

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОЗАЩИТЫ РЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ НЕЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОИЗОЛЯТОРА

А. В. Затылкин, В. С. Калашников, А. М. Телегин

Введение

На конструкцию радиоэлектронных средств (РЭС) влияют как внутренние, так и внешние воздействующие факторы (ВВФ), поэтому одной из основных задач при конструировании РЭС является обеспечение их надежного функционирования в реальных условиях эксплуатации. Механические воздействия являются причиной возникновения чрезмерно больших механических напряжений, деформаций или ускорений в элементах и узлах РЭС, что в свою очередь приводит к нарушению механической прочности, разрушению и, как следствие, отказу. Согласно статистическим данным, до 70 % всех отказов РЭС происходит по причине воздействия ударов и вибрации [1]. Поэтому задача защиты РЭС от внешних механических воздействий является актуальной.

Методы и средства защиты РЭС от внешних вибрационных воздействий

Существующие методы защиты РЭС от вибраций удобно рассмотреть, если использовать зависимость коэффициента динамичности μ от частоты внешнего воздействия f . Указанная зависимость позволяет выделить три характерных поддиапазона (рис. 1), для каждого из которых сложилась устойчивая практика применения тех или иных методов и средств виброзащиты [2–4].

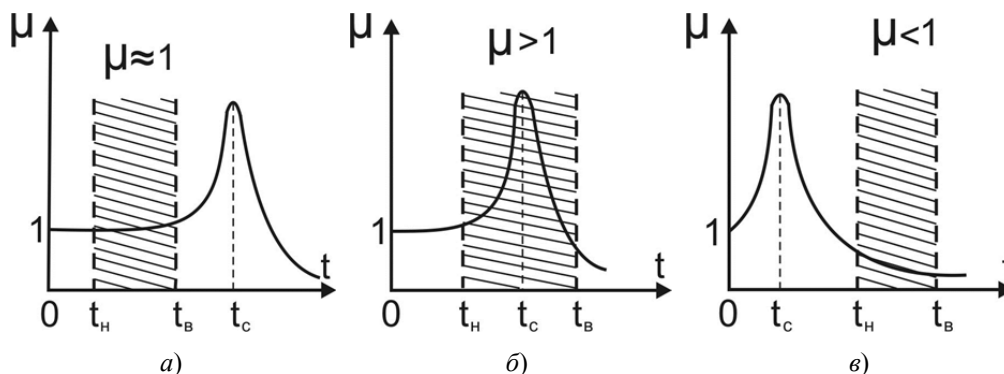


Рис. 1. Зависимость коэффициента динамичности μ от частоты внешнего воздействия f :
а – дорезонансный; б – резонансный; в – зарезонансный поддиапазоны

Для защиты РЭС от вибрационных воздействий с частотой ниже резонансной частоты РЭС (см. рис. 1,а) принято увеличивать жесткость конструктивных элементов. Наибольшее распространение получило применение дополнительных площадок крепления электрорадиоэлементов (ЭРЭ) с помощью клея; применение дополнительных точек крепления печатных узлов; применение профилирования и отбортовок (для пластин из металла) основания блока; применение ребер жесткости и т.д. Тем не менее эти методы являются локальными и эффективны лишь для защиты отдельных элементов РЭС и не способны обеспечить качественную защиту всей конструкции [2].

Для защиты РЭС от вибрационных воздействий с частотой, попадающей в область резонансной частоты РЭС (см. рис. 1,б) принято использовать конструктивные элементы с увеличенной степенью демпфирования [5]. Наибольшее распространение получило применение вибропоглощающих покрытий, слоев и вибропоглощающих заливочных материалов.

Применение слоистых конструкций и демпфирующих покрытий позволяет снизить значения коэффициентов динамичности печатных плат с нескольких десятков до нескольких единиц [2].

К недостаткам этих методов виброзащиты можно отнести возникновение больших внутренних напряжений в виброизоляционном материале при его полимеризации, изменение свойств покрытий и заливок с течением времени, зависимость характеристик покрытий и заливок от температуры, ухудшение ремонтоспособности РЭС.

Для защиты РЭС от вибрационных воздействий с частотой выше резонансной частоты РЭС (см. рис. 1,в) принято использовать виброизоляторы. Виброизоляция в данном поддиапазоне обеспечивается тем, что между объектом защиты (или его элементом) и вибрирующей поверхностью устанавливаются специальные элементы – виброизоляторы, образующие систему амортизации. Подобный способ виброзащиты может быть использован как для блоков, так и для отдельных элементов РЭС.

Применение виброизоляции признано наиболее эффективным методом виброзащиты РЭС [6, 7]. Тем не менее при проектировании РЭС с системой амортизации (виброизоляции) необходимо предусматривать комплексный подход обеспечения виброзащиты, т.е. нельзя пренебрегать ни увеличением жесткости конструктивных элементов, ни применением конструктивных элементов с увеличенной степенью демпфирования, поскольку лишь совокупность всех методов позволит обеспечить максимальный уровень надежности РЭС.

Поскольку универсальной системы виброизоляции не существует, разработка системы амортизации для конкретного блока или элемента РЭС и оценки ее эффективности является важной задачей, от решения которой будет зависеть надежность работы устройства.

Методы и средства оценки эффективности виброизоляции РЭС

В настоящее время существует большое количество виброизоляторов (амортизаторов), на основе которых проектируют как пассивные, так и активные системы амортизации РЭС. Активные системы амортизации РЭС эффективны, но чрезвычайно дороги, их применение оправдано в редких случаях. Информация, касающаяся описания общего принципа их работы, содержится в источниках [7, 8], при этом конкретные реализации, как правило, закрыты.

Конструкторский расчет пассивных систем амортизации РЭС регламентирован ГОСТ 26568-85 [9], примеры приведены в [2, 3]. Конструкторский расчет в основном сводится к проведению статического и динамического расчетов. При выполнении статического расчета проводят определение сил реакций виброизоляторов и величин статического прогиба, по которым с учетом возможного влияния дестабилизирующих факторов выбирают нужный типоразмер виброизолятора. При выполнении динамического расчета проводят оценку эффективности выбранной системы виброизоляции.

Наиболее сложная часть расчета пространственных систем виброизоляции – определение силы реакции виброизоляторов. Виброизоляторы выбирают с учетом всех направлений действия сил. В системах пространственного нагружения можно использовать только такие виброизоляторы, которые гарантируют работу по осям X , Y , Z (например виброизоляторы следующих типов: АВД, АКСС, АПН, АСД, АР, АТ).

Силы реакции виброизоляторов P_{ix} , P_{iy} , P_{iz} должны удовлетворять уравнениям [2, 3]

$$\sum_i^N P_{ix} = G_x, \quad \sum_i^N P_{iy} = G_y, \quad \sum_i^N P_{iz} = G_z,$$

$$\sum_i^N (P_{ix}y_i - P_{iy}x_i) = 0, \quad \sum_i^N (P_{iy}z_i - P_{iz}y_i) = 0, \quad \sum_i^N (P_{iz}x_i - P_{ix}z_i) = 0; \quad (1)$$

где m_i – компоненты массы по осям X , Y и Z ; x_i , y_i и z_i – координаты точки крепления к блоку i -го виброизолятора.

При этом оси прямоугольной системы координат X , Y , Z направлены параллельно главным осям, одна из которых совпадает с осью виброизолятора, а другие две перпендикулярны ей.

Выбор виброизоляторов происходит исходя из определения их несущих способностей и жесткости в осевых направлениях P_{ix} , P_{iy} , P_{iz} . При этом $P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max}$.

При расстановке виброизоляторов следует учитывать, что большие по горизонтали расстояния от виброизоляторов до их центра жесткости, лежащего на вертикали, проходящей через

центр тяжести блока, приводят к высоким частотам собственных вращательных колебаний блока. Расстановка виброизоляторов должна быть симметричной, хотя бы относительно одной из главных центральных осей инерции амортизируемого блока [2, 3].

Статические прогибы амортизаторов:

$$x_{ict} = \frac{P_{ix}}{k_{ix}}; \quad y_{ict} = \frac{P_{iy}}{k_{iy}}; \quad z_{ict} = \frac{P_{iz}}{k_{iz}}, \quad (2)$$

где k_i – расчетная жесткость каждого виброизолятора:

$$k_i = \frac{k_p}{N},$$

где k_p – расчетная жесткость всех виброизоляторов:

$$k_p = 40mf^2,$$

где f – частота возмущающих вибраций.

Если величина статических прогибов виброизоляторов получилась различной, то проводится выравнивание блока РЭС с помощью установки компенсирующих прокладок [2]. Поэтому для расчета пассивной системы виброизоляции РЭС важно знать компоновку и расположение виброизоляторов (амортизаторов). Наибольшее распространение имеют системы виброизоляции с одной (рис. 2,а) и двумя (рис. 2,б) плоскостями симметрии.

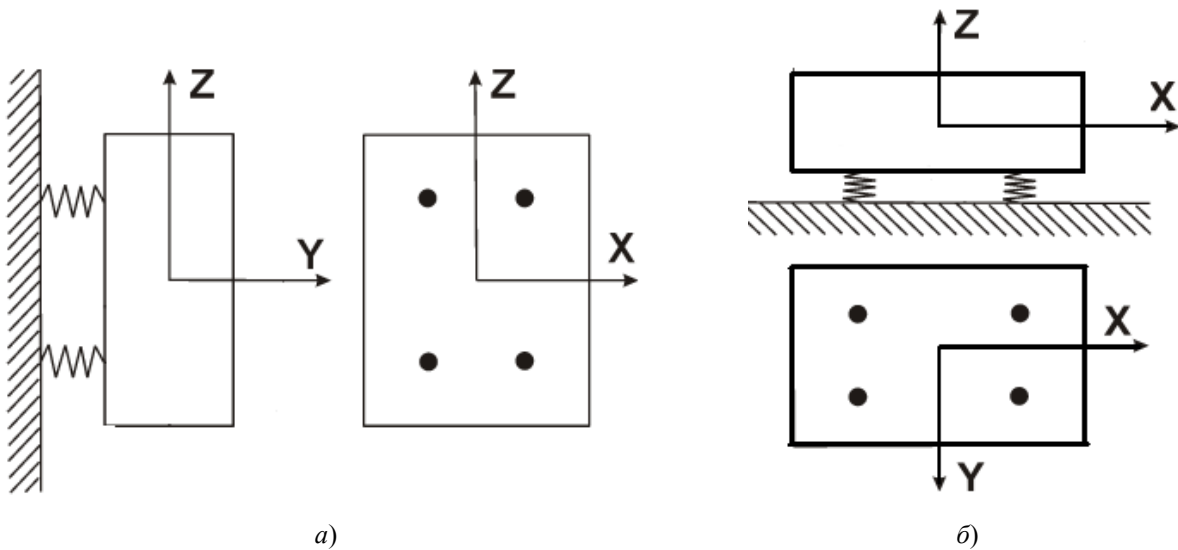


Рис. 2. Схемы систем амортизации РЭА с одной (а) и двумя (б) плоскостями симметрии

На рис. 3 показан пример промышленной пассивной системы виброизоляции с двумя плоскостями симметрии на основе виброизоляторов АПН 4 (рис. 3,а) и сам виброизолятор (рис. 3,б).

После проведения статического расчета, когда известны места установки виброизоляторов и их марка, проводят динамический расчет системы виброизоляции. Эффективность пассивной системы виброизоляции в зарезонансной области оценивается следующей формулой [2]

$$\Xi = (1 - \eta) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где η – величина коэффициента динамичности, определяемая отношением

$$\eta = \frac{\sqrt{1 + 4\beta^2 k^2}}{\sqrt{(1 - k^2)^2 + 4\beta^2 k^2}},$$

где $k = f/f_0$ – относительная частота; β – коэффициент демпфирования.

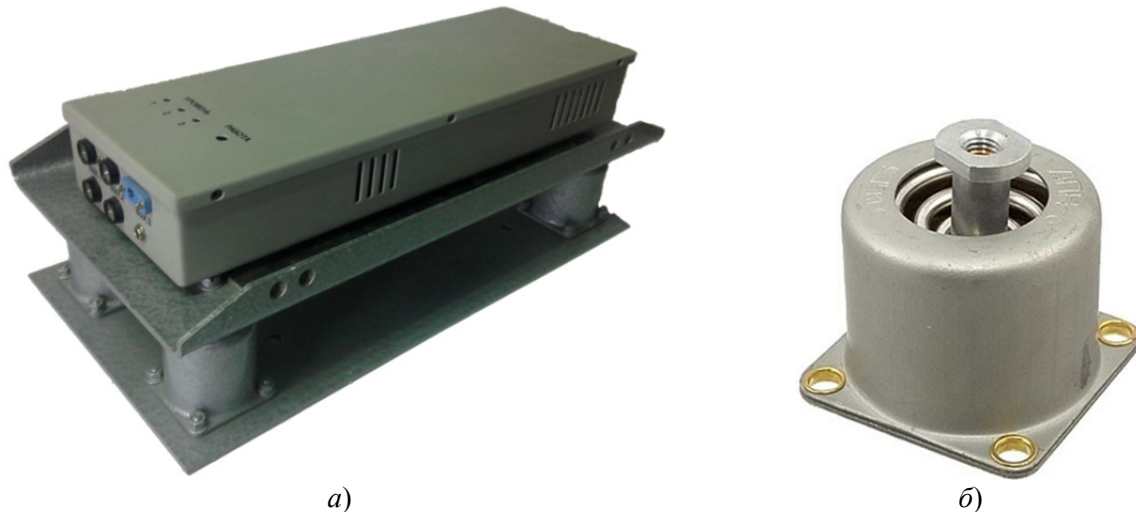


Рис. 3. Система амортизации на основе виброизоляторов АПН 4 (а) и внешний вид виброизолятора АПН 4 (б)

Выражение (3) позволяет дать оценку эффективности пассивной системы виброизоляции на протяжении всего диапазона рабочих частот. На практике принято оценивать эффективность на нижней частоте границы рабочего диапазона. Причина заключается в том, что все виброизоляторы подразделяются на низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные. У низкочастотных виброизоляторов частота собственных колебаний в нагруженном состоянии не превышает 4 Гц, для среднечастотных находится в пределах 8–10 Гц и у высокочастотных – в пределах 20–35 Гц [2]. Поэтому, выбирая виброизолятор, необходимо обеспечить нахождение его резонансной частоты, ниже границы рабочего диапазона, а расчет эффективности виброизоляции проводить на граничной частоте.

Согласно ГОСТ 11478-88, устанавливающим нормы климатических и механических воздействий, для РЭС I–IV групп эксплуатации нижняя граница частотного диапазона составляет 10 Гц [9, 10]. На рис. 4 показаны графики эффективности двух пассивных систем виброизоляции в частотном диапазоне от 0 до 1 кГц. Для каждой из рассматриваемых систем виброизоляции на нижней граничной частоте, равной 10 Гц, эффективность будет составлять 44,6 %. Традиционная методика не регламентирует дальнейшие действия инженера-конструктора по выбору системы виброизоляции.

Руководствуясь тем, что система виброизоляции 1 (показана сплошной линией на рис. 4) имеет резонанс на частоте 3,5 Гц и является низкочастотной, а система виброизоляции 2 (показана пунктирной линией на рис. 4) имеет резонанс на частоте 5 Гц и является среднечастотной, то следует выбрать систему 1, т.к. ее резонанс находится дальше от нижней границы рабочего диапазона частот.

Однако такой выбор ошибочен. Проведя расчет эффективности рассматриваемых систем виброизоляции на частотах выше границы нижней части рабочего диапазона, увидим, что система 2 эффективней системы 1 (заштрихованная область на рис. 4).

Вероятность возникновения ситуации, в которой эффективность двух систем виброизоляции равна (или приблизительно равна), невысока. Тем не менее эта вероятность существует, и неверный выбор системы виброизоляции приведет к снижению устойчивости проектируемой РЭС к воздействию вибрации.

Кроме этого, возможен другой случай, также не рассмотренный в рамках традиционной методики. Из-за своих конструктивных особенностей различные типы виброизоляторов имеют резонансные кривые, отличающиеся своей добротностью. Это может привести к тому, что на нижней граничной частоте (снова возьмем 10 Гц) эффективность системы 1 (показана сплошной линией на рис. 5), равная 27,5 %, окажется выше, чем эффективность системы 2 (показана пунктирной линией на рис. 5), равная 15,5 %. В данном случае (если проводить расчеты только на граничной частоте нижнего диапазона) следует, что необходимо выбрать систему 1. Однако, во-первых обе системы не входят в резонанс в рабочем диапазоне частот, а значит, могут быть ис-

пользованы. Во-вторых, эффективность системы 2 после частоты в 11 Гц до границы верхнего диапазона превышает эффективность системы 1. С учетом того, что весь диапазон находится в пределах от 10 до 1000 Гц, выбор системы 1 становится спорным.

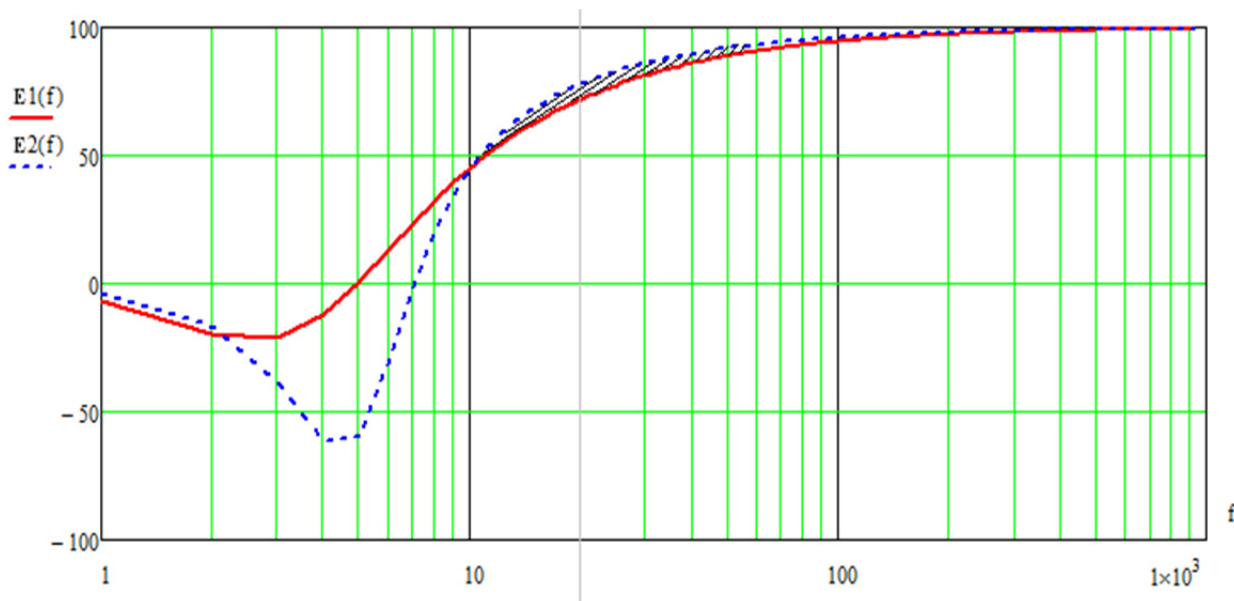


Рис. 4. Пример эффективности двух систем виброизоляции РЭС (эффективность на граничной частоте нижнего диапазона совпадает)

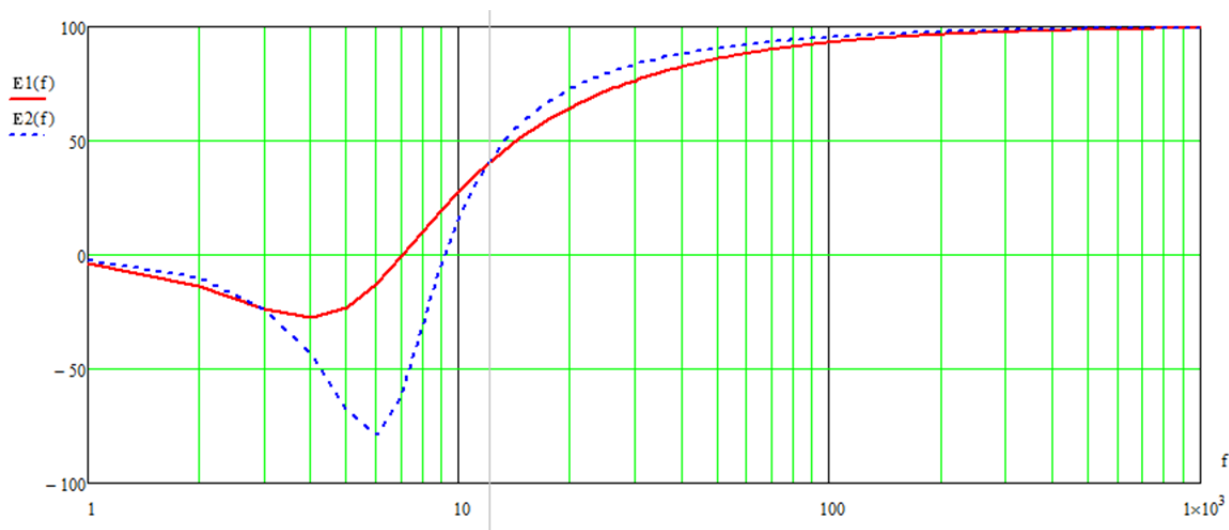


Рис. 5. Пример эффективности двух систем виброизоляции РЭС (эффективность на граничной частоте нижнего диапазона различна)

Из рассмотренных примеров следует вывод о том, что совершенствование известной методики [2, 3] оценки эффективности системы виброизоляции блока РЭС с целью оценки эффективности на всем рабочем диапазоне частот является важной научно-практической задачей.

Методика оценки эффективности системы виброизоляции блока РЭС, отличающаяся применением интегрального критерия неэффективности виброизолятора

Для оценки эффективности системы виброизоляции блока РЭС на всем рабочем диапазоне частот прежде всего необходимо проверить наличие эффекта вибровозбуждения системы на нижней частоте рабочего диапазона. Сделать это следует, подставив в выражение (3) значение нижней частоты рабочего диапазона, взятого из технического задания. В результате возможно получение лишь трех вариантов ответа: положительного, отрицательного и нулевого.

Нулевой и положительный варианты говорят об отсутствии вибровозбуждения. Такую систему виброизоляции можно применить, руководствуясь тем, что в остальной области рабочего диапазона ее эффективность будет однозначно положительной. Отрицательный ответ покажет наличие вибровозбуждения. В этом случае систему следует однозначно совершенствовать: менять марку виброизоляторов, их количество, места установки и т.д. Методы защиты РЭС от внешних вибрационных воздействий и очередность их применения рассмотрены в источниках [2, 4].

Как правило, возможность совершенствовать системы виброизоляции есть всегда, и зачастую более остро стоит вопрос сравнения эффективности нескольких возможных реализаций. Для оценки эффективности в частотной области можно оценить площадь, ограниченную функцией эффективности, пределами частотного диапазона и осью абсцисс. Но такой подход будет нецелесообразен, т.к. разность указанной площади для двух сравниваемых систем виброизоляции будет ничтожно мала, что следует из анализа рис. 4 и 5. Поэтому целесообразно провести прием, принятый, например, в теории надежности, когда вероятность безотказной работы РЭС (параметр надежности) заменяют на вероятность отказа РЭС (параметр ненадежности) и заменить эффективность систем виброизоляции на вновь введенный критерий неэффективности виброизолятора.

Для выполнения задачи оценки неэффективности виброизолятора используем интегральные исчисления, тогда, используя выражение (3), получим критерий неэффективности

$$H_{\mathcal{E}} = \int_{f_n}^{f_B} \left(1 - \left(1 - \frac{\sqrt{1 + 4\beta^2 (f/f_0)^2}}{\sqrt{(1 - (f/f_0)^2)^2 + 4\beta^2 (f/f_0)^2}} \right) \right) df.$$

Применение предложенного критерия неэффективности позволяет дать количественную оценку заштрихованной области, показанной на рис. 6.

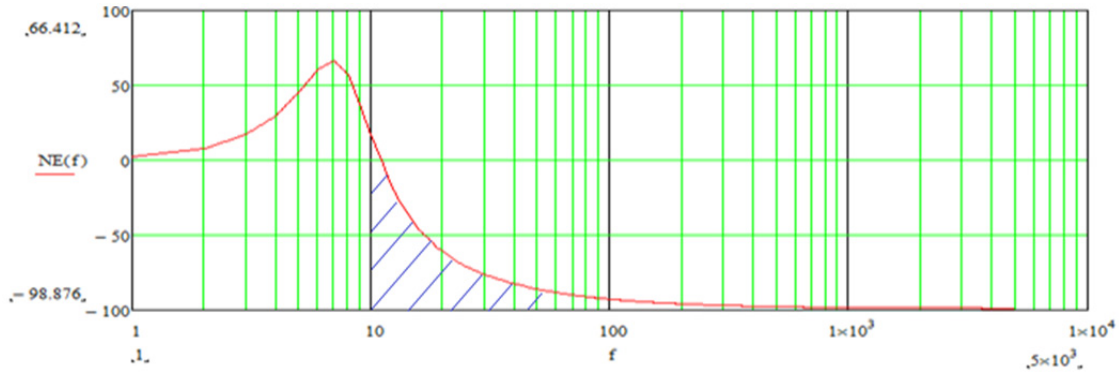


Рис. 6. Зависимость неэффективности виброизоляции блока РЭС от частоты внешнего воздействия (виброизоляторы АКСС-10)

Заменяв виброизоляторы АКСС-10 на АП-2-0,9, построим график зависимости интегрального критерия неэффективности виброизолятора для РЭС от частоты внешнего воздействия (рис. 7). Анализ заштрихованных областей на рис. 6 и 7 показывает, что система виброизоляции, график которой представлен на рис. 6, намного неэффективнее системы, график неэффективности которой представлен на рис. 7.

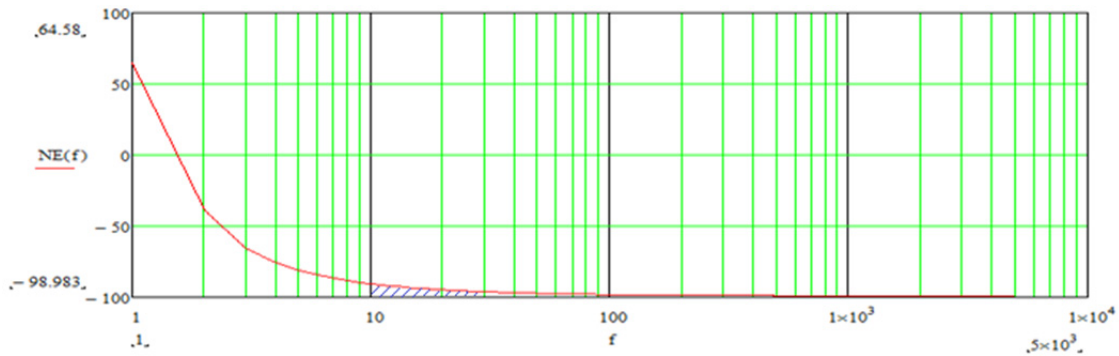


Рис. 7. Зависимость неэффективности виброизоляции блока РЭС от частоты внешнего воздействия (виброизоляторы АП-2-0,9)

Как видно, применение предложенного интегрального критерия неэффективности виброизолятора позволяет дать количественную оценку системы виброизоляции в частотной области (при условии совпадения частотного диапазона).

Таким образом, предложенная методика оценки эффективности системы виброизоляции блока РЭС выглядит следующим образом:

1) проверить наличие эффекта возбуждения системы виброизоляции на нижней частоте рабочего диапазона, подставив значение частоты нижнего рабочего диапазона в выражение (3). Удостоверившись в его отсутствии ($\Xi \geq 0$), перейти к оценке неэффективности системы виброизоляции. В случае наличия возбуждения следует изменить параметры системы виброизоляции;

2) рассчитать предложенный критерий неэффективности системы виброизоляции РЭС в рабочем диапазоне частот;

3) при наличии нескольких систем виброизоляции РЭС сравнить их критерии неэффективности в одинаковом диапазоне частот и выбрать ту систему, которая обладает наименьшим критерием неэффективности.

Таким образом, предложенная методика позволяет оценить эффективность системы виброизоляции РЭС во всем диапазоне рабочих частот, уделяя особое внимание низкочастотной области. Проведение расчетов, связанных с выбором и оценкой систем виброизоляции блоков РЭС, подразумевает выполнение огромного количества расчетов, поэтому уместно рассмотрение вопроса о целесообразности их автоматизации за счет разработки новой программной системы.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Разработка методов и средств создания высоконадежных компонентов и систем бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и транспортной техники нового поколения» (Соглашение № 15-19-10037 от 20 мая 2015 г.) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

Список литературы

1. Карпушин, В. Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре / В. Б. Карпушин. – М. : Сов. радио, 1971. – 344 с.
2. Талицкий, Е. Н. Защита электронных средств от механических воздействий. Теоретические основы : учеб. пособие / Е. Н. Талицкий. – Владимир, 2001. – 256 с.
3. Андреев, П. Г. Защита радиоэлектронных средств от внешних воздействий : учеб. пособие / П. Г. Андреев, И. Ю. Наумова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – 130 с.
4. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры / под ред. В. А. Шахнова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 564 с.
5. Chung, P. W. A finite element thermoviscoelastic creep approach for heterogeneous structures with dissipative correctors / P. W. Chung, K. K. Tamma, R. R. Namburu // Finite Elements in Analysis and Design. – 2000. – Vol. 36 (3–4). – P. 279–313.
6. Юрков, Н. К. Методы и средства проектирования высоконадежных электронных средств / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, И. И. Кочегаров ; под ред. проф. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – 266 с.
7. Лысенко, А. В. Анализ особенностей применения современных активных систем виброзащиты для нестационарных РЭС / А. В. Лысенко, Г. В. Таньков, Д. А. Рындин // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 155–158.
8. Евграфов, А. Н. Воспроизведение параметров движения на ротационных стендах / А. Н. Евграфов, В. И. Каразин, И. О. Хлебосолов // Теория механизмов и машин. – 2003. – Т. 1, № 1. – С. 92–96.
9. ГОСТ 26568-85. Вибрация. Методы и средства защиты. Классификация.
10. ГОСТ 11478-88 Аппаратура радиоэлектронная. Нормы и методы испытаний на воздействие внешних механических и климатических факторов.

Затылкин Александр Валентинович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: al.zatytkin@yandex.ru

Zatytkin Alexander Valentinovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Калашников Владимир Сергеевич

аспирант,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko7891@rambler.ru

Телегин Алексей Михайлович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: talex85@mail.ru

Аннотация. Дан обзор методов повышения эффективности средств защиты радиоэлектронной аппаратуры от внешних вибрационных воздействий на основе анализа зависимости коэффициента динамичности от частоты внешнего воздействия. Анализ существующих методик расчета и оценки эффективности пассивных систем амортизации радиоэлектронных средств показал их неработоспособность в области нижних частот за счет того, что проводится учет лишь отдельных частот рабочего диапазона. Для устранения указанного недостатка предложено проводить оценку эффективности пассивной системы амортизации радиоэлектронных средств с применением интегрального критерия неэффективности виброизолятора на всей частотной области. Разработанный математический аппарат доведен до алгоритмической и программной реализации. Проведены численные эксперименты, подтвердившие справедливость указанного подхода и повышение эффективности виброизоляции в области нижних частот.

Ключевые слова: вибрационные воздействия, виброизоляторы, коэффициент динамичности, система амортизации, алгоритм, программа, база данных.

УДК 629.01

Затылкин, А. В.

Методика оценки эффективности виброзащиты РЭС с применением интегрального критерия неэффективности виброизолятора / А. В. Затылкин, В. С. Калашников, А. М. Телегин // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 65–72.

Kalashnikov Vladimir Sergeevich

postgraduate student,
sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Telegin Aleksey Mikhaylovich

candidate of technical sciences,
senior staff scientist,
sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Abstract. A review of methods for increasing the effectiveness of protecting electronic equipment from external vibration impacts based on the analysis of the dependence of the dynamic factor from the frequency of the external impact. Analysis of existing methods of calculation and assessment of the effectiveness of passive systems depreciation of radio-electronic means showed their loss in the lower frequencies, due to the fact that an account of only some of the frequency. To eliminate this drawback it is suggested to evaluate the effectiveness of passive systems depreciation of radio-electronic equipment with application of integral criterion of effectiveness isolator throughout the frequency domain. The mathematical apparatus brought to the algorithmic and software implementation. Numerical experiments are carried out which confirmed the validity of this approach and increase the effectiveness of vibration isolation in the lower frequencies.

Key words: vibration exposure, vibration isolators, dynamic coefficient, damping system, algorithm, program, database.