

## **РАДІОТЕХНІЧНІ КОЛА ТА СИГНАЛИ**

УДК 621.372.061

### **АНАЛІЗ БАГАТОЧАСТОТНИХ ДЖЕРЕЛ СТРУМУ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ ДЛЯ ЗАДАЧ ЕЛЕКТРОІМПЕДАНСНОЇ ТОМОГРАФІЇ**

*Рибін О. І., д.т.н., професор; Мовчанюк А. В., к.т.н., доцент;  
Гайдаєнко Є. В., аспірант*

*Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

### **ANALYSIS OF MULTIFREQUENCY CURRENT SOURCES ON OPERATIONAL FOR ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY PROBLEMS**

*Rybin A., Doctor of Engineering, Professor; Movchanuk A., PhD, Associate Professor;  
Gaidayenko E., Postgraduate Student*

*National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

#### **Вступ**

Одним з критичних вузлів електроімпедансних томографів (ЕІТ) є джерело струму. Від його характеристик залежить точність, стабільність і відтворюваність вимірів, частотний та динамічний діапазон [1]. До його складу входить генератор стабільних сигналів змінної напруги (ГСС) з подслідуючим блоком перетворення її в струм. Тенденції розвитку ЕІТ показують, що з появою та активним впровадженням методів прямого цифрового синтезу для створення ГСС [2] повністю вирішуються проблеми, що виникали в ранніх варіантах розробок, направлених на забезпечення стабільності сигналів змінної напруги при їх формуванні [3-4]. Тому вирішальним стає функціональний вузол перетворювача напруги в струм (надалі перетворювач або джерело струму).

Більшість схемотехнічних рішень перетворювачів ґрунтується на основі використання операційних підсилювачів (ОП) [5]. Прикладами таких схем є ОП з навантаженням у колі зворотного зв'язку [6], схема Хауленда [7] та її модифікації [8-10]. З огляду на перспективність багаточастотних вимірювань в ЕІТ, перетворювачі повинні працювати в смузі частот від одиниць кілогерц до одиниць мегагерц [11]. Забезпечення прецизійності джерела струму в такій смузі частот викликає додаткові труднощі. Зазвичай вдається досягти похибки рівня струму в навантаженні менше 1 % на частотах до 100 кГц. [8-10], а в деяких випадках до 150 кГц [1]. Для якісних вимірювань струм не повинен відхилятися по амплітуді більше ніж на 0.1% від встановленого значення в усьому діапазоні робочих частот.

Огляд схем [1, 6-10] показав, що жодних практичних рекомендацій вибору ОП для роботи джерела струму в широкій смузі частот не представлено. **Метою дослідження** є розробка рекомендацій для вибору операційного підсилювача при проектуванні джерел струму ЕІТ.

### Основна частина

Як правило, виробники операційних підсилювачів в технічній документації наводять характеристики залежностей модуля коефіцієнту передачі за напругою від частоти. Характерними точками АЧХ на осі частот є частота зрізу  $\omega_{зр,U}$  та частота одиничного підсилення  $\omega_1$ . Амплітудна частотна характеристика операційного підсилювача без кола зворотного зв'язку може бути описана виразом:

$$\dot{K}_u(\omega) = \frac{K_0}{1 + j \cdot \frac{\omega}{\omega_{зр,U}}}, \quad (1)$$

де  $\dot{K}_u(\omega)$  — комплексний коефіцієнт передачі за напругою операційного підсилювача,  $K_0$  — коефіцієнт передачі за напругою на нульовій частоті,  $\omega$  — кутова частота.

Проаналізуємо роботу джерел струму на операційних підсилювачах. Для джерела струму (рис.1), маємо

$$\dot{U}_{вх} = \dot{U}_{ад} - \dot{U}_{зз}. \quad (2)$$

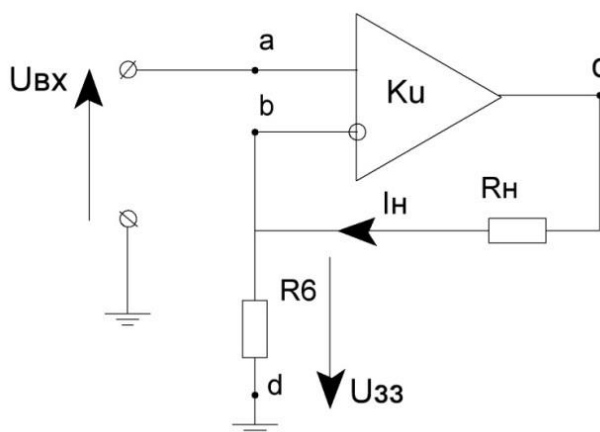


Рис. 1 Джерело струму за схемою ввімкнення операційного підсилювача з навантаженням (досліджуваним об'єктом) у колі зворотного зв'язку

З урахуванням того, що  $\dot{U}_{cd} = \dot{K}_u \cdot \dot{U}_{ад}$  та  $\dot{U}_{зз} = \dot{U}_{cd} \cdot \frac{R_6}{R_6 + R_n}$ ,

вираз (2) приймає вигляд:

$$\dot{U}_{вх} = \dot{U}_{cd} \cdot \left( \frac{1}{\dot{K}_u} - \frac{R_6}{R_6 + R_n} \right). \quad (3)$$

З іншої сторони:

$$\dot{U}_{cd} = \dot{I}_H \cdot (R_6 + R_H). \quad (4)$$

Підставивши (4), (1) в (3) отримаємо вираз для струму в навантаженні:

$$\dot{I}_H(\omega) = \frac{K_0}{(1 + j \cdot \omega \cdot (R_6 + R_H)) \cdot \frac{\tau}{R_6 + R_H - R_6 \cdot K_0}} \cdot \dot{U}_{ex}. \quad (5)$$

Введемо поняття частоти зрізу по струму:

$$\omega_{зр.I} = \lambda_1 \cdot \omega_{зр.U}, \quad (6)$$

де  $\lambda_1 = \frac{R_6 + R_H - R_6 \cdot K_0}{(R_6 + R_H)}$ .

Як бачимо, частота зрізу по струму дорівнює частоті зрізу ОП помноженої на коефіцієнт  $\lambda_1$ , що визначається елементами схеми джерела струму. Тому вираз (5) з урахуванням (6) можна представити як

$$\dot{I}_H(\omega) = \frac{\dot{I}_H(0)}{1 + j \cdot \frac{\omega}{\omega_{зр.I}}} \cdot \dot{U}_{ex}. \quad (7)$$

Задамося рівнем, що буде задовольняти вимоги точності підтримання струму джерела  $\Delta$ . Під  $\Delta$  будемо розуміти зменшення амплітуди струму у навантаженні:

$$\Delta = \frac{\left| \dot{I}_H(0) \right| - \left| \dot{I}_H(\omega_g) \right|}{\left| \dot{I}_H(0) \right|} \cdot 100\%, \quad (8)$$

де  $\omega_g$  частота, на якій ще задовольняється задана точність підтримання струму.

Після перетворень отримаємо:

$$\omega_g = \omega_{зр.I} \cdot \frac{\Delta}{\sqrt{100^2 - \Delta^2}} = \omega_{зр.I} \cdot \chi, \quad (9)$$

де  $\chi = \frac{\Delta}{\sqrt{100^2 - \Delta^2}}$ .

Підставивши (7) в (9), з урахуванням (8) маємо

$$\omega_{зр.I} = \frac{\omega_g}{\lambda_1 \cdot \chi}. \quad (10)$$

Так як на частоті одиничного підсилення ОП  $\omega_1$  значення модуля коефіцієнту передачі за напругою дорівнює 1, то підставивши (10) у вираз (1), для частоти  $\omega = \omega_1$  маємо

$$\omega_1 = \omega_0 \cdot \frac{1 - K_0}{\lambda_1 \cdot \chi} \quad (11)$$

Підставивши  $\lambda_1$  з (6) та  $\chi$  з (9) в (11), враховуючи те, що зазвичай  $K_0 \approx 10000$ , отримуємо:

$$\omega_1 = \omega_0 \cdot \frac{(R_6 + R_H) \cdot \sqrt{100^2 \cdot \Delta^2}}{R_6 \cdot \Delta} \quad (12)$$

Отриманий вираз дозволяє попередньо обрати ОП для схеми рис.1. Проаналізуємо схему Хауленда (рис.2). Маємо для напруг:

$$U_a \cdot \dot{K}_u - U_b \cdot \dot{K}_u - U_c = 0 \quad (13)$$

Падіння напруги на  $R_{11}$ :

$$\dot{U}_c - \dot{U}_H = \dot{I}_c \cdot R_{11}$$

Зауважимо, що  $\dot{I}_a + \dot{I}_H = \dot{I}_c$ , звідки

$$\dot{U}_c - \dot{U}_H = \dot{I}_a \cdot R_{11} + \dot{I}_H \cdot R_{11} \quad (14)$$

Крім того

$$\dot{U}_a = \dot{I}_a \cdot R_8, \quad (15)$$

$$\dot{U}_H = \frac{R_{10} + R_8}{R_8} \cdot \dot{U}_a \quad (16)$$

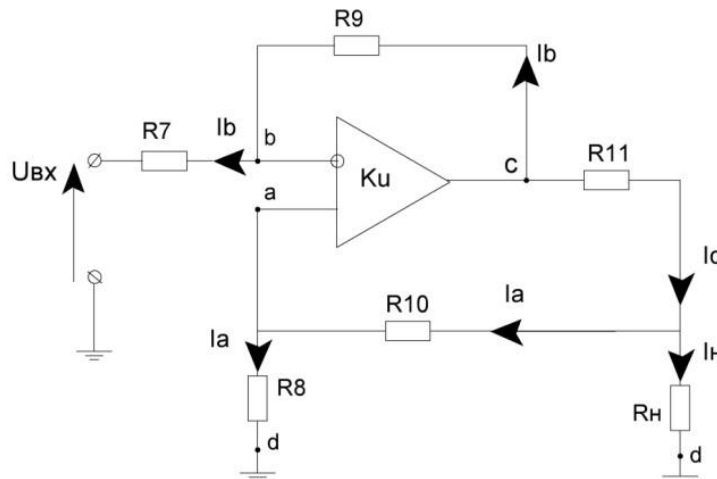


Рис. 2 Джерело струму за схемою Хауленда

Підставивши (15), (16) в (14), отримаємо

$$U_c \cdot \frac{R_{10} + R_8}{R_8} \cdot U_a = \frac{R_{11}}{R_8} \cdot U_a + I_H \cdot R_{11} \quad (17)$$

Оскільки  $I_H \cdot R_H = U_H$ , то з (16)

$$U_a = I_H \cdot \frac{R_8 \cdot R_H}{R_{10} + R_8} \quad (18)$$

Підставивши (17), в (18), отримаємо

$$U_c = I_H \cdot \left( R_H + R_{11} + \frac{R_{11} \cdot R_H}{(R_8 + R_{10})} \right) \quad (19)$$

Розглянемо співвідношення для інвертуючого входу ОП:

$$I_b = \frac{U_c - U_{ex}}{R_7 + R_9} \quad (20)$$

$$U_b = U_c - I_b \cdot R_9 \quad (21)$$

Підставивши (21) в (22) маємо

$$U_b = U_c \cdot \frac{R_7}{R_7 + R_9} + U_{ex} \cdot \frac{R_9}{R_7 + R_9} \quad (22)$$

Підставивши (19) в (22), отримаємо

$$U_b = I_H \cdot \left( R_H + R_{11} + \frac{R_{11} \cdot R_H}{(R_8 + R_{10})} \right) \cdot \frac{R_7}{R_7 + R_9} + U_{ex} \cdot \frac{R_9}{R_7 + R_9} \quad (23)$$

Підставивши (18), (19), (23) в (13) та виконавши необхідні перетворення, отримаємо

$$I_H = U_{ex} \cdot \frac{\frac{R_9 \cdot K_u}{R_7 + R_9}}{\frac{R_8 \cdot R_H}{R_8 + R_{10}} \cdot K_u - \frac{K_u \cdot R_7}{R_7 + R_9} \cdot \left( R_H + R_{11} + \frac{R_{11} \cdot R_H}{(R_8 + R_{10})} \right) - \frac{1}{\frac{R_7}{R_7 + R_9} \cdot \left( R_H + R_{11} + \frac{R_{11} \cdot R_H}{(R_8 + R_{10})} \right)}}$$

Множник при  $U_{ex}$  еквівалентний провідності. Тому, взявши зворотну величину, за умови вибору резисторів таким чином, щоб  $R_8 + R_{10} + R_{11} = R_7 + R_9$ , отримуємо

$$Z = -R_H \cdot \frac{(R_7 + R_9)^2}{K_u \cdot R_9 \cdot (R_7 + R_{10})} - R_{11} \cdot \left( \frac{R_7}{R_9} + \frac{(R_7 + R_9)}{R_9 \cdot K_u} \right);$$

$$\dot{I}_H = U_{ex} \cdot \frac{1}{-R_H \cdot \frac{(R_7 + R_9)^2}{K_u \cdot R_9 \cdot (R_7 + R_{10})} - R_{11} \cdot \left( \frac{R_7}{R_9} + \frac{(R_7 + R_9)}{R_9 \cdot K_u} \right)}. \quad (24)$$

Підставивши (1) в (24), отримаємо вираз, що характеризує залежність струму в навантаженні від частоти, з якого можна встановити (аналогічно до попередньої) схеми, що

$$\omega_{zp.I} = \lambda_2 \cdot \omega_{zp.U}, \quad (25)$$

де  $\lambda_2 = 1 + \left( \frac{(R_{10} + R_7) \cdot R_{11} \cdot R_7 \cdot K_0}{R_{11} \cdot (R_9 + R_7) \cdot (R_{10} + R_7) + R_H \cdot (R_9 + R_7)^2} \right)$ .

Підставивши (25) у (9), де замість  $\lambda_1$  стоятиме  $\lambda_2$ , та врахувавши, що  $K_0 \approx 10000$ , отримуємо для цієї схеми

$$\omega_1 = \omega_6 \cdot \frac{R_H \cdot (R_9 + R_7)^2 + R_{11} \cdot ((R_9 + R_7) \cdot (R_{10} + R_7))}{((R_{10} + R_7) \cdot R_{11} \cdot R_7) \cdot \frac{\Delta}{\sqrt{100^2 - \Delta^2}}}. \quad (26)$$

Отриманий вираз дозволяє розрахувати необхідну частоту одиничного підсилення ОП для схеми Хауленда. Як бачимо, отримані вирази мають подібну форму. З (12), (26) видно, що, задавшись бажаною верхньою частотою смуги робочих частот для кожної з розглянутих схем джерел струму, можна розрахувати частоту одиничного підсилення ОП.

Аналіз (12) і (26) показує, що при збільшенні опору навантаження необхідно застосовувати ОП з більшою частотою одиничного підсилення. Також слід зазначити, що зі зміною опору навантаження погіршуються частотні властивості розглянутих джерел струму.

### Висновки

Проаналізовані джерела струму мають майже однакові частотні властивості. На них впливають декілька факторів, а саме: значення опору навантаження, коефіцієнт підсилення операційного підсилювача та частота його одиничного підсилення.

Проаналізовані джерела струму мають відносно вузьку смугу робочих частот і не можуть бути рекомендовані до використання в широкосмугових імпедансних томографах. Для побудови широкосмугових джерел струму доцільно обирати більш складні схеми, наприклад, на основі транскондуктивних підсилювачів.

Отримані залежності дозволяють пов'язати діапазон робочих частот при заданій точності підтримання струму в навантаженні з частотою одиничного підсилення операційного підсилювача та дозволяють зробити попередній вибір операційного підсилювача.

**Література**

1. Фокин А. В. Источник тока для электроимпедансной томографии / А. В. Фокин, К. С. Бразовский. — Известия Томского Политехнического Университета. — 2008. — Т. 313 №4. — С. 99—101.
2. Rafiei-Naeini M. Low-noise current excitation sub-system for medical EIT. / M. Rafiei-Naeini., H. McCann. // *Physiological measurements Journal*. — 2008. — №29. — P. 173—184.
3. Khalighi M. Practical design of low-cost instrumentation for industrial electrical impedance tomography (EIT) / M. Khalighi., B. Vahdat., M. Mortazavi., H. Wei., M. Soleimani. // *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE International*. — 2012. — P. 1259—1263.
4. Электроимпедансная томография / Я. С. Пеккер, К. С. Бразовский, В. Ю. Усов, М. П. Плотников, О. С. Уманский. — Томск: ООО «Издательство научно-технической литературы», — 2004. — 190 с.
5. Bertemes-Filho P. A. Comparison of modified Howland circuits as current generators with current mirror type circuits. / P. Bertemes-Filho., B. H. Brown., A. J. Wilson. // *Physiological measurements Journal*. — 2000. — №21. — P. 1—6.
6. Хоровиц П. Искусство схемотехники: В 3-х томах. / Хоровиц П., Хилл У., пер. с англ. Б. Н. Бронин и др. — [5-е изд, перераб]. — М. : Мир, 1998. — 418 с.
7. Franco S. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits / Franco S. — [3rd ed.]. — New York : McGraw-Hill, 2002. — 658 p.
8. Al-Obaidi A. A new enhanced Howland voltage controlled current source circuit for EIT application / A. Al-Obaidi., M. Meribout // *IEEE GCC Conference and Exhibition February 19-22, Dubai*, — 2011. — P. 327—330.
9. Xiaoke L. Analysis of Constant-Current Characteristics for Current Sources / L. Xiaoke., D. Feng., F. Yan. // *Control and Decision Conference (CCDC), 24th Chinese*. — 2012. — P. 2607—2612.
10. Tucker A. S. Biocompatible, High Precision, Wideband, Improved Howland Current Source With Lead-Lag Compensation / A. S. Tucker., M. F. Robert., R. J. Sadleir // *Biomedical Circuits and Systems Journal*. — 2012. — №99. — P. 1—8.
11. Brown B. H. Electrical impedance tomography (EIT): a review / B. H. Brown // *Journal of Medical Engineering & Technology*. — 2003. — №27. — P. 97—108.
12. Сушко І. О. Потенційна чутливість імпедансної томографії / І. О. Сушко., Є. В. Гайдаєнко., О. А. Якубенко // *Вісник НТУУ «КПІ» . Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. — 2012. — №50. — С. 92—104.

**References**

1. Fokin A.V., Brazovskij K.S. Istochnik toka dlya e'lektroimpedansnoj tomografii. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta*, 2008, vol. 313, no. 4, pp. 99-101.
2. Rafiei-Naeini M. Low-noise current excitation sub-system for medical EIT. / M. Rafiei-Naeini., H. McCann. // *Physiological measurements Journal*. — 2008. — №29. — P. 173—184.
3. Khalighi M. Practical design of low-cost instrumentation for industrial electrical impedance tomography (EIT) / M. Khalighi., B. Vahdat., M. Mortazavi., H. Wei., M. Soleimani. // *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE International*. — 2012. — P. 1259—1263.
4. Elektroimpedansnaya tomografiya / Ya. S. Pekker, K.S. Brazovskiy, V. Yu. Usov, M.P. Plotnikov, O. S. Umanskiy. — Tomsk: ООО “Izdatelstvo nauchnotekhnicheskoy literaturi”, 2004, 190 p.

5. Bertemes-Filho P. A. Comparison of modified Howland circuit as current generator switch current mirror type circuits. / P. Bertemes-Filho., B.H.Brown., A.J.Wilson. //Physiological measurements Journal. –2000. – №21. – P. 1–6.
6. Horovits P., Hill U. *Iskusstvo shemotehniki: V 3-h tomah, per. s angl.* B. N. Bronin i dr. Moscow, Mir, 1998, 418 p.
7. Franco S. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits / Franco S. – [3rd ed.]. – New York : McGraw-Hill, 2002. – 658 p.
8. Al-Obaidi A. A New Enhanced Howland Voltage Controlled Current Source Circuit For EIT Application /A. Al-Obaidi., M.Meribout.,//IEEE GCC Conference and Exhibition February 19-22, Dubai,—2011.—P. 327–330.
9. Xiaoke L. Analysis of Constant-Current Characteristics for Current Sources /L Xiaoke., D.Feng., F.Yan.// Contro land Decision Conference (CCDC), 24th Chinese. –2012. – P. 2607–2612.
10. Tucker A. S. Biocompatible, High Precision, Wideband, Improved Howland Current Source With Lead-Lag Compensation/A. S.Tucker., M. F. Robert., R. J. Sadleir.// Biomedical Circuits and Systems Journal. –2012. – №99. – P. 1–8.
11. Brown B. H. Electrical Impedance Tomography (EIT): A review / B. H. Brown // Journal of Medical Engineering & Technology. –2003. – №27. – P. 97–108.
12. Horovits P., Hill U. *Iskusstvo shemotehniki: V 3-h tomah, per. s angl.* B. N. Bronin i dr. Moscow, Mir, 1998, 418 p.

*Рибін О. І., Мовчанюк А. В., Гайдаєнко Є. В. Аналіз джерел струму на операційних підсилювачах, згідно вимог їх прецизійності в широкій смузі робочих частот для задач електроімпедансної томографії. В роботі розглянуті особливості функціонування двох класичних схем джерел струму в ЕІТ, — операційний підсилювач з навантаженням (досліджуванним об'єктом) у колі зворотного зв'язку, та схеми Хауленда в широкій смузі частот. В кожній зі схем використаний ОП та негативний ЗЗ за струмом для збільшення вихідного опору цих джерел. Приведені відповідні аналітичні залежності струму навантаження від частоти для обох джерел. Надані практичні рекомендації при виборі ОП для таких схем, згідно вимог їх прецизійності в широкій смузі частот.*

**Ключові слова:** *електрична імпедансна томографія, джерело струму, операційний підсилювач, транскондуктивний підсилювач, прецизійність, широка смуга частот.*

*Рыбин А. И., Мовчанюк А. В., Гайдаенко Е. В. Анализ источников тока на операционных усилителях, согласно требований их прецизионности в широкой полосе частот для задач электроимпедансной томографии. В работе рассмотрены особенности функционирования двух классических схем источников тока для электроимпедансной томографии, — операционный усилитель с нагрузкой в цепи обратной связи и схема Хауленда в широкой полосе частот. В каждой из схем использован операционный усилитель и отрицательная обратная связь по току для увеличения выходного сопротивления этих схем. Приведены соответствующие аналитические зависимости тока нагрузки от частоты для обоих источников. Даны практические рекомендации при выборе операционных усилителей для таких схем, учитывая требования к прецизионности в широкой полосе частот.*

**Ключевые слова:** *электрическая импедансная томография, источник тока, операционный усилитель, транскондуктивный усилитель, прецизионность, широкая полоса частот.*



*Rybin A. I., Movchanuk A. V., Gaidaenko E.V. Analysis of current sources on the operational amplifiers according to their precision requirements in a wide frequency range for Electrical Impedance Tomography problems.*

*Introduction. The typical approaches for the current sources designing are considered. The difficulties of providing their precision in a wide frequency range are formulated. The necessary requirements for their precision in a wide frequency range are also specified.*

*Formulation of the problem. The most of existing current sources are implemented using operational amplifiers. It is shown by short review of them. Such solutions do not fully provide the requirements of precision in their work in a wide frequency range. The possibility of using operational amplifiers is analyzed; the limits of their application are determined.*

*The research methods and the analysis of results. The load current on the frequency analytical dependencies for these schemes were calculated and critically analyzed. The results are illustrated on the graphs. The ratios for practical recommendations for such schemes designing are calculated.*

*Conclusions. The arguments for inexpediency of operational amplifiers application for schemes of current sources in all frequency range are presented. The operational amplifiers with a greater bandwidth should be used for large load resistance values. The other elements of the electrical circuits (namely transconductance amplifiers) using is proposed.*

***Keywords:** Electrical Impedance Tomography, current source, operational amplifiers, transconductance amplifier, precision, wide frequency band.*