

12

## Новая конструкция активных виброзащитных устройств

© В.А. Мелик-Шахназаров, В.И. Стрелов, Д.В. Софьянчук,  
И.Ж. Безбах

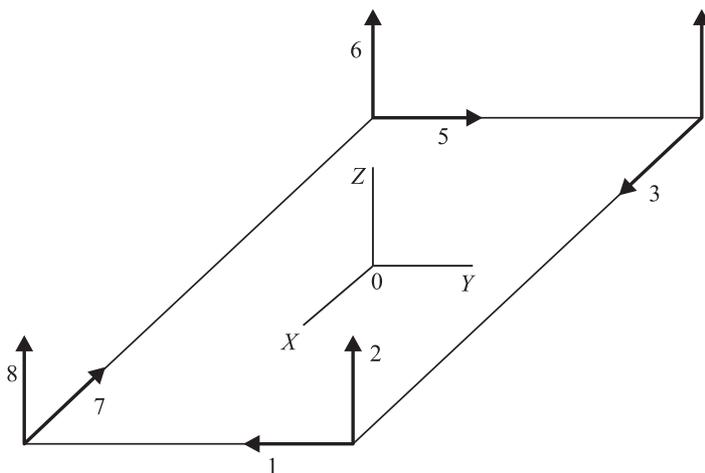
Филиал Института кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН  
Научно-исследовательский центр „Космическое материаловедение“,  
Калуга  
E-mail: kmikran@spark-mail.ru

Поступило в Редакцию 24 октября 2011 г.

Разработана принципиально новая конструкция активных виброзащитных устройств, позволяющая преодолеть ограничения по активному диапазону частот и максимальному коэффициенту подавления колебаний, присущие известным устройствам. Показано, что эти ограничения вызваны „паразитным“ сигналом наклона акселерометров в поле притяжения Земли, предложен способ его компенсации так, что уже с простыми электронными цепями нижняя граница активного диапазона виброзащитных устройств понижается от 2 до 0.2 Hz, а максимальный коэффициент подавления колебаний увеличивается от 40 до 60 dB.

Современные измерительные приборы и точное технологическое оборудование часто нуждаются в эффективной защите от вибраций. К ним относятся: 1) дифрактометры высокого разрешения (плосковолновая топография, малоугловое рассеяние в пленочных технологиях, метод стоячих волн и т.д.); 2) растровые и просвечивающие электронные микроскопы, системы позиционирования, сканирующие зондовые микроскопы, атомно-силовые микроскопы, наноманипуляторы; 3) лазерные экспериментальные и технологические устройства; 4) аппаратура для выращивания биологических и неорганических кристаллов и т.д. Кроме того, в настоящее время существенно возросла необходимость в активной защите от вибраций (микроускорений) научной аппаратуры на космических аппаратах [1,2], самолетах и других транспортных средствах.

Дорогостоящие массивные фундаменты в подвальных помещениях зданий не всегда способны изолировать аппаратуру от вибраций, вызванных как внутренними (насосы, компрессоры, вентиляторы), так и



**Рис. 1.** Расположение акселерометров и магнитоэлектрических двигателей на плите. Каждая стрелка обозначает соосно расположенную пару акселерометр–двигатель.

внешними (тяжелые транспортные средства) источниками. В этих случаях активные виброзащитные устройства являются более эффективным средством защиты от вибраций. Они существенно снижают требования к уровню шумов в местах расположения измерительных приборов и технологического оборудования.

Однако для многих практических применений известные коммерческие виброзащитные устройства [3–5] недостаточно эффективны из-за ограничения активного диапазона в области низких частот ( $< 2$  Hz) и недостаточно большого коэффициента подавления колебаний ( $\approx 40$  dB).

Предлагается новая система авторегулирования виброзащитных устройств, позволяющая преодолеть указанные выше „врожденные“ ограничения коммерческих приборов. Одним из ее отличий является симметричная ортогональная группа акселерометров и сервисных двигателей, показанная на рис. 1. Такая конструкция позволяет вместо восьмиканального управления по сигналам отдельных акселерометров перейти к шестиканальной схеме, управляющей отдельными модами механических колебаний несущей плиты, установленной на упругих опорах. Для этого сигналы акселерометров  $U_1–U_8$ , показанные на рис. 1, преобразуются в сигналы продольных  $U(LX)$ ,  $U(LY)$ ,  $U(LZ)$  и

торсионных  $U(TX)$ ,  $U(TY)$ ,  $U(TZ)$  мод колебаний плиты следующим образом:

$$\begin{aligned}
 U_7 - U_3 &= U(LX); \\
 U_5 - U_1 &= U(LY); \\
 (U_8 + U_6) + (U_4 + U_2) &= U(LZ); \\
 (U_8 + U_6) - (U_4 + U_2) &= U(TX); \\
 (U_6 + U_4) - (U_8 + U_2) &= U(TY); \\
 U_5 + U_1 &= U(TZ).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Ограничение нижней границы активного диапазона частот известных виброзащитных устройств вызвано тем, что при колебаниях наклона несущей плиты (моды  $TX$  и  $TY$ ) сигналы акселерометров  $U_1 - U_8$  кроме (обычно используемой) динамической составляющей  $U_a(t) = Ka(t)$  (где  $K$  — коэффициент передачи акселерометра по напряжению,  $a(t)$  — ускорение) содержат неинерционный, статический вклад, вызванный изменением проекции силы тяжести инерционной массы на ось чувствительности акселерометров. При колебаниях плиты с малой амплитудой  $\Delta\varphi$  амплитуда статического вклада для акселерометров, ориентированных вертикально и горизонтально, определяется соотношениями  $\Delta U_\varphi^\uparrow = -Kg \sin \varphi \Delta\varphi$  и  $\Delta U_\varphi^\rightarrow = Kg \cos \varphi \Delta\varphi$  соответственно. Если виброзащитная панель установлена горизонтально, то  $\Delta U_\varphi^\uparrow = -Kg \Delta\varphi^2$ , а  $\Delta U_\varphi^\rightarrow = Kg \Delta\varphi$ . При колебаниях панели амплитуда динамического сигнала акселерометров  $\Delta U_a = Ka_m = KL\omega^2 \Delta\varphi$  (где  $L$  — характерный размер панели, а  $\omega$  и  $\Delta\varphi$  — частота и амплитуда угловых колебаний соответственно), так что для отношения статического, „паразитного“ сигнала наклона акселерометров к динамическому сигналу можно записать:

$$\frac{\Delta U_\varphi^\uparrow}{\Delta U_a} = \frac{g \Delta\varphi}{L\omega^2}, \tag{2}$$

$$\frac{\Delta U_\varphi^\rightarrow}{\Delta U_a} = \frac{g}{L\omega^2}. \tag{3}$$

Из соотношений (2) и (3) видно, что помеха от сигнала наклона акселерометров в обоих случаях быстро увеличивается с понижением частоты. Так, по расчетам для конструкции с  $L = 20$  см отношение  $\Delta U_\varphi^\rightarrow / \Delta U_a = 0.1$  при  $\nu = 2.7$  Hz и достигает значения 3 при  $\nu = 0.5$  Hz.

Статический вклад в сигнал пьезоэлектрических акселерометров, измеренный в диапазоне частот 0.1–3 Hz, соответствует приведенным оценкам, равенство  $\Delta U_\phi^- / \Delta U_a = 1$  наблюдается вблизи 1 Hz. Видно, что при частотах  $< 2$  Hz отношение сигнала к сигналу помехи в цепях авторегулирования может быть ниже допустимого уровня.

Сравнение (2) и (3) показывает, что  $\Delta U_\phi^+ / \Delta U_a$  отличается от  $\Delta U_\phi^- / \Delta U_a$  малым сомножителем  $\Delta\varphi \leq 10^{-3}$ . Поэтому в цепях, содержащих вертикально ориентированные акселерометры, помеха будет проявляться при значительно более низких частотах, чем в цепях, содержащих горизонтально ориентированные акселерометры. Это обстоятельство может быть использовано для компенсации (подавления) сигнала наклона акселерометров, ориентированных горизонтально.

Дважды проинтегрированные сигналы углового ускорения мод  $TX$  и  $TU$  определяют углы наклона плиты, так что, как видно из (4) и (5), паразитные сигналы наклона, пропорциональные этим углам, в сигналах трансляционных мод  $U(LX)$  и  $U(LY)$  могут подавлены:

$$P \iint U(TX) dx^2 + (U_5 - U_1) = U_0(LY), \quad (4)$$

$$P_1 \iint U(TU) dt^2 + (U_7 - U_3) = U_0(LX). \quad (5)$$

На рис. 2 представлен преобразователь каналов управления, выполняющий с помощью прецизионных сумматоров С1–С6 функции (1) и содержащий также компенсаторы сигналов наклона акселерометров  $K1$  и  $K2$ , которые выполняют функции (4) и (5). При этом заметим, что сигнал моды  $U(TZ) = U_s + U_1$  не нуждается в компенсаторе, так как паразитные сигналы акселерометров 1 и 5, как видно из схемы на рис. 1, противофазны.

Количественно эффективность новой схемы управления виброзащитных устройств зависит главным образом от характеристик акселерометров и двойных интеграторов. Из двух доступных к настоящему времени типов акселерометров: механических компенсационных, использующихся в навигационных устройствах, и пьезоэлектрических — для измерений вибраций нами выбран второй. Механические акселерометры дороги и функционируют в ограниченном диапазоне частот, до  $\approx 100$  Hz, в то время как во многих случаях верхняя граница активного диапазона частот виброзащитных устройств должна быть

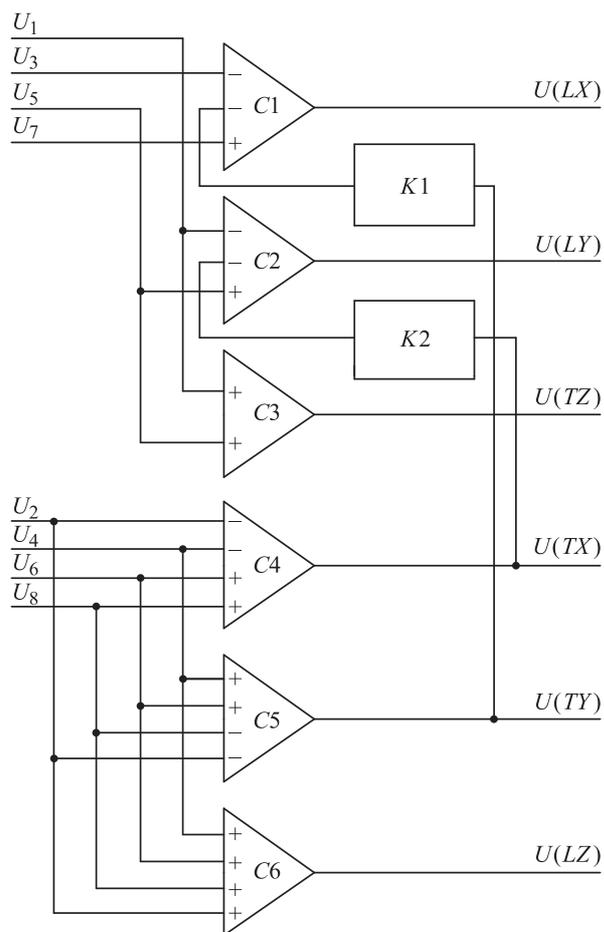
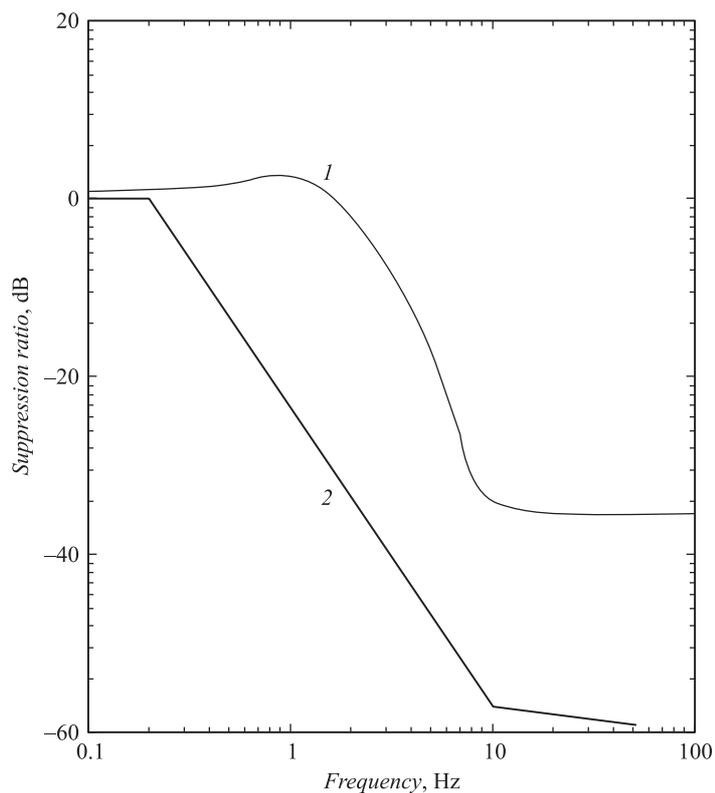


Рис. 2. Разделитель каналов регулирования.

не ниже 300–800 Hz. Пьезоэлектрические акселерометры с коэффициентом передачи от  $0.2V/g_0$  до  $2V/g_0$  обеспечивают остаточный уровень шумов виброзащитной плиты  $10^{-6}g_0-10^{-7}g_0$  в области частот 0.1–10 Hz (использовались малошумящие операционные усилители ОРА627, ОРА111). Проблемы, возникающие в связи с необычно низкой граничной частотой измерительных цепей ( $\approx 0.05$  Hz), представляют



**Рис. 3.** Коэффициент подавления колебаний коммерческого виброзащитного устройства (кривая 1) и новой конструкции, рассчитанной на нижнюю границу активного диапазона частот  $\approx 0.2$  Hz (кривая 2).

собой медленный температурный дрейф сигнала, вызванный термическим расширением корпуса акселерометра и пьезоэлемента. Для устранения температурного дрейфа использовалась многослойная тепловая изоляция корпусов акселерометров, а также, при необходимости, усилители сигнала акселерометров с автоподстройкой нуля.

Нижняя граница активного диапазона частот виброзащитного устройства, построенного по новой схеме, определяется точностью цепей компенсатора сигнала наклона акселерометров, то есть точностью интегрирования. Использование операционных усилителей ОРА111,

ОРА128 с малыми токами смещения ( $\approx 100 \text{ fA}$ ) обеспечивает точность интегрирования не ниже 1%, что отвечает десятикратному понижению границы активного диапазона частот  $c \approx 2$  до  $\approx 0.2 \text{ Hz}$ .

Цепи авторегулирования виброзащитной панели, за исключением преобразователей каналов и компенсаторов сигнала наклона акселерометров, строятся по стандартным схемам (см., например, [6]). Рассчитанная функция передачи шести идентичных авторегуляторов обеспечивает кривую подавления колебаний, показанную на рис. 3. Видно, что при десятикратном понижении граничной частоты активного диапазона частот и десятикратном увеличении максимального коэффициента подавления колебаний существенно расширяется область применения новых виброзащитных устройств. Так, в области частот 2–6 Hz, в которой, как правило, наблюдаются резонансные колебания зданий, эффективность новых виброзащитных устройств, в отличие от коммерческих, существенно выше.

В заключение необходимо отметить, что описанная выше новая конструкция активных виброзащитных устройств фактически представляет собой исходную принципиальную схему, на основе которой могут быть построены устройства с различными заданными параметрами, отличающиеся степенью совершенства электронных узлов и параметрами акселерометров.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2007–2013 годы“ (Государственный контракт № 16.513.11.3093 от 26.07.2011 г.).

## Список литературы

- [1] Захаров Б.Г., Волков П.К., Серебряков Ю.А., Стрелов В.И., Осипьян Ю.А. // Поверхность. 2001. № 9. С. 48–55.
- [2] Стрелов В.И., Захаров Б.Г., Сидоров В.С., Безбах И.Ж., Артемьев В.К. // Поверхность. 2005. № 10. С. 80–86.
- [3] [www.herzan.com](http://www.herzan.com)
- [4] [www.halcyonics.de](http://www.halcyonics.de), [www.halsyonics.com](http://www.halsyonics.com)
- [5] [www.herz.co.jp/english/](http://www.herz.co.jp/english/)
- [6] Трофимов А.И., Егунов Н.Д., Дмитриев А.Н. Методы теории автоматического управления, ориентированные на применение ЭВМ. М.: Энергоатомиздат, 1997.