$  рассматриваемый вариант кожуха не является безрезонансным и должен быть отклонен. Такой вывод показывает, какую важную роль играет нормативный уровень запаса отстройки для выбора оптимального конструкторского решения при создании безрезонансных конструкций и какую отрицательную роль играет его завышенная величина.



То, что используемый запас отстройки  $f_0/f \geq 2$  завышен, показано в работе [6]. Здесь для плат из стеклотекстолита экспериментально найдена величина запаса отстройки  $f_0/f \geq 1,2 \dots 1,3$ . В судостроении применяется почти такой же запас отстройки  $f_0/f \geq 1,25 \dots 1,3$  [7]. При таких уровнях запаса отстройки рассматриваемый кожух с поперечным кольцевым ребром будет считаться безрезонансным и использован при проектировании.

Учитывая важность для принятия оптимальных конструктивных решений при создании безрезонансных конструкций, проблема величины запаса отстройки требует дополнительных исследований.

### Заключение

1. В настоящей работе выполнено исследование СЧК тонкостенных кожухов для блоков БРЭС в виде круговых бочек.

2. На основе проведенных исследований даны рекомендации по определению основных СЧК кожухов в виде круговых бочек и выбору на ранних стадиях проектирования конструктивных решений по созданию безрезонансных конструкций.

3. Выполненные расчеты с использованием комплекса программ *ANSYS* показали важность компьютерного моделирования в исследованиях технически сложных задач конструирования надежных БРЭС.

### Список литературы

1. Талицкий Е. Н. Защита электронных средств от механических воздействий. Владимир : ВГУ, 2001.
2. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М. : Наука, 1967.
3. Карпушин В. Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре. М. : Советское радио, 1971.
4. Фролов С. И., Данилова Е. А., Таньков Г. В. [и др.]. Разработка методики определения резонансных частот тонкостенных цилиндрических конструкций бортовых радиоэлектронных средств // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 102–113. doi: 10.21685/2307-4205-2021-1-10
5. Кармишин А. В. [и др.]. Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций. М. : Машиностроение, 1975.
6. Ухин В. А. Автоматизация проектирования виброзащиты электронной аппаратуры методом частотной отстройки. Владимир, 2007.
7. Пилипенко В. В., Переверзев Е. С., Федоров В. М. Коэффициенты безопасности и прочность конструкций // Техническая механика. 2009. № 1.
8. Таньков Г. В., Трусов В. А. Модельные и стендовые методы определения амплитудно-частотных характеристик плат БРЭА // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 304–307.
9. Данилова Е. А., Таньков Г. В., Трусов В. А. [и др.]. Исследование динамики печатных плат радиоэлектронных средств : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. 116 с.
10. Таньков Г. В., Юрков Н. К., Данилова Е. А. К вопросу построения конечно-разностных моделей пластинчатых конструкций РЭС : итоги прошлого и проблемы настоящего века. 2022. Т. 11, № 1. С. 39–42.
11. Рыбаков И. М., Гришко А. К., Кочегаров И. И. Выбор и обоснование способов защиты сложных изделий РЭА от виброперегрузок // Современные информационные технологии. 2018. № 28. С. 56–60.
12. Свободные колебания круговой цилиндрической оболочки, заземленной по торцам. URL: [scadsoft.com/tests\\_scad/index/test/77](http://scadsoft.com/tests_scad/index/test/77)
13. Юрков Н. К., Михайлов В. С., Трусов В. А. Оценка и прогнозирование остаточного ресурса по результатам биномиальных испытаний, не давших отказы // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 3. С. 62–69. doi: 10.21685/2307-4205-2019-3-7
14. Дяченко И. А., Миронов А. А., Свердлик Ю. М. Сравнительный анализ теории и конечно-элементных моделей расчета свободных колебаний цилиндрических оболочек // Транспортные системы. 2019. № 39.

### References

1. Talitskiy E.N. *Zashchita elektronnykh sredstv ot mekhanicheskikh vozdeystviy = Protection of electronic means from mechanical influences*. Vladimir: VGU, 2001. (In Russ.)
2. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov = Handbook of Mathematics for engineers and students of higher education institutions*. Moscow: Nauka, 1967. (In Russ.)
3. Karpushin V.B. *Vibratsii i udary v radioapparature = Vibrations and shocks in radio equipment*. Moscow: Sovetskoe radio, 1971. (In Russ.)

4. Frolov S.I., Danilova E.A., Tan'kov G.V. [et al.]. Development of a methodology for determining the resonant frequencies of thin-walled cylindrical structures of onboard radio-electronic means. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(1):102–113. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-10
5. Karmishin A.V. [et al.]. *Statika i dinamika tonkostennykh obolocheknykh konstruksiy = Statics and dynamics of thin-walled shell structures*. Moscow: Mashinostroenie, 1975. (In Russ.)
6. Ukhin V.A. *Avtomatizatsiya proektirovaniya vibrozashchity elektronnoy apparatury metodom chastotnoy otstroyki = Automation of design of vibration protection of electronic equipment by the method of frequency tuning*. Vladimir, 2007. (In Russ.)
7. Pilipenko V.V., Pereverzev E.S., Fedorov V.M. Safety coefficients and structural strength. *Tekhnicheskaya mekhanika = Technical Mechanics*. 2009;(1). (In Russ.)
8. Tan'kov G.V., Trusov V.A. Model and bench methods for determining the amplitude-frequency characteristics of BRAA boards. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;1:304–307. (In Russ.)
9. Danilova E.A., Tan'kov G.V., Trusov V.A. [et al.]. *Issledovanie dinamiki pechatnykh plat radioelektronnykh sredstv: monografiya = Investigation of the dynamics of printed circuit boards of electronic means : monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2016:116. (In Russ.)
10. Tan'kov G.V., Yurkov N.K., Danilova E.A. On the issue of constructing finite-difference models of plate structures of RES. *KhKhI: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego veka = XXI: results of the past and problems of the present century*. 2022;11(1):39–42. (In Russ.)
11. Rybakov I.M., Grishko A.K., Kochegarov I.I. The choice and justification of ways to protect complex REA products from vibration overload. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies*. 2018;(28):56–60. (In Russ.)
12. *Svobodnye kolebaniya krugovoy tsilindricheskoy obolochki, zashchemlennoy po tortsam = Free vibrations of a circular cylindrical shell, pinched at the ends*. (In Russ.). Available at: [scadsoft.com/tests\\_scad/index/test/77](http://scadsoft.com/tests_scad/index/test/77)
13. Yurkov N.K., Mikhaylov V.S., Trusov V.A. Evaluation and prediction of the residual resource based on the results of binomial tests that did not give failures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(3):62–69. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2019-3-7
14. Dyachenko I.A., Mironov A.A., Sverdlik Yu.M. Comparative analysis of the theory and finite element models for calculating free vibrations of cylindrical shells. *Transportnye sistemy = Transport systems*. 2019;(39). (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Сергей Иванович Фролов

кандидат технических наук,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: sfrolov46@mail.ru

#### Евгения Анатольевна Данилова

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

#### Георгий Васильевич Таньков

кандидат технических наук,  
доцент кафедры конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: g.tankov43@mail.ru

#### Sergei I. Frolov

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

#### Evgeniya A. Danilova

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

#### Georgiy V. Tan'kov

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

**Игорь Иванович Кочегаров**

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

**Алексей Владимирович Лысенко**

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

**Igor' I. Kochegarov**

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

**Alexey V. Lysenko**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of radio equipment design and production,  
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 15.12.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 10.01.2022**

**Принята к публикации/Accepted 15.02.2022**