

## МОДЕЛИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ\*

И. А. Лушпа, В. В. Жаднов

В процессе эксплуатации большинство видов электронных средств (ЭС) подвергается воздействиям вибрации. Частота и ускорение вибрационных воздействий могут быть достаточно разнообразными в зависимости от источников воздействия и их расположения относительно конструкций ЭС, поэтому конструкции ЭС, работающие в условиях вибрационных воздействий, должны отвечать требованиям прочности и устойчивости. Тем не менее в распределении эксплуатационных отказов ЭС по видам внешних воздействий, приведенном в [1], отказы из-за воздействия вибрации могут достигать 28 % (рис. 1).

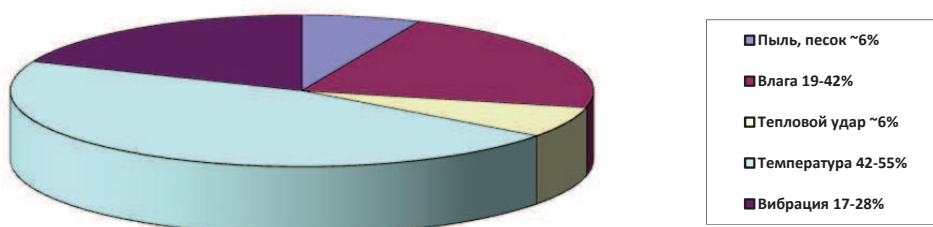


Рис. 1. Распределение отказов ЭС по видам воздействий

Одной из более эффективных мер борьбы с вибрациями является виброзащита ЭС с помощью различных систем виброизоляции, сущность которой заключается в том, что между ЭС и объектом установки помещаются устройства – виброизоляторы, которые ослабляют вибрационные воздействия на конструкцию.

Амортизатор (виброизолятор) представляет собой конструкцию, объединяющую упругий и демпфирующий элемент. Упругие силы в амортизаторе создаются стальными пружинами, упругой составляющей жесткости резиновых или полимерных элементов, упругостью металлорезины или троса. Силы сопротивления (демпфирование) в конструкции амортизатора образуются в результате сухого трения в материале упругого и демпфирующего элементов и вязкого трения.

В зависимости от типа упругого элемента и способа демпфирования виброизоляторы подразделяют на следующие группы: резинометаллические; пружинные с воздушным демпфированием; пружинные с фрикционным демпфированием; цельнометаллические со структурным демпфированием [2]. На рис. 2 в качестве примера приведен внешний вид виброизолятора типа ДО.



Рис. 2. Виброизолятор типа ДО

\* Данное научное исследование (№ 14-05-0038) выполнено при поддержке Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2014 г.

Основные технические характеристики виброизоляторов типа ДО сведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Технические характеристики виброизоляторов типа ДО

| Марка | Нагрузка Р, Н |       | Вертикальная жесткость, Н/см | Высота в свободном состоянии | Осадка пружины под нагрузкой, мм |       | Число рабочих витков | Масса, кг |
|-------|---------------|-------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------|----------------------|-----------|
|       | Раб.          | Пред. |                              |                              | Раб.                             | Пред. |                      |           |
| ДО-38 | 122           | 152   | 45                           | 72                           | 27                               | 33,7  | 5,6                  | 0,3       |
| ДО-39 | 219           | 273   | 61                           | 92,5                         | 36                               | 45    | 5,6                  | 0,4       |
| ДО-40 | 339           | 424   | 81                           | 113                          | 41,7                             | 52    | 5,6                  | 1         |
| ДО-41 | 540           | 674   | 124                          | 129                          | 43,4                             | 54    | 5,6                  | 1         |
| ДО-42 | 942           | 1177  | 165                          | 170                          | 57,2                             | 72    | 5,6                  | 1,8       |
| ДО-43 | 1648          | 2060  | 294,3                        | 192                          | 56                               | 70    | 5,6                  | 2,4       |
| ДО-44 | 2384          | 2979  | 357                          | 226                          | 66,5                             | 83    | 5,6                  | 3,65      |
| ДО-45 | 3728          | 4660  | 441,5                        | 281                          | 84,5                             | 106   | 5,6                  | 6,45      |

Таблица 2

Геометрические характеристики виброизоляторов типа ДО

| Марка | Размеры, мм |                |     |                 |    |                |                |
|-------|-------------|----------------|-----|-----------------|----|----------------|----------------|
|       | A           | A <sub>1</sub> | B   | D <sub>cp</sub> | d  | d <sub>1</sub> | d <sub>2</sub> |
| ДО-38 | 100         | 70             | 60  | 30              | 3  | 12             | 8,5            |
| ДО-39 | 110         | 80             | 70  | 40              | 4  | 12             | 8,5            |
| ДО-40 | 130         | 100            | 90  | 50              | 5  | 12             | 8,9            |
| ДО-41 | 130         | 100            | 90  | 54              | 6  | 14             | 10,5           |
| ДО-42 | 150         | 120            | 110 | 72              | 8  | 14             | 10,5           |
| ДО-43 | 160         | 130            | 120 | 80              | 10 | 14             | 10,5           |
| ДО-44 | 180         | 150            | 140 | 96              | 12 | 14             | 10,5           |
| ДО-45 | 220         | 180            | 170 | 120             | 15 | 16             | 12,5           |

П р и м е ч а н и я:

1. Деформация (осадка пружины) под нагрузкой, отличающейся от указанной в таблице, изменяется пропорционально нагрузке.

2. Для виброизоляторов всех типов общее число витков пружины равно 6,5.

3. Для виброизоляторов ДО-38, ДО-39  $S = 2$  мм, для остальных виброизоляторов  $S = 3$  мм,  $S_1$  равно соответственно 5 и 10 мм. В резиновых прокладках во всех случаях  $d_1 = d_2 + 3,5$  мм.

На рис. 3 приведен эскиз конструкции виброизолятора типа ДО.

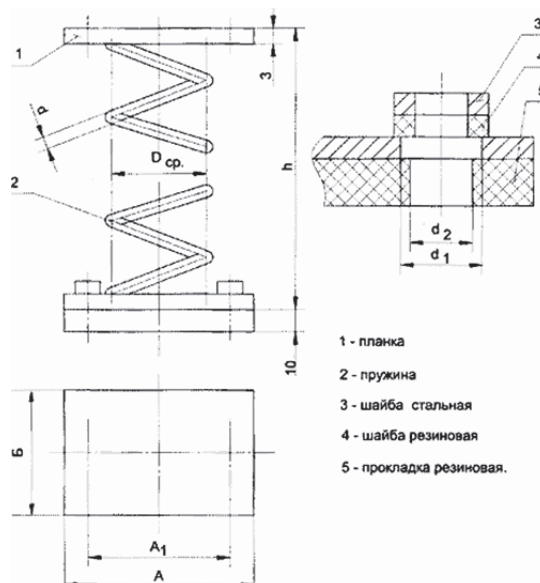


Рис. 3. Конструкция виброизолятора ДО

Как видно из рис. 3, основным элементом виброизолятора ДО является пружина, изготовленная из стали марки 65 [3], поэтому его характеристики надежности в значительной степени определяются надежностью именно этого элемента. По классификации ГОСТ 27.003 [4] пружины относятся к изделиям общего назначения вида I (высоконадежное комплектующее изделие межотраслевого применения), непрерывного длительного применения, невосстанавливаемое, необслуживаемое, переход которого в предельное состояние не ведет к катастрофическим последствиям, изнашиваемое, стареющее при хранении. Для таких изделий нормируются следующие показатели надежности:

- интенсивность отказов –  $\lambda$ ;
- средний ресурс –  $T_{p.c.p.}$ ;
- средний срок сохраняемости –  $T_{c.c.p.}$ ;

Пусть требуемое значение  $\lambda$  виброизолятора ДО-38 составляет  $5 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$ .

Рассмотрим расчет интенсивности отказа пружины виброизолятора ДО-38 при номинальной нагрузке и следующих воздействиях:

- амплитуда ускорения вибрации:  $40 \text{ м/с}^2$ ;
- диапазон частот: от 1 до 300 Гц;
- рабочая температура:  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- предельная температура:  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

что соответствует классу 1, группе 1.9 «Аппаратура, базирующаяся на железнодорожных платформах» по классификации ГОСТ РВ 20.39.304 [5].

Выбор методов расчета показателей надежности механических и электромеханических элементов, применяемых на практике, весьма ограничен [6–8]. Для расчета воспользуемся методикой, приведенной в [10], в соответствии с которой математическая модель интенсивности отказов пружины имеет следующий вид:

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_0 \cdot a_1, \quad (1)$$

где  $\lambda_0$  – интенсивность отказов пружины в номинальном режиме и нормальных условиях (температура окружающей среды  $20 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ; относительная влажность воздуха 30...70 %; атмосферное давление  $0,825 \dots 1,06 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; отсутствие вибрации и ударов);  $a_1$  – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности пружины, условия производства и эксплуатации пружины.

Значение коэффициента  $a_1$  рассчитывается по формуле

$$a_1 = K_{11} \cdot K_{12} \cdot K_{13} \cdot K_{14} \cdot K_{15}, \quad (2)$$

где  $K_{11}$  – коэффициент, учитывающий воздействие вибрации;  $K_{12}$  – коэффициент, учитывающий воздействие ударов;  $K_{13}$  – коэффициент, учитывающий воздействие климата;  $K_{14}$  – коэффициент, учитывающий воздействие качества обслуживания;  $K_{15}$  – коэффициент, учитывающий воздействие качества изготовления.

Значения коэффициентов  $K_{11} - K_{14}$ , полученные по данным таблиц, приведенных в [9], представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения поправочных коэффициентов формулы (2)

| Коэффициент | Классификационный признак  | Значение |
|-------------|--|----------|
| $K_{11}$    | Предприятия металлургические тяжелого машиностроения.<br>Железнодорожный транспорт (неамортизированная аппаратура) | 8,0      |
| $K_{12}$    |  | 4,0      |
| $K_{13}$    | Климат умеренный, средняя полоса<br>(не отапливаемое, негерметизированное помещение)                               | 1,3      |
| $K_{14}$    | Транспорт  | 1,5      |
| $K_{15}$    |  | 0,5      |

Значение  $\lambda_0$ , приведенное в [9] для класса «Пружины», составляет  $0,05 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ .

Тогда эксплуатационная интенсивность отказов пружины виброизолятора ДО-38 равна

$$\lambda_3 = 1,56 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Полученное значение  $\lambda_3$  превышает заданное, что требует принятия мер по повышению безотказности.

Анализ данных табл. 3 показывает, что наибольшее влияние на величину  $\lambda$  оказывают коэффициенты  $K_{11}$  и  $K_{12}$ . Однако снизить их значения путем использования виброизолятора ДО другого номинала невозможно, так как при использовании этой методики значения коэффициентов  $K_{11}$  и  $K_{12}$  не изменятся, т.к. зависят от признака «Железнодорожный транспорт» (см. табл. 3).

Поэтому воспользуемся методикой, приведенной в стандарте [11]. Математическая модель интенсивности отказов пружины ( $\lambda_{sp}$ ) имеет следующий вид:

$$\lambda_{sp} = \lambda_{sp,b} \cdot C_G \cdot C_{DW} \cdot C_{DC} \cdot C_N \cdot C_Y \cdot C_L \cdot C_K \cdot C_{CS} \cdot C_R \cdot C_M, \quad (3)$$

где  $\lambda_{sp,b}$  – базовая интенсивность отказов пружины;  $C_G$ ,  $C_{DW}$ ,  $C_{DC}$ ,  $C_N$ ,  $C_Y$ ,  $C_L$ ,  $C_K$ ,  $C_{CS}$ ,  $C_R$ ,  $C_M$  – поправочные коэффициенты.

На рис. 4 приведен эскиз конструкции винтовой пружины сжатия.

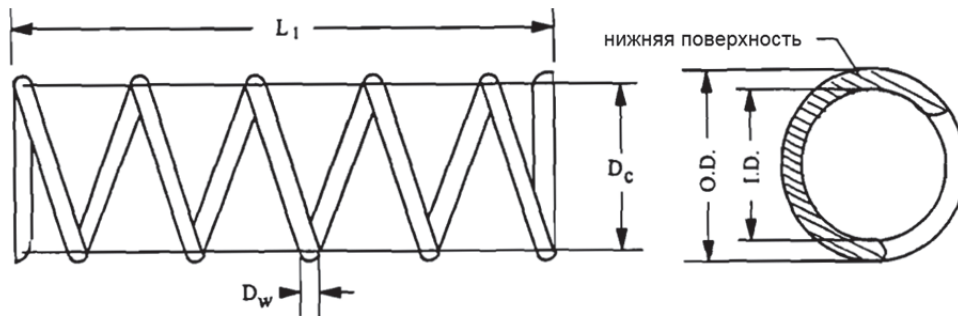


Рис. 4. Винтовая пружина сжатия

Значение коэффициента  $C_G$ , учитывающего величину модуля жесткости материала, рассчитывается по формуле

$$C_G = \left( \frac{G_M}{11,5 \cdot 10^6} \right)^3, \quad (4)$$

где  $C_M$  – модуль жесткости материала пружины.

Значение коэффициента  $C_{DW}$ , учитывающего величину диаметра нити, рассчитывается по формуле

$$C_{DW} = \left( \frac{D_W}{0,085} \right)^3, \quad (5)$$

где  $D_W$  – диаметр нити (см. рис. 4).

Значение коэффициента  $C_{DC}$ , учитывающего величину диаметра витка, рассчитывается по формуле

$$C_{DC} = \left( \frac{0,58}{D_C} \right)^6, \quad (6)$$

где  $D_C$  – средний диаметр пружины (см. рис. 4).

Значение коэффициента  $C_N$ , учитывающего количество активных витков, рассчитывается по формуле

$$C_N = \left( \frac{14}{N_A} \right)^3, \quad (7)$$

где  $N_A$  – количество активных витков.

Значение коэффициента  $C_Y$ , учитывающего сопротивление растяжению материала пружины, рассчитывается по формуле

$$C_Y = \left( \frac{190}{T_S} \right)^3, \quad (8)$$

где  $T_S$  – предел прочности материала на разрыв.

Значение коэффициента  $C_L$ , учитывающего деформацию (осадку пружины), рассчитывается по формуле

$$C_L = \left( \frac{L_1 - L_2}{1,07} \right)^3, \quad (9)$$

где  $L_1$  – длина пружины в свободном состоянии (см. рис. 4);  $L_2$  – длина пружины под рабочей нагрузкой.

Значение коэффициента  $C_K$ , учитывающего воздействие сжатия пружины, рассчитывается по формуле

$$C_K = \left( \frac{K_W}{1,219} \right)^3, \quad (10)$$

где  $K_W = \frac{4 \cdot r - 1}{4 \cdot r - 4} + \frac{0,616}{r}$ ,  $r = \frac{D_C}{D_W}$ .

Значение коэффициента  $C_{CS}$ , учитывающего воздействие частоты нагружения пружины, рассчитывается по формуле

$$C_{CS} = \frac{CR}{300}, \quad (11)$$

где  $CR$  – частота нагрузки пружины.

Численные значения параметров, необходимых для расчетов коэффициентов  $C_G$ ,  $C_{DW}$ ,  $C_{DC}$ ,  $C_N$ ,  $C_Y$ ,  $C_L$ ,  $C_K$ ,  $C_{CS}$ ,  $C_R$  и  $C_M$ , приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения параметров, используемых в формулах (4)-(11)

| Обозначение    | Наименование                        | Значение | Ед. измерения       | Примечание        |
|----------------|-------------------------------------|----------|---------------------|-------------------|
| $D_W (d)$      | Диаметр нити                        | 3        | мм                  | Таблица 2         |
| $D_C (D_{cp})$ | Диаметр пружины                     | 30       | мм                  | Таблица 2         |
| $N_A$          | Количество активных витков          | 5.6      | шт.                 | Таблица 1         |
| $T_S$          | Предел прочности                    | 80       | кгс/мм <sup>2</sup> | ГОСТ 14959        |
| $L_1$          | Высота в свободном состоянии        | 72       | мм                  | Таблица 1         |
| $L_2$          | Высота под рабочей нагрузкой        | 45       | мм                  | Таблица 1         |
| $CR$           | Частота нагрузки                    | 290      | Гц                  | ГОСТ РВ 20.39.304 |
| $C_R$          | Влияние коррозии                    | 1        | –                   | NSWC-11           |
| $C_M$          | Качество производственного процесса | 1        | –                   | NSWC-11           |

Полученные в результате расчета численные значения коэффициентов модели (3) сведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения коэффициентов модели (3)

| Обозначение | Значение |
|-------------|----------|
| $C_G$       | 0,949    |
| $C_{DW}$    | 2,658    |
| $C_{DC}$    | 0,014    |
| $C_N$       | 15,625   |
| $C_Y$       | 4,657    |
| $C_L$       | 0,99     |
| $C_K$       | 0,829    |
| $C_{CS}$    | 1,0      |

Базовая интенсивность отказов ( $\lambda_{sp,b}$ ) для данной группы, приведенная в стандарте [11], составляет  $23,8 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ .

Тогда эксплуатационная интенсивность отказов пружины виброизолятора ДО-38 равна

$$\lambda_{sp} = 4,947 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

Как следует из полученного результата, расчетное значение  $\lambda_{sp}$  также превышает заданное, что требует принятия мер по повышению безотказности.

Найдем, во сколько раз нужно уменьшить  $\lambda_{sp}$  для обеспечения требуемого уровня интенсивности отказов:

$$\frac{\lambda_{sp}}{\lambda} \approx 100.$$

Как видно из табл. 5, наибольшие значения имеют коэффициенты  $C_N$ ,  $C_Y$  и  $C_{DW}$ . Однако анализ модели (3), приведенный в работе [12], показал, что наибольшее влияние на  $\lambda_{sp}$  оказывают параметры  $D_W$ ,  $D_C$  и  $L_2$ . Исходя из этого, для обеспечения требуемого уровня интенсивности отказов в данном случае достаточно выбрать виброизолятор ДО другого номинала. Проведя последовательно расчеты  $\lambda_{sp}$ , начиная с ДО-39, получим для ДО-42  $\lambda_{sp} = 1,072 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$ , что удовлетворяет заданным выше требованиям [13–14].

Необходимые для расчетов значения  $L_2$  можно получить исходя из условия, что деформация (осадка пружины) под нагрузкой изменяется пропорционально нагрузке (см. примечание 1 к табл. 2) или в результате моделирования механических характеристик (см. рис. 5).

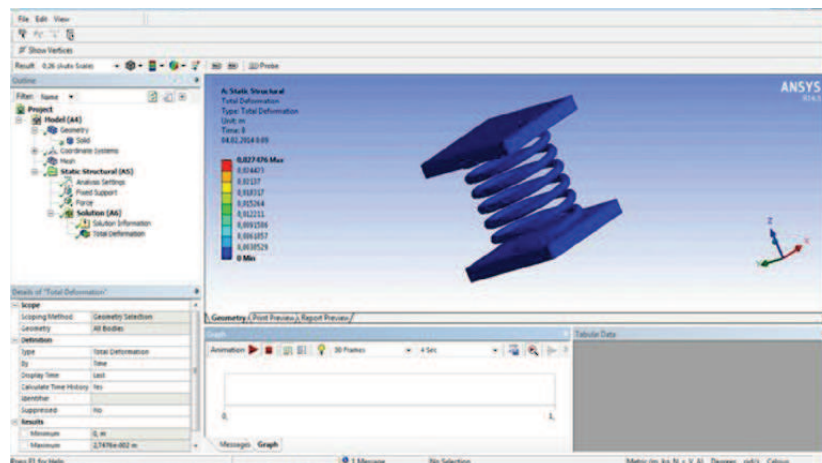


Рис. 5. ANSYS: Результаты моделирования виброизолятора типа ДО

Таким образом, можно сделать вывод о том, что методика, приведенная в [9], хотя и более простая, чем методика стандарта [11], но если полученные с ее помощью результаты не удовлетворительны, то следует применять методику стандарта [10], в которой при расчете интенсивностей отказов учитываются как конструктивно-технологические особенности пружин, так и механические характеристики материалов.

### Список литературы

1. Писарев, В. Система испытаний – основа обеспечения надежности / В. Писарев, М. Критенко, В. Постнов // *Электроника*. – 2002. – № 5. – С. 32–35.
2. Ильинский, В. С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий / В. С. Ильинский. – М. : Радио и связь, 1982. – 296 с.
3. ГОСТ 14959-79. Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Технические условия.
4. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
5. ГОСТ РВ 20.39.304-98. КСОТТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования к стойкости внешних воздействующих факторов.
6. Жаднов, В. В. Методы и средства оценки показателей надежности механических и электромеханических элементов приборов и систем / В. В. Жаднов // *Датчики и системы*. – 2013. – № 4. – С. 15–20.
7. Zhadnov, V. Methods and means of the estimation of indicators of reliability of mechanical and electromechanical elements of devices and systems / V. Zhadnov // *Reliability: Theory & Applications*. – 2011. – Vol. 2, № 4. – P. 94–102.
8. Маркин, А. В. Методы оценки надежности элементов механики и электромеханики электронных средств на ранних этапах проектирования / А. В. Маркин, С. Н. Полесский, В. В. Жаднов // *Надежность*. – 2010. – № 2. – С. 63–70.
9. Юрков, Н. К. Концепция синтеза сложных наукоемких изделий / Н. К. Юрков // *Надежность и качество* : тр. Междунар. симпозиума : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 3–5.
10. Шавыкин, Н. А. Оценка показателей безотказности механических элементов продукции приборостроения / Н. А. Шавыкин, Б. П. Петрухин // *Датчики и системы*. – 2006. – № 6. – С. 28–35.
11. NSWC-11. Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment.
12. Монахов, М. А. Исследование модели интенсивности отказов механических элементов класса «Пружина» / М. А. Монахов, В. М. Фокин, И. Л. Лушпа. // *Инновационные информационные технологии* : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – М. : МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. – Т. 3. – С. 443–446.
13. Гришко А. К. Оценка качества математических моделей расчета электроакустических полей и моделей расчета дальности действия радиолокационных систем методом последовательного анализа / А. К. Гришко // *Надежность и качество* : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 244–245.
14. Юрков, Н. К. Оценка безопасности сложных технических систем / Н. К. Юрков // *Надежность и качество сложных систем*. – 2013. – № 2. – С. 15–21.

УДК 621.396.6

Лушпа, И. Л.

Модели интенсивности отказов виброизоляторов для электронных средств / И. Л. Лушпа, В. В. Жаднов // *Надежность и качество сложных систем*. – 2014. – № 1(5). – С. 50–57.

*Лушпа Игорь Леонидович*

студент,  
Московский институт электроники и математики  
Национального исследовательского университета  
«Высшая школа экономики»  
(101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20)  
(495) 916-88-80  
E-mail: illushpa@edu.hse.ru

*Жаднов Валерий Владимирович*

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций,  
Московский институт электроники и математики  
Национального исследовательского университета  
«Высшая школа экономики»  
(101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20)  
(495) 916-88-80  
E-mail: vzhadnov@hse.ru

*Lushpa Igor' Leonidovich*

student,  
Moscow institute of electronic and mathematic  
of National Research University  
«High School of Economics»  
(101000, 20 Myasnitskaya street, Moscow, Russia)

*Zhadnov Valeriy Vladimirovich*

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of radio electronic  
and telecommunications,  
Moscow institute of electronic and mathematic  
of National Research University  
«High School of Economics»  
(101000, 20 Myasnitskaya street, Moscow, Russia)

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы оценки надежности виброизоляторов, применяемых для защиты электронных средств от вибрационных воздействий. Приведены расчеты интенсивностей отказов пружин по различным методикам. Показано, что применение методики, учитывающей влияние особенностей конструктивно-технологического исполнения, позволяет решать не только задачи расчета, но и обеспечения требуемого уровня характеристик надежности виброизоляторов.

**Ключевые слова:** электронные средства, надежность, виброизоляторы, пружины, интенсивность отказов.

**Abstract.** The article considers the questions of reliability evaluation of vibration isolators are used to protect electronic equipment from vibration impacts. The calculations of the failure rate springs by different techniques. It is shown that application techniques, taking into account the influence of features of constructive and technological performance, allows to solve not only problems of calculation, but also ensure the required level of reliability characteristics of vibration isolators

**Key words:** electronic equipment, reliability, vibration isolators, springs, failure rate.