

К. т. н. В. И. СТАРЦЕВ, к. т. н. Ю. С. ЯМПОЛЬСКИЙ

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: vist@rtf.ospu.odessa.ua

Дата поступления в редакцию
18.09 2007 г.

Оппонент А. Г. ЯЦУНЕНКО
(Ин-т технической механики, г. Днепрпетровск)

ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Рассматриваются способы уменьшения влияния пьезоэлектрических токов, вызванных воздействием градиента температуры на пьезоэлектрический датчик, на уровень выходного напряжения зарядочувствительных усилителей.

В диагностике и определении вибронпряженности механизмов — как на стадии доводки, так и на стадии эксплуатации — все более широкое применение находят измерения с помощью вибропреобразователей. Наиболее широко применяются пьезоэлектрические вибропреобразователи [1, 2].

Среди многочисленных факторов, влияющих на результаты измерений параметров вибрации, особое значение имеет изменение температуры окружающей среды в месте размещения вибропреобразователя. Коэффициент преобразования современных пьезоэлектрических вибропреобразователей практически не зависит от температуры, но, как отмечено в ряде работ, изменение температуры по объему вибропреобразователя приводит к появлению паразитных зарядов. Подобные явления носят название пьезоэлектричества [3, 4].

Влияние эффекта генерирования паразитных зарядов особенно проявляется при проведении измерений вибрации на низких частотах. Рассмотрим способы устранения этого влияния.

Пьезоэлектрические вибропреобразователи имеют емкостный импеданс и генерируют электрический сигнал мощностью $10^{-12} \dots 10^{-14}$ Вт. Для преобразования заряда в напряжение используются операционные усилители напряжения (ОУ) с большим коэффициентом усиления ($K \gg 1$), охвачен-

ные глубокой параллельной отрицательной обратной связью (ООС) через C_{oc} (рис. 1).

Оба плеча дифференциального усилителя заряда охвачены отрицательной обратной связью через емкости C_{oc} и сопротивления R_{oc} . На положительный вход сигнал по второй цепи C_{oc} и R_{oc} подается через инвертор. Выходное напряжение $U_{вых} = (q_1 - q_2)/C_{oc}$, где q_1 и q_2 — заряды на электродах вибропреобразователя.

Частотная характеристика в области низких частот описывается выражением

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_i}{\omega}\right)^2}},$$

где $\omega_i = 1/R_{oc}C_{oc}$ — нижняя частота среза усилителя заряда по уровню 0,707 (при заданной чувствительности C_{oc}). Величина нижней граничной частоты при этом определяется величиной R_{oc} .

Постоянный перепад температуры приводит к появлению паразитной пьезоэлектрической электризации датчика и медленно меняющегося тока ($I_{пз}$), протекающего на вход зарядочувствительного усилителя. Для датчика АВС-132 величина этого тока равна $I_{пз} \approx 4 \cdot 10^{-10}$ А/°С.

При больших значениях R_{oc} , т. е. при малых значениях нижней граничной частоты усилителя, под

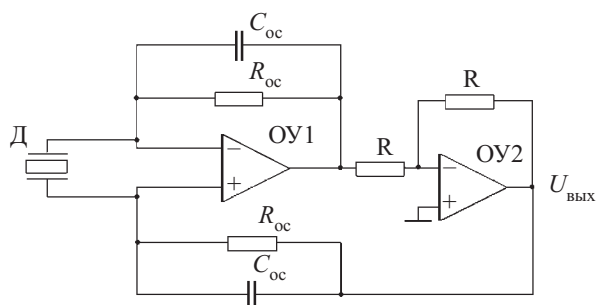


Рис. 1. Симметричный зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ) с параллельной ООС

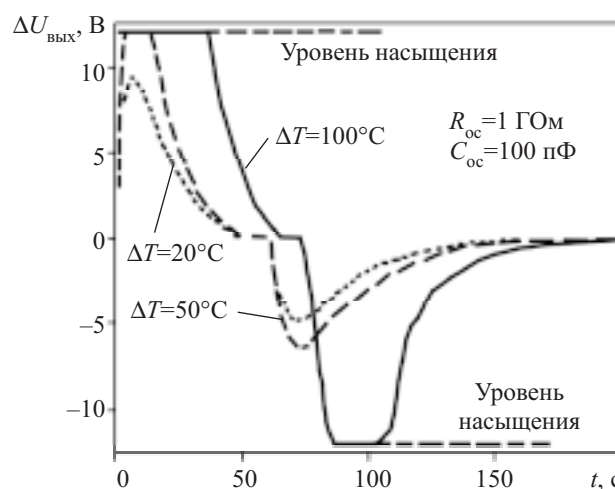


Рис. 2. Изменение уровня выходного напряжения ЗЧУ, вызванное воздействием перепадов температуры на пьезодатчик АВС-132

действием этих токов происходит перегрузка усилителя, и аппаратура может потерять работоспособность на длительное время (см. **рис. 2**, где отражены результаты воздействия перепадов температуры на датчик ABC-132, подключенный к входу зарядочувствительного усилителя).

При этом емкость в цепи обратной связи зарядочувствительного усилителя была выбрана исходя из чувствительности пьезоэлектрического датчика типа ABC-132 ($0,7 \text{ пК}/(\text{м}/\text{с}^2)$), а также из ожидаемого уровня виброускорения $100g$, и равна 100 пФ . Следовательно, максимальная величина напряжения на выходе усилителя не будет превышать 7 В .

Величина резистора в цепи обратной связи была выбрана исходя из требуемого значения нижней граничной частоты ($f_n = 1,5 \text{ Гц}$) и равна 10^9 Ом .

Измерения проводились по методике фирмы Брюль и Кьер [5].

Как видно из приведенных графиков, даже небольшой перепад температуры $\Delta T = \pm 20^\circ\text{C}$ влечет за собой значительное изменение уровня выходного напряжения $\Delta U_{\text{вых}}$. Это приводит к ограничению полезного сигнала и, таким образом, к потере работоспособности усилителя на десятки секунд, а при больших значениях скачка температуры — к потере работоспособности более чем на минуту. Аналогичные результаты были получены при испытании пьезоэлектрического датчика типа 4375 фирмы Брюль и Кьер.

Потеря информации об уровне вибрации (особенно во время переходных процессов в механизмах, когда резко изменяется температура) может привести к пропуску начала развития аварийной ситуации, которую можно было бы предотвратить при нормальной работе контролирующей аппаратуры.

Для устранения такого явления предпринимаются следующие меры.

1. Выбор датчиков с максимальной чувствительностью к изменениям температуры (для разных типов датчиков эта чувствительность может отличаться

в 250 раз — см. **таблицу**). К сожалению, это требование не всегда удается выполнить из-за габаритных, массовых, частотных, температурных или других ограничений [5].

2. Уменьшение влияния температуры с помощью специальных теплоизолирующих покрытий. При внутренних измерениях этот метод может оказаться неприемлемым из-за габаритных ограничений и необходимости обеспечения долговременной механической прочности покрытий в агрессивных средах.

На **рис. 3** отражены результаты воздействия перепадов температуры на датчик ABC-132 с термоизолирующим покрытием. Как видно из графиков, изменение уровня напряжения на выходе усилителя под воздействием перепада температуры стало почти в 3 раза меньше, но при этом процесс возвращения к исходному уровню увеличился во столько же раз. Следует отметить, что и в этом случае наблюдается потеря работоспособности аппаратуры на достаточно большое время.

3. Уменьшение сопротивления резистора в цепи обратной связи (см. **рис. 1**). Действительно, т. к.

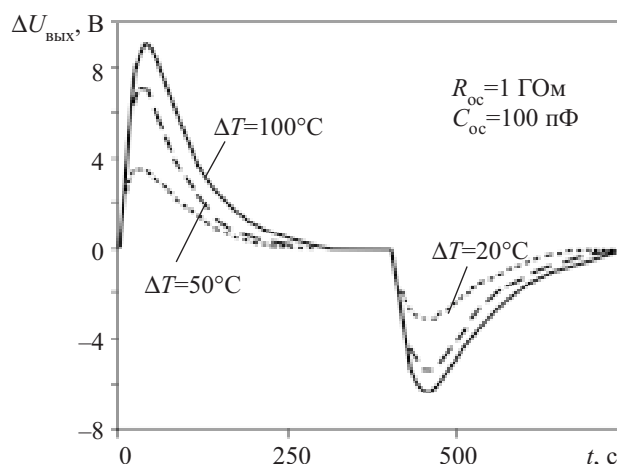


Рис. 3. Изменение уровня выходного напряжения ЗЧУ, вызванное воздействием перепадов температуры на пьезодатчик, покрытый термоизоляцией

Акселерометры пьезоэлектрические Brüel & Kjær 											
		4375 4375V	4393 4393V	4384 4384V	4371 4371V	4391 4391V	4382 4382V	4383 4383V	4370 4370V	4381 4381V	
Масса, г		2,4		11		16		17		54	43
Чувствительность по заряду для Uni-Gain-DeltaShear-типов	пКл/(м·с ⁻²)	0,316±2%		1±2%		1±2%		3,16±2%		10±2%	
	пКл/g	3,1±2%		9,8±2%		9,8±2%		31±2%		98±2%	
Пьезоэлектрический материал		PZ23		PZ23		PZ23		PZ23		PZ23	
Конструкция		DeltaShear		DeltaShear		DeltaShear		DeltaShear		DeltaShear	
Чувствительность к изменениям температуры (номинальное значение НПЧ 3 Гц, 20 дБ/дек	м·с ⁻² /°C	5		0,4		0,2		0,1		0,02	0,04
	g/°F	0,28		0,022		0,011		0,0056		0,0011	0,0022
Диапазон рабочих температур, °C		-74...250		-74...250		-60...180		-74...250		-74...250	
Материал основания		Титан ASTM Gr. 2		Титан ASTM Gr. 2		Титан ASTM Gr. 2		Титан ASTM Gr. 2		Сталь AISI316	Титан ASTM Gr. 2

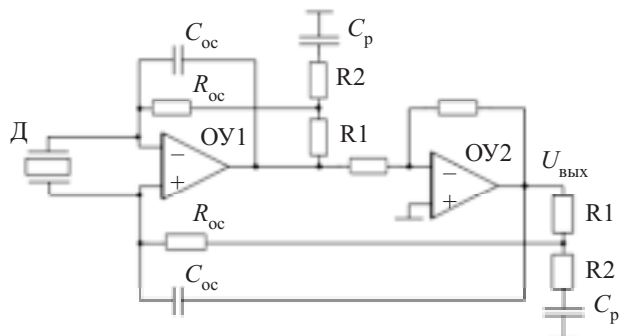


Рис. 4. Схема ЗЧУ с частотно-зависимым делителем в цепи ООС

$U_{\text{вых}} = I_{\text{пз}} R_{\text{oc}} \Delta T$, то уменьшение R_{oc} позволит снизить величину изменения уровня выходного напряжения ЗЧУ под действием паразитного пьезоэлектрического тока, но в этом случае происходит увеличение нижней граничной частоты ЗЧУ

$$f_i = \frac{1}{2\pi R_{\text{oc}} C_{\text{oc}}},$$

что недопустимо, особенно при пусковых режимах работы механизмов.

Использование частотно-зависимого делителя, включенного между выходом усилителя и резистором R_{oc} , позволяет уменьшать сопротивление этого резистора с сохранением полосы пропускания в области низких частот (см. рис. 4).

Коэффициент передачи в этом случае будет иметь вид

$$K = \frac{C_d}{C_{\text{oc}}} \frac{1}{1 + \frac{1 + j\omega\tau_k}{j\omega\alpha \left(\frac{1}{\alpha} + j\omega\tau_k \right)}}$$

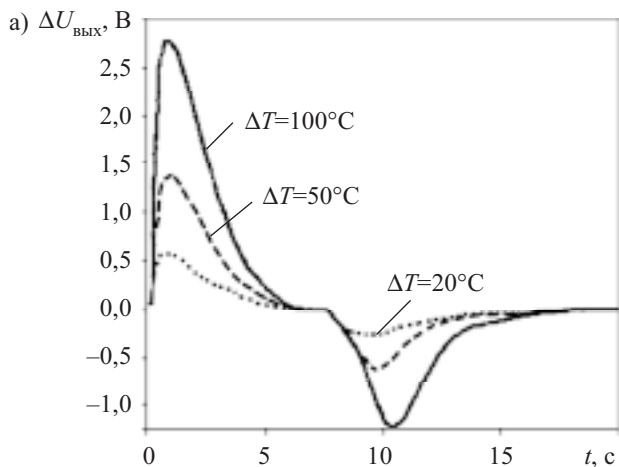
где C_d — емкость датчика;

$\tau_k = R_2 C_p$;

C_p — разделительная емкость;

$\tau = R_{\text{oc}} C_{\text{oc}}$;

$\alpha = (1 + R_1/R_2)$.



Анализ, проведенный с использованием метода Брауде [6], показал, что максимально плоскую форму амплитудно-частотной характеристики можно получить только при выборе C_p из выражения

$$\tau_k = R_2 C_p = 2\tau(\alpha - 1).$$

Номинал резистора R_{oc} в этом случае можно уменьшить в α раз. Полоса пропускания в области низких частот не изменится, а смещение выходного напряжения усилителя под действием пьезоэлектрического эффекта уменьшится во столько же раз (α).

Результаты экспериментальных исследований воздействия перепада температуры на пьезоэлектрический датчик типа АВС-132, подключенный к входу зарядочувствительных усилителей, собранных по схеме рис. 4, с различными частотно-зависимыми делителями в цепи ООС, представлены на рис. 5 ($f_n = 1,5$ Гц).

Как видно из рис. 5, под воздействием паразитного пьезоэлектрического тока напряжение на выходе зарядочувствительного усилителя с частотно-зависимым делителем изменялось незначительно даже при перепаде температуры в 100°C , что позволило произвести запись вибросигнала без потерь.

На рис. 6 приведена запись сигнала, полученного при испытании механизма, работающего с большой нагрузкой. Для измерения уровня вибрации использовалась схема усилителя, показанного на рис. 1, и схема усилителя, показанного на рис. 4 ($\alpha = 10$). При использовании ЗЧУ со схемой по рис. 1 испытания были остановлены на 90-й секунде (см. рис. 6, а), т. к. прекратилась запись сигналов от датчиков виброускорения (произошла перегрузка зарядочувствительного усилителя). При испытаниях со схемой ЗЧУ по рис. 4 запись сигнала, как видно из рис. 6, б, продолжалась на протяжении всего времени испытаний при больших перепадах температуры, воздействующих на пьезоэлектрический датчик.

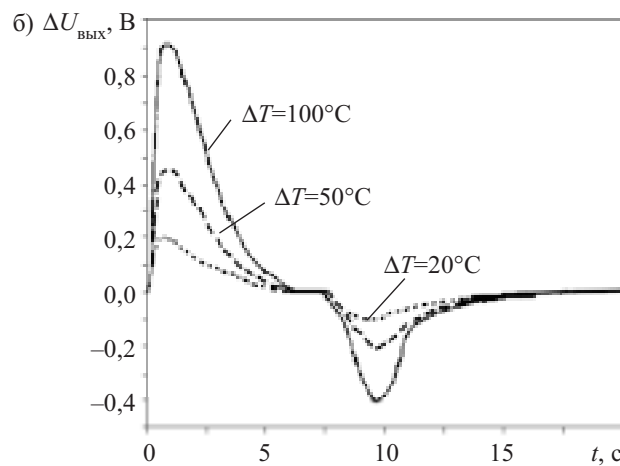


Рис. 5. Изменение уровня выходного напряжения ЗЧУ с частотно-зависимым делителем в цепи ООС, вызванное воздействием перепадов температуры на пьезодатчик:

а — $C_{\text{oc}} = 100$ пФ; $R_{\text{oc}} = 100$ Ом; $R_1 = 20$ МОм; $R_2 = 2$ МОм; $\alpha = 10$; $C_p = 0,1$ мкФ;

б — $C_{\text{oc}} = 100$ пФ; $R_{\text{oc}} = 30$ Ом; $R_1 = 20$ МОм; $R_2 = 0,7$ МОм; $\alpha = 30$; $C_p = 0,25$ мкФ

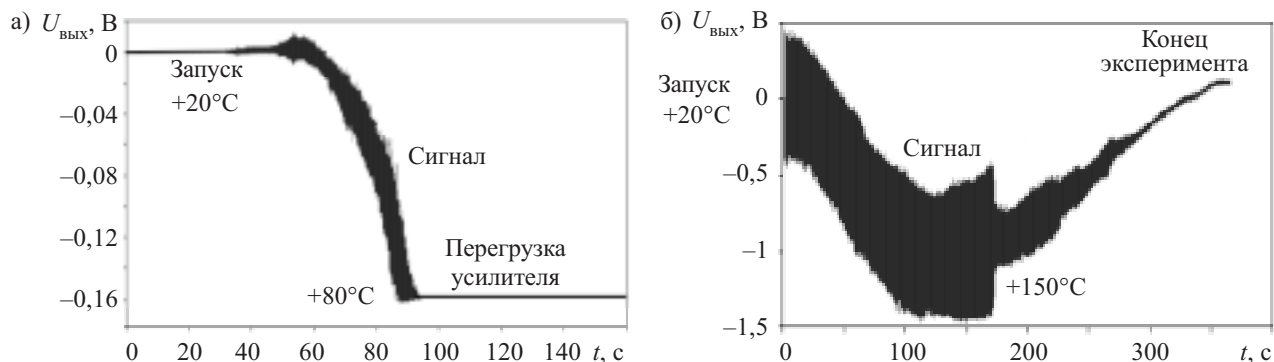


Рис. 6. Запись сигнала, полученного при испытании механизма (датчик АВС-132):
 а — схема ЗЧУ по рис. 1, $R_{oc}=1$ ГОм, $C_{oc}=100$ пФ; б — схема ЗЧУ по рис. 4, $\alpha=10$, $R_{oc}=100$ МОм, $C_{oc}=100$ пФ

Таким образом, можно избежать влияния эффекта генерирования паразитных зарядов на точность измерительных пьезоэлектрических вибропреобразователей. Это достигается оптимальным выбором датчика, использованием конструктивных теплоизолирующих решений и схемотехнических способов.

Экспериментальные исследования подтвердили правильность принятых мер по снижению влияния пьезоэлектрических токов, вызванных воздействием градиента температуры на пьезоэлектрический датчик, на уровень выходного напряжения зарядочувствительного усилителя.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Максимов В. П. Измерение, обработка и анализ быстропротекающих процессов в машинах. — М.: Машиностроение, 1987.
2. Шарапов В. М., Минаев И. Г., Бондаренко Ю. Ю. и др. Пьезоэлектрические преобразователи. — Черкассы: ЧГТУ, 2004.
3. Барфут Дж., Тейлор Дж. Полярные диэлектрики и их применение. — М.: Мир, 1981.
4. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. — М.: Техносфера, 2005.
5. www.pribor.ru
6. Мамонкин И. Г. Усилительные устройства. — М.: Связь, 1977.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Болл С. Р. Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров. — М.: Додэка, 2007. — 360 с.

Данное издание является практическим пособием по применению различных интерфейсов для подключения аналоговых периферийных устройств к компьютерам, микропроцессорам и микроконтроллерам. Раскрывается специфика применения таких интерфейсов как I2C, SPI/Microware, SMBus, RS-232/485/422, токовая петля 4—20 мА и др. Дается обзор большого количества современных датчиков: температурных, оптических, ПЗС, магнитных, тензодатчиков и т. д. Подробно описываются контроллеры, АЦП и ЦАП, их элементы — УВХ, ИОН, кодеки, энкодеры. Рассмотрены исполнительные устройства — двигатели, терморегуляторы — и вопросы их управления в составе систем автоматического управления различного типа (релейного, пропорционального и ПИД). Книга снабжена иллюстрациями, наглядно представляющими аппаратные и программные особенности применения элементов аналоговой и цифровой техники.

Заинтересует не только начинающих радиолюбителей, но и специалистов, имеющих стаж работы с аналоговой и цифровой техникой, а также студентов технических колледжей и ВУЗов.

НОВЫЕ КНИГИ



Афонский А., Дьяконов В. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. — М.: Солон, 2007. — 544 с.

Описаны самые современные измерительные приборы: измерители R, C и L, мультиметры, измерительные ВЧ- и НЧ-генераторы, импульсные и функциональные генераторы, аналоговые и цифровые стационарные и портативные осциллографы, в том числе уникальные. Особое внимание уделено массовым дешевым (бюджетным) приборам и технике измерений, в том числе с применением виртуальных и компьютеризированных лабораторий, и их применению в практике электронных измерений. Ряд материалов посвящен работе с современными цифровыми осциллографами и функциональными генераторами. Рассмотрена современная элементная база и схемотехника измерительных устройств. В книге около шестисот иллюстраций и осциллограмм.

Для работников служб ремонта и сервиса сложной электронной техники, научных работников и инженеров, студентов, аспирантов, преподавателей и лаборантов ВУЗов, а также для подготовленных радиолюбителей.