

# ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ДІАПАЗОНІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ СХЕМОТЕХНІЧНИХ НЕГАТРОНІВ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ

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

**Вступ.** Функціонування в робочих режимах більшості електротехнічних та електронних пристроїв супроводжується різного роду небажаними витоками енергії, які погіршують параметри пристроїв та звужують робочі діапазони. Для відновлення запроєктованих параметрів застосовують компенсацію паразитних втрат у пасивних елементах, джерелах енергії, лініях передавання та інших з використанням схмотехнічних негатронів [1, 2]. В іноземній літературі схмотехнічні негатрони об'єднують аббревіатурою NIC (Negative Impedance Converter – перетворювачі з негативним імпедансом).

**Мета роботи.** Дослідити умови технічного застосування схемних реалізацій негатронів на операційних підсилювачах (ОП) із зворотними зв'язками, які мають у робочому режимі від'ємне значення основного параметра (активного опору, ємності або індуктивності). З'ясувати вплив на стабільність роботи пристроїв співвідношення номіналів компенсуемого параметра і параметра негатрона.

**Матеріали і результати досліджень.** До класу схмотехнічних негатронів відносять активні двополіусники, які здатні змінювати напрям струму або напруги між затискачами приладу і мають імпеданс, значення якого є пропорційним імпедансу одного із елементів у складі самого негатрона. Ефект зміни напрямку струму (напруги) можна урахувати у математичному виразі компонентного рівняння негатрона знаком «мінус». Отже, з математичної точки зору функціонування схмотехнічних негатронів описується компонентними рівняннями, подібними до тих, що характеризують базові пасивні елементи електричних схем заміщення (ідеалізовані резистор, конденсатор та котушку індуктивності), але за умови заміни позитивного значення параметра ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ) на негативне ( $-R$ ,  $-L$ ,  $-C$ , відповідно). Звідси назви: негативний резистор, негативний конденсатор, негативна індуктивність.

$$\text{Негативний резистор (} R\text{-негатрон)} \quad u_{R-}(t) = (-R) \cdot i(t) \quad (1)$$

$$\text{Негативний конденсатор (} C\text{-негатрон)} \quad u_{C-}(t) = \frac{1}{(-C)} \int i(t) dt \quad (2)$$

$$\text{Негативна індуктивність (} L\text{-негатрон)} \quad u_{L-}(t) = (-L) \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

Співвідношення (1) – (3) є справедливими лише за певних умов на обмежених ділянках вольт-амперних характеристик  $R$ -негатронів, амплітудних та частотних діапазонах вхідних сигналів для  $C$ ,  $L$ -негатронів. Кожен

схемотехнічний негatron має всередині джерело енергії. Енергія джерела обмежена, тому схема працює в негatronному режимі у обмеженій області.

Серед численних запропонованих схемних реалізацій негatronів на думку авторів надзвичайно перспективними є варіанти на операційних підсилювачах із зворотними зв'язками [3, 4]. Усі негatronи поділяють на дві великі групи  $U$ -негatronи, які змінюють фазу напруги і керуються струмом, та  $I$ -негatronи, які створюють протифазний струм і керуються напругою. Запропоновані схеми негatronів мають практичне значення тільки у випадку гарантованої стабільної роботи, яка забезпечується роботою операційного підсилювача в лінійному режимі, аж доки ОП не потрапляє у режим насичення і на виході не встановлюється напруга  $u_{вих} = \pm E_{ж}$ . Проаналізуємо вплив значень вхідних сигналів на роботу негatronа на прикладі  $R$ -негatronа  $U$ -типу за схемою 1, яка зображена на рисунку 1,а).

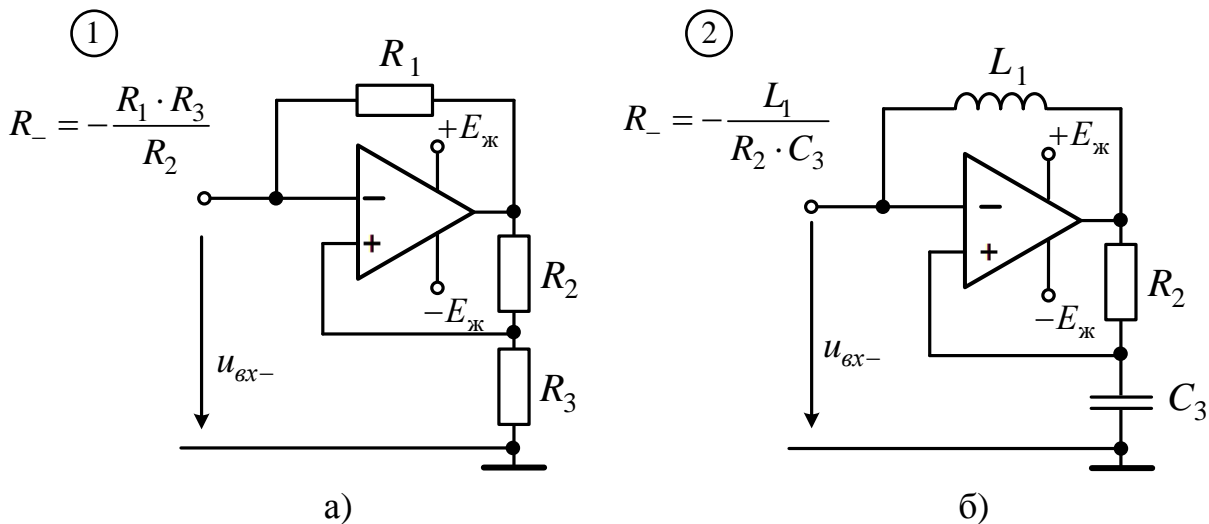


Рисунок 1 –  $R$ -негatronи

У режимі насичення  $u_{вих} = +E_{ж}$  і на прямий вхід ОП з виходу через дільник напруги  $R_2, R_3$  подається сигнал  $u_{вх+} = \frac{E_{ж} \cdot R_2}{R_2 + R_3}$ , а на інвертуючий вхід

для забезпечення насичення має надходити сигнал  $u_{вх-} < u_{вх+} = \frac{E_{ж} \cdot R_2}{R_2 + R_3}$ .

Вхідний струм негatronа у такому режимі приймає від'ємні значення. Дійсно, навіть для найбільшого за значенням вхідного сигналу  $u_{\max \text{ вх-}}$  виконується співвідношення (4):

$$i_{\text{вх}} = \frac{u_{\max \text{ вх-}} - u_{\text{вих}}}{R_1} = \frac{\frac{E_{ж} \cdot R_2}{R_2 + R_3} - E_{ж}}{R_1} < 0. \quad (4)$$

Таким чином, точка перемикання ОП із лінійного режиму у додатне насичення на ВАХ негatronа  $U$ -типу (точка **a** на рис. 2) має координати

( $i < 0, u_{\text{вх-}} = \frac{E_{\text{жс}} \cdot R_2}{R_2 + R_3}$ ). При зменшенні струму керування ОП буде залишатися у режимі насичення, а напруга на вході двополюсника  $u_{\text{вх-}}$  буде поступово зменшуватися. При збільшенні струму керування схема потрапляє у лінійний режим і працює як негатрон.

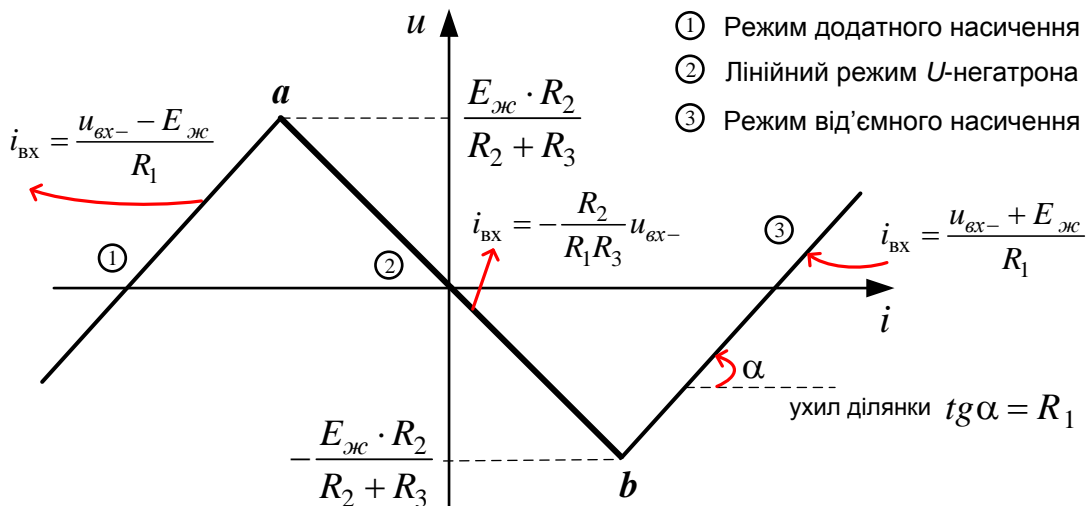


Рисунок 2 – Вольт-амперна характеристика  $R$ -негатрона  $U$ -типу

У режимі від'ємного насичення  $u_{\text{вих}} = -E_{\text{жс}}$  на прямий вхід ОП з виходу через ділянку напруги  $R_2, R_3$  подається сигнал  $u_{\text{вх+}} = \frac{-E_{\text{жс}} \cdot R_2}{R_2 + R_3}$ , а на інвертуючий вхід має надходити сигнал  $u_{\text{вх-}} > u_{\text{вх+}} = \frac{-E_{\text{жс}} \cdot R_2}{R_2 + R_3}$ , щоб забезпечити негативне насичення. Вхідний струм схеми у такому режимі приймає додатні значення, тобто спрямований від входу до виходу. Дійсно, навіть для найменшого за значенням вхідного сигналу виконується співвідношення (5):

$$i_{\text{вх}} = \frac{u_{\text{міх вх-}} - u_{\text{вих}}}{R_1} = \frac{\frac{-E_{\text{жс}} \cdot R_2}{R_2 + R_3} + E_{\text{жс}}}{R_1} > 0 \quad (5)$$

Таким чином, точка перемикання ОП із лінійного режиму у негативне насичення на ВАХ негатрона  $U$ -типу (точка  $b$  на рис. 2) має координати ( $i > 0, u_{\text{вх-}} = \frac{-E_{\text{жс}} \cdot R_2}{R_2 + R_3}$ ). При збільшенні значення струму керування напруга на вході схеми негатрона також буде невпинно збільшуватися.

З вищесказаного виходить, що обмеженням для амплітуди вхідного сигналу є значення  $U_{sat} = \left| \pm \frac{E_{жс} \cdot R_2}{R_2 + R_3} \right|$ . Якщо миттєві значення вхідного сигналу більші за  $+U_{sat}$  або менші від  $-U_{sat}$ , то наступають спотворення функціонування.

За наявності реактивних елементів у ланках зворотного зв'язку ОП границі діапазону дозволених миттєвих значень вхідних сигналів можна розрахувати, скориставшись символічним методом.

$$U_{sat} = \left| \pm \frac{E_{жс} \cdot Z_2}{Z_2 + Z_3} \right|. \quad (6)$$

Наприклад, для схеми  $R$ -негатрона  $U$ -типу за схемою 2 (рис. 1,б):

$$\dot{U}_{sat} = \left| \frac{E_{жс} \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C}} \right| = \left| \frac{E_{жс}}{R_2 \cdot j\omega C + 1} \right| = \left| \frac{E_{жс}}{\sqrt{1 + \omega^2 R_2^2 C^2}} e^{-j[\arctg(\omega R_2 C)]} \right|. \quad (7)$$

Отже,

$$U_{sat} = \frac{E_{жс}}{\sqrt{1 + \omega^2 R_2^2 C^2}}. \quad (8)$$

Таким чином, дозвалені значення вхідного сигналу можна оцінити за співвідношенням (8) для кожної конкретної частоти.

Для з'ясування впливу на стабільність роботи пристроїв співвідношення номіналів компенсуемого параметра і параметра негатрона проаналізуємо передатну функцію для схеми, що зображена на рисунку 3,а). На схемі  $R$ -негатрон  $U$ -типу використаний для компенсації напруги на внутрішньому опорі генератора  $R_{ген}$ . Для наближеного аналізу передатної функції на рис. 3,б) сам негатрон замінено елементом Баркгаузена [2].

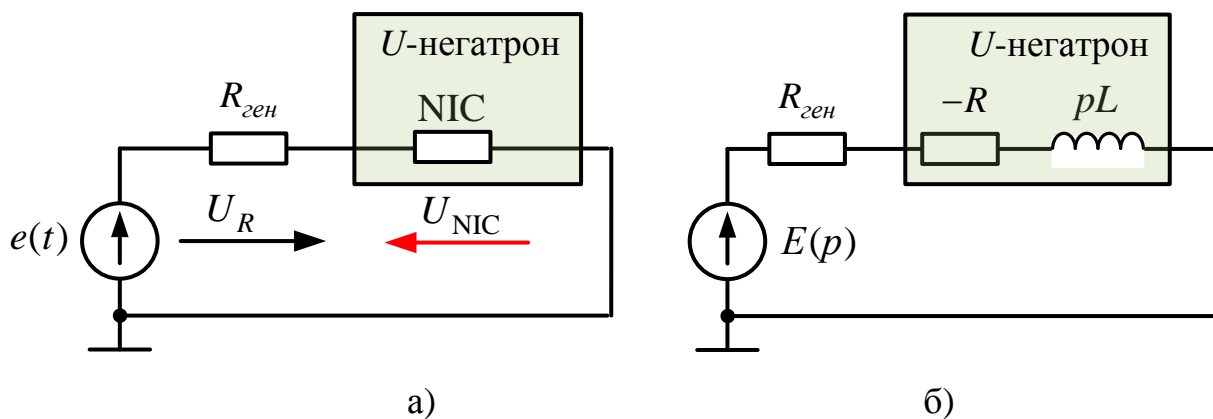


Рисунок 3 – Схеми застосування  $R$ -негатрона  $U$ -типу: структурна (а), схема заміщення з елементом Баркгаузена (б)

Запишемо передатну функцію за напругою як відношення операторних зображень, що представляють реакцію та збудження:

$$H(p) = \frac{U_{NIC}(p)}{E(p)} = \frac{\frac{E(p)}{R_{ген} - R + pL}(-R + pL)}{E(p)} = \frac{-R + pL}{R_{ген} - R + pL}. \quad (9)$$

Характеристичне рівняння:

$$R_{ген} - R + pL = 0 \rightarrow p = -\frac{R_{ген} - R}{L}. \quad (10)$$

Для стійкої роботи схеми корінь характеристичного рівняння має бути від'ємним. Ця вимога виконується, якщо  $R_{ген} > |R_-|$ . Це означає, що для стабільної роботи схеми незначна частина внутрішнього опору генератора (навантаження) має залишатися некомпенсованою. Побудова схем заміщення усіх типів негatronів  $U$ -типу та  $I$ -типу з елементами Баркгаузена та аналіз відповідних передатних функцій дають змогу отримати кількісні співвідношення для параметрів негatronів та компенсуємих елементів.

**Висновки.** 1. На стабільність роботи схмотехнічного негatronа впливає амплітуда вхідного сигналу, співвідношення параметрів негatronа та компенсуємого елемента, частотний діапазон сигналу збудження.

2. Для кількісної оцінки границь діапазону робочих напруг схмотехнічних негatronів на операційних підсилювачах запропоновано співвідношення (6).

3. Доведено, що для стабільної роботи негatronа  $U$ -типу його номінал має бути трохи меншим за компенсуємий опір (джерела, лінії). В той же час для стабільної роботи негatronа  $I$ -типу його номінал має бути трохи більшим за компенсуємий опір.

4. Здійснено моделювання роботи схемних реалізацій  $R$ -негatronів,  $C$ -негatronів та  $L$ -негatronів з урахуванням робочих діапазонів вхідних сигналів та їхньої частоти з залученням програмного продукту MultiSim. Результати моделювання довели обґрунтованість вищезазначених обмежень на області функціонування.

#### Перелік посилань

1. Филинюк Н.А. Негатроника. Исторический обзор // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – №3. – С.38...43.
2. Бенинг Ф. Отрицательные сопротивления в электронных схемах. Берлин, 1971. Пер. с нем. Под ред. Д.П. Линде. М., «Сов. Радио». 1975. – 288 с.
3. Петренко І.А., Марков Д.К. Моделювання конверторів з негативними імпедансами, реалізованих на операційних підсилювачах. // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенергетики та автоматики: зб. наук. праць. – К.: «Політехніка», 2013. – С. 568...571.
4. Петренко І. А., Приходько В. С. Схмотехнічні реалізації  $C$ -негatronів на операційних підсилювачах. // Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенергетики та автоматики: зб. наук. праць. – К.: «Політехніка», 2014. – С. 384...386.