

## ОПЕРАЦІЙНІ ПІДСИЛЮВАЧІ З ПРОГРАМОВАНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ ПІДСИЛЕННЯ

В статті виконано аналіз існуючих операційних підсилювачів з програмованим коефіцієнтом підсилення. Запропоновано використання атенюатора-подільника Троцишина для отримання більшої кількості квантованих значень підсилення.

Ключові слова: коефіцієнт підсилення, ключі, операційний підсилювач.

V.V. PETRYCHUK, O.P. VOITYUK  
Khmelnitskiy National University, Ukraine

### OPERATIONAL AMPLIFIER WITH PROGRAMMABLE GAIN

*Abstract - In article has evaluated the existing operational amplifiers with programmable gain. It is shown that one can get binary and decade except the law of change of the gain can be obtained by others. The use of attenuator - Trotsyshyna divider. This technique allows not significantly increasing the number of circuit elements, increase the values of gain at times.*

*Thus, developers and designers of devices with automatic gain control is possible to use the whole scale transformation, not just its individual value*

Keywords: gain, keys, operational amplifier.

### Вступ

Більшість сучасних систем збору інформації з широким динамічним діапазоном використовують різні методи нормалізації рівня вхідного сигналу для подальшої подачі на аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Значення мінімальної напруги вхідного сигналу для більшості АЦП рівно 0, тоді як максимум у різних типів АЦП може знаходитися в діапазоні від 2В до 10В.

Для нормалізації рівнів напруг часто застосовують операційні підсилювачі, що мають широкий діапазон вхідних напруг і дозволяють забезпечити значні коефіцієнти підсилення. Більшість датчиків мають низький рівень вихідних напруг для забезпечення роботи яких необхідні великі коефіцієнти підсилення. Однак, якщо вихідна напруга датчика значна, то великий коефіцієнт підсилення може викликати насичення як самого підсилювача, так і АЦП.

### Постановка задачі

Для забезпечення універсальності режимів потрібен підсилювач з змінним (керованим) коефіцієнтом підсилення. Області застосування даних підсилювачів можуть бути: дистанційне вимірювання електричних сигналів, портативні пристрої збору даних, системи збору даних, тестове устаткування, програмовані логічні контролери, устаткування для медичних і фізичних вимірів, плати аналогових інтерфейсів, пристрої з автоматичним керуванням підсиленням та інші.

Подібні підсилювачі управляються або напругою постійного струму, або мають цифровий вхід керування, і їх відносять до класу підсилювачів із програмованим коефіцієнтом підсилення (programmable gain amplifier - PGA). На практиці підсилювачі PGA мають можливість змінювати коефіцієнт підсилення з декадним кроком (10, 100, 1000, ...), або бінарним (1, 2, 4, 8, 16, ...), що задовольняє багатьом застосуванням, але зовсім не виключає можливості використання іншого закону зміни коефіцієнта підсилення.

### Аналіз підсилювачів із програмованим коефіцієнтом підсилення

Розглянемо як приклад схему PGA з бінарним кроком зміни коефіцієнта підсилення (рис. 1).

У наведеній схемі необхідний коефіцієнт підсилення обирається шляхом комутації за допомогою перемикачів S1...S4 відповідних резисторів R1...R4. Якщо в замкнутий стан перевести ключ S4, коефіцієнт підсилення буде дорівнює двом, якщо S3 замкнутий, а S4 - розімкнутий, коефіцієнт підсилення дорівнює чотирьом і т.д. Неважко помітити, що підбором величин опорів резисторів R1...R4 можна забезпечити й декадний крок зміни коефіцієнта підсилення, а також будь-який необхідний.

У наведеній схемі мінімальний коефіцієнт підсилення  $k=2$ . Якщо потрібна менша величина коефіцієнта, припустимо  $k=1$ , то потрібно використовувати підсилювач як буферний каскад, тобто скористатися наступним включенням (рис.2).

Однак спосіб організації комутації за допомогою механічних перемикачів на сьогоднішній момент є неприйнятним, особливо при інтегральному виготовленні таких підсилювачів, він лише розкриває

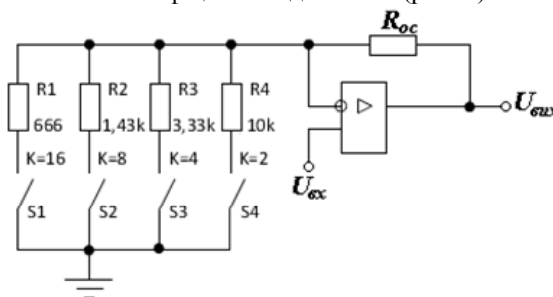


Рис. 1. PGA з бінарним кроком зміни коефіцієнта

можливості від лагодження і створення нових типів PGA на основі операційного підсилювача. Саме тому, що в цьому випадку доцільне використання електронних аналогових комутаторів із цифровим керуванням. Такі аналогові комутатори, високоякісні операційні, підсилювачі підсилювачі класу PGA та інші аналогові компоненти, виготовляє компанія Analog Devices Inc, що є світовим лідером у даній області.

Як комутатори бажано використовувати ADG611, ADG702, ADG719 і інші, але кращих результатів можна отримати при застосуванні ADG802(рис. 4), опір каналу якого не перевищує 0,4 Ом [3] і практично не вносить додаткової помилки при встановленні коефіцієнта підсилення.

Канал комутатора замикається при подачі на керуючий вхід логічної одиниці рівня TTL. Однак можливі інші варіанти побудови PGA, запропоновані компанією AD. У технічній документації компанії AD підсилювачі із програмованим коефіцієнтом підсилення представлені як Variable Gain Amplifiers (VGA), тобто підсилювачі зі змінним коефіцієнтом підсилення. Одні з них, зокрема, AD8330, AD8367 і ряд інших, мають аналоговий вхід керування коефіцієнтом підсилення. Підсилювачі AD8369, AD8367 і т.п. управляються за допомогою цифрового інтерфейсу. Всі підсилювачі відрізняються високими якісними показниками, прості й надійні в експлуатації, що визначає можливості їхнього застосування в різноманітних електронних пристроях і системах [1].

Як ілюстрація приведемо схему підсилювача з низьким рівнем власних шумів у якій використовується операційний підсилювач AD797 і чотирьохканальний аналоговий комутатор ADG412 [1] (рис. 4).

Опори резисторів подільника у вихідному ланцюзі підсилювача AD797 підібрані таким чином, що забезпечують декадний крок зміни коефіцієнта підсилення, але можливий і будь-який інший крок при відповідному розрахунку величин опорів. Конденсатор у ланцюзі зворотного зв'язка необхідний для стабілізації режимів роботи підсилювача і усунення впливу перехідних процесів при перемиканні коефіцієнта підсилення [1].

Схеми неінвертуючих PGA припускають наявність у своєму складі операційних підсилювачів, і сигнал від джерела подається лише на неінвертуючий вхід, що до загальної шини (аналогової "землі").

Таким чином розглянуті схеми показують, що виробники виготовляють програмовані операційні підсилювачі лише з декадним або бінарним кроком зміни коефіцієнта підсилення. Хоча на практиці іноді виникають випадки коли потрібно отримати характеристики зміни коефіцієнта підсилення логарифмічні, експоненціальні та інших залежностей.

**Збільшення кількості квантованих значень підсилення**

На даний момент виробники підсилювачів з програмованим коефіцієнтом підсилення виробляють інтегральні схеми PGA в яких набір квантованих значень коефіцієнтів підсилення рідко перевищує 8.

Пропонується збільшити роздільну здатності (кількості квантованих значень шкали перетворення) і розширити функціональні можливості PGA шляхом застосування подільника – Троцишина дослідження якого проводилися в [2]. Пропонується використати такі схеми подільників для утворення нового класу PGA.

На основі класичної схеми неінвертуючого підсилювача покажемо застосування подільника Троцишина.

Коефіцієнт підсилення для даної схеми включення операційного підсилювача дорівнює:

$$K_U = 1 + \frac{R_F}{R_G} \quad (1)$$

і в основному визначається величиною відношення опорів резисторів  $R_F, R_G$ . Тому що в даних схемах

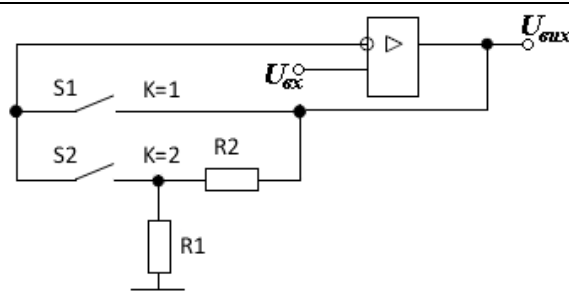


Рис. 2. Схема з PGA з  $K_{min}=1(R1=R2)$

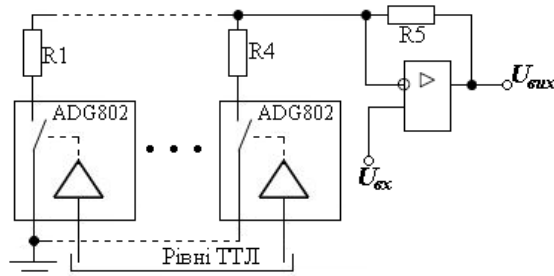


Рис. 3. PGA з використанням ADG802

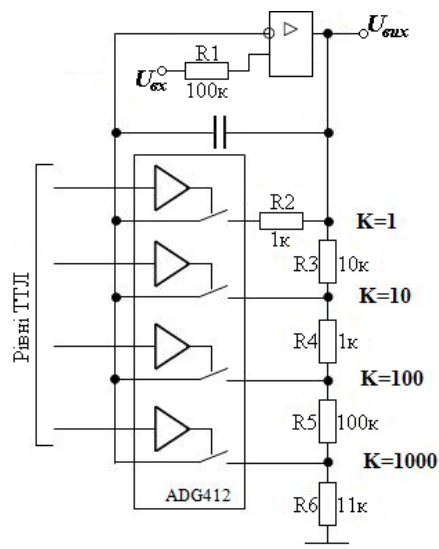


Рис. 4. PGA на основі ADG412

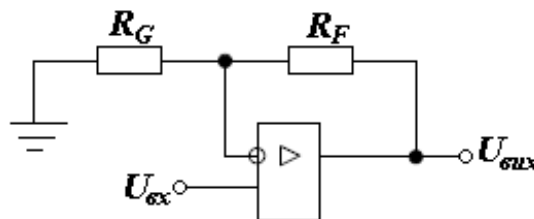


Рис. 5. Схема включення неінвертуючого підсилювача

опори резисторів постійні, коефіцієнт підсилення також не змінюється. Але якщо, припустимо, збільшити опір резистора  $R_G$ , коефіцієнт підсилення зменшиться й навпаки. На такому принципі створюються PGA.

Замінивши подільник, що складається з опорів  $R_F, R_G$ , на подільник Троцишина отримаємо наступну схему.

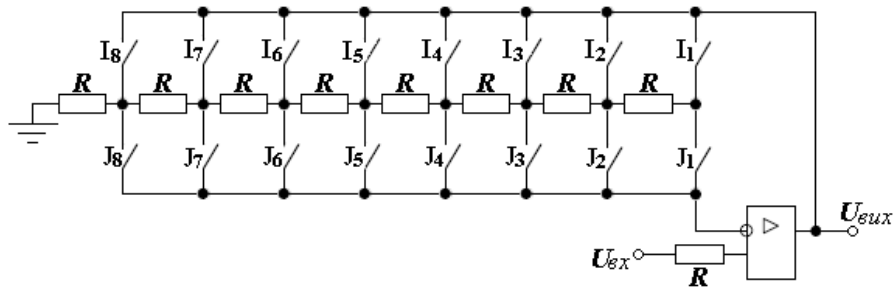


Рис. 6. Схема включення неінвертуючого підсилювача на основі подільника – Троцишина

В даній схемі опори  $R_F, R_G$  перероджуються в наступні вирази:

$$R_F = \sum_{L=j}^{i-1} R_L, \quad (2)$$

де  $j=1..8, i=j..8$ ;  $i$  – номер верхнього ключа;  $j$  – номер нижнього ключа;  $R_L$  – опір резисторів.

$$R_G = \sum_{K=i(\geq j)}^N R_K, \quad (3)$$

де  $j=1..8, i=j..8$ ;  $N$  – кількість резисторів подільника Троцишина;  $R_K$  – опір резисторів.

В загальному випадку коефіцієнт підсилення для даної схеми розраховується за наступною формулою:

$$K_U = \frac{\sum_{L=j}^{i-1} R_L}{\sum_{K=i(\geq j)}^N R_K} + 1, \quad (4)$$

Перевагою даної схеми є те, що використовуючи резисторів однакового номіналу за допомогою комутації ключів  $J_1..J_8$  та  $I_1..I_8$  можна отримати різні значення опорів резистивних ланок. Це дає можливість отримати крім бінарного закону зміни коефіцієнта підсилення, ще й додаткові значення, які знаходяться в даному діапазоні.

В таблиці 1 наведені можливі значення коефіцієнтів підсилення.

Таблиця 1

**Залежність коефіцієнта підсилення від комутації ключів**

	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8
I1	1	-	-	-	-	-	-	-
I2	1,143	1	-	-	-	-	-	-
I3	1,133	1,167	1	-	-	-	-	-
I4	1,6	1,4	1,2	1	-	-	-	-
I5	2	1,75	1,5	1,25	1	-	-	-
I6	2,667	2,333	2	1,667	1,333	1	-	-
I7	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1	-
I8	8	7	6	5	4	3	2	1

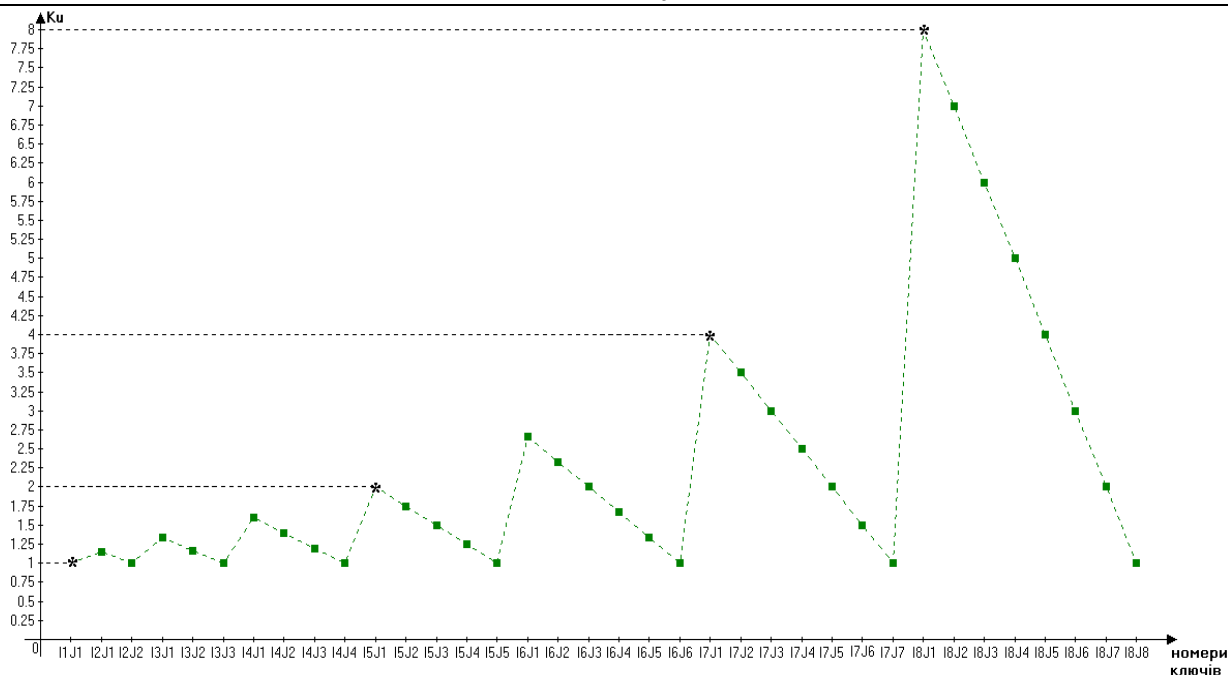


Рис. 7. Графік залежності коефіцієнта підсилення від номеру комутованого ключа

На рис. 9 наглядно зображено, як за допомогою комутації ключів на рис. 6 можна отримати бінарний закон розподілу(\*) так і додаткові значення підсилення.

При інвертуючому включенні (рис. 8) неінвертуючий вхід з'єднується з землею. Таким чином вихідна напруга підсилення при інвертуючому включенні знаходиться в протифазі по відношенню до вхідної. Коефіцієнт підсилення вхідного сигналу по напрузі для даної схеми залежить від відношення опорів резисторів і може бути як менше так і більше одиниці.

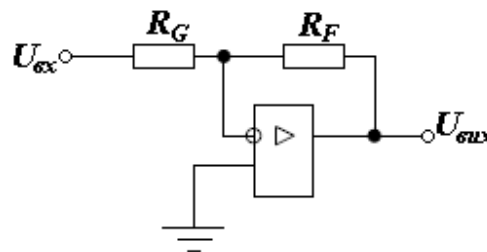


Рис. 8. Схема включення інвертуючого підсилювача

$$K_U = -\frac{R_F}{R_G} \tag{5}$$

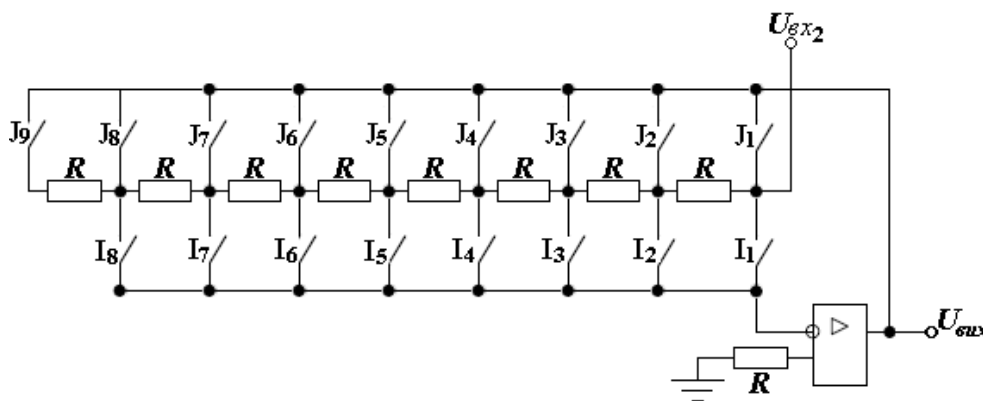


Рис. 10. Схема включення інвертуючого підсилювача на основі подільника – Троцишина.

Коефіцієнт підсилення для даної схеми розраховується за формулою:

$$K_U = -\frac{\sum_{K=j(i<j)}^{j-1} R_K}{\sum_{L=1}^{i-1} R_L}, \tag{6}$$

де  $i=1..8, j=i+1..9$ ;  $j$  – номер верхнього ключа;  $i$  – номер нижнього ключа;  
 $R_L, R_K$  – опори резисторів.  
 Напруга на виході даної схеми буде дорівнювати:

$$U_{bux} = \frac{(R_G^* + R_F^*)R_F}{R_G^*(R_G + R_F)} U_{bx1} - \frac{R_F^*}{R_G^*} U_{bx2} \quad (7)$$

При виконанні співвідношення  $R_G^* R_F = R_F^* R_G$  отримаємо:

$$U_{bux} = \frac{R_F^*}{R_G^*} (U_{bx1} - U_{bx2}) \quad (8)$$

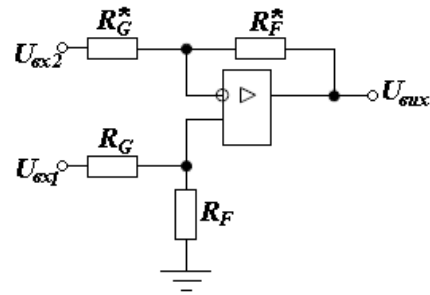


Рис.7. Схема включення диференційного підсилювача

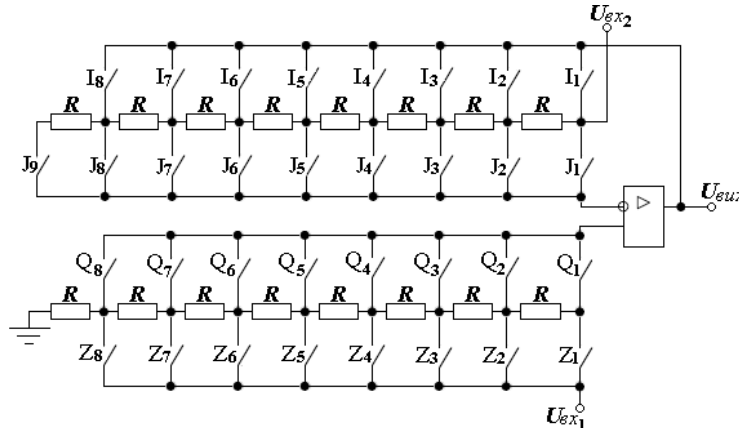


Рис.11. Схема включення диференційного підсилювача на основі подільника – Троцишина

Напряга на виході в загальному випадку визначається:

$$U_{bux} = \frac{(\sum_{L=1}^{i-1} R_L + \sum_{K=i(i < j)}^{j-1} R_K) \sum_{X=z(z \leq q)}^N R_X}{\sum_{L=1}^{i-1} R_L (\sum_{P=q}^N R_P + \sum_{X=z(z \leq q)}^N R_K)} U_{bx1} - \frac{\sum_{K=i(i < j)}^{j-1} R_K}{\sum_{L=1}^{i-1} R_K} U_{bx2} \quad (9)$$

**Висновок**

Отже, розроблені схеми дозволяють отримувати додаткові значення коефіцієнтів підсилення при цьому значно не збільшуючи кількість елементів схеми, але суттєво розширюють діапазон можливих квантованих значень коефіцієнтів підсилення. Також загально вживані коефіцієнти підсилення бінарного закону збереглися, що в свою чергу дозволяє використати новостворені PGA в старих інтерпретаціях схем.

Тобто, у розробників та проектувальників пристроїв з автоматичним керуванням підсиленням з'являється можливість використовувати всю шкалу перетворення, а не лише її окремі значення.

**Література**

1. Walt Kester, James Bryant. Programmable Gain Amplifiers. in book: Op Amp Applications. Analog Devices Inc, 2002, pp. 2.1-2.52. ISBN 0-916550-26-5.
2. Троцишин І.В. Шлях підвищення роздільної здатності шкали вимірювального перетворення ЦАП і АЦП/ Троцишин І. В., Войтюк О.П., Троцишина Н.І. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 2010. - №2. – С.236 – 241.
3. ADG802. Інформація з сайту компанії Analog Devices Inc. [Електронний ресурс]. <http://www.analog.com/en/switches/multiplexers/analog-switches/adg802/products/product.html>.

**References**

1. Walt Kester, James Bryant. Programmable Gain Amplifiers. in book: Op Amp Applications. Analog Devices Inc, 2002, pp. 2.1-2.52. ISBN 0-916550-26-5.
2. I.V.Trotskyshyn, O.P. Voityuk, N.I. Trotskyshyna. Shliakh pidvyshchennia rozdilnoi zdatnosti shkaly vymiriuvalnoho peretvorennia DAC i ADC . Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. Khmelnytskyi. 2010. Issue 2. pp.236 – 241. [in Ukrainian]
3. ADG802. Informatsiia z сайту kompanii Analog Devices Inc <http://www.analog.com/en/switches/multiplexers/analog-switches/adg802/products/product.html>.

Рецензія/Peer review : 19.3.2013 р. Надрукована/Printed :8.4.2013 р.  
Статтю представляє: к.т.н., доцент кафедри радіотехніки та зв'язку Мартинюк В.В.