

К. т. н. В. И. СТАРЦЕВ, А. А. АНИСИМОВ, А. С. РУССУ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: anilewa1988@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШУМОВ НА РАБОТУ ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ

Рассмотрены проблемы, возникающие при работе зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ) в критических условиях. Предложены упрощенные схемы, математические модели ЗЧУ для исследования влияния шумов операционного усилителя и высокоомного резистора цепи отрицательной обратной связи. Исследована зависимость уровня шумов ЗЧУ от величины компенсации пироэлектрической помехи. Данные математического анализа подтверждены компьютерным схемотехническим моделированием.

Ключевые слова: зарядочувствительный усилитель, шум, помеха, пироэлектричество, моделирование.

Измерение параметров вибрации представляет собой сложную задачу, при решении которой необходимо применять малоинерционные первичные вибропреобразователи, широкодиапазонную и широкополосную усилительно-преобразующую и регистрирующую аппаратуру. На этапе доводочных испытаний и штатной эксплуатации оборудования для диагностирования параметров вибраций широко применяются «внутренние» измерения вибраций, когда датчик находится в прямом контакте с рабочей средой (например, внутри газовой установки). В таком случае повышается информативность результатов измерений динамической активности и оценки технического состояния исследуемого оборудования, однако при этом датчик подвергается воздействию больших перепадов температуры, особенно при переходных режимах работы исследуемого оборудования [1]. Для получения вибрационных характеристик различных установок в этих условиях целесообразно использовать пьезоэлектрические датчики, подключенные к зарядочувствительному усилителю (ЗЧУ), поскольку их коэффициент преобразования практически не зависит от температуры. С другой стороны, как показано в ряде работ, изменение температуры в месте установки датчика приводит к появлению больших пироэлектрических паразитных зарядов, которые не наблюдаются при изотермическом режиме [2, с. 12; 3, с. 40]. Кроме того, на полезный сигнал ЗЧУ влияют шумы операционного усилителя (ОУ) и шум высокоомного резистора в цепи отрицательной обратной связи (ООС) в ЗЧУ.

Шумы операционного усилителя, накладываясь на полезный сигнал, обуславливают аддитивную погрешность при измерениях. Различают внешние и внутренние шумы. Внешние шумы поступают в усилитель с входными сигнала-

ми, и для уменьшения их влияния используют различные схемотехнические и конструктивные решения. Внутренние (тепловые, дробовые, фликкер-шумы) являются собственными шумами усилителя — их уровень пытаются минимизировать на этапе разработки микросхемы усилителя.

Собственные шумы резисторов, которые растут с увеличением температуры [4], ограничивают чувствительность электронных схем и создают помехи при воспроизведении полезного сигнала.

Целью настоящей работы является исследование влияния шумов операционного усилителя и резистора цепи отрицательной обратной связи на полезный сигнал зарядочувствительного усилителя с компенсацией пироэлектрической помехи.

Влияние шума операционного усилителя

В состав исследуемого зарядочувствительного усилителя, схема которого приведена на рис. 1, входят следующие элементы:

— операционный усилитель ОУ₁, охваченный отрицательной обратной связью через параллельную цепочку C_1 , R_1 ;

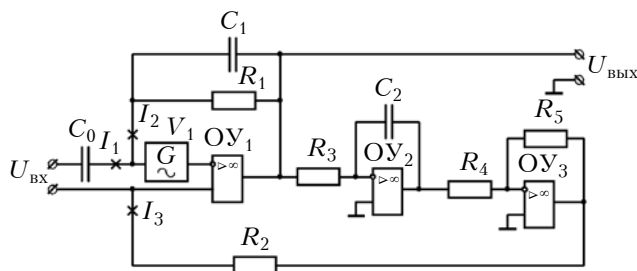


Рис. 1. Схема ЗЧУ с компенсацией пироэлектрической помехи при добавлении шума операционного усилителя

- источник шума V_1 ;
- интегратор ОУ₂, охваченный отрицательной обратной связью через емкость C_2 , его вход соединен с выходом ОУ₁ через резистор R_3 ;
- инвертор ОУ₃, его выход соединен с входом ОУ₁ через резистор R_2 , а вход — с выходом интегратора через резистор R_4 .

В рассматриваемом ЗЧУ применяются три ОУ, коэффициенты передачи без обратной связи которых намного больше 1: $K_{0i} \gg 1$, сопротивления резисторов R_4 , R_5 равны между собой: $R_4=R_5$.

Запишем закон Кирхгофа для токов I_1 , I_2 , I_3 :

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0. \quad (1)$$

Ток на входе ОУ₁ равен

$$I_1 = \frac{U_{\text{вх}}}{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_0}}, \quad (2)$$

где ω — угловая частота;

C_0 — емкость датчика;

$U_{\text{вх}}$ — уровень сигнала на входе усилителя.

Запишем формулы для токов I_2 и I_3 :

$$I_2 = (U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}})(1 + j\omega C_1); \quad (3)$$

$$I_3 = U_{\text{вых}}/R_2, \quad (4)$$

где $U_{\text{вых}2} = -\frac{R_5}{R_4} U_{\text{вых}} \left(\frac{-K_{02}}{1 + j\omega R_3 C_2 (1 + K_{02})} \right)$.

Поскольку $R_4=R_5$, формула (4) преобразуется к виду

$$I_3 = \frac{K_{02} U_{\text{вых}}}{[1 + j\omega R_3 C_2 (1 + K_{02})] R_2}. \quad (5)$$

Подставив в формулу (1) выражения (2), (3), (5) и проведя некоторые математические преобразования с учетом того, что коэффициент передачи $K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$, получим выражение для $\dot{K}$, в котором учтены шумы ОУ:

$$\dot{K} = \frac{j\omega \cdot 2\tau_1 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) - \omega^2 \cdot 2\tau_1^2 (1 + n)}{1 - \omega^2 \cdot 2\tau_1^2 + j\omega \cdot 2\tau_1}, \quad (6)$$

где τ_1 — постоянная времени ОУ1, $\tau_1 = R_1 C_1$;

α — коэффициент компенсации, $\alpha = R_2/R_1$;

n — коэффициент чувствительности усилителя, $n = C_0/C_1$.

Исходя из формулы (6), запишем выражение для модуля комплексного коэффициента передачи ЗЧУ с компенсацией пирозлектрической помехи с учетом влияния шумов ОУ

$$|\dot{K}| = \sqrt{\frac{\omega^4 \cdot 4\tau_1^4 (1 + n)^2 - \omega^2 \cdot 4\tau_1^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right)^2}{(1 - \omega^2 \cdot 2\tau_1^2)^2 + 4\omega^2 \tau_1^2}} \quad (7)$$

и определим его граничные значения:

$$|\dot{K}| \rightarrow 0 \text{ при } \omega \rightarrow 0;$$

$$|\dot{K}| \rightarrow 1 + n \text{ при } \omega \rightarrow \infty;$$

$$|\dot{K}| \rightarrow 1/\alpha \text{ при } \omega = \omega_0 \left(\omega_0 = (\sqrt{2} \cdot \tau_1)^{-1} \right).$$

На рис. 2, а представлены результаты математического моделирования коэффициента передачи ЗЧУ с компенсацией с учетом шума ОУ в со-

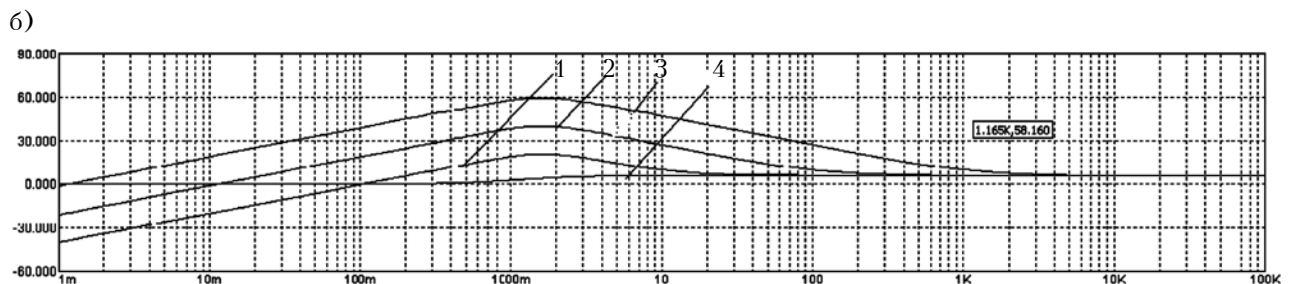
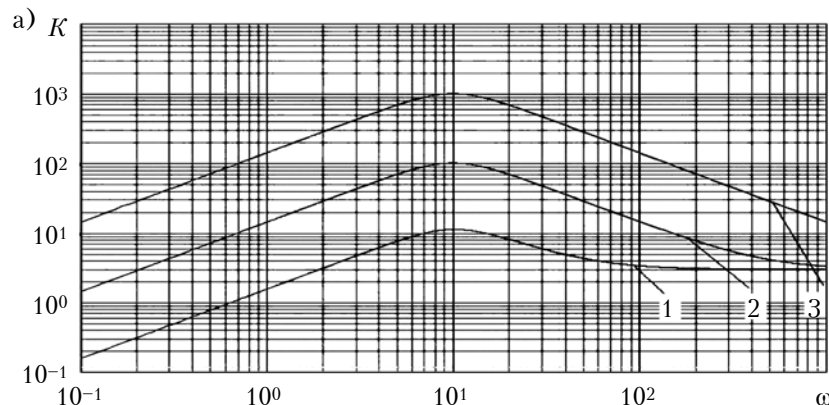


Рис. 2. Зависимость коэффициента передачи ЗЧУ с компенсацией (1–3) и без компенсации (4) с учетом шума ОУ от ω , полученные при моделировании в программной среде MathCad (а) и в схемотехнической среде Micro-Cap (б) при различных значениях α :

1 — $\alpha=10$; 2 — $\alpha=100$; 3 — $\alpha=1000$

ответствии с выражением (6), полученные в программной среде MathCad. Адекватность полученной математической модели подтверждена схемотехническим моделированием в среде Micro-Cap, результаты которого приведены на рис. 2, б. Из приведенных данных видно, что увеличение коэффициента компенсации α на порядок приводит к возрастанию шумов ОУ на 20 дБ.

Влияние шума резистора цепи ООС

Для анализа влияния шума резистора цепи ООС на полезный сигнал ЗЧУ рассмотрим схему, приведенную на рис. 3. Здесь, в отличие от схемы на рис. 1, источник шума V_1 подключен к резистору цепи обратной связи R_1 .

Проведем расчеты, аналогичные приведенным выше.

Запишем выражения, определяющие значения тока на входах операционных устройств:

$$I_1 = j\omega C_0 U_{\text{ВХ}}; \quad (8)$$

$$I_2 = -U_{\text{ВЫХ}} j\omega C_0 - \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_1} + \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1}; \quad (9)$$

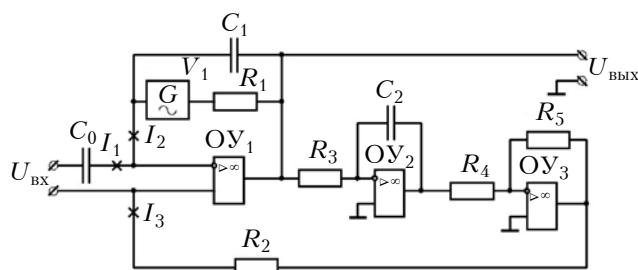


Рис. 3. Схема ЗЧУ с компенсацией пирозлектрической помехи при добавлении шумов резистора ООС

$$I_3 = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_2} = \frac{U_{\text{ВЫХ}} K_{02}}{(1 + j\omega R_3 C_2 (1 + K_{02})) R_2}, \quad (10)$$

где $C_2 = \tau_2 / R_3$;

τ_2 — постоянная времени ОУ₂, $\tau_2 = 2\tau_1 / \alpha$.

Подставив в закон Кирхгофа выражения (8)–(10) и проведя некоторые математические преобразования, получим выражение для $\dot{K}$, в котором учтены шумы резистора цепи ООС:

$$\dot{K} = \frac{j\omega 2\tau_1}{1 - 2\tau_1^2 - 2\omega\tau_1^2}. \quad (11)$$

Исходя из формулы (11), запишем выражение для модуля комплексного коэффициента передачи ЗЧУ с компенсацией пирозлектрической помехи с учетом влияния шумов резистора цепи ООС

$$|\dot{K}| = \sqrt{\frac{4\omega^2\tau_1^2}{(1 - \omega^2 \cdot 2\tau_1^2)^2 + (\omega \cdot 2\tau_1)^2}} = \sqrt{\frac{4\omega^2\tau_1^2}{1 + 4\omega^4\tau_1^4}} \quad (12)$$

и определим его граничные значения:

$$|\dot{K}| \rightarrow 0 \text{ при } \omega \rightarrow 0;$$

$$|\dot{K}| \rightarrow 0 \text{ при } \omega \rightarrow \infty;$$

$$|\dot{K}| \rightarrow 1 \text{ при } \omega = \omega_0.$$

На рис. 4 представлены результаты математического (а) и схемотехнического (б) моделирования коэффициента передачи рассматриваемого ЗЧУ с учетом шума резистора ООС, которые подтверждают правомерность получен-

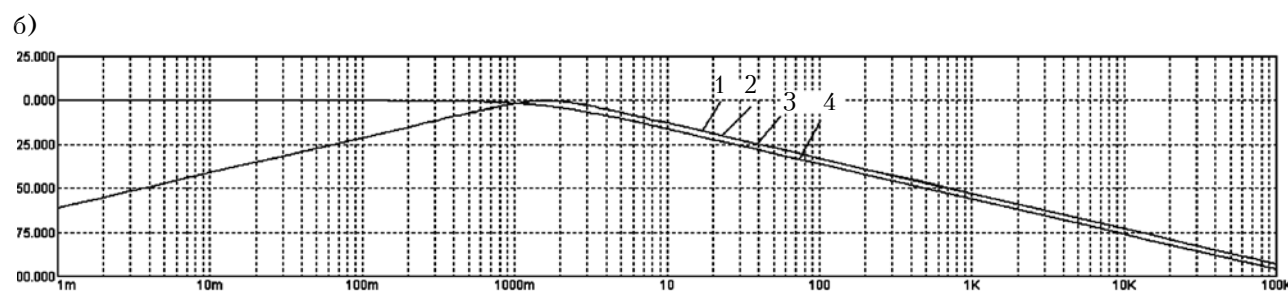
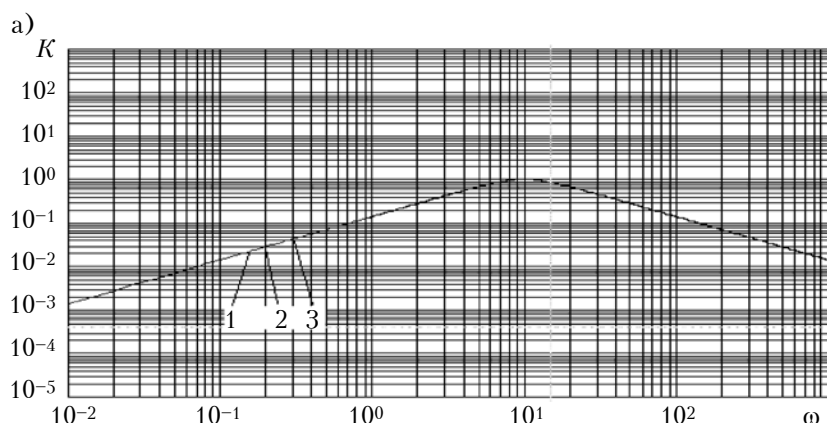


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи ЗЧУ с компенсацией (1–3) и без компенсации (4) с учетом шума резистора цепи ООС от ω , полученные при моделировании в программной среде MathCad (а) и в схемотехнической среде Micro-Cap (б) при различных значениях α : 1 — $\alpha=10$; 2 — $\alpha=100$; 3 — $\alpha=1000$

ной математической модели (12). Приведенные на рисунках данные свидетельствуют о том, что изменение коэффициента компенсации α не влияет на уровень шумов.

Таким образом, проведенное математическое моделирование зарядочувствительного усилителя с компенсацией пьезоэлектрической помехи с учетом шумов операционного усилителя и резистора цепи обратной связи показало, что увеличение коэффициента компенсации приводит к пропорциональному возрастанию уровня шумов и определяется в основном шумом операционного усилителя.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Барфут Дж., Тейлор Дж. Полярные диэлектрики и их применение. — Москва: Мир, 1981.
2. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. — Москва: Техносфера, 2005.
3. Шарапов В.М., Минаев И.Г., Бондаренко Ю. Ю. и др. Пьезоэлектрические преобразователи. — Черкассы: ЧГТУ, 2004.
4. Гендин Г. С. Все о резисторах: справочник. — Москва: Горячая линия-Телеком, 1999.
5. Мамонкин И. Г. Усилительные устройства. — Москва: Связь, 1977.

Дата поступления рукописи
в редакцию 17.02 2015 г.

В. І. СТАРЦЕВ, О. О. АНІСІМОВ, О. С. РУССУ

Україна, Одеський національний політехнічний університет

E-mail: anilewa1988@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШУМІВ НА РОБОТУ ЗАРЯДОЧУТЛИВОГО ПІДСИЛЮВАЧА З КОМПЕНСАЦІЄЮ ПІРОЕЛЕКТРИЧНОЇ ЗАВАДИ

Розглянуто проблеми, які виникають при роботі зарядочутливого підсилювача (ЗЧУ) у критичних режимах. Запропоновано спрощені математичні моделі ЗЧУ для дослідження шумів операційного підсилювача і високоомного резистора кола від'ємного зворотного зв'язку. Досліджено залежність рівня шумів ЗЧУ від рівня компенсації піроелектричної завади. Дані математичного аналізу підтверджені схемотехнічним моделюванням.

Ключові слова: зарядочутливий підсилювач, шум, завада, піроелектрика, моделювання.

DOI: 10.15222/TKEA2015.4.15
UDC 621.3.084.6

V. I. STARCEV, A. A. ANISIMOV, A. S. RUSSU

Ukraine, Odessa National Polytechnic University
E-mail: anilewa1988@gmail.com

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF NOISE ON THE OPERATION OF THE CHARGE SENSITIVE AMPLIFIER WITH COMPENSATED PYROELECTRIC INTERFERENCE

The authors consider the problems that arise during the operation of the charge sensitive amplifier (CSA) in critical conditions. Simplified schemes and mathematical models of the CSA are presented in order to study the effect of noise of operational amplifier and high-resistance resistor of negative feedback loop. The dependence of the CSA noise level on the pyroelectric interference compensation value is studied. Mathematical analysis data is confirmed by computer circuit simulation.

Keywords: charge-sensitive amplifier, noise, interference, pyroelectric.

REFERENCES

1. Barfoot J., Taylor J. *Polyarnye dielektriki i ikh primeneniye* [The polar dielectrics and their applications]. Moscow, Mir, 1981, 467 p. (Rus)
2. J. Fried. *Sovremennyye datchiki* [Modern sensors: a handbook]. Moscow, Technosphere, 2005, 592 p. (Rus)
3. Sharapov V.M., Minaev I.G., Bondarenko Yu.Yu. et al. *P'ezoelektricheskie preobrazovateli* [Piezoelectric transducers]. Cherkasy, CSTU, 2004. (Rus)
4. Gendin G.S. *Vse o rezistorakh* [All of the resistors: a handbook]. Moscow, Hotline Telecom, 1999, 192 p. (Rus)
5. Mamonkin I.G. *Usilitel'nye ustroystva* [Amplifying devices]. Moscow, Svyaz', 1977. (Rus)