

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

Украина, Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: vist@irt.opu.ua

Дата поступления в редакцию  
23.04 2009 г.

Оппонент А. Г. ЯЦУНЕНКО  
(ИТМ, г. Днепропетровск)

## УМЕНЬШЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ НА РАБОТУ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

*Предлагается способ подавления пироэлектрических помех, обеспечивающий работоспособность пьезоэлектрических датчиков при значительных перепадах температуры в заданной полосе частот.*

Современные технологии требуют постоянного контроля параметров технологических процессов и технического состояния оборудования. Одним из важнейших является контроль параметров вибрации. Вибрационный процесс содержит большой объем важнейшей информации, которая позволяет диагностировать техническое состояние механизмов и оперативно устранять дефекты [1].

Одним из существенных факторов, влияющих на результаты измерений параметров вибрации, является изменение температуры окружающей среды. Изменение температуры в месте установки пьезоэлектрического датчика приводит к появлению пироэлектрического паразитного заряда, что может привести к перегрузке зарядочувствительного усилителя и к полной потере информации при измерениях вибрации в низкочастотном диапазоне [2, 3]. Очевидно, что потеря информации, особенно во время переходных процессов в механизмах, когда резко изменяется температура, может привести к пропуску начала развития аварийной ситуации, которую можно было бы

предотвратить в случае нормальной работы измерительной аппаратуры.

В настоящей работе предлагается способ подавления пироэлектрических помех, обеспечивающий работоспособность пьезоэлектрических датчиков при значительных перепадах температуры в заданной полосе частот с помощью частотно-зависимой цепи обратной связи.

На рис. 1 приведена схема усилителя напряжения пьезоэлектрического датчика без коррекции частотной характеристики [3, с. 186]. Пьезоэлектрический датчик представлен в виде эквивалентной схемы, состоящей из источника напряжения  $U_{вх}$ , собственной емкости датчика  $C_d$  и емкости соединительного кабеля  $C_k$ .

Рассмотрим работу измерительного усилителя с коррекцией амплитудно-частотной характеристики в области низких частот (рис. 2).

Введение в схему измерительного усилителя емкости  $C_p$ , образующий с резистором  $R$  цепь коррекции, позволяет существенно уменьшить влияние пироэлектрических токов на постоянную составляющую выходного измерительного усилителя.

При использовании малогабаритных конденсаторов  $C_p$  для получения необходимой величины постоянной времени в цепи коррекции нужно выбирать высокоомные резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  с сопротивлением, соизмеримым с величиной сопротивления резистора  $R$ , что усложняет настройку аппаратуры. Этот недостаток легко устранить, добавив в схему повторитель на операционном усилителе  $A_1$  (см. рис. 2).

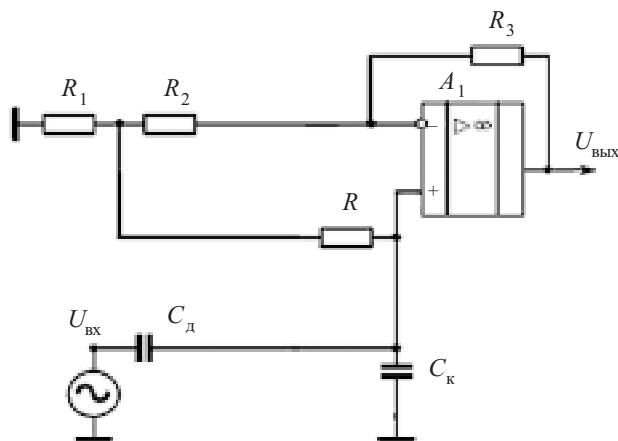


Рис. 1. Измерительный усилитель без коррекции частотной характеристики

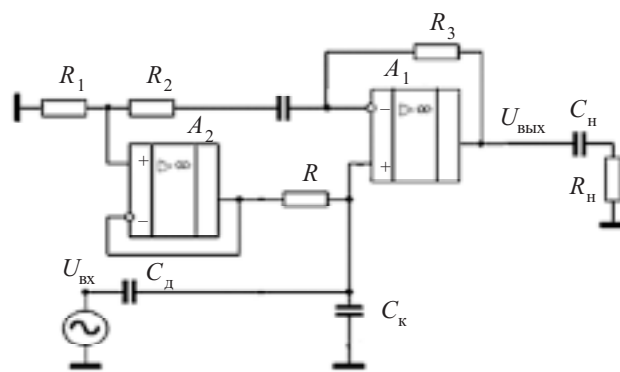


Рис. 2. Измерительный усилитель с коррекцией частотной характеристики

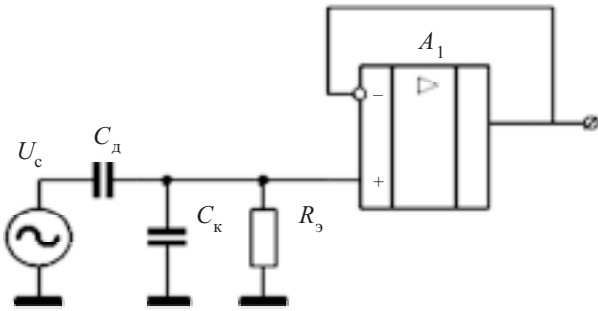


Рис. 3. Эквивалентная схема измерительного усилителя с коррекцией частотной характеристики

Рассмотрим амплитудно-частотную характеристику измерительного усилителя с коррекцией частотной характеристики в области низких частот.

В области средних частот коэффициент передачи усилителя с обратной связью  $K_{ос} = 1 + \frac{R_3}{R_1 + R_2}$  выбирается с учетом коэффициента ослабления сигнала

емкостью кабеля  $K_{осл} = \frac{C_d}{C_k + C_d}$  так, чтобы выполнялось условие

$$K = K_{ос} K_{осл} = \left( \frac{C_d}{C_k + C_d} \right) \left( 1 + \frac{R_3}{R_1 + R_2} \right) = 1.$$

Считая, что операционные усилители  $A_1$  и  $A_2$  идеальны, и представив  $R$  как  $R_3$  (с учетом делителя в цепи обратной связи), получим эквивалентную схему усилителя (рис. 3), где

$$\dot{R}_3 = R / (1 - \dot{K}_{дел}),$$

$$\dot{K}_{дел} = \frac{j\omega C_p R_1}{1 + j\omega C_p (R_1 + R_2)}.$$

Комплексный коэффициент передачи по напряжению усилителя с коррекцией равен

$$\dot{K} = \frac{j\omega R_3 C_d}{1 + j\omega R_3 (C_d + C_k)}.$$

Обозначив  $C_k + C_d = C$ , получим

$$\dot{K} = \frac{C_d}{C} \frac{j\omega \dot{R}_3 C}{1 + j\omega \dot{R}_3 C}.$$

Проведя некоторые преобразования, найдем квадрат модуля нормированного коэффициента передачи усилителя

$$|\dot{M}|^2 = \left| \frac{\dot{K}}{K_{ос}} \right|^2 = \frac{\omega^2 C^2 R^2 + \omega^4 C_p^2 C^2 R^2 R_d^2}{1 - 2\omega^2 R C R_d C_p + \omega^4 C_p^2 C^2 R^2 R_d^2 + \omega^2 (R_2^2 C_p^2 + 2R_2 C_p R C + R C)},$$

где  $R_d = R_1 + R_2$ .

Приравняв между собой коэффициенты при  $\omega^2$  в числителе и знаменателе (метод Брауде [4, с. 137]) и проведя преобразования, получим значение  $C_p$ , обеспечивающее максимально плоскую форму амплитудно-частотной характеристики в полосе пропускания усилителя:

$$C_p = 2RC \frac{a-1}{R_2},$$

где  $a = (R_1 + R_2) / R_1$ .

В области низких частот, с учетом того, что  $a \gg 1$ , получим

$$|\dot{M}| = \sqrt{\frac{\omega^2 C^2 R^2 + 4\omega^4 R^4 C^4 a^2 (a-1)^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2 + 4\omega^4 R^4 C^4 a^2 (a-1)^2}}.$$

Приравняв  $|\dot{M}| = 1 / \sqrt{2}$ , определим нижнюю граничную частоту усилителя

$$\omega = \frac{1}{1,4RCa}.$$

В области низких частот вблизи полосы пропускания, там, где  $\omega^4 \gg \omega^2$ , получим

$$|\dot{M}| = \sqrt{\frac{4\omega^4 R^4 C^4 a^2 (a-1)^2}{1 + 4\omega^4 R^4 C^4 a^2 (a-1)^2}}.$$

Отсюда видно, что угол наклона частотной характеристики пропорционален  $\omega^4$ , следовательно, скорость спада амплитудно-частотной характеристики составляет -40 дБ за одну декаду.

При дальнейшем понижении частоты  $\omega < \frac{0,01}{2RCa^2}$ , т. е. когда  $\omega^4 \ll \omega^2$ , получим

$$|\dot{M}| = \sqrt{\frac{\omega^2 C^2 R^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2}}.$$

В этом случае угол наклона частотной характеристики пропорционален  $\omega^2$ , следовательно, скорость

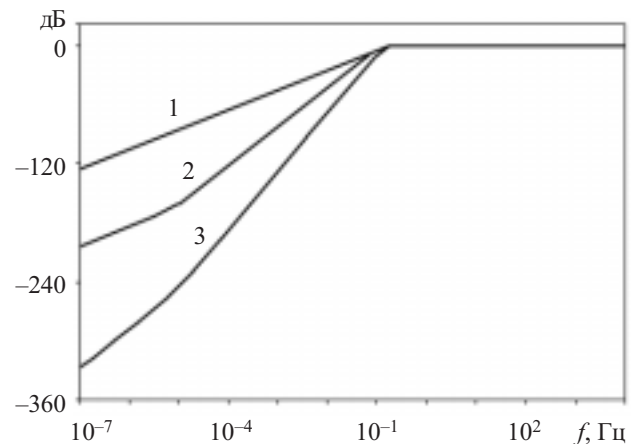


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики усилителей: 1 — без коррекции ( $f_H = 0,15$  Гц); 2 — с коррекцией ( $f_H = 0,15$  Гц); 3 — с коррекцией и дополнительной разделительной цепью

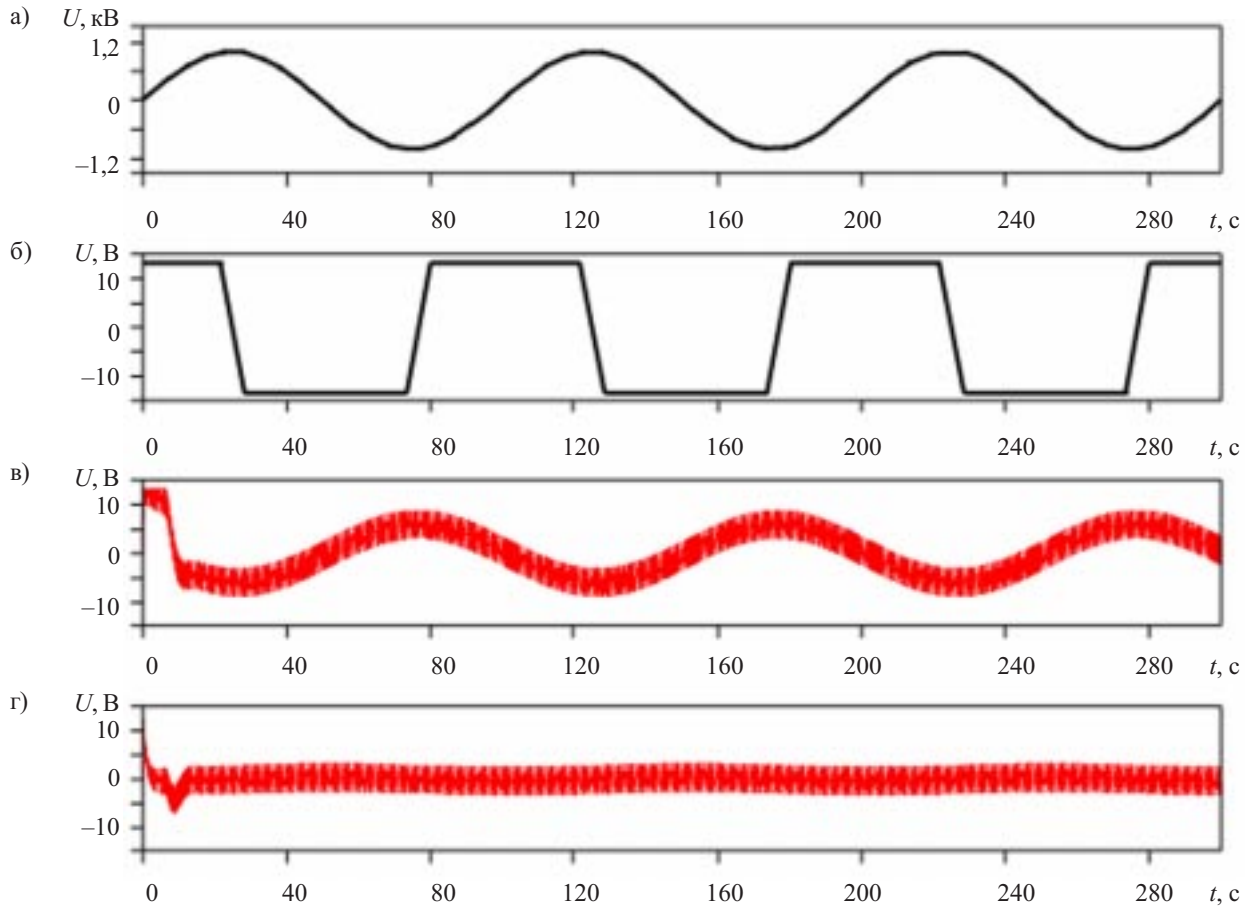


Рис. 5. Помеха (а) и переходные характеристики усилителей без коррекции (б), с коррекцией АЧХ (в) и с коррекцией АЧХ и дополнительной разделительной цепью (г)

спада амплитудно-частотной характеристики составляет  $-20$  дБ за декаду.

Приведенные на рис. 4 амплитудно-частотные характеристики позволяют оценить степень подавления низкочастотных помех, вызванных пьезоэлектрическим эффектом, учитывая, что период установления тепловых процессов составляет от десятков до сотен секунд, что соответствует диапазону частот от  $0,01$  до  $0,001$  Гц.

Дополнительное подавление помехи возможно с помощью разделительной цепи  $C_H, R_H$  на выходе  $A_1$  (см. рис. 2). Постоянная времени этой цепи выбирается равной  $\tau = C_H R_H = 1,4RC_d$ , что позволяет облегчить дальнейшую обработку сигнала.

Приведенные на рис. 5 переходные характеристики позволяют сделать вывод, что низкочастотная коррекция существенно подавляет пьезоэлектрическую помеху, а значит, и обеспечивает работоспособность усилителя с пьезоэлектрическим датчиком при значительных перепадах температуры.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Максимов В. П. Егоров И. В., Карасев В. А. Измерение, обработка и анализ быстропеременных процессов в машинах.— М.: Машиностроение, 1987.
2. Шарапов В. М., Минаев И. Г., Бондаренко Ю. Ю. и др. Пьезоэлектрические преобразователи.— Черкассы: ЧГТУ, 2004.
3. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник.— М.: Техносфера, 2005.
4. Мамонкин И. Г. Усилительные устройства.— М.: Связь, 1977.