

УДК 621.396.6

О.Я. Крук

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

**СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ОПЕРАЦІЙНОГО ПІДСИЛЮВАЧА**

У статті розглянуті принципи визначення власного коефіцієнта підсилення операційного підсилювача, при цьому проведено дослідження точності перетворення сигналів.

**Ключові слова:** перетворення сигналів, операційний підсилювач, похибка перетворення, коефіцієнт підсилення, зворотній зв'язок.

**Вступ**

Схеми перетворення електричних сигналів на активних елементах застосовується при побудові електронних компонент комп'ютерних систем, є розвитком попередньо описаних технічних рішень. Загальний вигляд структурного схемного рішення наведено на рис. 1.

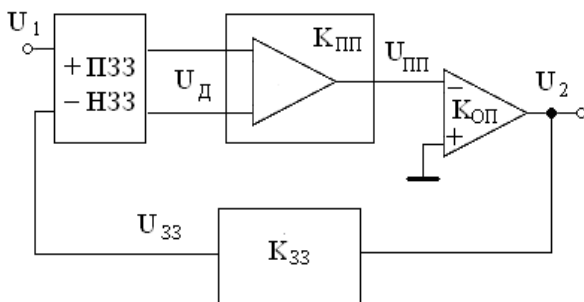


Рис. 1. Схема перетворення електричних сигналів

Робота схеми перетворення електричних сигналів рис.1 ґрунтується на аналітичному описі функціонування, та відбувається таким чином.

Вхідний сигнал  $U_1$  та напруга зворотного зв'язку  $U_{33}$  створюють на диференціальних входах відповідну напругу  $U_d$  для схеми підсилення у каналі прямої передачі зі знаками взаємодії: „+” для позитивного зворотного зв'язку (ПЗЗ), „-” для негативного зворотного зв'язку (НЗЗ) у вигляді:

$$U_d = U_1 \pm U_{33} = U_1 \pm K_{33} U_2. \quad (1)$$

Після підсилення у каналі прямої передачі з коефіцієнтом  $K_{ПП}$  маємо напругу  $U_{ПП}$ , яка діє на вході операційного підсилювача:

$$U_{ПП} = K_{ПП} U_d$$

$$U_{ПП} = K_{ПП} U_1 \pm K_{ПП} K_{33} U_2; \quad (2)$$

Відносно опорної напруги за основною властивістю операційного підсилювача, який має власний коефіцієнт  $K_{ОП}$  підсилення, вихідна напруга  $U_2$  буде становити:

$$U_2 = K(U_{GND} - U_{ПП});$$

$$U_2 = -K_{ОП} K_{ПП} U_1 \mp K_{ОП} K_{ПП} K_{33} U_2. \quad (3)$$

Після розрахунку, відносно вихідної напруги  $U_2$ , коефіцієнт  $K_U$  підсилення та методична  $\Delta$  похибка перетворення будуть визначені наступним чином:

$$U_2(1 \pm K_{ОП} K_{ПП} K_{33}) = -K_{ОП} K_{ПП} U_1;$$

$$K_U = \frac{-K_{ОП} K_{ПП}}{1 \pm K_{ОП} K_{ПП} K_{33}};$$

$$K_U = \frac{1}{\frac{-1}{K_{ОП} K_{ПП}} \mp K_{33}} = \frac{1}{\Delta \mp K_{33}}. \quad (4)$$

Вирази (1) – (4) дозволяють встановити, що для довільного функціонального перетворення методична похибка становить

$$|\Delta| = \frac{1}{K_{ПП} K_{ОП}} \cong \frac{1}{K_{ОП}^2},$$

тобто, зменшується у  $K_{ОП}^2 = 10^{10} \dots 10^{12}$  раз.

Врахування знаку похибки дає можливість подальшого збільшення точності перетворення.

Таким чином, запропоноване рішення дозволяє для будь-якої схеми, яка виконує встановлене функціональне перетворення, забезпечити суттєве підвищення достовірності здійснюваної операції.

Запропоновані рішення розширюють практичні можливості електроніки у схемотехніці побудови аналогових компонент КС, електронних пристроїв та вузлів радіоелектронної апаратури на новому рівні за точністю. Використання внутрішнього підсилення в схемі зберігає виконувану функцію, але вимагає застосування спеціальних операційних підсилювачів з покращеними динамічними характеристиками.

**Схемотехнічне рішення сума-різницевого перетворювача**

Використаємо вираз (3) в частині впливу кола зворотного зв'язку для побудови сума-різницевої схеми перетворення. Очевидно, використання джерела  $U_2$  в колі негативного зворотного зв'язку з коефіцієнтом перетворення, рівним одиниці, за наявності джерела  $U_1$ , включеного до неінвертуючого входу, створює ідеальні умови одержання умови  $U_3 = U_1 - U_2$ .

Схемне рішення такого пристрою наведено на рис. 2.

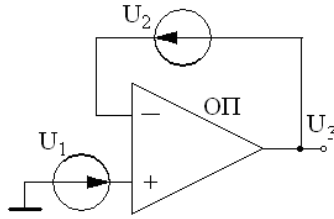


Рис. 2. Схема сума-різницевих вхідних напруг за правилом (3)

Аналітичне обґрунтування функціонування схеми рис. 2 здійснюється наступним чином:

$$\begin{aligned}
 U_3 &= K_{\text{ОП}} \cdot [U_1 - (nU_3 \mp U_2)] = \\
 &= K_{\text{ОП}} \cdot U_1 - K_{\text{ОП}} \cdot U_3 \pm K_{\text{ОП}} \cdot U_2; \\
 U_3(1 + K_{\text{ОП}}) &= K_{\text{ОП}} \cdot U_1 \pm K_{\text{ОП}} \cdot U_2; \\
 U_3 &= \frac{K_{\text{ОП}}}{(1 + K_{\text{ОП}})} \cdot U_1 \pm \frac{K_{\text{ОП}}}{(1 + K_{\text{ОП}})} \cdot U_2 = \\
 &= \frac{1}{\Delta + 1} \cdot U_1 \pm \frac{1}{\Delta + 1} \cdot U_2 = \frac{1}{\Delta + 1} \cdot (U_1 \pm U_2).
 \end{aligned}$$

Таким чином, можна записати сума-різницеве перетворення:

$$U_3 = \frac{1}{\Delta + 1} (U_1 \pm U_2) \cong (U_1 \pm U_2) \quad (5)$$

за умови  $\Delta = 1/K_{\text{ОП}} \rightarrow 0$ .

### Схемотехнічне рішення підсилювача різниці сигналів

Недоліком попередньої схеми є відсутність підсилення в сума-різницевій схемі. Цей недолік із застосуванням правила (3) ліквідує схема підсилювача різниці сигналів, яка наведена на рис. 3.

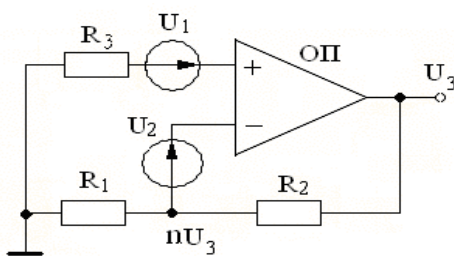


Рис. 3. Схема підсилювача різниці сигналів

Аналітичне обґрунтування роботи схеми рис. 3 встановлює опис функціонування підсилювача різ-

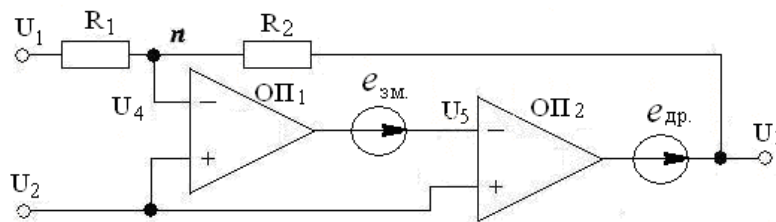


Рис. 4. Процес взаємодії у вихідному колі ОП

ниці сигналів.

Вихідна напруга  $U_3$ , ділиться у  $n$  пропорції резисторів  $R_1, R_2$  описаним раніше способом та з напругою  $U_2$  діє на інвертуючий вхід ОП, тоді:

$$\begin{aligned}
 U_3 &= K_{\text{ОП}} \cdot [U_1 - (nU_3 \mp U_2)] = \\
 &= K_{\text{ОП}} \cdot U_1 - K_{\text{ОП}} \cdot nU_3 \pm K_{\text{ОП}} \cdot U_2; \\
 U_3(1 + K_{\text{ОП}} \cdot n) &= K_{\text{ОП}} \cdot U_1 \pm K_{\text{ОП}} \cdot U_2 = \\
 &= K_{\text{ОП}} \cdot (U_1 \mp U_2); \\
 U_3 &= \frac{K_{\text{ОП}}}{(1 + K_{\text{ОП}} \cdot n)} \cdot U_1 \pm \frac{K_{\text{ОП}}}{(1 + K_{\text{ОП}} \cdot n)} \cdot U_2 = \\
 &= \frac{K_{\text{ОП}}}{(1 + K_{\text{ОП}} \cdot n)} \cdot (U_1 \pm U_2); \\
 U_3 &= \frac{1}{\Delta + n} \cdot (U_1 \pm U_2) \cong \frac{1}{n} \cdot (U_1 \pm U_2) = \\
 &= (1 + \frac{R_2}{R_1}) \cdot (U_1 \pm U_2).
 \end{aligned} \quad (6)$$

Функціонування схеми здійснюється за описаною методичною похибкою, є можливість здійснювати підсилення з відомим коефіцієнтом, як різницю, так і суму вхідних сигналів в залежності від включення джерела  $U_2$  тільки двома резисторами.

Слід звернути увагу, що аналогічну дію в схемі сустратора виконують чотири резистора при виконанні суттєвих обмежень відносно точної попарної відповідності цих резисторів. Для забезпечення умов подавлення синфазної складової резистор  $R_3$  обирають за опором, рівним еквівалентному опору паралельного з'єднання резисторів  $R_1$  та  $R_2$ , як це вимагає класичне включення.

### 4. Процеси у вихідному колі схеми операційного підсилювача

Наслідки правила, щодо подавлення у вихідному колі ОП різних артефактів дозволяють обґрунтувати наступну схемотехнічну особливість в побудові підсилювачів. Варіант такого виконання представлений на рис.4.

Виконаємо запропоновану процедуру розрахунку схеми рис. 4. Для цього попередньо визначимо напруги  $U_4$  та  $U_5$ .

$$U_4 = n \cdot U_3 + (1 - n) \cdot U_1;$$

$$U_5 = e_{\text{зм}} + K_{\text{ОП}} \cdot (U_2 - U_4);$$

$$\begin{aligned}
 U_5 &= e_{\text{зм}} + K_{\text{ОП}} \cdot (U_2 - n \cdot U_3 - (1 - n) \cdot U_1) = \\
 &= e_{\text{зм}} + K_{\text{ОП}} \cdot U_2 - K_{\text{ОП}} \cdot n \cdot U_3 - K_{\text{ОП}} \cdot (1 - n) \cdot U_1
 \end{aligned}$$

Тоді напруга виходу  $U_3$  буде визначена наступним чином:

$$\begin{aligned} U_3 + e_{др.} &= K_{ОП} \cdot (U_2 - U_5) = \\ &= K_{ОП} \cdot U_2 - K_{ОП} \cdot e_{зм.} - \\ -K_{ОП}^2 \cdot U_2 + K_{ОП}^2 \cdot n \cdot U_3 + K_{ОП}^2 \cdot (1-n) \cdot U_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Виконаємо розрахунок (7):

$$\begin{aligned} U_3(1 - K_{ОП}^2 \cdot n) &= K_{ОП} \cdot U_2 - K_{ОП} \cdot e_{зм.} - \\ -K_{ОП}^2 \cdot U_2 + K_{ОП}^2 \cdot (1-n) \cdot U_1 - e_{др.}; \\ U_3 &= \frac{K_{ОП}}{1 - K_{ОП}^2 \cdot n} \cdot U_2 - \frac{K_{ОП}}{1 - K_{ОП}^2 \cdot n} \cdot e_{зм.} - \\ - \frac{K_{ОП}^2}{1 - K_{ОП}^2 \cdot n} \cdot U_2 + \frac{K_{ОП}^2}{1 - K_{ОП}^2 \cdot n} \cdot (1-n) \cdot U_1 - \frac{e_{др.}}{1 - K_{ОП}^2 \cdot n}; \\ U_3 &= - \frac{K_{ОП}}{1 - K_{ОП}^2 \cdot n} \cdot e_{зм.} - \frac{K_{ОП}^2 + K_{ОП}}{1 - K_{ОП}^2 \cdot n} \cdot U_2 + \\ + \frac{K_{ОП}^2}{1 - K_{ОП}^2 \cdot n} \cdot \frac{1-n}{n} \cdot U_1 - \frac{e_{др.}}{1 - K_{ОП}^2 \cdot n}. \end{aligned}$$

Після скорочення у складниках отримаємо результат

$$\begin{aligned} U_3 &= \\ &= - \frac{1}{\Delta - n} e_{зм.} - \frac{1+\Delta}{\Delta^2 - n} U_2 + \frac{1-n}{\Delta^2 - n} U_1 - \frac{e_{др.}}{1 - K_{ОП}^2 n}; \\ U_3 &= K_{зм.} \cdot e_{зм.} + K_{U2} \cdot U_2 + K_{U1} \cdot U_1 - K_{др.} \cdot e_{др.}; \\ K_{зм.} &= - \frac{1}{\Delta - K_{ОП} \cdot n} = \\ &= \frac{1}{K_{ОП} \cdot n} = \frac{K_U}{K_{ОП}} = K_3 \quad \left| \Delta = - \frac{1}{K_{ОП}}; \right. \\ K_{U2} &= - \frac{1+\Delta}{\Delta^2 - n} = \frac{1}{n} = K_U = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad \left| \Delta^2 = - \frac{1}{K_{ОП}^2}; \right. \\ K_{U1} &= \frac{1-n}{\Delta^2 - n} = 1 - \frac{1}{n} = 1 - K_U = - \frac{R_2}{R_1} \quad \left| \Delta^2 = \frac{1}{K_{ОП}^2}; \right. \\ K_{др.} &= - \frac{1}{1 - K_{ОП}^2 \cdot n} = \frac{K_U}{K_{ОП}^2} \end{aligned} \quad (8)$$

## ВИСНОВКИ

Отримані результати (8) дозволяють зробити висновки відносно впливу внесених елементів:

1. Основні підсилювальні властивості входів для несиметричних режимів відповідають класичним з  $K_U = 1 + R_2/R_1 = K_{U2}$  та  $K_{U1} = -R_2/R_1$ .

2. Вплив напруги зміщення понижується до рівня  $K_U/K_{ОП}$ .

3. Дрейфові явища у вихідних колах підсилювача знижуються суттєво, а саме у  $K_U/K_{ОП}^2$  раз.

4. Методична похибка основних операцій підсилення складає нано-піко рівень:  $\Delta = 1/K_{ОП}^2$ .

Для реалізації схеми рис. 4 необхідні спеціальні схеми підсилення.

## Список літератури

1. Хоровиц П. Искусство схемотехники: в 2-х томах. Пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – М.: Мир, 1983. – 598 с.
2. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы: / пер. с англ. / С. Соклоф. – М.: Мир, 1988. – 583 с.
3. Слипченко Н.И. Особенности наносхемо-техники для обеспечения нужд нанoeлектроники / Н.И. Слипченко, П.Д. Федотов, Д.А. Федотов // Вторая международная НК «Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития». – Харьков-Туапсе, 2007. – С. 47.
4. Патент України №81087 «Спосіб формування коефіцієнта підсилення та пристрій для його здійснення», МПК H03F 3/45, H03G 3/00, бюл.№19 26.11.2007.
5. Патент України №90338 «Спосіб формування коефіцієнта перетворення схеми на операційних підсилювачах та пристрій для його реалізації (варіанти)», МПК H03F 3/45, H03G 3/00, бюл.№8 26.04.2010.

Надійшла до редколегії 1.03.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.М. Фоменко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

О.Я. Крук

В статье рассмотрены принципы определения собственного коэффициента усиления операционного усилителя, при этом проведено исследование точности преобразования сигналов.

**Ключевые слова:** преобразование сигналов, операционный усилитель, погрешность преобразования, коэффициент усиления, обратная связь.

## SCHEMATIC DESIGNS OF OPERATIONAL AMPLIFIER

О.Я. Kruk

The principles of definition of own amplification factor of the operational amplifier are considered in article, thus is carried out research of accuracy of transformation of signals.

**Keywords:** transformation of signals, the operational amplifier, an error of transformation, amplification factor, a feedback.