

УНІВЕРСАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ІМПЕДАНСІВ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ

Петренко І.А., к.т.н., доц., Лобода С.С., студент
НТУУ «КПІ», кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. У теорії електричних кіл використовується порівняно невеликий набір базових схемних компонентів (лінійних або нелінійних), а саме: активні – незалежні та керовані джерела напруги і струму та ідеальні пасивні – резистор, конденсатор, котушка індуктивності. Для забезпечення проектування електронної апаратури різного призначення до стандартних компонентів додають нові: схемотехнічні негатрони [1], D-елементи, мемристори та інші. На думку авторів надзвичайно перспективними є універсальні перетворювачі імпедансів (General Impedance Converters, або коротко GIC) на операційних підсилювачах із зворотними зв'язками.

Мета роботи – дослідити властивості універсальних перетворювачів імпедансів, побудованих на двох операційних підсилювачах, та з'ясувати придатність GIC для реалізації схемних моделей котушок індуктивності, негатронів та D-елементів.

Матеріали і результати досліджень. Для вивчення властивостей була обрана схема універсального перетворювача, відома як Antoniou GIC [2]. На рис. 1 зображена схема GIC. Універсальний перетворювач побудовано на двох звичайних схемотехнічних негатронах [3], які зістиковані інвертуючими входами і зв'язані навхрест прямими входами з виходами один одного через комплексні опори (Z_1, Z_4). Схема GIC має дві модифікації з симетричним розміщенням вхідних портів: для модифікації 1 (рис. 1,а) входом є вузол 1, для модифікації 2 (рис. 1,б) входом є порт 2.

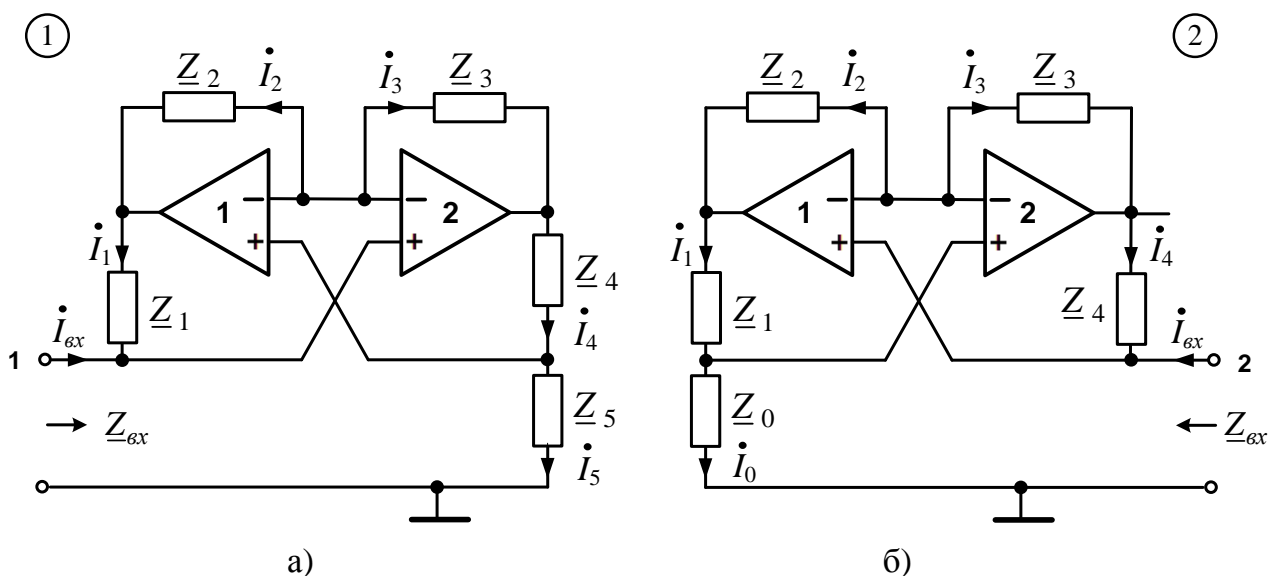


Рисунок 1 – Універсальні перетворювачі імпедансів (GIC)

Операційні підсилювачі, які входять до складу GIC, мають працювати у лінійному режим, а отже, характеризуються відсутністю вхідних струмів і тим, що усі чотири входи ОП знаходяться під однаковим потенціалом. Отримаємо вирази для вхідних імпедансів обох модифікацій перетворювача. Застосуємо символічний метод і поступово зв'яжемо комплексні зображення струмів і напруг відповідними співвідношеннями.

Для модифікації 1 перетворювача (рис. 1, а):

$$\dot{U}_{ex1} = \dot{U}_{ex2}, \quad (1)$$

$$\dot{i}_5 = \frac{\dot{U}_{ex2}}{\underline{Z}_5}, \quad (2)$$

$$\dot{i}_4 = \frac{\dot{U}_{вux2} - \dot{U}_{ex2}}{\underline{Z}_4}, \quad (3)$$

$$\dot{i}_3 = \frac{\dot{U}_{ex2} - \dot{U}_{вux2}}{\underline{Z}_3} = -\frac{\dot{i}_4 \cdot \underline{Z}_4}{\underline{Z}_3} \stackrel{i_4 = i_5}{=} -\frac{\dot{U}_{ex2} \cdot \underline{Z}_4}{\underline{Z}_5 \cdot \underline{Z}_3}, \quad (4)$$

$$\dot{i}_2 = \frac{\dot{U}_{ex1} - \dot{U}_{вux1}}{\underline{Z}_2}, \quad (5)$$

$$\dot{i}_1 = \frac{\dot{U}_{вux1} - \dot{U}_{ex1}}{\underline{Z}_1} = -\frac{\dot{i}_2 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1} \stackrel{i_2 = -i_3}{=} -\frac{\dot{U}_{ex1} \cdot \underline{Z}_4}{\underline{Z}_5 \cdot \underline{Z}_3} \cdot \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1}, \quad (6)$$

$$\dot{i}_{ex} = -\dot{i}_1 = \frac{\dot{U}_{ex1} \cdot \underline{Z}_4}{\underline{Z}_5 \cdot \underline{Z}_3} \cdot \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1}, \quad (7)$$

де $\dot{U}_{ex1}, \dot{U}_{ex2}$ – комплексні напруги на входах операційних підсилювачів 1 та 2, відповідно, $\dot{U}_{вux1}, \dot{U}_{вux2}$ – комплексні напруги на їхніх виходах.

Тоді вираз для вхідного імпедансу:

$$\underline{Z}_{ex} = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3 \cdot \underline{Z}_5}{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_4}. \quad (8)$$

Аналогічний аналіз виконаємо для іншої модифікації GIC (рис. 1, б).

$$\dot{U}_{ex1} = \dot{U}_{ex2}, \quad (9)$$

$$\dot{i}_0 = \frac{\dot{U}_{ex1}}{\underline{Z}_0}, \quad (10)$$

$$\dot{i}_1 = \frac{\dot{U}_{вux1} - \dot{U}_{ex1}}{\underline{Z}_1}, \quad (11)$$

$$i_2 = \frac{\dot{U}_{ex1} - \dot{U}_{oux1}}{Z_2} = -\frac{i_1 \cdot Z_1}{Z_2} \stackrel{i_1=i_0}{=} -\frac{\dot{U}_{ex1} \cdot Z_1}{Z_0 \cdot Z_2}, \quad (12)$$

$$i_4 = \frac{\dot{U}_{oux2} - \dot{U}_{ex2}}{Z_4} = -\frac{i_3 \cdot Z_3}{Z_4} \stackrel{i_3=-i_2}{=} i_2 \frac{Z_3}{Z_4} = -\frac{\dot{U}_{ex2} \cdot Z_1 \cdot Z_3}{Z_0 \cdot Z_2 \cdot Z_4}, \quad (13)$$

$$i_{ex} = -i_4 = \frac{\dot{U}_{ex2} \cdot Z_1 \cdot Z_3}{Z_0 \cdot Z_2 \cdot Z_4}. \quad (14)$$

Звідси, комплексний вхідний опір схеми:

$$Z_{ex} = \frac{Z_0 \cdot Z_2 \cdot Z_4}{Z_1 \cdot Z_3}. \quad (15)$$

Отримані вирази (8) та (15) свідчать про певну симетричність функціонування обох модифікацій GIC і можливість отримання широкого спектру вхідних імпедансів шляхом вибору різних типів комплексних опорів $Z_0 \dots Z_5$.

GIC надзвичайно зручно використовувати для реалізації котушок індуктивності у складі інтегральних схем, де цей елемент теоретично неможливо сконструювати, в той час як операційні підсилювачі, конденсатори та резистори виготовляють в основному технологічному циклі. Наприклад, якщо елементом Z_2 вважати конденсатор з параметром C_2 , а усі інші елементи Z_1, Z_3, Z_4, Z_5 резисторами, то такий вибір призведе до індуктивного характеру вхідного опору перетворювача.

$$Z_{ex} = \frac{R_1 \cdot R_3 \cdot R_5}{\frac{1}{j\omega C_2} \cdot R_4} = j\omega \frac{R_1 C_2 R_3 R_5}{R_4} \quad (16)$$

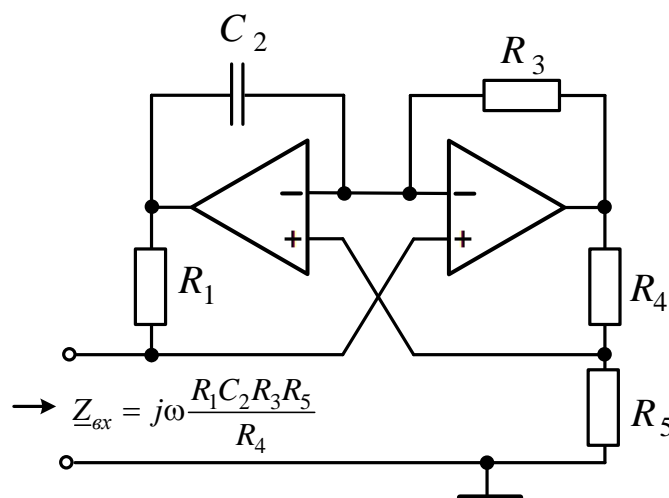


Рисунок 2 – Реалізація котушки індуктивності за допомогою GIC

На основі схеми GIC можна створити різні нефізичні елементи, наприклад, резистори з від'ємними опорами, параметри яких прямо або обернено пропорційні квадрату частоти. D-елемент з $Z_{ex} = \frac{-1}{D \cdot \omega^2}$ виходить в модифікації 1 (рис. 1, а) трьома способами: за умови вибору пари елементів Z_1, Z_5 (Z_3, Z_5 або Z_1, Z_3) конденсаторами, а усіх інших елементів резисторами (рис. 3). Схемотехнічні негатрони, на жаль, не реалізуються на основі GIC.

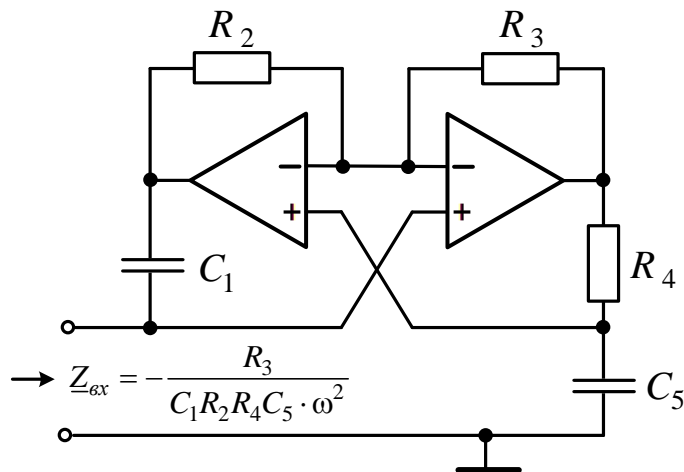


Рисунок 3 – Реалізація D-елемента за допомогою GIC

Перевагою обох модифікацій універсального перетворювача імпедансів є їхня безумовна стабільна робота. Це означає, що після вибору будь-якого значення вхідного імпедансу (реального або нефізичного як D-елемент) схема GIC стабільна у складі іншої схеми, наприклад, електричного фільтра.

Висновки. 1. Універсальний перетворювач GIC замінює будь-який фізичний пасивний компонент електричних кіл, повністю реалізуючи його передатну функцію за допомогою резисторів, конденсаторів та операційних підсилювачів, які є стандартними елементами інтегральних схем на відміну від котушок індуктивності.

2. Використання GIC розширює базовий набір елементів електричних схем: можна створити компоненти з новими властивостями, наприклад, нефізичні D-елементи, які використовують для побудови електричних фільтрів.

Перелік посилань

1. Бенинг Ф. Отрицательные сопротивления в электронных схемах. Берлин, 1971. Пер. с нем. Под ред. Д.П. Линде. М., «Сов. Радио». 1975. – 288 с.
2. Bruton L.T. Non-ideal performance of two-amplifier positive-impedance converters, IEEE Transactions on Circuit Theory, CT-14 (4), 1970 – P. 541...549.
3. Петренко І.А., Марков Д.К. Моделювання конверторів з негативними імпедансами, реалізованих на операційних підсилювачах. У збірнику «Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенергетики та автоматики». – К.: «Політехніка», 2013. – С. 568...571.