
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.
НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ**

УДК 628.517.4; 699.842

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

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ЦЕПИ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ АКТИВНЫХ
ВИБРОЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Исследованы особенности электронных цепей управления для активных виброзащитных устройств (АВУ) нового типа с расширенным активным диапазоном частот и увеличенным максимальным коэффициентом подавления колебаний. Показано, что разработанные схемотехнические и конструктивные решения позволяют использовать в цепях управления новых АВУ стандартные пьезоэлектрические акселерометры, высокий коэффициент передачи которых сопряжен с низкой частотой резонанса и большим паразитным сигналом, вызванным изменением температуры.

Кл. сл.: вибрации, защита от вибраций, активная защита от вибраций, акселерометры

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдающийся сегодня глобальный переход к наноразмерным элементам в электронике, сенсорики и другой технике сопровождается разработкой высокоскоростных и высокочувствительных приборов с высоким пространственным разрешением — дифрактометров высокого разрешения, станций пользователей синхротронного излучения, растровых и просвечивающих электронных микроскопов, систем позиционирования, сканирующих зондовых микроскопов, атомно-силовых микроскопов и т. п.

Вся эта лабораторная и технологическая аппаратура нуждается в защите от вибраций [1]. Кроме того, вибрации оказывают существенное влияние на процесс кристаллизации и соответственно структурное совершенство биологических и неорганических кристаллов, выращиваемых не только в земных условиях, но и на борту космических аппаратов [2–4]. Поэтому для обеспечения точностных характеристик как средств измерений для нанотехнологий, так и для создания материалов с заданными свойствами и других целей использование эффективной виброзащитной аппаратуры имеет решающее значение.

Дорогостоящие массивные фундаменты в подвальных помещениях и пассивные виброзащитные устройства не всегда способны изолировать в нужной степени чувствительную аппаратуру от колебаний, которые возбуждаются мощными силовыми машинами и тяжелыми транспортными средствами. В таких случаях активные виброзащитные устройства являются единственным эффективным средством защиты от вибраций.

Известны фирмы HERZAN (США) [5], HALCYONICS (Германия, США) [6], HERZ (Япония) [7], производящие широкий набор активных виброзащитных устройств (панелей) размерами от 400×400×120 мм до 1000×800×130 мм для нагрузок от 60 до 1200 кг. Механическая часть этих приборов состоит из несущей плиты, установленной на пружинах, на которой симметрично расположены восемь акселерометров и восемь сервисных двигателей. Электрические цепи авторегулирования состоят из восьми независимых контуров, включающих пары акселерометр—двигатель. Такая конструкция позволяет подавлять все шесть мод колебаний несущей плиты (три торсионные и три поступательные) с установленным на ней защищаемым объектом.

При этом все коммерческие активные виброзащитные устройства (АВУ) характеризуются нижней границей активного диапазона частот ≈ 2 Гц и максимальным коэффициентом подавления колебаний от 35 до 40 дБ, который достигается при частоте ≈ 10 Гц. Существенно, что указанные характеристики коммерческих устройств являются предельными из-за "паразитного" сигнала наклона акселерометров, возникающего в поле притяжения Земли, который подавляет сигнал ускорения и нарушает функционирование авторегуляторов при низких (≤ 2 Гц) частотах. Кроме того, для многих применений коммерческие АВУ недостаточно эффективны по величине максимального коэффициента подавления колебаний. В основном это относится к зданиям, расположенным вблизи от транспортных магистралей или содержащим собственные источники вибраций.

НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ АКТИВНЫХ ВИБРОЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ

В работе [8] описана предложенная нами новая конструкция АВУ, возможности которой по частоте и максимальному коэффициенту подавления колебаний значительно расширены благодаря следующим конструктивным и функциональным особенностям. Первое, на несущей плите располагается симметричная группа из восьми ортогонально ориентированных акселерометров и сопряженных с ними восьми сервисных двигателей. Второе, введено разделение каналов, что позволяет управлять шестью модами колебаний несущей плиты отдельно. Третье и основное, отдельные сигналы торсионных мод позволяют определять наклоны несущей плиты в поле притяжения Земли и компенсировать "паразитный" сигнал наклона акселерометров, представляющий собой неинерционный статический вклад, вызванный изменением проекции силы тяжести инерционной массы на ось чувствительности акселерометров. Компенсация сиг-

нала наклона позволяет расширить активный диапазон в область низких частот, т. е. преодолеть "врожденные" ограничения коммерческих АВУ. В [8] показано, что, используя для этого несложные электронные цепи, можно сдвинуть границу активного диапазона частот от ≈ 2 до ≈ 0.2 Гц и увеличить максимальный коэффициент подавления колебаний от 35–40 дБ до ≈ 60 дБ (в сравнении с коммерческими устройствами).

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЦЕПЯМ УПРАВЛЕНИЯ НОВЫХ АКТИВНЫХ ВИБРОЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ

Ниже будут рассмотрены дополнительные, расширенные (в сравнении со старыми конструкциями) требования к электронным цепям управления новых АВУ. Все основные элементы цепей управления могут быть проанализированы на однокоординатной схеме АВУ, представленной на рис. 1.

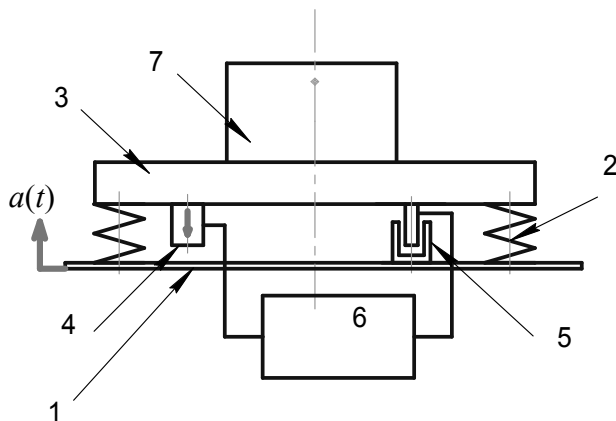


Рис. 1. Однокоординатная схема активного виброзащитного устройства.

1 — опорная плита; 2 — упругие опоры; 3 — несущая плита; 4 — акселерометр; 5 — сервисный магнитоэлектрический двигатель; 6 — электронные цепи управления; 7 — защищаемый объект; $a(t)$ — смещение опорной плиты

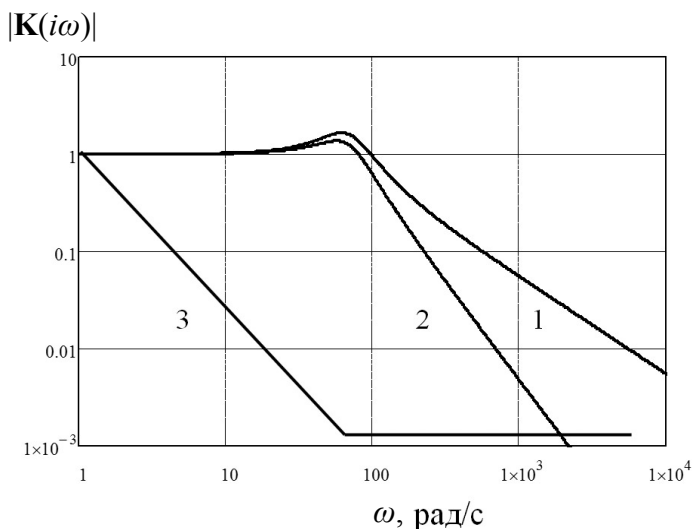


Рис. 2. Модули функции передачи механического осциллятора (схема на рис. 1 без цепи управления).

1 — кривая для входного сигнала в виде смещений $a(t)$ опорной плиты; 2 — кривая для входного сигнала в виде силы, приложенной к несущей плите; 3 — модуль функции передачи функционирующего активного виброзащитного устройства

Из рисунка видно, что АВУ построено на базе механического осциллятора, состоящего из опорной плиты 1, упругих опор 2 и несущей плиты 3, к которому добавлена система управления, включающая в себя акселерометр 4, бесконтактный линейный магнитоэлектрический движитель 5 и электронные цепи 6. На рис. 2 показаны модули функции передачи механического осциллятора $|K(i\omega)|$ (кривая 1 для входного сигнала в виде колебания опоры и 2 — в виде силы, приложенной к несущей плите), а также полной цепи с включенной цепью управления (кривая 3), т. е. функционирующего АВУ. Резонансная частота механического осциллятора ≈ 10 Гц. Устойчивость и динамические характеристики авторегуляторов определяются петлевой функцией передачи $H(i\omega) = M(i\omega) \cdot K(i\omega)$, где $M(i\omega)$ — функция передачи электрических цепей, а $K(i\omega)$ — полная функция передачи механической системы. Последняя может быть представлена как произведение $K(i\omega) = K_A(i\omega) \cdot K_M(i\omega) \cdot K_D(i\omega)$, где $K_A(i\omega)$, $K_M(i\omega)$, $K_D(i\omega)$ — функции передачи акселерометра, механического осциллятора и магнитоэлектрического движителя соответственно. Если конструкции акселерометров и магнитоэлектрических движителей выбраны так, что они не вносят существенного сдвига фазы в активном диапазоне

частот АВУ, то можно считать $K(i\omega) = K_M(i\omega) \cdot K_A \cdot K_D$. Петлевая функция передачи с учетом отмеченных выше условий может иметь такой вид:

$$H(i\omega) = \omega^2 \cdot \frac{1}{1+i\omega T_1} \cdot \frac{1+i\omega T_2}{1+i\omega T_3} \cdot \frac{1}{1+2\xi i\omega T_0 + (i\omega T)^2}. \quad (1)$$

Здесь первый множитель отражает квадратичную частотную зависимость сигнала акселерометра, второй представляет функцию передачи интегратора, третий — корректора, а четвертый — механического осциллятора.

На рис. 3 представлена диаграмма Бode (см., например, [9]), содержащая частотные зависимости модуля функции передачи и фазового угла для построенного указанным образом АВУ. Из кривой фазового угла видно, что авторегулятор устойчив во всем активном диапазоне частот. Частотная зависимость коэффициента подавления колебаний АВУ в данном случае описывается кривой 3 на рис. 1. Горизонтальный участок на кривой 3 обусловлен тем, что при частотах выше ≈ 10 Гц в дополнение к активному подавлению колебаний появляется вклад пассивного звена — упругого осциллятора (кривая 1 на рис. 1).

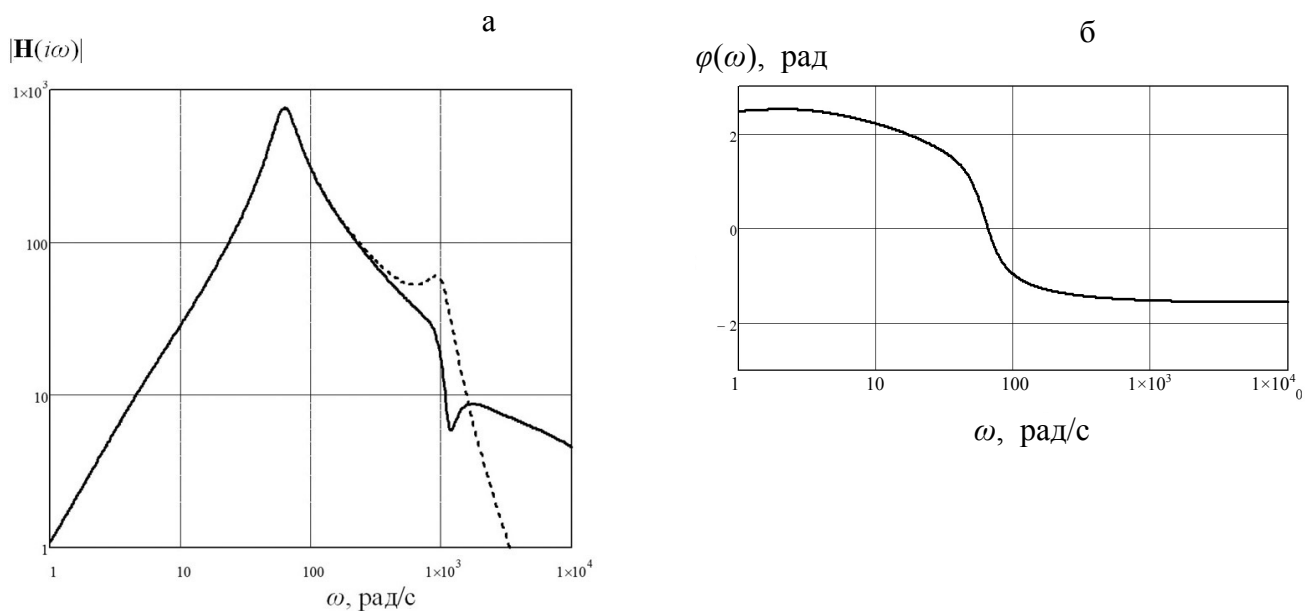


Рис. 3. Диаграмма Бode для активного виброзащитного устройства нового типа.

а — частотная зависимость модуля функции передачи цепи управления АВУ; б — фазочастотная характеристика цепи управления АВУ, $\varphi(\omega) = \arg H(i\omega)$

Параметры кривой 3 подавления колебаний на рис. 1 полностью соответствуют возможностям АБУ нового типа, однако в рассмотренной конструкции не учтен ряд новых требований к элементам цепей управления, связанных с расширением активного диапазона частот и увеличением максимального коэффициента подавления колебаний. Они главным образом связаны с параметрами акселерометров, к числу которых относятся коэффициент передачи, электрическая емкость, сопротивление изоляции, частота резонанса. Важной является также такая "нештатная" характеристика акселерометра, как степень термической изоляции пьезоэлемента от корпуса.

Первое очевидное отличие цепей управления новых АБУ связано с тем, что нижняя граница их активного диапазона частот понижена от ≈ 2 до ≈ 0.2 Гц. Поскольку сигнал акселерометра пропорционален квадрату частоты, десятикратное понижение граничной частоты должно сопровождаться стократным увеличением петлевого коэффициента усиления при низких частотах. С точки зрения схемотехники это легко выполнимо, однако необходимо создать эффективную защиту от электрических и магнитных наводок первого каскада усилителей сигнала и разместить их вблизи от акселерометров.

Другое осложнение, связанное с измерениями низкочастотных колебаний, проявляется в виде медленного (с периодом больше десятков секунд) дрейфа сигнала акселерометров. Этот паразитный сигнал является результатом термических напряжений пьезоэлемента, закрепленного на корпусе акселерометра, которые возникают при колебании температуры. При обычном использовании акселерометров в качестве датчиков вибраций в диапазоне частот 0.5–3 Гц этот паразитный сигнал легко подавляется частотными фильтрами. Для измерения колебаний несущей панели АБУ в диапазоне частот от 0.05 Гц необходимы более сложные комплексные меры его подавления. В зависимости от величины температурного дрейфа сигнала конкретного акселерометра могут быть использованы в отдельности или вместе: а) термическая изоляция корпуса акселерометра и б) усилитель сигнала с автоподстройкой нуля "по постоянному току".

Термическая изоляция акселерометров изготавливается из чередующихся слоев отражающих пленок и тонких слоев из вспененного полиэтилена. Такая изоляция смещает паразитный дрейф сигнала в область низких частот, так что он может оказаться подавленным, поскольку усилитель сигнала акселерометра, функция передачи которого

$$K_y(i\omega) = \frac{i\omega T_{cp}}{i\omega T_{cp} + 1}, \quad (2)$$

представляет собой фильтр верхних частот с граничной частотой $\nu_{cp} = 1/2\pi T_{cp}$ и наклоном модуля функции передачи 20 дБ/дек. при $\nu \leq \nu_{cp}$.

В тех случаях, когда описанные выше способы подавления дрейфа сигнала оказываются недостаточными или если создание термической изоляции невозможно, например, из конструктивных соображений, предусмотрено использование усилителя с автоподстройкой нуля, схема которого представлена на рис. 4. Сигнал акселерометра подается на неинвертирующий усилитель, собранный на операционном усилителе $U1$. Для акселерометра с электрической емкостью ≈ 3 нФ граничная частота усилителя ν_{cp} составляет ≈ 0.05 Гц. Автоподстройка нуля осуществляется с помощью частотно-независимой обратной связи, выполненной на операционном усилителе $U2$. Функция передачи цепи обратной связи соответствует фильтру низких частот, граничная частота которого ν_{oc} определяется цепью $R5, C2$. Поэтому сигнал компенсации температурного дрейфа акселерометра поступает на вход усилителя $U1$ через цепь $R7, R9$ только в области частот $\nu_{cp} \leq \nu_{oc}$. Схема может быть настроена так, что наклон кривой модуля ее функции передачи в области частот ниже ν_{cp} будет равен 40 дБ/дек., т. е. увеличится в 2 раза в сравнении с усилителем без цепей автоподстройки. Поэтому очевидно, что рассмотренным способом достигается весьма эффективное подавление низкочастотного дрейфа сигнала акселерометров.

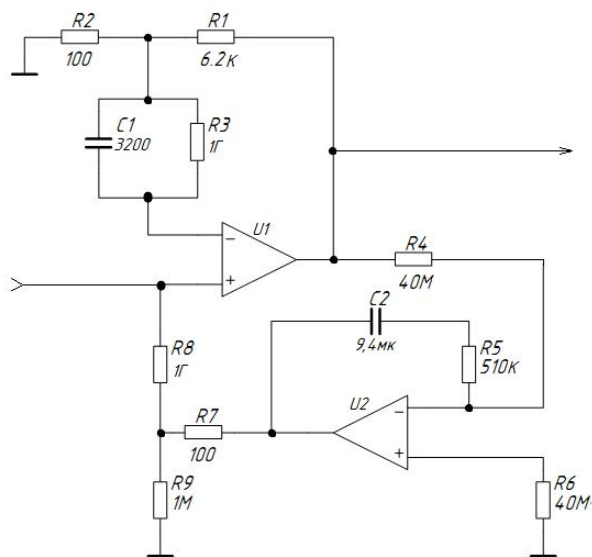


Рис. 4. Принципиальная схема усилителя сигнала акселерометра с автоподстройкой нуля

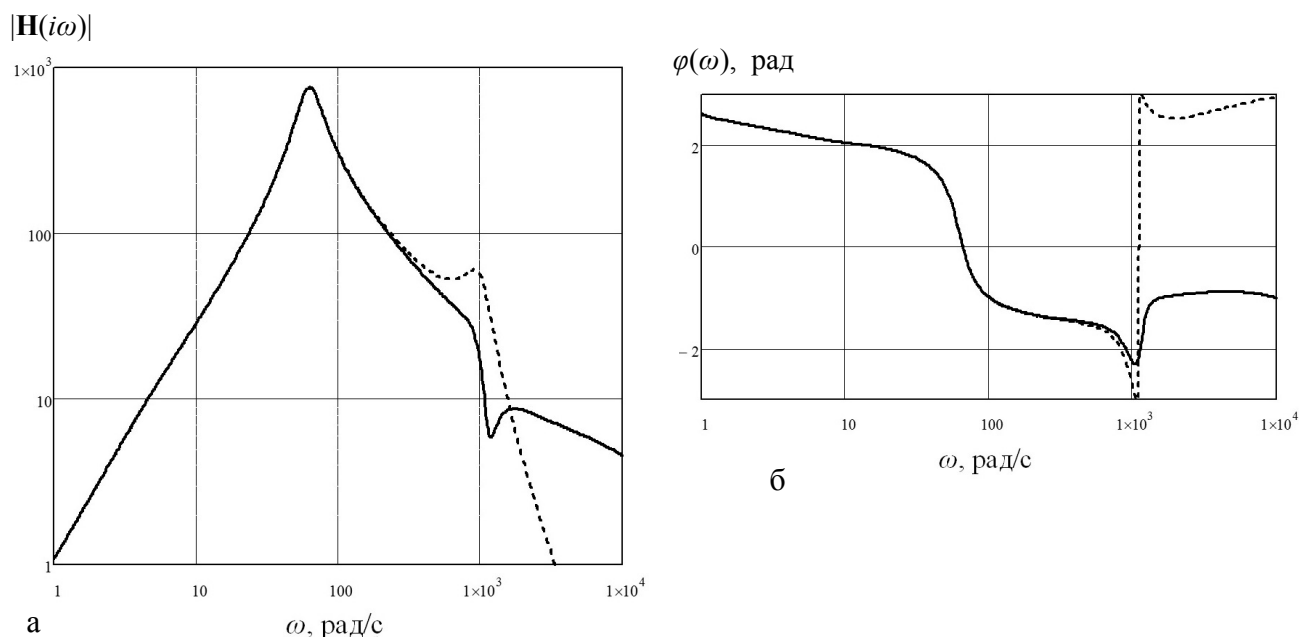


Рис. 5. Диаграмма Бode для активного виброзащитного устройства с цепями управления, содержащими акселерометр, резонанс которого (≈ 180 Гц) находится в активном диапазоне частот.

а — частотная зависимость модуля функции передачи цепи управления АБУ; б — фазочастотная характеристика цепи управления АБУ, $\varphi(\omega) = \arg H(i\omega)$. Пунктирные кривые соответствуют одноконтурной, а сплошные — двухконтурной цепи управления

В [8] отмечено, что для достижения уровня остаточных шумов несущей плиты АБУ в пределах $10^{-6} - 10^{-7} g$ в цепях управления необходимы акселерометры с коэффициентом передачи по напряжению от 0.2 до 2 В/г. Для обычных измерений вибрации различных механизмов в диапазоне частот 0.5–3 Гц достаточна чувствительность акселерометров в 10 или 100 раз ниже, а акселерометры с коэффициентом передачи порядка 2 В/г относят к сейсмоприемникам. Из принципа работы пьезоэлектрического акселерометра, представляющего собой упругий осциллятор (упругим звеном является пьезоэлемент), нагруженный инерциальной массой, следует, что повышение коэффициента передачи акселерометра сопровождается понижением его резонансной частоты. Поэтому в перечне имеющихся конструкций акселерометры с достаточно высоким коэффициентом передачи, ≥ 0.2 В/г, имеют неприемлемо низкую частоту резонанса (200–1000 Гц).

Непригодность акселерометров с низкой частотой резонанса демонстрирует диаграмма Бode, показанная на рис. 5, на которой пунктирная кривая соответствует цепям управления АБУ, содержащим акселерометр с частотой резонанса ≈ 180 Гц. Из кривой $\varphi(\omega)$ на рис. 5, б, видно, что пониже-

ние (отставание) фазы вблизи резонанса акселерометра выводит систему управления из области устойчивости, что в данном случае будет сопровождаться автоколебаниями несущей панели с частотой ≈ 180 Гц.

Для того чтобы подавить автоколебания в рассмотренной цепи авторегулирования была разработана двухконтурная цепь управления, компенсирующая понижение фазы вблизи резонанса акселерометра. Блок-схема такой цепи показана на рис. 6. На схеме видно, что дополнительный контур содержит аттенюатор, корректор и сумматор. Настройка функции передачи этого контура позволяет полностью компенсировать понижение фазы вблизи резонанса акселерометра, как показывают сплошные кривые на рис. 5.

Отметим, что мы располагаем акселерометрами, специально разработанными в ООО "Глобал-Тест" для измерений в области сверхнизких (до 0.001 Гц) частот. Они обладают большим коэффициентом передачи — 0.3–0.6 В/г при частоте резонанса ≈ 8 кГц и, что особенно важно, малой чувствительностью к температуре среды благодаря термической изоляции пьезоэлемента от корпуса. Для их использования необходима только теплоизоляция корпуса. Однако стоимость этих акселерометров

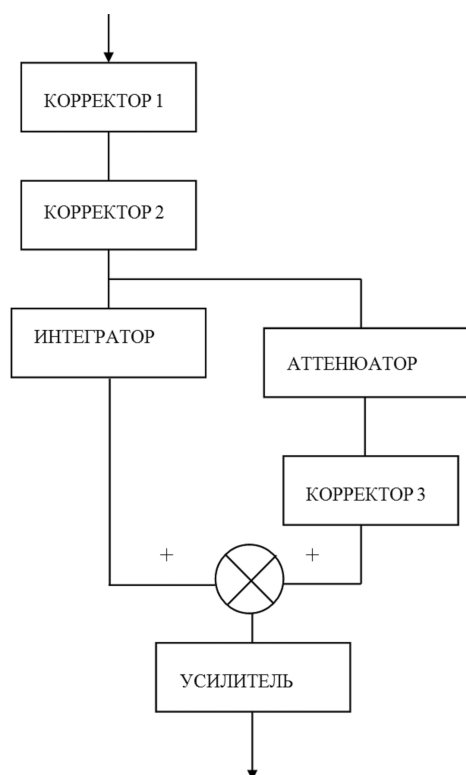


Рис. 6. Блок-схема двухконтурной цепи управления

настолько высока, что их применение оправдано только в АБУ для авиакосмических и других применений, где необходима устойчивость акселерометров к повышенному уровню вибраций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены дополнительные требования и разработаны электронные цепи управления новых АБУ, обеспечивающие десятикратное понижение нижней границы активного диапазона частот даже при использовании стандартных пьезоэлектрических акселерометров. Показано, что разработанные схмотехнические и конструктивные решения позволяют использовать в цепях управления новых АБУ стандартные пьезоэлектрические акселерометры, высокий коэффициент передачи которых сопряжен с низкой частотой резонанса и большим паразитным сигналом, вызванным изменением температуры.

Показано, что при возникновении в виброзащитной системе паразитных резонансов (в области активного диапазона частот) могут быть использованы двухконтурные цепи управления, что позволяет полностью компенсировать отставание фазы функции передачи так, что система не теряет устойчивости.

Для массовых применений АБУ в лабораторных (исследовательских) и производственных условиях можно использовать простые конструкции акселерометров в сочетании с описанными выше схмотехническими и конструктивными приемами, компенсирующими их недостатки.

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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Н. Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2004. 110 с.
2. Стрелов В.И., Сидоров В.С., Захаров Б.Г. Образование полос роста в монокристаллах Ge, выращенных в условиях слабой тепловой конвекции при вибрационных воздействиях на расплав // Кристаллография. 2001. Т. 46, № 4. С. 759–764.
3. Захаров Б.Г., Волков П.К., Серебряков Ю.А., Стрелов В.И., Осипьян Ю.А. Проблемы и перспективы получения в условиях микрогравитации монокристаллов полупроводников с высокой микрооднородностью свойств // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2001. № 9. С. 48–55.
4. Стрелов В.И., Захаров Б.Г., Сидоров В.С., Безбах И.Ж., Артемьев В.К. Математическое моделирование и экспериментальные исследования влияния вибраций и конвекции Марангони на микрооднородность кристаллов полупроводников // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2005. № 10. С. 80–87.
5. URL: (www.herzan.com).
6. URL: (www.halcyonics.com).
7. URL: (www.herz.co.jp/english/).
8. 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.
9. Трофимов А.И., Егупов Н.Д., Дмитриев А.Н. Методы теории автоматического управления, ориентированные на применение ЭВМ. М.: Энергоатомиздат, 1997. 656 с.

*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова
РАН, г. Москва*

Контакты: Мелик-Шахназаров Владимир Алексеевич,
kmikran@spark-mail.ru

Материал поступил в редакцию 12.04.2012.

ELECTRONIC CONTROL CIRCUITS FOR THE NEW GENERATION OF ACTIVE VIBROPROTECTION DEVICES

V. A. Melik-Shakhnazarov, V. I. Strelov, D. V. Sofiyanchuk, I. Zh. Bezbakh

Shubnikov Institute of Crystallography of RAS, Moscow

The features of electronic control circuits for the new design of active vibroprotection devices (AVD) have been investigated, those include the extended active frequency range and increased maximum vibration suppression coefficient. It was shown that the developed schematic and structural solutions allow using standard piezoelectric accelerometers in the control circuits of the new AVD. For these accelerometers high transmission coefficient is coupled with low resonance frequency and great parasitic signal caused by temperature changes.

Keywords: vibration, vibration protection, active vibration protection, accelerometer