

ДОСЛІДЖЕННЯ ДІАПАЗОНІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ СХЕМНИХ НЕГАТРОНІВ, РЕАЛІЗОВАНИХ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ

к. т. н. Петренко І. А.

Україна, Київ, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Abstract. The using of negative impedance circuits expands the set of basic electrical circuit components by three additional components: a negative resistor, a negative capacitor and a negative inductor, respectively, R-, C-, L-negatrons. Definitions and the component equations of the circuit negatrons have been represented for time and frequency domains. The possibility of direct synthesis negative impedance circuits, which are based on operational amplifier with feedback circuits on both inputs, has been studied. Because of input signal's amplitude and frequency band effects on the negative impedance circuit working stability, the investigations of the permissible excitation signals deviations for negative impedance circuits were carried out and results were obtained in numerical expressions. The numerical values of the boundaries of the operating range of currents and voltages are determined by the value of electromotive force source of the operational amplifier split power, parameters of feedback elements and signal frequency excitation. Simulation results using MultiSim software have proved the validity of the considered limitations on the operating range of input signals and their frequency for different types of negative impedance circuits.

Keywords: a negative resistor, a negative capacitor, a negative inductor, negative impedance converter, negative impedance circuit

Синтез електричних систем з наперед заданими властивостями становить одну із найважливіших задач електротехніки. Серед методів побудови генераторів, підсилювачів, систем передавання з заданими характеристиками цікавим є використання в їхній структурі негatronів – елементів з негативними параметрами. Негatronи поділяють на фізичні та схмотехнічні [1]. Більшість фізичних негatronів складають напівпровідникові прилади, які характеризуються від'ємним диференціальним опором на окремих ділянках вольт-амперних характеристик. Це, наприклад, тунельні діоди, лавинно-пролітні діоди, діоди Ганна, інжекційно-пролітні діоди, диністори і тиристори. Велика кількість фундаментальних робіт присвячена дослідженню властивостей та застосувань фізичних негatronів. Схмотехнічні негatronи являють собою електричні кола з активними елементами, які забезпечують негативні значення вхідного імпедансу (NIC – Negative Impedance Converter). Перші спроби сформулювати схемні негatronи відносяться до 70-х років XX століття [2–5]. В останні роки спостерігається відродження інтересу до схмотехнічних негatronів, спричинене появою в розпорядженні розробників електронної апаратури порівняно дешевих мікроелектронних підсилювачів [6–8]. Використання схмотехнічних негatronів розширює набір сучасних схемних компонентів електротехніки: окрім елементів з негативним диференціальним опором (R-негатронів), з'явилась можливість створення елементів, які за певних умов мають негативну ємність (C-негатрони) або негативну індуктивність (L-негатрони).

Проведені автором дослідження ставили за мету проаналізувати вплив значень вхідних сигналів на коректність роботи схемних негatronів різних типів, побудованих на базі операційного підсилювача (ОП), охопленого водночас колами додатного і від'ємного зворотного зв'язку [9–10], і надати рекомендації щодо діапазону значень сигналів збудження.

До класу схмотехнічних негatronів відносять активні двополосники, які здатні змінювати напрям струму або напруги між затискачами приладу і мають імпеданс, значення якого є пропорційним імпедансу одного із елементів у складі самого негatronа. Ефект зміни напрямку струму (напруги) можна урахувати у математичному виразі компонентного рівняння негatronа знаком «мінус». З математичної точки зору функціонування схмотехнічних негatronів описується компонентними рівняннями, подібними до тих, що характеризують

базові пасивні елементи електричних схем заміщення, але з єдиною відмінністю – знаком мінус перед струмом (або напругою). Знак мінус можна інтерпретувати як зміну параметра елемента на негативне значення. Цей факт пояснює поширені назви: негативний резистор, негативний конденсатор, негативна індуктивність.

Компонентні рівняння негatronів у часовій області мають вигляд:

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

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

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

В комплексній формі при аналізі процесів у колах синусоїдного струму символічним методом компонентні рівняння негatronів (1) – (3) набувають вигляду (4) – (6):

$$\text{для R- негatrona} \quad \dot{U}_{R-} = \underline{Z}_{R-} \cdot \dot{I}_{R-} = -R \cdot \dot{I}_{R-}, \quad (4)$$

$$\text{для C- негatrona} \quad \dot{U}_{C-} = \underline{Z}_{C-} \cdot \dot{I}_{C-} = (-1/j\omega C) \cdot \dot{I}_{C-} = -\underline{Z}_C \cdot \dot{I}_{C-}, \quad (5)$$

$$\text{для L-негatrona} \quad \dot{U}_{L-} = \underline{Z}_{L-} \cdot \dot{I}_{L-} = -j\omega L \cdot \dot{I}_{L-} = -\underline{Z}_L \cdot \dot{I}_{L-}, \quad (6)$$

де $\underline{Z}_{C-} = j1/\omega C = -\underline{Z}_C$ – комплексний опір (імпеданс) C-негatrona, $\underline{Z}_C$ – імпеданс звичайного конденсатора без втрат, який характеризується ємністю C , $\underline{Z}_{L-} = -\underline{Z}_L$ – імпеданс L-негatrona.

Негативний імпеданс виникає у двох випадках:

- якщо на виводах елемента з'являється протифазна напруга. Такий схемотехнічний негatron керується струмом і має назву *U*-негatron (VNIC – NIC with voltage inversion);
- або струм через схемотехнічний негatron змінює свій напрям на протифазний. Такий схемотехнічний негatron має назву *I*-негatron (INIC – NIC with current inversion).

З огляду на вищесказане, 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.

Компонентні рівняння негatronів є справедливими лише за певних умов на обмежених робочих діапазонах. Кожен схемотехнічний негatron має всередині джерело енергії. Енергія джерела обмежена, тому схема працює в негatronному режимі у обмеженій області.

Найпростішою базовою схемою, на думку автора, можна вважати схему перетворювача на операційному підсилювачі, який охоплено водночас ланками послідовного та паралельного зворотного зв'язку за напругою на обидва входи (рис. 1). На рисунку не позначені прямий та інвертуючий входи ОП тому, що перетворювач реалізує свої функції незалежно від вибору входів для позитивного і негативного зворотних зв'язків, хоча властивості схеми при цьому різняться.

За умови роботи схеми при синусоїдних сигналах збудження кількісна оцінка вхідного імпеданса у лінійному режимі роботи операційного підсилювача, коли нульові значення приймають напруга між входами ОП та вхідні струми на обох його входах [4, 9], приводить до співвідношення (7):

$$\underline{Z}_{BX} = \frac{\dot{U}_{BX}}{\dot{I}_{BX}} = -\frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2}. \quad (7)$$

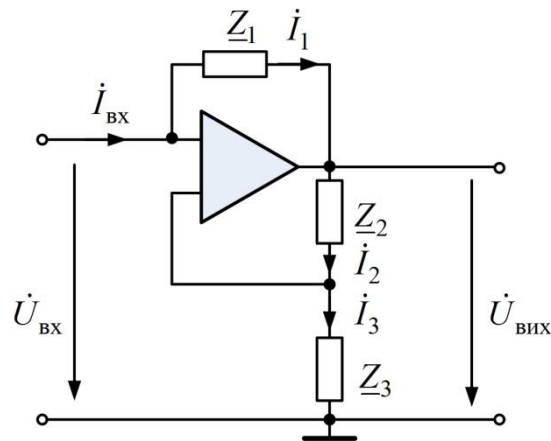


Рис. 1. Базова схема схемотехнічного негатрона на операційному підсилювачі

Комбінації різнохарактерних елементів у колах зворотного зв'язку ОП обумовлюють різний характер вхідного опору схеми. На основі базової схеми можна побудувати 38 схемних реалізацій негатронів: 14 для R -негатронів, і по 12 для C -негатронів і L -негатронів. При надходженні вхідного сигналу на прямий вхід операційного підсилювача реалізується I -тип негатрона, а при подаванні вхідного сигналу на інвертуючий вхід – негатрон U -типу.

Схема негатрона має практичне значення тільки у випадку гарантованої стабільної роботи, яка забезпечується роботою операційного підсилювача у лінійному режимі. Проаналізуємо вплив значень вхідних сигналів на роботу негатрона на прикладі R -негатрона U -типу, схема якого зображена на рис. 2, а.

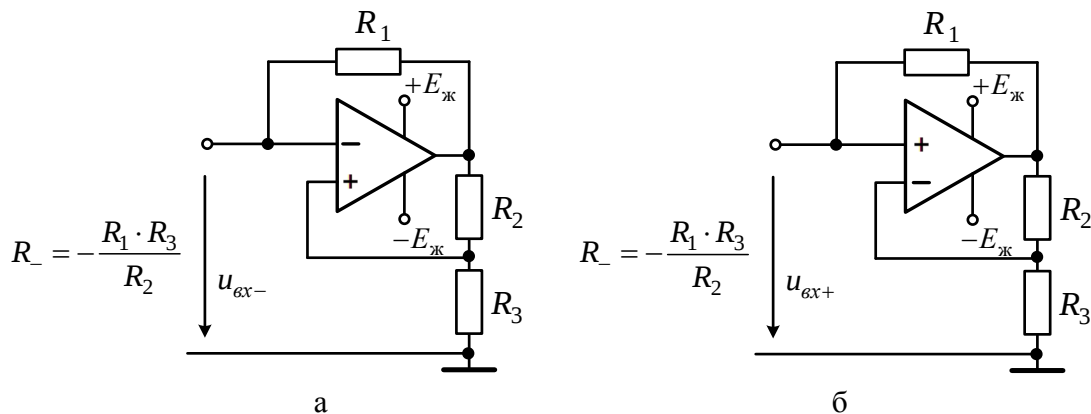


Рис. 2. Схема R -негатронів: а – U -типу; б – I -типу

У режимі додатного насичення напруга на виході операційного підсилювача приймає додатне незмінне значення $u_{вих} = +E_{ж}$. На прямий вхід ОП з виходу через дільник напруги R_2, R_3 подається сигнал $u_{вх+} = E_{ж} \cdot R_3 / (R_2 + R_3)$, а на інвертуючий вхід для забезпечення насичення має надходити сигнал менший за значенням. Вхідний струм негатрона у такому режимі приймає від'ємні значення. Дійсно, навіть для найбільшого за значенням вхідного сигналу $u_{max\ вх-}$ виконується співвідношення (8):

$$i_{вх} = \frac{u_{max\ вх-} - u_{вих}}{R_1} = \frac{(E_{ж} \cdot R_3 / (R_2 + R_3)) - E_{ж}}{R_1} < 0 \quad (8)$$

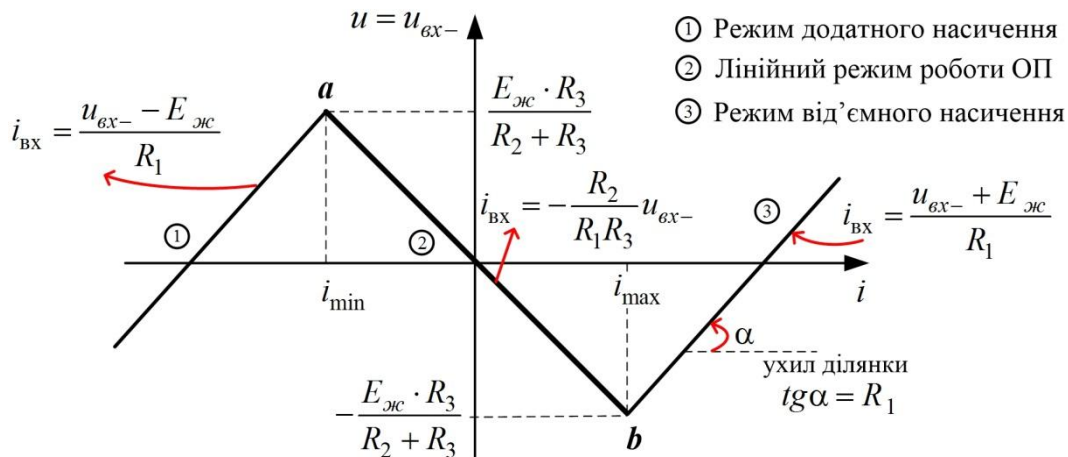


Рис. 3. Вольт-амперна характеристика R-негатрона U-типу

На рис. 3 зображена ВАХ R-негатрона U-типу, яка складається з трьох лінійних ділянок. Ділянка ② є робочою: при значеннях вхідного струму із діапазону $i_{\min} < i_{\text{вх}} < i_{\max}$ негатрон має від'ємний опір $R_{\text{вх}} = -R_2/R_1R_3$. Точка **a** на рис. 3 – це точка перемикання ОП із лінійного режиму у додатне насичення з координатами $[i_{\text{вх}} = i_{\min} < 0, u_{\text{ex-}} = E_{\text{жс}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3)]$. Негатрон U-типу керується струмом, тому при значеннях струму $i_{\text{вх}} < i_{\min}$ ОП буде залишатися у режимі насичення, а напруга на вході двополюсника $u_{\text{ex-}}$ буде поступово зменшуватися зі зменшенням струму (ділянка ① на рис. 3).

У режимі від'ємного насичення операційного підсилювача $u_{\text{вих}} = -E_{\text{жс}}$ на прямий вхід операційного підсилювача з виходу через дільник напруги R_2, R_3 подається сигнал $u_{\text{ex+}} = -E_{\text{жс}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3)$, а на інвертуючий вхід має надходити сигнал більший за це значення. Вхідний струм схеми у такому режимі приймає додатні значення, тобто протікає від входу до виходу ОП через ланки зворотного зв'язку. Навіть для найменшого за значенням вхідного сигналу виконується співвідношення (9):

$$i_{\text{вх}} = \frac{u_{\text{mix ex-}} - u_{\text{вих}}}{R_1} = \frac{-[E_{\text{жс}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3)] + E_{\text{жс}}}{R_1} > 0. \quad (9)$$

Отже, точка перемикання операційного підсилювача із лінійного режиму у негативне насичення на ВАХ негатрона U-типу (точка **b** на рис. 3) має координати $[i_{\text{вх}} = i_{\max} > 0, u_{\text{ex-}} = -E_{\text{жс}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3)]$. При збільшенні значення струму керування $i_{\text{вх}} > i_{\max}$ напруга на вході схеми негатрона також буде невпинно збільшуватися (ділянка ③ на рис. 3).

З вищесказаного виходить, що робочий діапазон вхідної напруги для R-негатрона U-типу визначається згідно співвідношення (10):

$$-E_{\text{жс}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3) = -U_{\text{sat}} < u_{\text{ex-}} < +U_{\text{sat}} = E_{\text{жс}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3). \quad (10)$$

Якщо миттєві значення вхідного сигналу напруги більші за $u_{\text{ex}} > +U_{\text{sat}}$ або менші від $u_{\text{ex}} < -U_{\text{sat}}$, то настають спотворення функціонування як наслідок роботи операційного

підсилювача в режимі насичення. В робочому діапазоні значення вхідного струму R -негатрона U -типу з урахуванням вхідного опору негатрона $\underline{Z}_{\text{BX}} = R_1 \cdot R_3 / R_2$ належать інтервалу:

$$-E_{\text{жс}} \cdot R_2 / R_1(R_2 + R_3) < i_{\text{вх}} < E_{\text{жс}} \cdot R_2 / R_1(R_2 + R_3). \quad (11)$$

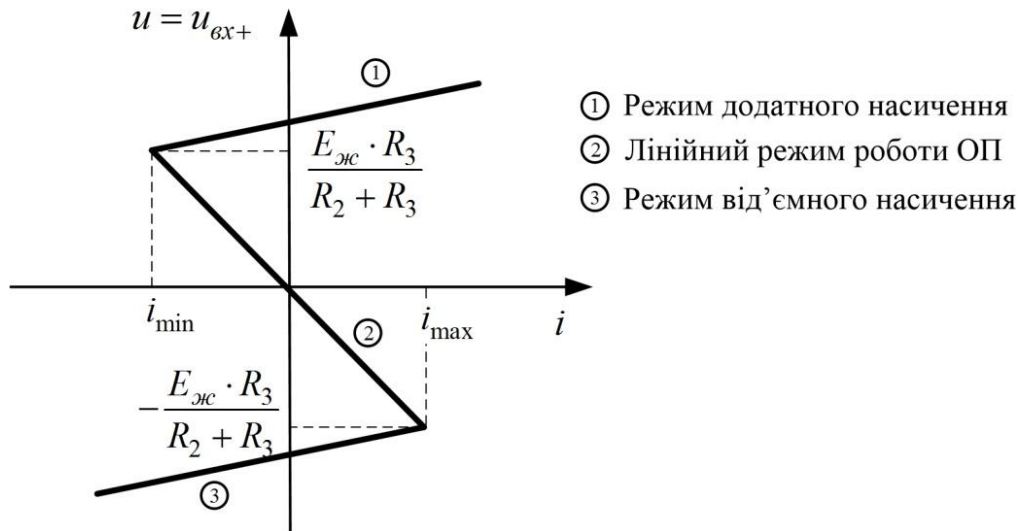


Рис. 4. Вольт-амперна характеристика R -негатрона I -типу

Подібний аналіз впливу значень вхідних сигналів на роботу R -негатрона I -типу, схема якого зображена на рис. 2, б, веде до висновку, що координати точок перемикання ОП із лінійного режиму у насичення не змінюються, не зважаючи на зміну форми самої вольт-амперної характеристики (рис. 4).

За наявності реактивних елементів у ланках зворотного зв'язку операційного підсилювача границі діапазону дозволених миттєвих значень вхідних сигналів можна розрахувати, скориставшись символічним методом. Для цього у вираз (10) потрібно підставити комплексні опори компонентів у ланках зворотного зв'язку, а потім кількісно оцінити модуль комплексної амплітуди напруги за виразом (12):

$$U_{\text{sat}} = \left| \pm E_{\text{жс}} \cdot \underline{Z}_3 / (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3) \right|. \quad (12)$$

Значення струму насичення можна розрахувати для точок перемикання операційного підсилювача у режими насичення:

$$I_{\text{sat}} = \frac{U_{\text{sat}}}{|\underline{Z}_{\text{BX}}|} = \left| \frac{E_{\text{жс}} \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)} \right|, \quad (13)$$

де $\underline{Z}_{\text{BX}} = -\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3 / \underline{Z}_2$ – комплексний вхідний опір негатрона згідно (7).

Миттєві значення сигналів збудження мають належати діапазонам:

$$-I_{\text{sat}} < i_{\text{вх}} < I_{\text{sat}}, \quad (14)$$

$$-U_{\text{sat}} < u_{\text{вх}} < U_{\text{sat}}. \quad (15)$$

Для прикладу обчислимо робочі діапазони вхідних сигналів для схеми R -негатрона U -типу, схема якого зображена на рис. 5.

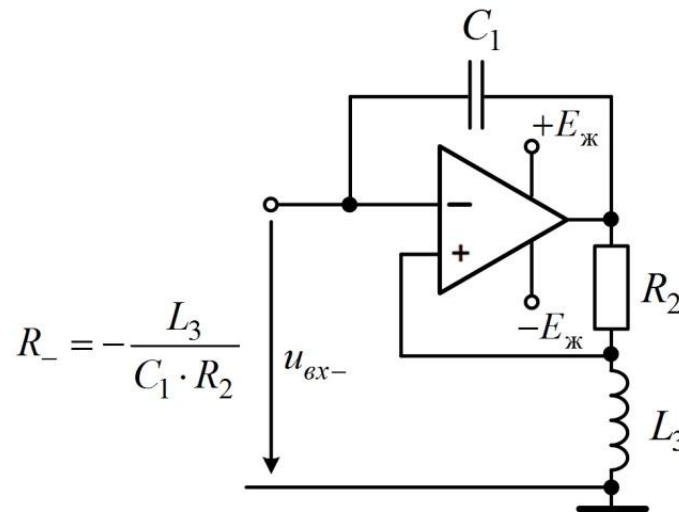


Рис. 5. Схема R -негатрона U -типу

$$U_{sat} = \left| \pm \frac{E_{жс} \cdot j\omega L_3}{R_2 + j\omega L_3} \right| = \left| \pm \frac{E_{жс} \omega L_3}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_3^2}} e^{j(90^\circ - \arctg(\omega L_3 / R_2))} \right| = \frac{E_{жс} \omega L_3}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_3^2}} \quad (16)$$

$$I_{sat} = \frac{U_{sat}}{|Z_{BX}|} = \frac{E_{жс} \omega C_1 R_2}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_3^2}}. \quad (17)$$

Отже, для коректної роботи R -негатрона вхідні сигнали напруги та струму на інвертуючому вході мають приймати миттєві значення із діапазонів, зазначених виразами (18) і (19):

$$-E_{жс} \omega L_3 / \sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_3^2} < u_{BX} < E_{жс} \omega L_3 / \sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_3^2}, \quad (18)$$

$$-E_{жс} \omega C_1 R_2 / \sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_3^2} < i_{BX} < E_{жс} \omega C_1 R_2 / \sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_3^2}. \quad (19)$$

Скориставшись виразами (12–15) можна оцінити діапазон допустимих значень вхідних сигналів заданої частоти для кожної із 38 схемних реалізацій R -, C -, L -негатронів, реалізованих на операційному підсилювачі. Кількісна оцінка границь робочих діапазонів напруг та струмів ураховує значення електрорушійної сили джерела розщепленого живлення операційного підсилювача, параметри елементів ланок зворотного зв'язку та частоту сигналів збудження.

Для перевірки отриманих результатів було виконано моделювання роботи схемних реалізацій R -негатронів, C -негатронів та L -негатронів з залученням програмного продукту MultiSim (рис. 6).

Результати параметричного моделювання продемонстрували базові властивості додаткових схемних компонентів електротехніки та довели обґрунтованість вищезазначених обмежень на області функціонування. Слід зазначити, що отримані дослідним шляхом робочі діапазони R -, C -, L -негатронів виявлялись дещо вужчими за розрахункові. Це зрозуміло і очікувано, тому що на гоаниці діапазонів бажаного функціонування R -, C -, L -негатронів впливають окрім миттєвих значень і частотного діапазону сигналів збудження ще інші численні фактори. В той же час, отримані кількісні співвідношення можуть вважатися за обов'язкові первісні для аналізу областей працездатності конкретних різновидів негатронів на ОП і формулювання рекомендацій щодо діапазону значень сигналів збудження.

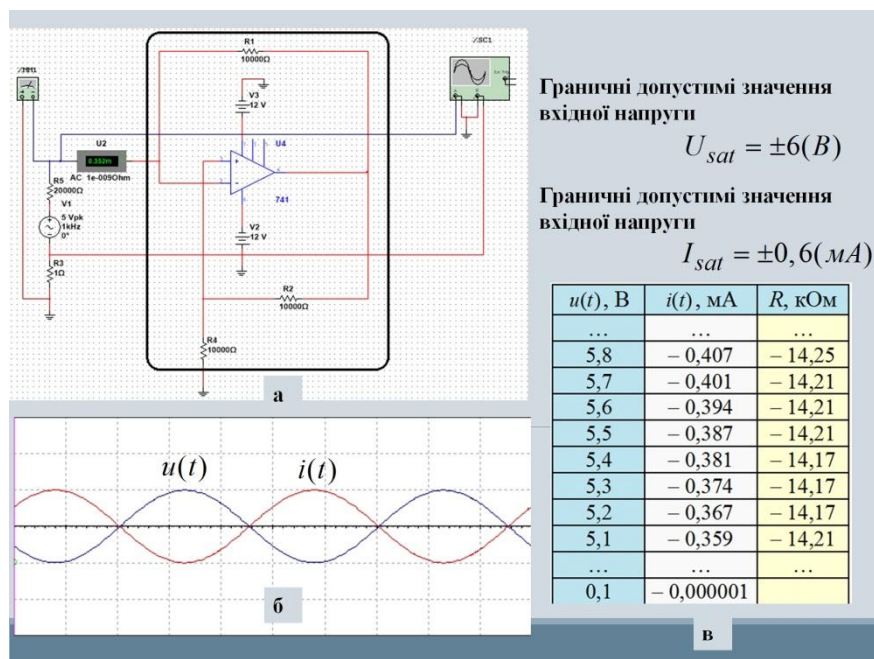


Рис. 6. Моделювання R-негатрона U-типу : а – експериментальна схема;
б – MultiSim осцилограма з протифазними вхідними напругою і струмом;
в – результати дослідження функціонування у робочому діапазоні

ЛІТЕРАТУРА

1. Филинюк, Н. А. Негатроника. Исторический обзор / Н. Ф. Филинюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – №3. – С. 38–43.
2. Марше, Ж. Операционные усилители и их применение: пер. с франц. – Л.: Энергия, 1974. – 216 с.
3. Бенинг, Ф. Отрицательные сопротивления в электронных схемах: пер. с нем. – под ред. Д. П. Линде; – М.: Советское Радио, 1975. – 288 с.
4. Sheingold, D. H. Impedance and admittance transformations using operational amplifiers / D. H. Sheingold // The lightning empiricist. – 1964. – Vol. 12, № 1. – pp. 1 – 2, 7 – 8.
5. Linvill, J. G. Transistor Negative-Impedance Converters / J. G. Linvill // Proceedings of the IRE. – Jun 1953. – pp. 725–729.
6. Rajavardhan Reddy, K. Design of Low-Power CMOS Limiting Amplifier Using Negative Impedance / K. Rajavardhan Reddy, P. Ramakrishna // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Website. – 2013. – Vol. 3, № 12. – pp. 634 – 638.
7. Mechkov, C. S. A heuristic approach to teaching negative resistance phenomenon [Електронний ресурс] / C. S. Mechkov // Presented at Third International Conference «Computer Science'06», Istanbul, Turkey, 12 - 15 October, 2006. Режим доступа: URL: http://www.circuit-fantasia.com/my_work/conferences/cs_2006/paper.htm.
8. Лазарев, А. А. Исследование схемотехнических реализаций С-негатронов на конверторах с отрицательным сопротивлением / А. А. Лазарев, К. В. Огородник, Р. Ю. Чехмиструк, Н. А. Филинюк. // Наукові праці ВНТУ. – 2011. – №4. – С. 1–10.
9. Петренко, І. А. Моделювання конверторів з негативними імпедансами, реалізованих на операційних підсилювачах / І. А. Петренко, Д. К. Марков. // Збірник матеріалів V Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми електроенергетики та автоматики». – К.: Політехніка, 2013. – С. 568–571.
10. Петренко, І. А. Схемотехнічні реалізації С-негатронів на операційних підсилювачах / І. А. Петренко, В. С. Приходько // Збірник матеріалів VI Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми електроенергетики та автоматики». – К.: Політехніка, 2014. – С. 384–386.