

УДК 628.517.4

Сравнительный анализ схем амортизирующих подвесов полезной нагрузки на подвижном объекте

Купоросова Е. С.^{1*}, Милехин Л. Н.^{1}, Максимов Е. Ю.²**

¹*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.*

Туполева (КНИТУ КАИ), К. Маркса, 10, Казань, 420111, Россия

²*Конструкторское бюро Навигационные Технологии, Сибирский тракт, 34, Казань,
420029, Россия*

**e-mail: kuporos_lena@mail.ru*

***e-mail: lev_milekhin@mail.ru*

Аннотация

В статье рассматриваются несколько вариантов конструкций амортизирующего подвеса полезной нагрузки, установленной на подвижном объекте, создающем полигармоническое вибрационное возмущение. Для оценки эффективности предложенных методов амортизации объекта произведен аналитический расчет частот свободных колебаний с учетом влияния амортизирующих технических средств в заданном режиме работы. Приведены результаты математического моделирования вынужденных колебаний рассматриваемых систем.

Ключевые слова

полигармоническое возмущение, амортизирующий подвес, полезная нагрузка

Эффективность использования полезной нагрузки (ПН) на подвижном вибрирующем основании (например, вертолете) существенно зависит от параметров вибрации и методов амортизации. Под ПН имеются в виду установленные на подвижном объекте устройства, относящиеся к классу радиоэлектронной аппаратуры, для которых требуется ослабить воздействие вибрации основания. Для уменьшения или полного устранения влияния вибрации на эффективность использования ПН применяются различные методы амортизации как самой ПН, так и основания, реализуемые с помощью технических средств. В статье приведены варианты схем

амортизации ПН и результаты расчета частот свободных колебаний с учетом влияния амортизирующих технических средств в заданном режиме работы.

Вопросам амортизации приборов на вибрирующем основании в литературе уделяется сравнительно мало внимания, что затрудняет решение как теоретических, так и прикладных задач в этой области. В связи с этим появилась необходимость написания статьи, в которой излагались бы эффективные методы амортизации ПН на испытывающих вибрацию объектах, а также производился бы аналитический расчет частот свободных колебаний с учетом влияния амортизирующих технических средств в заданном режиме работы.

Поведение объекта амортизации зависит от способа его подвеса на подвижном объекте и параметров примененных амортизирующих элементов, в качестве которых используем резино-металлические амортизаторы и резиновые шнуры. Для выбора наиболее эффективной схемы амортизации ПН рассмотрены следующие их варианты, приведенные на рис. 1 – 6.

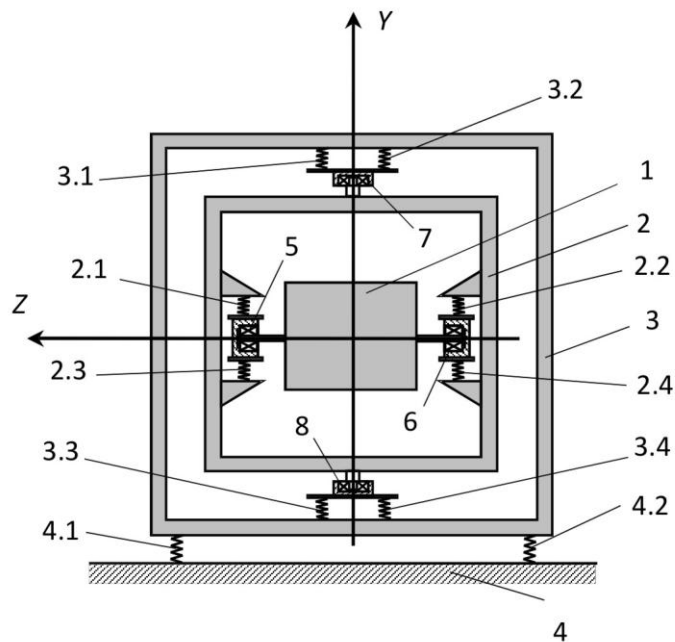


Рис.1. Вариант 1 – трехкаскадная схема на амортизаторах. 1 – полезная нагрузка; 2 – рама; 2.1 – 2.4 – амортизаторы; 3 – штатив; 3.1 – 3.4 – амортизаторы; 4 – подвижное основание; 4.1 – 4.2 – амортизаторы; 5 – 8 – подшипники.

Штативом назовем элемент конструкции подвеса, устанавливаемый жестко или с помощью амортизаторов на подвижном основании. Полезная нагрузка может

крепиться непосредственно к штативу (варианты 3, 4) или к промежуточному элементу конструкции – раме (варианты 1, 2, 6, 5), которая крепится к штативу (варианты 1, 2, 5) или на резиновых шнурах непосредственно к основанию (вариант 6).

В качестве примера подвижного основания, на котором устанавливается ПН, рассмотрим вертолет КА-226, создающий полигармоническое возмущение в виде вертикальных вибраций с частотами $f_1 = 4,72$ Гц и $f_2 = 14,2$ Гц. Для частоты f_1 максимально-допустимая амплитуда вертикальных вибраций на висении $A_{y0}^{don} \leq 0,5$ мм, а для частоты f_2 - $A_{y0}^{don} \leq 0,3$ мм.

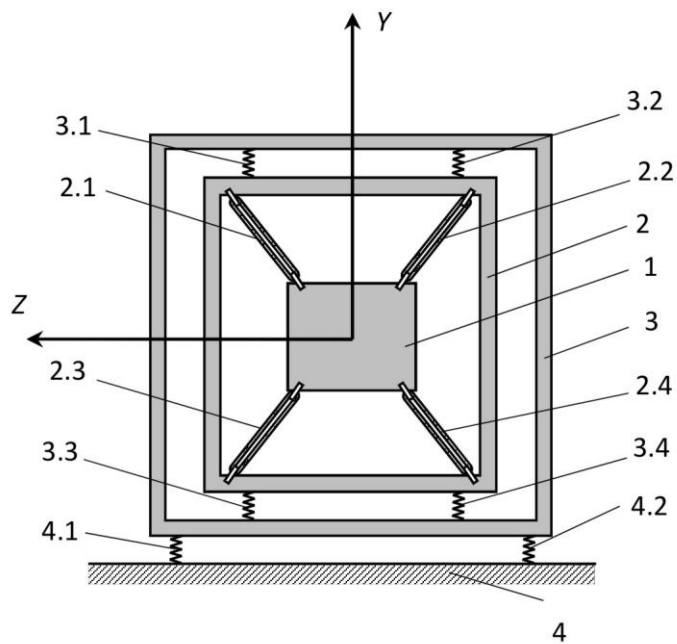


Рис. 2. Вариант 2 – трехкаскадная схема с комбинированной виброзащитой. 1 – полезная нагрузка; 2 – рама; 2.1 – 2.4 – резиновые шнуры; 3 – штатив; 3.1 – 3.4 – амортизаторы; 4 – подвижное основание; 4.1 – 4.2 – амортизаторы.

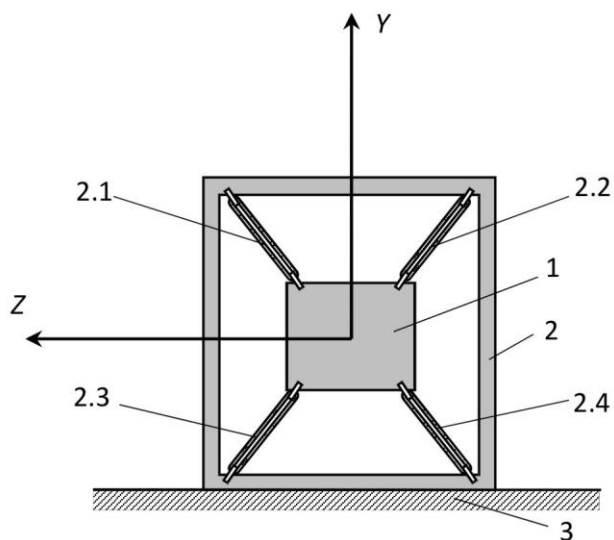


Рис. 3. Вариант 3 – схема подвеса полезной нагрузки на резиновых шнурах непосредственно к основанию. 1 – полезная нагрузка; 2 – штатив, жёстко связанный с подвижным объектом; 2.1 –2.4 – резиновые шнуры; 3 – подвижное основание.

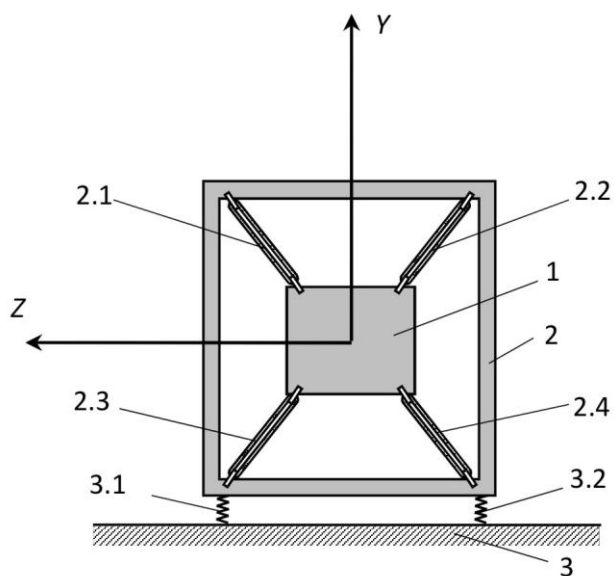


Рис. 4. Вариант 4 – двухкаскадная схема с комбинированной виброзащитой. 1 – полезная нагрузка; 2 – штатив; 2.1 –2.4 – резиновые шнуры; 3 – подвижное основание; 3.1 –3.2 – амортизаторы.

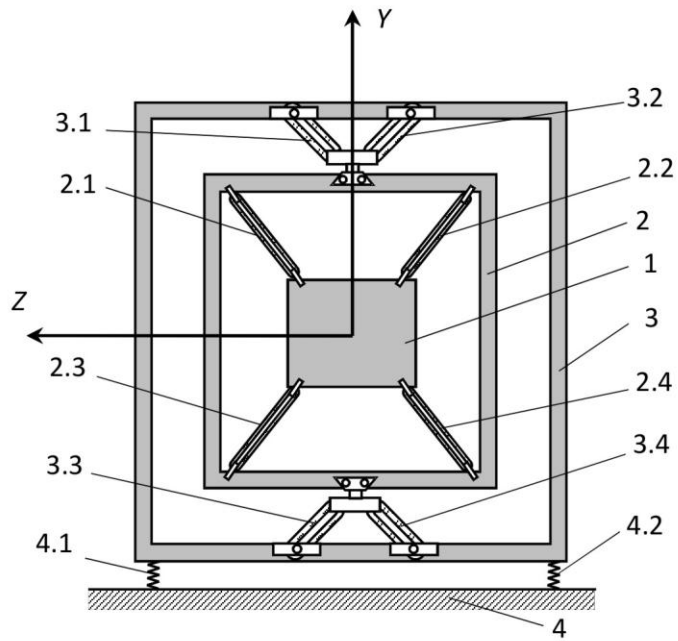


Рис. 5. Вариант 5 – трехкаскадная схема с комбинированной виброзащитой. 1 – полезная нагрузка; 2 – рама; 2.1 – 2.4 – резиновые шнуры; 3 – штатив; 3.1 – 3.4 – резиновые шнуры; 4 – подвижное основание; 4.1 – 4.2 – амортизаторы.

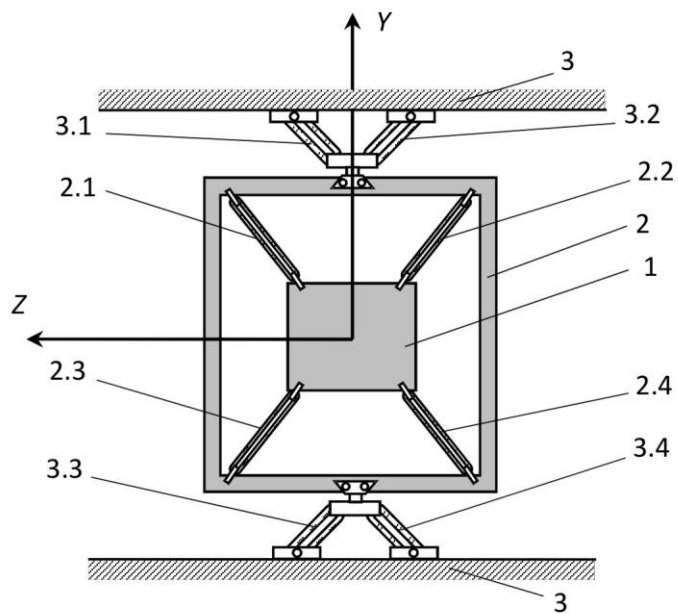


Рис. 6. Вариант 6 – двухкаскадная схема на резиновых шнурах. 1 – полезная нагрузка; 2 – рама; 2.1 – 2.4 – резиновые шнуры; 3 – подвижное основание; 3.1 – 3.4 – резиновые шнуры.

При выводе уравнений движения конструкции подвеса амортизируемого объекта допустим, что элементы конструкции (ПН, рама, штатив) абсолютно твердые тела, и каждый элемент конструкции совершает лишь поступательное движение вдоль вертикальной оси Y [1].

Для каждого варианта схемы подвеса выведены дифференциальные уравнения возмущенного движения модели конструкции с учетом вязкого трения методом Лагранжа [2], заданы числовые значения инерционных и геометрических параметров, выбраны амортизаторы и резиновые шнуры, а также рассчитаны их приведенные коэффициенты жесткости.

Например, для варианта 3 получено дифференциальное уравнение движения в вариациях следующего вида:

$$m_1 \ddot{y}_1 + k_1 \dot{y}_1 + c_1 y_1 = c_1 y_0 + k_1 \dot{y}_0, \quad (1)$$

где m_1 – масса ПН; k_1 – приведенный коэффициент вязкого трения резиновых шнуров; c_1 – приведенный коэффициент жесткости резиновых шнуров (шнур №1, мягкий, диаметр 8 мм [3], количество верхних шнуров 8, количество нижних шнуров 4); y_1, y_0 – вариации вертикальных координат ПН и основания соответственно.

В таблице 1 приведены числовые значения коэффициентов уравнений (1).

Числовые значения коэффициентов уравнений (1)

Таблица 1

Коэффициент	m_1	c_1	k_1
Размерность	кг	Н/м	Н/м/с
Числовое значение	10	2846,3	10,03

Для варианта 4 получены дифференциальные уравнения движения в вариациях следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + k_1 \dot{y}_1 + c_1 y_1 - k_1 \dot{y}_2 - c_1 y_2 &= 0; \\ m_2 \ddot{y}_2 + (k_1 + k_2) \dot{y}_2 + (c_1 + c_2) y_2 - k_1 \dot{y}_1 - c_1 y_1 &= c_2 y_0 + k_2 \dot{y}_0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где m_1 – масса ПН; m_2 – масса штатива; c_1 – приведенный коэффициент жесткости резиновых шнуров (шнур №1, мягкий, диаметр 8 мм [3], количество верхних шнуров 8, количество нижних шнуров 4); c_2 – суммарный коэффициент жесткости амортизаторов типа АЧ-1-2-0,9 [3] (количество амортизаторов 4); k_1 – приведенный коэффициент вязкого трения резиновых шнуров; k_2 – суммарный коэффициент вязкого трения

амортизаторов; y_1, y_2, y_0 – вариации вертикальных координат ПН, штатива и основания соответственно.

В таблице 2 приведены числовые значения коэффициентов уравнений (2).

Числовые значения коэффициентов уравнений (2)

Таблица 2

Коэффициент	m_1	m_2	c_1	c_2	k_1	k_2
Размерность	кг	кг	Н/м	Н/м	Н/м/с	Н/м/с
Числовое значение	10	2,5	2786,8	20000	15,9	12

Для варианта 5 получены дифференциальные уравнения движения в вариациях следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + k_1 \dot{y}_1 + c_1 y_1 - k_1 \dot{y}_2 - c_1 y_2 &= 0; \\ m_2 \ddot{y}_2 + (k_1 + k_2) \dot{y}_2 + (c_1 + c_2) y_2 - k_1 \dot{y}_1 - c_1 y_1 - k_2 \dot{y}_3 - c_2 y_3 &= 0; \\ m_3 \ddot{y}_3 + (k_2 + k_3) \dot{y}_3 + (c_2 + c_3) y_3 - k_2 \dot{y}_2 - c_2 y_2 &= c_3 y_0 + k_3 \dot{y}_0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где m_1 – масса ПН; m_2 – масса штатива; m_3 – масса рамы; c_1 – приведенный коэффициент жесткости резиновых шнуров подвеса ПН (шнур №1, мягкий, диаметр 8 мм [3], количество верхних шнуров 8, количество нижних шнуров 4); c_2 – приведенный коэффициент жесткости резиновых шнуров подвеса рамы (шнур №1, мягкий, диаметр 8 мм [3], количество верхних шнуров 8, количество нижних шнуров 4); c_3 – суммарный коэффициент жесткости амортизаторов типа АЧ-1-2-0,9 [3] (количество амортизаторов 4); k_1 – приведенный коэффициент вязкого трения резиновых шнуров подвеса ПН; k_2 – приведенный коэффициент вязкого трения резиновых шнуров подвеса рамы; k_3 – суммарный коэффициент вязкого трения амортизаторов; y_1, y_2, y_3, y_0 – вариации вертикальных координат ПН, рамы, штатива и основания соответственно.

В таблице 3 приведены числовые значения коэффициентов уравнений (3).

Числовые значения коэффициентов уравнений (3)

Таблица 3

Коэффициент	m_1	m_2	m_3	c_1	c_2	c_3	k_1	k_2	k_3
Размерность	кг	кг	кг	Н/м	Н/м	Н/м	Н/м/с	Н/м/с	Н/м/с
Числовое значение	10	1,8	2,5	2846,3	10413	20000	10,03	2,02	40

По дифференциальным уравнениям движения получены передаточные функции для всех вариантов схем амортизации $W_i(s) = \frac{Y_i(s)}{Y_0(s)}$, $i = 1; 2; 3$, где $Y_i(s)$ – изображение по Лапласу вариаций вертикальных координат ПН ($i=1$), рамы ($i=2$) и штатива ($i=3$); $Y_0(s)$ – изображение по Лапласу вариации вертикальной координаты основания. С помощью пакета прикладных программ Matlab построены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) всех вариантов схем подвеса и определена эффективность амортизации подвешенного объекта на частотах f_1 и f_2 .

На рис. 7 показана АЧХ $A_1(f) = |W(j \cdot 2\pi f)|$ для варианта № 3, из которой следует, что при допустимой амплитуде вибрации основания $A_{y0}=0,5$ мм на частоте f_1 амплитуда вибрации ПН равна 0,24 мм, а на частоте f_2 при допустимой амплитуде вибрации основания $A_{y0}=0,3$ мм – 0,01 мм. Таким образом, амплитуда колебаний ПН относительно инерциальной системы отсчета на частоте f_1 вдвое меньше амплитуды колебаний основания, а на частоте f_2 – меньше в 30 раз.

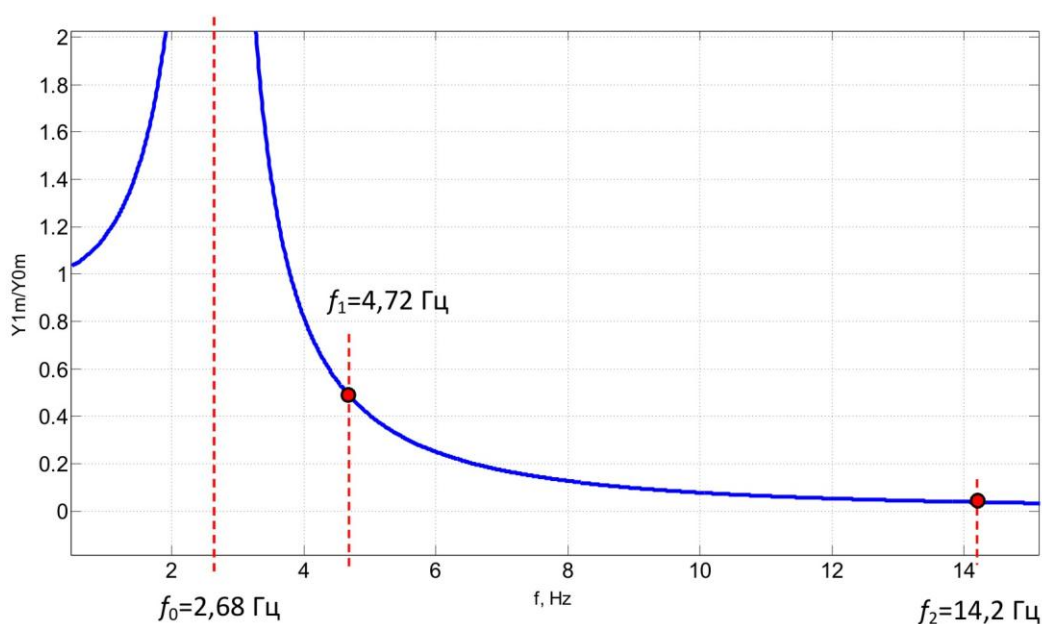


Рис.7. Фрагмент АЧХ $A_1(f) = A_{y_1}(f)/A_{y_0}$ для варианта №3 (схема подвеса ПН на резиновых шнурах непосредственно к основанию). $f_1=4,72$ Гц, $f_2=14,2$ Гц – циклические частоты возбуждающих колебаний основания. $f_0=2,68$ Гц – собственная частота системы.

На рис. 8 показана АЧХ $A_1(f) = |W(j \cdot 2\pi f)|$ для варианта № 4, из которой следует, что при допустимой амплитуде вибрации основания $A_{y0}=0,5$ мм на частоте f_1 амплитуда вибрации ПН равна 0,21 мм, а на частоте f_2 при допустимой амплитуде вибрации основания $A_{y0}=0,3$ мм – 0,062 мм. Таким образом, амплитуда колебаний ПН относительно инерциальной системы отсчета на частоте f_1 более чем вдвое меньше амплитуды колебаний основания, а на частоте f_2 – меньше в 5 раз.

На рис. 9 показана АЧХ $A_1(f) = |W(j \cdot 2\pi f)|$ для варианта № 5, из которой следует, что при допустимой амплитуде вибрации основания $A_{y0}=0,5$ мм на частоте f_1 амплитуда вибрации ПН равна 0,19 мм, а на частоте f_2 при допустимой амплитуде вибрации основания $A_{y0}=0,3$ мм – 0,021 мм. Таким образом, амплитуда колебаний ПН относительно инерциальной системы отсчета на частоте f_1 в 2,63 раза меньше амплитуды колебаний основания, а на частоте f_2 – меньше в 14 раз.

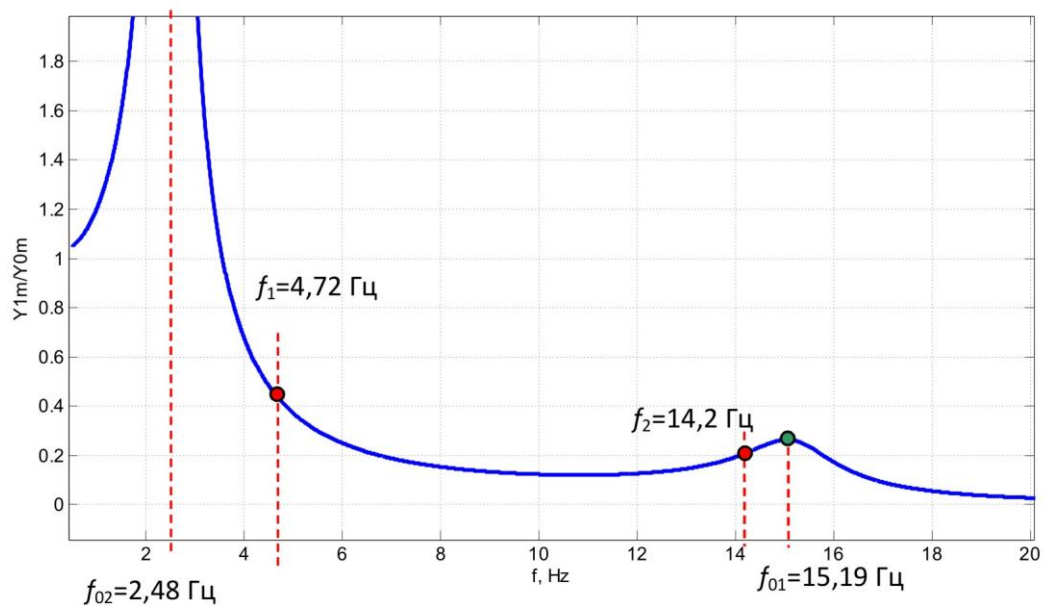


Рис.8. Фрагмент АЧХ $A_1(f) = A_{y1}(f) / A_{y0}$ для варианта № 4 (двухкаскадная схема с комбинированной виброзащитой). $f_1=4,72$ Гц, $f_2=14,2$ Гц – циклические частоты возбуждающих колебаний основания. $f_{01}=15,19$ Гц, $f_{02}=2,48$ Гц – собственные частоты системы.

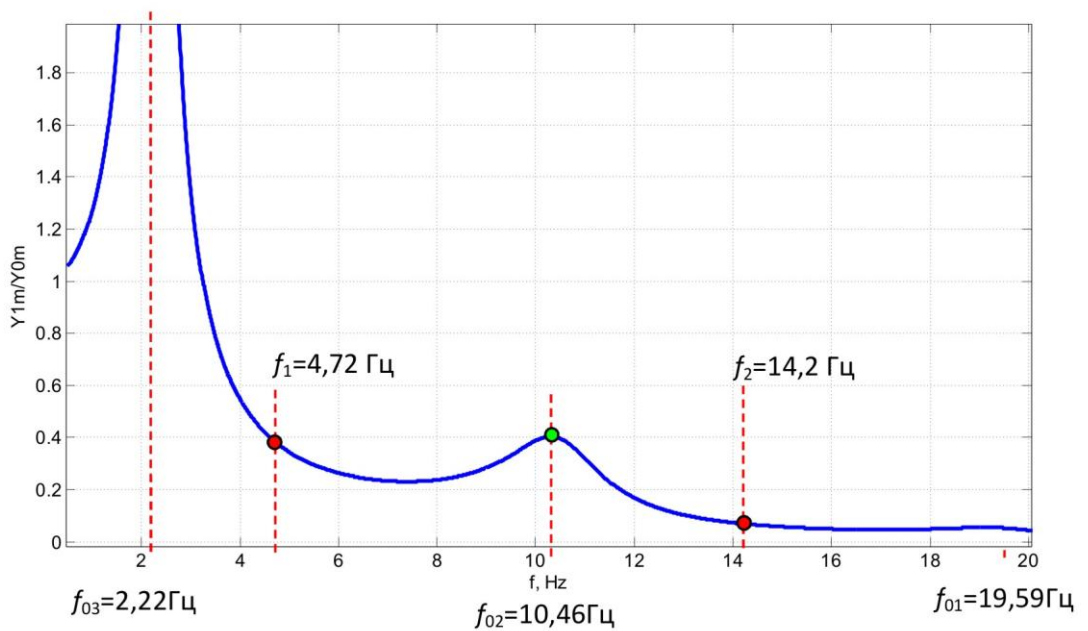


Рис.9. Фрагмент АЧХ $A_1(f) = A_{y_1}(f)/A_{y_0}$ для варианта №5 (трехкаскадная схема с комбинированной виброзащитой). $f_1=4,72$ Гц, $f_2=14,2$ Гц – циклические частоты возбуждающих колебаний основания. $f_{01}=19,6$ Гц, $f_{02}=10,46$ Гц, $f_{03}=2,22$ Гц – собственные частоты системы.

Для оценки эффективности амортизации в режиме полигармонических колебаний основания выполнено моделирование движения всех систем подвеса при изменении вариации вертикальной координаты основания y_0 по закону:

$$y_0(t) = (0.5 \sin(2\pi f_1 t) + 0.3 \sin(2\pi f_2 t)) \cdot 10^{-3}.$$

По результатам моделирования определены оценки среднеквадратичных отклонений $\sigma\{y_0\}$, $\sigma\{y_1\}$ переменных $y_0(t)$, $y_1(t)$ и коэффициент $q = \sigma\{y_1\}/\sigma\{y_0\}$, характеризующий эффективность амортизации.

Важным показателем эффективности амортизации является также отношение первой (низкой) частоты возмущения f_1 к частоте собственных колебаний объекта амортизации f_0 , которое должно быть не менее $\sqrt{2}$ [3].

В таблице 4 для всех вариантов схем подвеса приведены числовые значения:

- амплитуд вынужденных колебаний ПН A_{y_1} на частотах f_1 и f_2 при значениях амплитуды колебаний основания $A_{y_0} = A_{y_0}^{don}$, $A_{y_0} = 1$ мм;
- собственной частоты ПН f_0 и отношения нижней частоты возмущения f_1 к частоте f_0 ;

- оценки среднеквадратичного отклонения вертикальной координаты ПН $\sigma\{y_1\}$ и коэффициента эффективности амортизации $q = \sigma\{y_1\} / \sigma\{y_0\}$.

Параметры вынужденных колебаний ПН
для различных вариантов схем подвеса

Таблица 4

Вариант схемы подвеса	1	2	3	4	5	6
A_{y1} (мм) при $f_1=4,72$ Гц, $A_{y0}=0,5$ мм	7,98	0,24	0,24	0,21	0,19	0,19
A_{y1} (мм) при $f_1=4,72$ Гц, $A_{y0}=1$ мм	15,97	0,48	0,48	0,42	0,38	0,38
A_{y1} (мм) при $f_2=14,2$ Гц, $A_{y0}=0,3$ мм	0,087	0,021	0,011	0,063	0,02	0,063
A_{y1} (мм) при $f_2=14,2$ Гц, $A_{y0}=1$ мм	0,29	0,07	0,037	0,21	0,068	0,21
f_0 , Гц	4,64	2,5	2,68	2,48	2,22	2,35
f_1/f_0	1,02	1,89	1,76	1,9	2,13	2
$\sigma\{y_1\}$ при $\sigma\{y_0\} = 0,412$ мм	5,41	0,36	0,19	0,16	0,136	0,141
$q = \sigma\{y_1\} / \sigma\{y_0\}$	13,88	0,87	0,47	0,38	0,33	0,34

Анализируя данные, приведенные в таблице 4, можно сделать следующие выводы:

- из рассмотренных вариантов схем подвеса ПН вариант № 1 не подходит для применения на вертолете КА-226, так как основные показатели эффективности амортизации не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям. Так, отношение нижней частоты возмущения f_1 к собственной частоте объекта амортизации, равное 1,02, меньше допустимого значения $\sqrt{2}$, а коэффициент эффективности амортизации $q = 13,88 \gg 1$;

- варианты № 2-6 могут быть использованы для амортизации ПН при установке ее на вертолете КА-226, так как основные показатели эффективности амортизации удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, т.е. отношение f_1/f_0 для вариантов №2-6 больше $\sqrt{2}$, а коэффициент эффективности амортизации $q < 1$.

Библиографический список

1. Суровцев Ю.А. Амортизация радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Советское радио, 1974 .- 176 с.
2. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. Т. II: Динамика. – М.: Наука, 1979 г. – 544 с.
3. Ильинский В.С. Вопросы изоляции вибрации и ударов. – М.: Советское радио, 1960 .- 160 с.