

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 628.517.4–681.53

АКТИВНОЕ ПОДАВЛЕНИЕ РЕЗОНАНСОВ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ НЕСУЩЕЙ ПЛИТЫ ВИБРОЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ¹

© 2021 г. И. Ж. Безбах, В. А. Мелик-Шахназаров^{a,*}, В. И. Стрелов^a, А. А. Трегубенко^a

^a ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

*e-mail: kmikran@spark-mail.ru

Поступила в редакцию 07.10.2019 г.

После доработки 29.01.2021 г.

Принята к публикации 29.03.2021 г.

Разработан способ подавления резонансов поперечных колебаний несущей плиты активного виброзащитного устройства, позволяющий расширить его активный диапазон частот и понизить коэффициент пропускания вибраций. Используется второй дополнительный контур управления отдельными, выбранными резонансами плиты. Его инерционные сервисные движители и акселерометры располагаются на плите (или в объеме плиты) в определенных позициях вблизи от максимума волны, а в электрических цепях устанавливаются фильтры, настроенные на частоту резонанса. Для описания конструкции используется структурная схема, состоящая из электрических и механических импедансов, которые представляют резонансы несущей плиты, установленной на упругих опорах, резонансы ее поперечных колебаний, а также резонансы в цепи инерционных сервисных движителей. Применение теории электрических цепей позволяет определять динамическое поведение системы управления, а также конструктивные и мощностные характеристики ее узлов.

DOI: 10.31857/S0002338821040119

Введение. Для защиты от вибраций прецизионной измерительной и технологической аппаратуры необходимы активные виброзащитные устройства (АВЗУ), содержащие опорную плиту, все шесть мод колебаний которой подавлены. Потребность в таких устройствах привела к тому, что вслед за слишком “металлоемкой” конструкцией [1] была разработана идеальная в своей простоте конструкция, служащая в настоящее время основой коммерческих виброзащитных устройств [2, 3]. Основными узлами этой конструкции являются: опорная плита, на которой с помощью упругих опор устанавливается несущая плита с защищаемым объектом. На несущей плите установлена *симметрично расположенная* группа из восьми акселерометров и восьми сервисных движителей, соединенных с опорной плитой. Акселерометры и движители включены в восемь отдельных цепей управления, так что все шесть мод колебаний плиты, установленной на упругих опорах, оказываются подавлены.

Указанные конструкции АВЗУ характеризуются нижней границей активного диапазона частот ~ 2 Гц и максимальным коэффициентом подавления колебаний 35–40 дБ, который достигается при ~ 10 Гц. Существенно, что указанные характеристики для рассматриваемой конструкции АВЗУ являются предельными из-за “паразитного” сигнала наклона акселерометров, который вызывается изменением проекции вектора силы тяжести инерционной массы акселерометров на его ось чувствительности. Отношение динамического, “полезного” сигнала акселерометра к паразитному обратно пропорционально квадрату частоты, так что ниже ~ 2 Гц помеха становится выше допустимого уровня; это и определяет (неустранимую) нижнюю границу активного диапазона устройства.

Отметим, что именно благодаря отсутствию паразитного сигнала наклона акселерометров в условиях невесомости, активное виброзащитное устройство gLIMIT функционирует на международной космической станции в области низких частот вплоть до ~ 0.01 Гц [4].

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН и с использованием оборудования ЦКП ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” при поддержке Минобрнауки России (проект RFMEFI62119X0035).

Для расширения активного диапазона АВЗУ рассматриваемого вида в лабораторных/цеховых условиях, а также на транспортных средствах нами была разработана новая структура симметричной группы акселерометров и сервисных движителей, позволяющая включить их в электрические цепи для *раздельного управления* шестью модами колебаний несущей плиты [5]. Такая конструкция позволяет, используя простые электрические цепи, осуществить компенсацию сигнала наклона акселерометров, что приводит к смещению нижней границы активного диапазона частот от ~ 2 до ~ 0.2 Гц и 10-кратному увеличению максимального коэффициента подавления колебаний (до 60 дБ).

В области низких (ниже ~ 200 Гц) частот цепи управления АВЗУ подавляют три поступательные и три торсионные моды колебаний плиты в отсутствие ее объемной деформации. При расширении активного диапазона в область более высоких частот в плите возбуждаются резонансы поперечных колебаний, нарушающие работу цепей управления АВЗУ, т.е. фактически ограничивающие активный диапазон со стороны высоких частот. Отметим, что поперечные резонансы плиты с добротностью Q , расположенные выше верхней границы активного диапазона частот устройства (т.е. при величине модуля функции передачи разомкнутой цепи управления $|H(i\omega)| \leq 1$), также могут приводить к появлению паразитных автоколебаний в цепи управления при условии $|H(i\omega)|Q \geq 1$.

Отмеченные ограничения активного диапазона частот могут быть устранены либо путем уменьшения размера плиты (что не всегда возможно из-за фиксированных размеров защищаемого объекта), либо с помощью дополнительного устройства (пассивного или активного), подавляющего резонансы ее поперечных колебаний.

Теоретические расчеты и компьютерное моделирование пассивного динамического подавления резонансов поперечных колебаний плиты показали, что для плиты толщиной ≥ 30 мм необходимы виброгасящие резонаторы с недостижимо высокими упругими потерями. Поэтому единственным перспективным способом решения проблемы представляется активное подавление резонансов. При этом следует иметь в виду ряд обстоятельств, ограничивающих выбор конструкции такого устройства.

Резонансы поперечных колебаний несущей плиты, нарушающие работу АВЗУ, могут располагаться вблизи от верхней границы его активного диапазона частот, так что включить дополнительные полосовые фильтры в цепь управления невозможно из-за фазовых ограничений, поэтому для подавления резонансов необходим дополнительный контур управления, не влияющий на амплитудно- и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) главного контура. Он должен содержать отдельные цепи для измерения амплитуды поперечных колебаний выбранной подавляемой волны (группы волн), а также отдельные сервисные движители. Целью настоящей работы является создание устройства, удовлетворяющего указанным условиям.

1. Конструкция и структурная схема устройства. Очевидно, что при конструировании АВЗУ с независимым управлением шестью модами колебаний несущей плиты [5] конструкционные и динамические характеристики шести одномодовых парциальных устройств могут быть рассчитаны раздельно.

На рис. 1 показана одномодовая схема АВЗУ с дополнительными контурами управления, предназначенными для подавления резонансов поперечных колебаний несущей плиты. Главная цепь управления содержит несущую плиту массой m_1 , которая опирается на упругий элемент c_1 . На плите установлен акселерометр A_1 и магнитная система электродинамического преобразователя: опорного магнитоэлектрического движителя (ОД) Дв₁ (катушка которого установлена на опорной плите). Электрические цепи управления с функцией передачи $W_{1o.o.c}(i\omega)$ замыкают цепь отрицательной обратной связи, что подавляет пропускание внешних вибраций $n(t)$ от опорной плиты к несущей. Подробно структурная схема и динамические звенья главного контура управления АВЗУ рассмотрены в [6].

Второй контур управления, собственно служащий для подавления резонансов поперечных колебаний несущей плиты, содержит электрические цепи обратной отрицательной связи $W_{2o.o.c}(i\omega)$, а также акселерометр A_2 и инерционный сервисный движитель (ИД) [7], *которые устанавливаются вблизи от максимума подавляемой волны на поверхности или в объеме плиты*. ИД состоит из массы m_2 , опирающейся на упругий элемент c_2 и электродинамического преобразователя Дв₂, управляющего движением массы m_2 . ИД действует на плиту в заданной “точке” ньютоновой силой инерции $F_H(t) = m_2 a_2(t)$, где $a_2(t)$ – ускорение массы m_2 . Требования к функции передачи цепи управления $W_{2o.o.c}(i\omega)$ будут рассмотрены ниже.

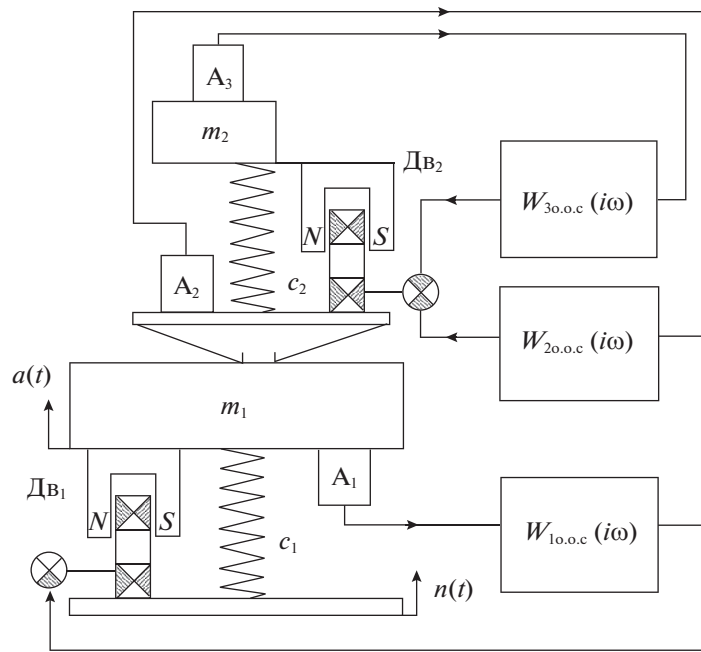


Рис. 1. Схема одномодовой конструкции АВЗУ с узкополосным активным гасителем резонансов поперечных колебаний несущей плиты

Следует обратить внимание на то, что второй контур управления, соединенный с несущей плитой посредством акселерометра и инерционного двигателя, включен во все шесть первых контуров управления АВЗУ.

Третий контур управления является вспомогательным, он предназначен для подавления резонанса ИД. Контур содержит электрические цепи обратной отрицательной связи $W_{30.o.c}(i\omega)$, акселерометр A_3 , установленный на инерционной массе m_2 , и электродинамический преобразователь $ДВ_2$. Как будет показано ниже, в результате подавления резонанса ИД расширяется его рабочий диапазон частот, а также уменьшаются фазовые ограничения для АЧХ второго контура управления. Отметим, что подавление резонанса подвижной системы электродинамических преобразователей с целью повышения их качества впервые было предложено Григорьевым В.С. и Фурдеевым В.В. в 1937 г. (цитируется по [8, 9]).

Следует отметить, что использование во втором контуре управления ИД обусловлено конструктивными соображениями. Действительно, сервисные двигатели должны располагаться в определенных позициях вблизи от максимума подавляемой стоячей волны, однако пространство между несущей и опорной плитами АВЗУ практически полностью занято симметрично расположенными группами сервисных опорных двигателей, акселерометров и упругих опор [5]. Поэтому указанное условие можно выполнить лишь используя ИД, размещенные в объеме несущей плиты.

Необходимо также отметить, что для расширения активного диапазона частот АВЗУ достаточно подавить влияние только первых резонансов плиты (от двух до четырех), поэтому второй контур управления должен/может быть узкополосным.

Для математического описания динамики конструкции, показанной на рис. 1, используется метод структурной схемы, которая, как видно из рис. 2, состоит из однонаправленных динамических звеньев, каждому из которых соответствует определенная функция передачи. В сущности, эта схема представляет собой графическое изображение системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику всех частей конструкции. Оно предпочтительнее обычной математической записи уравнений, так как позволяет весьма просто, используя правила электрических цепей, “свертывать” уравнения в одно для получения функций передачи соединений механических и электрических импедансов [10, 11].

Важно, что метод электрических цепей устанавливает соответствие каждого динамического звена определенному конструктивному элементу устройства. Это позволяет определять также

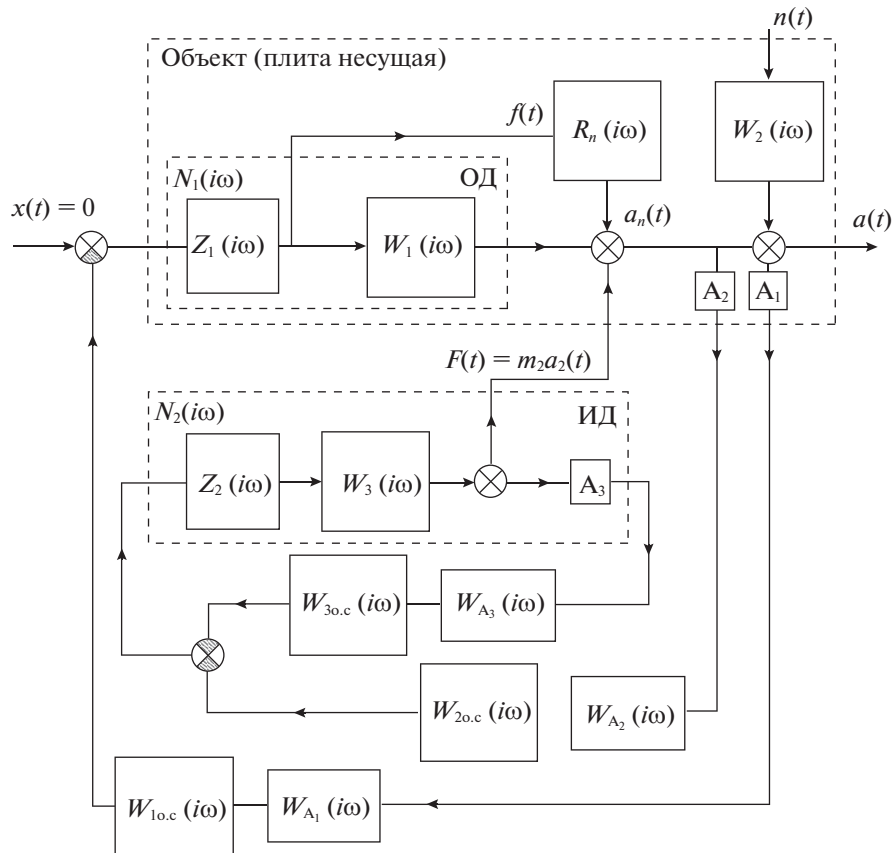


Рис. 2. Структурная схема одномодовой конструкции АВЗУ с узкополосным активным гасителем резонансов поперечных колебаний несущей плиты

необходимые физические параметры механических и электрических элементов конструкции, исходя из заданных заранее основных характеристик устройства. Необходимый анализ выполняется не сложным способом с помощью компьютерной программы, рассчитанной для вычисления функций с комплексными переменными.

Согласно схеме на рис. 2, “свертка” проводится по цепям двух типов следующим образом. Первый – функция передачи последовательной цепи динамических звеньев, которая равна произведению функций передачи звеньев цепи. Второй – функция передачи замкнутой цепи с отрицательной обратной связью (контура управления), представляющая собой дробь, числителем которой является произведение функций передачи динамических звеньев, включенных в прямом направлении, а знаменателем – единица плюс произведение функций передачи всех звеньев замкнутой цепи.

Как видно из рис. 2, структурная схема рассматриваемой конструкции АВЗУ содержит, кроме основного, два дополнительных контура управления. Первый, главный контур управления (подробно исследован в [6]) включает следующие динамические звенья: акселерометр A_1 , усилитель сигнала акселерометра $W_{A_1}(i\omega)$, электрические цепи обратной связи $W_{10.c}(i\omega)$ и сервисный двигатель $N_1(i\omega)$. Функция передачи последнего определяется электрическим импедансом $Z_1(i\omega)$ катушки электродинамического преобразователя Дв₁, нагруженного механическим импедансом несущей плиты $W_1(i\omega)$, установленной на упругих опорах, и коэффициентом электромеханической связи преобразователя [6].

Динамическое звено $W_2(i\omega)$, подключенное к главному контуру управления, представляет параллельный резонанс плиты (установленной на упругие опоры), входным сигналом которого, как видно из рис. 1, является смещение свободного конца упругого элемента $n(t)$ (в последовательном резонансе плиты $W_1(i\omega)$ входной сигнал есть сила, приложенная электродинамическим

преобразователем к массе m_1). Как видно из структурной схемы, звено $W_2(i\omega)$ не входящее в замкнутый контур управления, представляет собой фильтр входного (внесенного) сигнала $n(t)$ виброзащитного устройства.

Второй контур управления, собственно предназначенный для подавления резонансов поперечных колебаний плиты, состоит из следующих динамических звеньев: акселерометр A_2 , усилитель сигнала акселерометра $W_{A_2}(i\omega)$, электрические цепи обратной связи $W_{20.c}(i\omega)$ и сервисный двигатель $N_2(i\omega)$. Функция передачи последнего определяется электрическим импедансом катушки электродинамического преобразователя $Z_2(i\omega)$, нагруженного механическим импедансом $W_3(i\omega)$, который представляет инерционную массу m_2 , установленную на упругой опоре c_2 , а также коэффициентом электромеханической связи преобразователя [12].

Динамическое звено $R_n(i\omega)$ обозначает ряд резонансов поперечных колебаний несущей плиты, т.е. ряд включенных параллельно механических импедансов. В отличие от всех звеньев, описывающих колебания с сосредоточенными параметрами, при соединении звена $R_n(i\omega)$ (где $n = 1, 2, 3, \dots$ – номер резонанса несущей плиты) с другими звеньями место расположения акселерометров и сервисных двигателей на плите должно быть учтено введением соответствующих коэффициентов связи.

Форма волны резонансов поперечных колебаний плиты определяется аналитически [13, 14] либо компьютерными расчетами, так что для каждой (n -й) моды определено место расположения акселерометров и ИД вблизи от максимума волны. Это позволяет получить максимальные значения коэффициентов связи рассматриваемых резонансов с внешними цепями.

Каждый резонанс объемных колебаний плиты может быть с достаточной точностью представлен импедансом соответствующего замещающего эквивалентного резонатора с сосредоточенными параметрами. Для определения его параметров (массы m , упругой податливости c , сопротивления потерь r) может быть использован компьютерный расчет резонансов плиты, однако для первых резонансов они могут быть легко получены приравниванием потенциальной энергии, кинетической энергии и энергии рассеяния объемного и локального резонансов [15]. Считая волну синусоидальной для упругой податливости n -го эквивалентного резонатора с сосредоточенными параметрами, получаем

$$c_n = \frac{24}{\pi^4} \frac{l_n^3}{Eh^3b}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \tag{1.1}$$

Здесь l – длина полуволны n -го резонатора, E – модуль упругости материала плиты, h и b – толщина и ширина плиты соответственно.

Для массы эквивалентного резонатора:

$$m_n = 0.36m_0 \tag{1.2}$$

(m_0 – масса покоящегося стержня).

Следовательно, функция передачи n -го резонанса поперечных колебаний плиты (по ускорению) может быть записана таким образом:

$$R_n(i\omega) = \frac{i\omega}{z_n^R(i\omega)} = \frac{i\omega}{r_n + i\omega m_n + 1/(i\omega c_n)}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \tag{1.3}$$

(здесь $z_n^R(i\omega)$ – импеданс n -го резонанса).

На структурной схеме в качестве входного сигнала динамического звена $R_n(i\omega)$ обозначены суммарные объемные силы $f(t)$, источником которых являются сервисные двигатели в цепи главного контура управления АВЗУ (Дв₁ на одномодовой схеме, показанной на рис. 1).

Важно, что динамическое звено $R_n(i\omega)$ (как видно из рис. 2) включено и в первый, и второй контуры управления, но различным образом. В первый контур звено $R_n(i\omega)$ включено параллельно звену $W_1(i\omega)$, что соответствует параллельному соединению “основного” резонанса АВЗУ (колебания несущей плиты, установленной на упругих опорах) с группой резонансов объемных колебаний плиты. Именно в результате такого соединения при определенных условиях, которые будут рассмотрены ниже, в системе появляются автоколебания на частоте одного из резонансов плиты. С вторым контуром управления звено $R_n(i\omega)$ соединено как источник внесенного сигнала (в главном контуре управления такую роль играет звено $W_2(i\omega)$).

Особенностью второго контура управления является упомянутая выше цепь дополнительной обратной связи $W_{30.c}(i\omega)$, предназначенная для подавления механического резонанса ИД [8, 9]. В рассматриваемом устройстве ИД с подавленным резонансом приобретает ряд важных свойств: 1) расширяется диапазон его рабочих частот; 2) снижаются фазовые ограничения при установке в цепи управления $W_{20.c}(i\omega)$ фильтров с необходимыми АЧХ и ФЧХ; 3) упрощается конструкция ИД, так как не требуется настройка частоты его механического резонанса.

Заметим, что электрическим аналогом плиты является полый объемный радиочастотный резонатор сантиметрового диапазона волн. Для возбуждения и детектирования определенной формы волны последний также соединяется с внешними цепями с помощью зондов в виде штырьков или петель, которые вводятся в его объем в известных позициях. В рассматриваемой конструкции эту роль выполняют электромеханические зонды – акселерометр и ИД, установленные на плите в определенной “точке” (на площадке малого размера).

2. Подавление резонансов несущей плиты типичного активного виброзащитного устройства.

На основе представленных выше общих закономерностей далее приводится расчет устройства, предназначенного для подавления резонансов поперечных колебаний несущей плиты конкретного экспериментального макета АВЗУ [6, 12]. На структурной схеме рис. 2 это устройство представлено вторым контуром управления. Первый, основной контур, подробно исследован нами в [6]. Динамика рассматриваемой конструкции, как отмечалось выше, определялась с помощью структурной схемы, состоящей из ряда электрических и механических импедансов, и правил теории электрических цепей.

Параметры экспериментального ИД таковы: масса $m_2 = 0.8$ кг, резонансная частота $\nu_0 = 1/(2\pi\sqrt{m_2c_2}) \approx 100$ Гц, сопротивление катушки электродинамического преобразователя $R = 12$ Ом, индуктивность $L = 22$ мГн. Магнитная индукция в зазоре магнитной системы $B \approx 0.2$ Тл, длина провода в магнитном поле $l = 50$ м, коэффициент электромеханической связи $K = Bl = 10$ (конструкция движителя может отличаться от оптимальной, так как использовались имеющиеся узлы макета АВЗУ).

Функция передачи сервисного ИД $N_2(i\omega)$ описывает динамику двух связанных элементов конструкции, электродинамического преобразователя (катушка в магнитном поле) и механической нагрузки (инерционная масса). В динамику этого звена важный вклад вносит появление в электрической цепи ИД *внесенного* электрического импеданса вследствие возникновения электродвижущей силы в катушке, движущейся в магнитном поле. Функция передачи движителя по ускорению, учитывающая этот эффект, имеет такой вид [6, 12]:

$$N_2(i\omega) = \frac{a}{u} = -i\omega \left(\frac{Z_2(i\omega)z_3(i\omega)}{K} + K \right)^{-1}. \quad (2.1)$$

Здесь

$$Z_2(i\omega) = R + i\omega L + \frac{1}{i\omega C_{\text{вн}}} \quad (2.2)$$

– полный электрический импеданс преобразователя, учитывающий эффект внесенной емкости $C_{\text{вн}} = m_2/K^2$ [12] (R и L – электрическое сопротивление и индуктивность катушки соответственно), K – коэффициент электромеханической связи преобразователя,

$$z_3(i\omega) = r + i\omega m_2 + 1/(i\omega c_n) \quad (2.3)$$

– механический импеданс (m_2 – величина инерционной массы, c_2 – податливость пружины, r – коэффициент трения пружины).

На рис. 3 и 4 сплошной кривой показаны модуль и фазовый угол функции передачи $N_2(i\omega)$ инерционного движителя, которая определяется уравнением (2.1). На кривых кроме резонансного максимума и соответствующего понижения фазы вблизи от $\nu_0 \approx 100$ Гц видны изломы асимптот резонанса и изменение фазы в широком диапазоне частот. Как отмечалось в [12], эти аномалии связаны с эффектом внесенной емкости и возникновением так называемого электромеханического резонанса. Видно, что наличие в актуальном диапазоне частот двух резонансов приводит к большому понижению фазы, затрудняющему/исключающему возможность включения фильтров или корректирующих звеньев в цепь управления обратной связи $W_{20.c}(i\omega)$. Пунктирные кривые на рис. 3 и 4 показывают, что подавление резонанса ИД устраняет эту проблему.

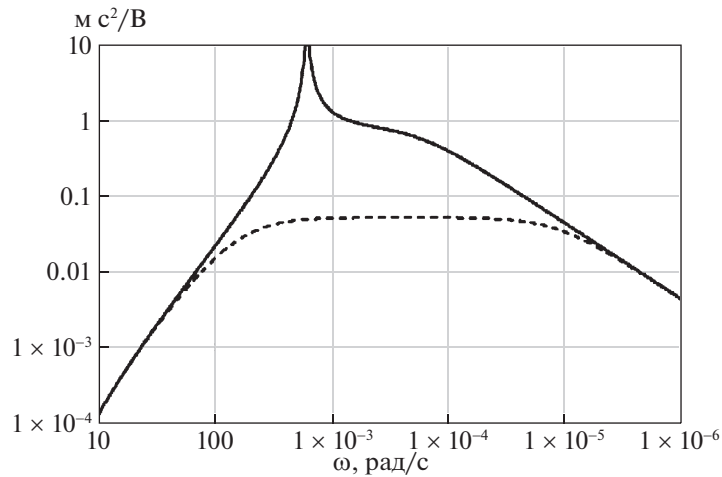


Рис. 3. Кривая модуля функции передачи инерционного движителя $N_2(i\omega)$ (сплошная кривая). То же с подавленным резонансом $H_1(i\omega)$ (пунктирная кривая)

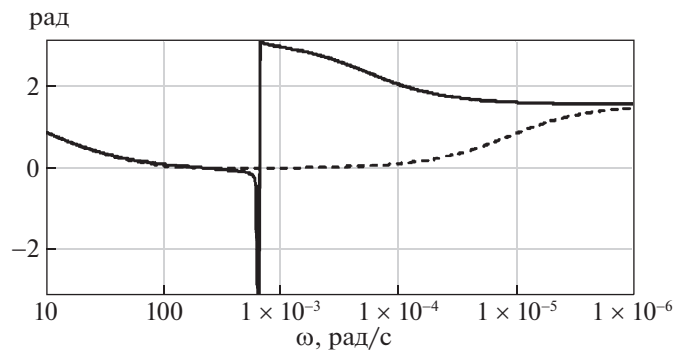


Рис. 4. Фазовый угол инерционного движителя $\phi_1(\omega) = \arg N_2(i\omega)$ (сплошная кривая). То же с подавленным резонансом $\phi_2(\omega) = \arg H_1(i\omega)$ (пунктирная кривая)

Функцию передачи движителя, включенного в третий, вспомогательный контур управления, показанного на рис. 2, можно записать следующим образом:

$$H_1(i\omega) = \frac{N_2(i\omega)}{1 + K_S N_2(i\omega)}. \tag{2.4}$$

Здесь K_S – полный коэффициент усиления цепи, состоящей из звеньев $W_{30.c}(i\omega)$, $W_{A_3}(i\omega)$ и коэффициента передачи акселерометра A_3 (в единицах $\text{В/м} \cdot \text{с}^{-2}$). Величина K_S может варьироваться в зависимости от того, насколько широкая “площадка” необходима на кривой $|H_1(i\omega)|$ для размещения фильтров или корректоров (на рис. 3 представлена кривая $|H_1(i\omega)|$ для $K_S = 20 \text{ В/м} \cdot \text{с}^{-2}$).

Подчеркнем преимущества рассматриваемой цепи управления, содержащей ИД с подавленным механическим резонансом. В исходном состоянии резонанс ИД может быть использован для создания цепи узкополосного управления, однако для этого собственная частота движителя должна быть настроена на подавляемый резонанс поперечных колебаний плиты. Очевидно, что такое решение сопряжено с высокими требованиями к механической конструкции ИД. При подавленном же собственном резонансе ИД является широкополосным звеном, а настройка полосы (диапазона) управления осуществляется с помощью электрических полосовых пропускающих фильтров (включены в звено $W_{20.o.c}(i\omega)$). Важно также, что в этом случае один ИД с подавленным резонансом может быть включен в цепи для подавления двух (или более) резонансов поперечных колебаний плиты.

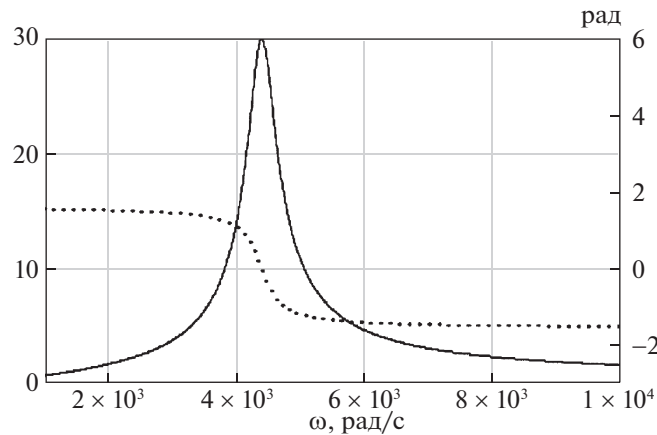


Рис. 5. АЧХ и ФЧХ полосового пропускающего фильтра $F_1(i\omega)$, включенного в звено $W_{20.c}(i\omega)$ второго контура управления

Выбор схемы полосно-пропускающего фильтра определялся характером спектра резонансов плиты, полученного компьютерным моделированием. Для используемой в макете несущей плиты из плексигласа размером $450 \times 450 \times 100$ мм³ рассчитанные частоты первых резонансов распределены таким образом: 431, 643, 809, 1009, 1634, 1664, 1731, 1969, 2184, 2380 Гц. Видно, что для управления отдельными резонансами в цепи обратной связи необходимы фильтры с добротностью порядка 10. Подходящей для данной цели является схема активного фильтра с многопетлевой обратной связью [16, 17], реализующей полосовой пропускающий фильтр второго порядка (в случае, когда соответствующий фильтр нижних частот имеет первый порядок). Его функция передачи имеет вид

$$F_1(i\omega) = \frac{K_1 (\omega_0/Q) i\omega}{(i\omega)^2 + (\omega_0/Q) i\omega + \omega_0^2}. \quad (2.5)$$

Простая процедура расчета цепей обратной связи [16] позволяет получить заданные: максимальный коэффициент передачи K_1 , добротность, которая определяется соотношением $Q = \omega_0/(\omega_b - \omega_n)$, где ω_b и ω_n – верхняя и нижняя границы модуля функции передачи фильтра на уровне 0.707 максимального значения кривой передачи, и центральную частоту $\omega_0 = \sqrt{\omega_b \omega_n}$.

На рис. 5 показаны АЧХ и ФЧХ фильтра со следующими параметрами: $\omega_0 = 700 \times 2\pi$, $Q = 10$, $K_1 = 30$.

Функция передачи замкнутого второго контура по внесенному сигналу может быть записана следующим образом:

$$H_2^*(i\omega, n) = \frac{a_n}{f} = \frac{1}{1 + H_1(i\omega)F_1(i\omega)K_2} m_2 R_n(i\omega). \quad (2.6)$$

Здесь a_n – колебание n -й поперечной объемной моды, f – суммарные объемные упругие силы, источником которых является группа опорных движителей, включенных в главный контур управления АВЗУ, $H_1(i\omega)$ – функция передачи ИД с подавленным резонансом (формула (2.4)), $F_1(i\omega)$ – функция передачи полосового пропускающего фильтра (формула (2.5)), включенного в звено $W_{20.o.c}(i\omega)$, K_2 – полный коэффициент усиления цепи вместе с коэффициентом передачи акселерометра A_2 (0.03 В/м · с⁻²), m_2 – активная масса ИД, $R_n(i\omega)$ – функция передачи n -го резонанса плиты (формула (1.3)), играющего роль входного фильтра внесенного сигнала.

При гипотетическом отсутствии в рассматриваемом диапазоне частот объемных резонансов плиты в (2.6) $R_n(i\omega) = 1$, так что уравнение

$$H_2(i\omega) = \frac{1}{1 + H_1(i\omega)F_1(i\omega)K_2} m_2 \quad (2.7)$$

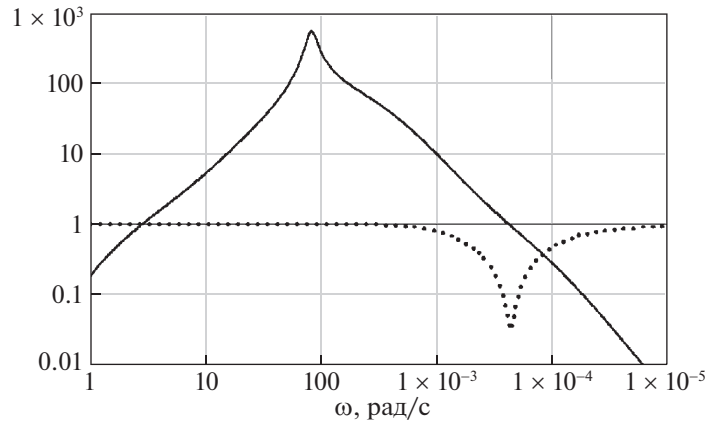


Рис. 6. Частотная зависимость модуля функции передачи разомкнутого первого контура управления $H(i\omega)$ (сплошная кривая) и замкнутого второго контура управления $H_2(i\omega)$ (пунктирная кривая)

представляет собой обобщенную функцию пропускания внесенного сигнала, модуль которой, как видно из рис. 6, имеет вид минимума по форме близким к кривой $F_1^{-1}(i\omega)$ с максимальным коэффициентом подавления ~ 30 дБ на частоте ~ 700 Гц.

На рис. 6 показан также модуль функции передачи разомкнутого первого главного контура управления виброзащитного устройства:

$$H(i\omega) = N_1(i\omega)W_{10.o.c}(i\omega)W_{A_1}(i\omega), \tag{2.8}$$

где

$$N_1(i\omega) = \frac{a}{u} = -i\omega \left(\frac{Z_1(i\omega)W_1(i\omega)}{K} + K \right)^{-1}. \tag{2.9}$$

В данном случае кривая $H(i\omega)$ рассчитана для АВЗУ с верхней границей активного диапазона частот ~ 700 Гц. Подробно расчеты цепей управления АВЗУ представлены в [6].

Из структурной схемы (рис. 2) видно, что цепи, включающие объемные резонансы плиты

$$P_n(i\omega) = N_n(i\omega)W_{10.o.c}(i\omega)W_{A_1}(i\omega), \tag{2.10}$$

где

$$N_n(i\omega) = \frac{a_n}{u} = -i\omega \left(\frac{Z_1(i\omega)R_n(i\omega)}{K} + K \right)^{-1}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \tag{2.11}$$

подключены параллельно цепи обратной связи (2.8). (В приведенных формулах предполагается, что коэффициенты связи акселерометров и движителей с резонансами поперечных колебаний плиты равны единице.)

Выше в качестве образца была представлена функция передачи цепи второго контура управления (2.7), рассчитанного для подавления второй резонансной моды поперечных колебаний несущей плиты ($z_2^R(i\omega)$ согласно (1.3) с частотой $\nu_2 \approx 700$ Гц. Условием возникновения/самовозбуждения паразитных автоколебаний в замкнутой цепи АВЗУ, связанных с этой модой, является соотношение

$$|P_2(i\omega_2)| \geq 1 \tag{2.12}$$

($\omega_2 \approx 700 \times 2\pi$ – круговая частота второй моды резонанса поперечных колебаний плиты).

При включении второго контура управления это условие приобретает вид

$$|P_2(i\omega_2)| \times |H_2(i\omega_2)| \geq 1. \tag{2.13}$$

Для несущей плиты из органического стекла максимум модуля функции передачи рассматриваемого резонанса $|P_2(i\omega_2)| \leq 30$ дБ, а пропускание второго контура цепи управления, как отмечалось выше, $|H_2(i\omega_2)| \approx -30$ дБ. Так что произведение (2.13) оказывается меньше единицы и резонанс при частоте $\nu_2 \approx 700$ Гц подавляется.

Как отмечалось выше, второй контур управления может быть рассчитан для подавления более одного резонанса при условии размещения ИД и акселерометров в позиции с достаточно большим коэффициентом связи с выбранной группой волн.

Заключение. Разработан способ подавления резонансов поперечных колебаний несущей плиты АВЗУ, позволяющий расширить его активный диапазон частот и понизить коэффициент пропускания. Конструкция устройства характеризуется следующими особенностями.

1. Используется второй дополнительный контур управления отдельными, выбранными резонансами поперечных колебаний плиты, для связи с которыми на ее поверхности (или в объеме) устанавливаются акселерометры и инерционные сервисные движители. Второй контур не связан с первым гальванически, его сигнал является для первого внесенным, так что он не влияет на АЧХ и ФЧХ последнего.

2. Резонансы поперечных колебаний плиты могут быть достаточно точно замещены резонансами с сосредоточенными параметрами и представлены рядом импедансов с определенными эквивалентными массой, упругой податливостью и потерями. При соединении n -го импеданса с внешними цепями учитывается коэффициент его связи с акселерометрами и движителями, расположенными в позиции, которая определяется исходя из известной формы волны n -й гармоники резонанса поперечных колебаний плиты (обычно вблизи от максимума волны). Форма волны, резонансные частоты, параметры замещающих резонансов, а также коэффициенты связи n -й гармоники с акселерометрами и движителями определяются аналитически или компьютерными вычислениями.

3. Рассматриваемая конструкция описывается структурной схемой, связывающей электрические и механические импедансы, которые представляют механические резонансы с сосредоточенными параметрами и резонансы поперечных колебаний плиты в виде замещающих резонансов. Использование правил теории электрических цепей (фактической свертки системы дифференциальных уравнений) позволяет определять динамическое поведение цепи или ее отдельных участков, а также конструктивные, мощностные и массогабаритные характеристики узлов устройства.

4. Поскольку результаты расчета цепей управления АВЗУ представлены на частотной шкале, при необходимости уточненные параметры замещающих резонаторов, а также коэффициенты связи упругой волны с акселерометрами и движителями могут быть легко получены (уточнены) экспериментально на макете или опытном экземпляре устройства с помощью низкочастотного анализатора спектра.

Отметим, что разработанное устройство может быть использовано также для подавления резонансных колебаний в трубопроводах, вентиляционных воздуховодах, панелях-выгородках, оптических столах, элементах конструкции машин, приборных стоек и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hoque Md. E., Mizuno T., Ishino Y., Takasaki M.* A Six-Axis Hybrid Vibration Isolation System Using Active Zero-PowerControl Supported by Passive Weight Support Mechanism // J. Sound and Vibration. 2010. V. 329. № 17. P. 3417–3430.
2. Acoustic, Vibration & EMI Isolation Specialists: <http://www.herzan.com>
3. Imaging Ellipsometry – Active Vibration Isolation: <http://www.halcyonics.com>
4. *Carlos M. Grodinsky, Mark S. Whorton* Survey of Active Vibration Isolation Systems for Microgravity Applications // J. Spacecraft and Rockets. 2000. V. 37. № 5. P. 586–596.
5. *Мелик-Шахназаров В.А., Стрелов В.И., Софьянчук Д.В., Безбах И.Ж.* Новая конструкция активных виброзащитных устройств // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 6. С. 61–67.
6. *Мелик-Шахназаров В.А., Софьянчук Д.В., Стрелов В.И., Трегубенко А.А.* Динамические звенья и границы эффективности активных виброзащитных устройств // Изв. РАН. ТИСУ. 2019. № 2. С. 90–97.
7. *Мелик-Шахназаров В.А., Стрелов В.И., Софьянчук Д.В., Трегубенко А.А.* Активные виброзащитные устройства с инерционными сервисными движителями // Космич. исслед. 2018. Т. 56. № 2. С. 156–159.

8. *Митрофанов Ю., Пикерсгиль А.* Электродинамическая обратная связь в акустических системах // Радио. 1970. № 5. С. 25–26.
9. *Эфрусси М.* О воспроизведении низших звуковых частот // Радио. 1974. № 7. С. 32–35.
10. *Дорф Р., Бишоп Р.* Современные системы управления / Пер. с англ. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.
11. Основы автоматического управления / Под ред. Пономарева В.М., Литвинова А.П. М.: Высш. шк., 1974. 439 с.
12. *Мелик-Шахназаров В.А., Стрелов В.И., Софиянчук Д.В., Трегубенко А.А.* Функции передачи электродинамических преобразователей в цепях управления активных виброзащитных устройств // Инженерная физика. 2017. № 2. С. 20–26.
13. *Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У.* Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1985. 474 с.
14. *Биргер И.А., Пановко Я.Г.* Прочность, устойчивость, колебания: справочник в 3 т. Т. 3. М.: Машиностроение, 1968. 568 с.
15. *Вахитов Я.Ш.* Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура. М.: Искусство, 1980. 416 с.
16. *Фолкенберри Л.* Применение операционных усилителей и линейных ИС / Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 572 с.
17. *Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Г.* Справочник по активным фильтрам / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1983. 128 с.