

Петренко І. А.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СХЕМНИХ НЕГАТРОНІВ, РЕАЛІЗОВАНИХ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ

Наведено аналіз властивостей і параметрів схемних негатронів з позицій класичної електро-техніки. Описані реалізації R-, C-, L-негатронів на базі операційного підсилювача, охопленого ланками додатного і від'ємного зворотного зв'язку. Обґрунтовано вибір границь робочих діапазонів надійного функціонування схемотехнічних негатронів на операційних підсилювачах. Здійснена перевірка працездатності схемних негатронів з залученням програмного продукту MultiSim.

Ключові слова: негатроніка, схемний негатрон, перетворювач з негативним імпедансом.

1. Вступ

Синтез електричних систем з наперед заданими властивостями становить одну із найважливіших задач електротехніки. У теорії електричних кіл, яка забезпечує основу практичних методик проектування електронної апаратури різного призначення, використовується сьогодні порівняно невеликий набір базових схемних компонентів (лінійних або нелінійних), а саме: незалежні джерела напруги і струму, ідеальний резистор, ідеальний конденсатор, ідеальна котушка індуктивності та залежні джерела напруги і струму, керовані напругою або струмом. Виявилось, що цього набору компонентів достатньо для комп'ютерного моделювання електронних пристроїв (і не тільки електронних!) практично будь-якої складності [1]. Нещодавно до них приєднався мемристор, пасивний елемент, який відображає безпосередній зв'язок між зарядом і магнітним потоком [2]. До нових базових елементів схемотехніки можна також віднести негатрони — елементи з негативними параметрами, використання яких є особливо важливим під час побудови генераторів, підсилювачів, систем передавання з заданими характеристиками та інших електронних пристроїв.

В даній роботі пропонується узагальнене визначення поняття схемотехнічного негатрона, яке легко поширюється на кола різних типів функціонування, і описуються властивості трьох основних типів схемотехнічних негатронів: негативного резистора, негативного конденсатора і негативної котушки індуктивності. Проаналізовані усі можливі реалізації негатронів на основі відомої схеми перетворювача на операційному підсилювачі (ОП) та отримані кількісні співвідношення для оцінки діапазонів вхідних сигналів, які забезпечують нормальне функціонування таких негатронів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Науковий напрям під назвою «негатроніка» сформувався протягом останнього десятиріччя [3], хоча численні публікації за відповідною тематикою стали фундаментальними роботами набагато раніше. Річ у тому, що негатроніка, як наука, об'єднала теоретичні та практич-

ні дослідження приладів та окремих електричних кіл з від'ємними значеннями основних параметрів. Відповідно, об'єкти дослідження класифікують як фізичні негатрони та схемотехнічні аналоги негатронів.

Детальному дослідженню властивостей різних фізичних негатронів, основну частину яких складають напівпровідникові прилади, присвячена велика кількість наукових робіт [4–10]. У ранніх дослідженнях було відмічено, що пристрої з дуговим розрядом і деякі електровакуумні пристрої, такі як динатрон, виявляють ефекти негативного диференціального опору. Практично негатрони стали доступними тільки з появою твердотільних технологій. Першим масовим і найвідомішим типом напівпровідникових негатронів вважаються низьковольтні тунельні діоди [7]. Через дуже низькі робочі напруги і відсутність керованості нині ці прилади використовуються лише в деяких унікальних високочастотних розробках. Усього напівпровідникових негатронів створено більше двох десятків різновидів, серед яких слід зазначити лавинні транзистори, лавинно-пролітні діоди, діоди Ганна, інжекційно-пролітні діоди, диністори і тиристори. Фізичні негатрони відносяться до R-негатронів, тобто тих, які мають робочі ділянки з негативним диференціальним опором, і знаходять широке практичне застосування, особливо в техніці НВЧ і силовій електроніці.

Перші спроби створити схемотехнічні негатрони відносяться до 60-х років ХХ століття [11–14]. В іноземній літературі схемотехнічні негатрони об'єднують аббревіатурою NIC (Negative Impedance Converter — перетворювачі з негативним імпедансом). З розвитком напівпровідникової техніки з'явилися все нові схемотехнічні реалізації на польових транзисторах з керуючим p-n-переходом, польових транзисторах з ізольованим затвором з індуктованими і вбудованими каналами, а також на біполярних транзисторах різних типів провідності [15, 16]. Випробування часом пройшли, так звані, перетворювачі імпедансу на операційних підсилювачах. Відповідні публікації розділені у часі на два періоди: 60-ті роки минулого століття [17, 18] і перша декада ХХІ століття [19–22]. Відродження інтересу до схемотехнічних аналогів негатронів в останні роки пов'язане з появою у розпорядженні розробників електронної апаратури недорогих та надійних мікроелектронних опе-

раційних підсилювачів (ОП) і вдалими реалізаціями перетворювачів на операційних підсилювачах, які значно розширюють властивості однокристальних структур. Використання схемотехнічних негatronів розширює набір сучасних схемних компонентів електротехніки на три додаткові компоненти: негативний резистор, негативний конденсатор та негативну котушку індуктивності, відповідно, R -, C -, L -негатрони. Це означає, що окрім R -негатронів з'явилась можливість створення елементів, які за певних умов мають негативну ємність або індуктивність. Практичне застосування C - і L -негатронів на даний час не отримало широкого розповсюдження і обумовлює необхідність подальших досліджень і пошуку напрямків їхнього ефективного використання. Доцільним, на думку автора, вбачається застосування схемотехнічних негatronів для відновлення запроектованих параметрів та компенсації паразитних втрат у пасивних елементах, джерелах енергії, лініях передавання та інших з огляду на те, що функціонування в робочих режимах більшості електротехнічних та електронних пристроїв супроводжується різного роду небажаними витоками енергії, які погіршують параметри пристроїв та звужують робочі діапазони.

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єкт дослідження — схемотехнічні негatronи. Проведені дослідження ставили за мету охарактеризувати основні типи схемних негatronів як елементів схем заміщення електричних схем та з'ясувати умови технічного застосування схемних реалізацій негatronів на операційних підсилювачах із зворотними зв'язками.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- узагальнити поняття схемотехнічних R -, C -, L -негатронів і описати властивості різних типів негatronів з позицій класичної електротехніки як базових схемних компонентів;
- обґрунтувати можливість побудови негatronів на базі операційного підсилювача, охопленого водночас колами додатного і від'ємного зворотного зв'язку, та надати повний перелік таких схемних реалізацій для негatronів різних типів з зазначенням кількісної оцінки параметрів;
- проаналізувати вплив значень вхідних сигналів на коректність роботи схемних негatronів і надати рекомендації щодо діапазону значень сигналів збудження;
- перевірити працездатність схемних негatronів шляхом моделювання з урахуванням робочих діапазонів значень вхідних сигналів та їхньої частоти з залученням програмного продукту MultiSim.

4. Матеріали та методи дослідження схемотехнічних R -, C -, L -негатронів

4.1. Характеристики схемотехнічних R -, C -, L -негатронів як елементів схем заміщення електричних кіл. До класу схемотехнічних негatronів відносять активні двополюсники, 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». Отже, з математичної точки зору функціонування схемотехнічних негatronів 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 походять назви: негативний резистор, негативний конденсатор, негативна котушка індуктивності.

Негативний резистор (R -негатрон):

$$u_R(t) = (-R) \cdot i(t). \quad (1)$$

Негативний конденсатор (C -негатрон):

$$u_C(t) = \frac{1}{(-C)} \int i(t) dt. \quad (2)$$

Негативна котушка індуктивності (L -негатрон):

$$u_L(t) = (-L) \frac{di(t)}{dt}. \quad (3)$$

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

Конкретизуємо загальне визначення схемотехнічного негatronа для трьох можливих застосувань, зважаючи що зміна напрямку струму (напруги) означає зміну зсуву фаз між напругою та струмом на 180° .

R -негатрон — це активний двополюсник зі спадаючою вольт-амперною характеристикою (ВАХ), який характеризується одним параметром — негативним опором ($R_- = -R$).

Негативний опір виникає у двох випадках:

1) якщо на виводах елемента з'являється протифазна напруга. Такий схемотехнічний негатрон керується струмом і має назву U -негатрон (в іноземній літературі VNIC — negative impedance component with voltage inversion);

2) якщо струм через схемотехнічний негатрон змінює свій напрям на протифазний. Такий схемотехнічний негатрон має назву I -негатрон (в іноземній літературі INIC — negative impedance component with current inversion).

Умовне зображення R -негатрона на схемах заміщення подібне до зображення звичайного резистора, але параметр елемента має від'ємне значення (рис. 1, а). За умови роботи R -негатрона у колі синусоїдного струму протифазність напруги і струму наочна на векторній діаграмі елемента (рис. 1, б).

Ділянка вольт-амперної характеристики з негативним диференціальним опором $R_- = du/di < 0$ завжди обмежена ділянками з додатними значеннями диференціального опору. Негatronи U -типу, які керуються струмом, мають

ВАХ *S*-типу (рис. 2, *a*) при виборі осі ординат за вісь струмів. Відповідно, негatronи *I*-типу, які керуються напругою, характеризуються ВАХ *N*-типу (рис. 2, *б*). Інший вибір позначення осей призведе до зміни назви типу ВАХ.

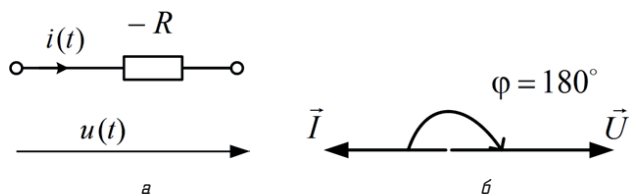


Рис. 1. *R*-негатрон: *a* — умовне зображення негatronа; *б* — векторна діаграма

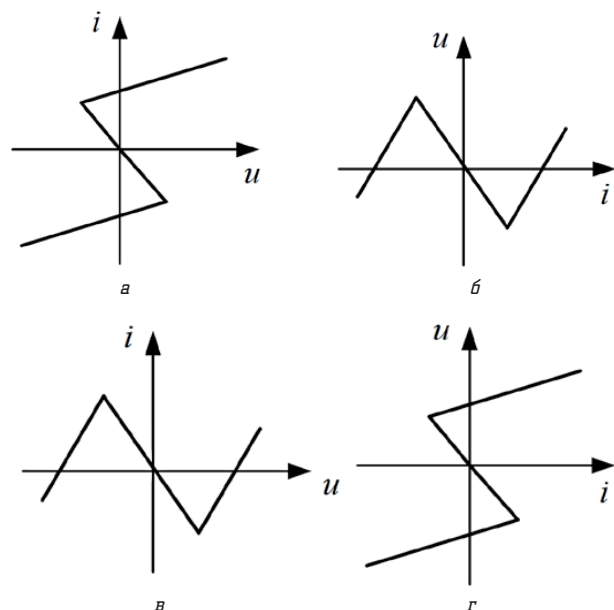


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики *R*-негатронів: *a, б* — *U*-типу; *в, г* — *I*-типу

Якщо звичайний резистор в схемі заміщення кола характеризує необоротне перетворення електромагнітної енергії на інші види, то *R*-негатрон, навпаки, постачає енергію в електричне коло.

C-негатрон — це активний двополюсник, який характеризується одним параметром — негативною ємністю ($C_- = -C$) і має додатний реактивний опір, тобто проявляє себе як котушка індуктивності, але при цьому частотна залежність реактивного опору зберігає свій характер — значення опору змінюється обернено пропорційно щодо змін частоти.

Умовне зображення *C*-негатрона на схемах заміщення подібне до зображення ідеального конденсатора, але параметр елемента має від'ємне значення (рис. 3, *a*).

За умови роботи звичайного конденсатора у колах синусоїдного струму такий елемент періодично накопичує енергію в електричному полі та повертає її в електричне коло. Ідеальний конденсатор, який є ідеалізацією реального як елемента без втрат, характеризується тільки одним параметром — ємністю і при синусоїдному збудженні струм через елемент випереджає напругу на чверть періоду, тобто зсув фаз між синусоїдними напругою та струмом складає -90° . Умова

виникнення негatronного ефекту передбачає зміну напрямку напруги або струму, тому на векторній діаграмі *C*-негатрона вектор напруги випереджає вектор струму на 90° (рис. 3, *б*).

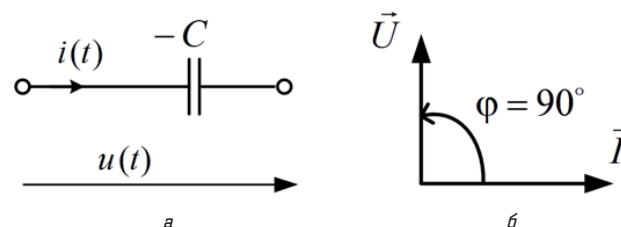


Рис. 3. *C*-негатрон: *a* — умовне зображення негatronа; *б* — векторна діаграма

В комплексній формі при аналізі процесів у колах синусоїдного струму символічним методом компонентне рівняння *C*-негатрона (2) набуває вигляду:

$$\dot{U}_{C-} = Z_{C-} \cdot \dot{I}_{C-} = (-1/j\omega C) \cdot \dot{I}_{C-} = -Z_C \cdot \dot{I}_{C-}, \quad (4)$$

де $Z_{C-} = j \frac{1}{\omega C} = -Z_C$ — комплексний опір (імпеданс) *C*-негатрона; Z_C — комплексний опір звичайного конденсатора без втрат, який характеризується ємністю *C* (табл. 1).

Зауважимо, що у вітчизняній літературі імпедансом часто називають відношення амплітуд діючих значень) напруги на ділянці кола і струму через цю ділянку, тому назва НІС видається не зовсім коректною. Але поняття імпедансу, яке було запроваджене Олівером Хевісайдом у 1886 році і яке якнайширше використовується сьогодні в іноземній літературі, стосується саме комплексного опору двополюсника для гармонічного сигналу, який дає змогу визначати водночас відношення амплітуд синусоїдних напруги і струму та зсув фаз між ними.

Таблиця 1

Порівняння комплексних опорів *C*-негатрона та звичайного конденсатора

Параметр	Звичайний конденсатор без втрат	<i>C</i> -негатрон
Зсув фаз між напругою та струмом	$\varphi_C = -90^\circ$	$\varphi_{C-} = 90^\circ$
Комплексний ємнісний опір	$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C} = Z_C e^{j\varphi_C} = \frac{1}{\omega C} e^{-j90^\circ}$	$Z_{C-} = \frac{1}{j\omega(-C)} = -\frac{1}{j\omega C} = j \frac{1}{\omega C} = Z_C e^{j\varphi_{C-}} = \frac{1}{\omega C} e^{j90^\circ}$

З фізичної точки зору, як виходить із рівняння (4), *C*-негатрон є приладом, повний опір якого $Z_C = 1/\omega C$ зменшується зі збільшенням частоти сигналу збудження за законом гіперболи як у звичайного конденсатора, але напруга випереджає за фазою струм. Зсув фаз між напругою і струмом у ідеального *C*-негатрона становить $\varphi_{C-} = 90^\circ$.

Можна стверджувати, що *C*-негатрон виконує функції параметричної індуктивності з параметром $L_- = 1/\omega^2 C$,

імпеданс якої $\omega L = 1/\omega C$ зменшується з підвищенням частоти на відміну від звичайної індуктивності.

L-негатрон — це активний двополюсник, який характеризується одним параметром — негативною індуктивністю ($L_- = -L$) і має від'ємний реактивний опір, тобто проявляє себе як конденсатор, але при цьому частотна залежність реактивного опору зберігає свій лінійний характер.

L-негатрон за своїми властивостями є елементом дуальним до C-негатрона. Умовне зображення L-негатрона на схемах заміщення подібне до зображення ідеальної котушки індуктивності, але з від'ємним значенням основного параметра (рис. 4, а).

Звичайна котушка індуктивності характеризує накопичення енергії у магнітному полі елемента. Ідеальна котушка індуктивності є елементом схем заміщення електричних кіл, який описується всього одним параметром — індуктивністю L . У колах синусоїдного струму, який протікає через елемент, відстає від напруги між затискачами на чверть періоду, тобто зсув фаз між синусоїдними напругою та струмом складає 90° . При зміні напрямку напруги або струму зсув фаз змінюється на 180° . Отже, на векторній діаграмі L-негатрона вектор напруги відстає від вектора струму на 90° (рис. 4, б).

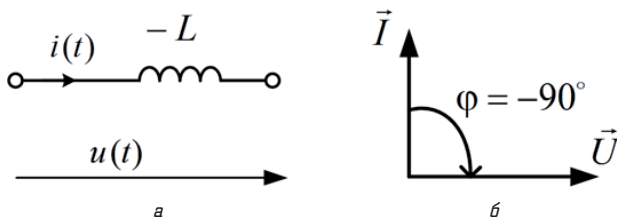


Рис. 4. L-негатрон: а — умовне зображення негатрона; б — векторна діаграма

В комплексній формі при аналізі символічним методом компонентне рівняння L-негатрона (3) набуває вигляду:

$$\dot{U}_L = \underline{Z}_L \cdot \dot{I}_L = -j\omega L \cdot \dot{I}_L = -\underline{Z}_L \cdot \dot{I}_L, \quad (5)$$

де $\underline{Z}_L = -Z_L$ — комплексний опір (імпеданс) L-негатрона; Z_L — комплексний опір звичайної котушки індуктивності без втрат, яка характеризується індуктивністю L (табл. 1).

Як виходить із рівняння (5), L-негатрон є приладом, опір якого збільшується прямо пропорційно частоті сигналу збудження. При цьому струм випереджає за фазою напругу на приладі і зсув фаз між напругою і струмом становить $\varphi_{L-} = -90^\circ$ (табл. 2).

Можна вважати, що L-негатрон виконує функції параметричного конденсатора з параметром $C_- = 1/\omega^2 L$, повний опір якого збільшується зі зростанням частоти на відміну від звичайного конденсатора.

L-негатрони і C-негатрони в електричних колах є додатковими джерелами енергії, яка періодично надходить у коло, а потім повертається до негатронів.

C-негатрони та L-негатрони подібно до R-негатронів поділяють на дві великі групи: U-негатрони, які змінюють фазу напруги і керуються струмом, та I-негатрони, які забезпечують протифазний струм і керуються напругою.

Таблиця 2

Порівняння комплексних опорів L-негатрона та звичайної котушки індуктивності

Параметр	Звичайна котушка індуктивності без втрат	L-негатрон
Зсув фаз між напругою та струмом	$\varphi_L = 90^\circ$	$\varphi_{L-} = -90^\circ$
Комплексний індуктивний опір	$Z_L = j\omega L = Z_L e^{j\varphi_L} = \omega L e^{j90^\circ}$	$Z_{L-} = j\omega L = Z_L e^{j\varphi_{L-}} = \omega L e^{-j90^\circ}$

4.2. Методика побудови негатронів на базі операційного підсилювача та визначення їхніх параметрів. Схемотехнічні негатрони на практиці реалізують на основі підсилювачів з пасивними і активними зворотними зв'язками. Найпростішою базовою схемою, на думку авторів, можна вважати схему перетворювача на операційному підсилювачі, який охоплено водночас ланками послідовного та паралельного зворотного зв'язку за напругою на обидва входи (рис. 5). Операційний підсилювач з високим коефіцієнтом підсилення має працювати у лінійному режимі. На рис. 5 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.

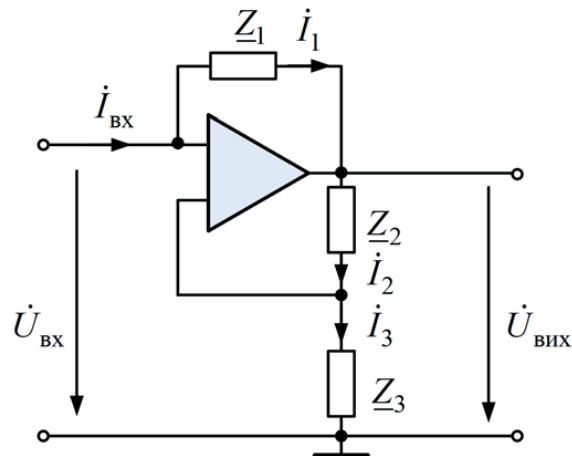


Рис. 5. Базова схема перетворювача на операційному підсилювачі

Для з'ясування кількісної оцінки вхідного імпедансу схеми на рис. 5 пригадаємо ключові властивості ідеального ОП з колами зворотного зв'язку, що працює у лінійному режимі: нульова напруга між входами і нульові вхідні струми на обох входах. За умови збудження схеми синусоїдною вхідною напругою застосуємо символічний метод розрахунку. Вхідний струм схеми дорівнює струму через ланку зворотного зв'язку з опором Z_1 :

$$\dot{I}_{\text{вх}} = \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{\text{вх}} - \dot{U}_{\text{вих}}}{Z_1}, \quad (6)$$

а через опори Z_2 і Z_3 протікає один і той самий струм:

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{\text{вих}} - \dot{U}_{\text{вх}}}{Z_2}. \quad (7)$$

Підставляючи різницю напруг із виразу (7) у рівняння (6), матимемо:

$$\dot{I}_{\text{вх}} = \dot{I}_1 = -\frac{\dot{I}_3 \cdot Z_2}{Z_1} \quad (8)$$

За законом Ома:

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{\text{вх}}}{Z_3} \quad (9)$$

Підставимо вираз (9) у рівність (8) і отримаємо співвідношення (10), яке зв'яже вхідні струм і напругу:

$$\dot{I}_{\text{вх}} = -\frac{\dot{U}_{\text{вх}} \cdot Z_2}{Z_3 \cdot Z_1} \quad (10)$$

Із співвідношення (10) виходить, що вхідний опір схеми можна обчислити за формулою:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}_{\text{вх}}}{\dot{I}_{\text{вх}}} = -\frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2} \quad (11)$$

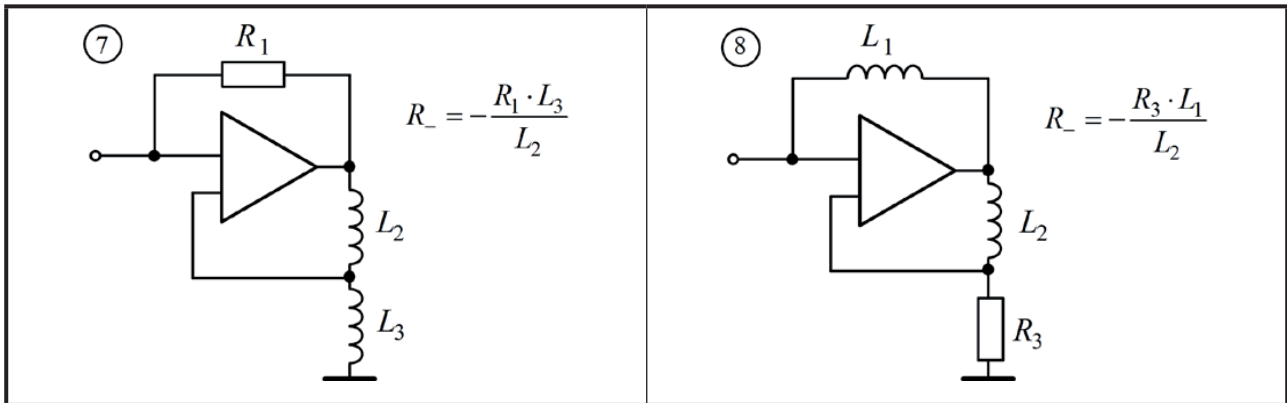
Комбінації різнохарактерних елементів у колах зворотного зв'язку ОП обумовлюють різний характер вхідного опору схеми. На основі базової схеми можна побудувати 38 негатронів. Схемотехнічні реалізації *R*-негатронів наведені у табл. 3, *C*-негатронів і *L*-негатронів, відповідно у табл. 4 і 5. Потрібно взяти до уваги, що кількість запропонованих схем подвоюється через наявність двох варіантів охоплення операційного підсилювача ланками зворотного зв'язку через елементи Z_1 та Z_2, Z_3 , відповідно на прямий та інвертуючий входи ОП. При надходженні вхідного сигналу на прямий вхід операційного підсилювача реалізується *I*-негатрон, а при подаванні вхідного сигналу на інвертуючий вхід маємо негатрон *U*-типу. Наприклад, на схемах № 1 і № 2 (табл. 3) реалізуються *R*-негатрони, але один керується напругою (*I*-тип), а інший струмом (*U*-тип).

Таблиця 3

R-негатрони

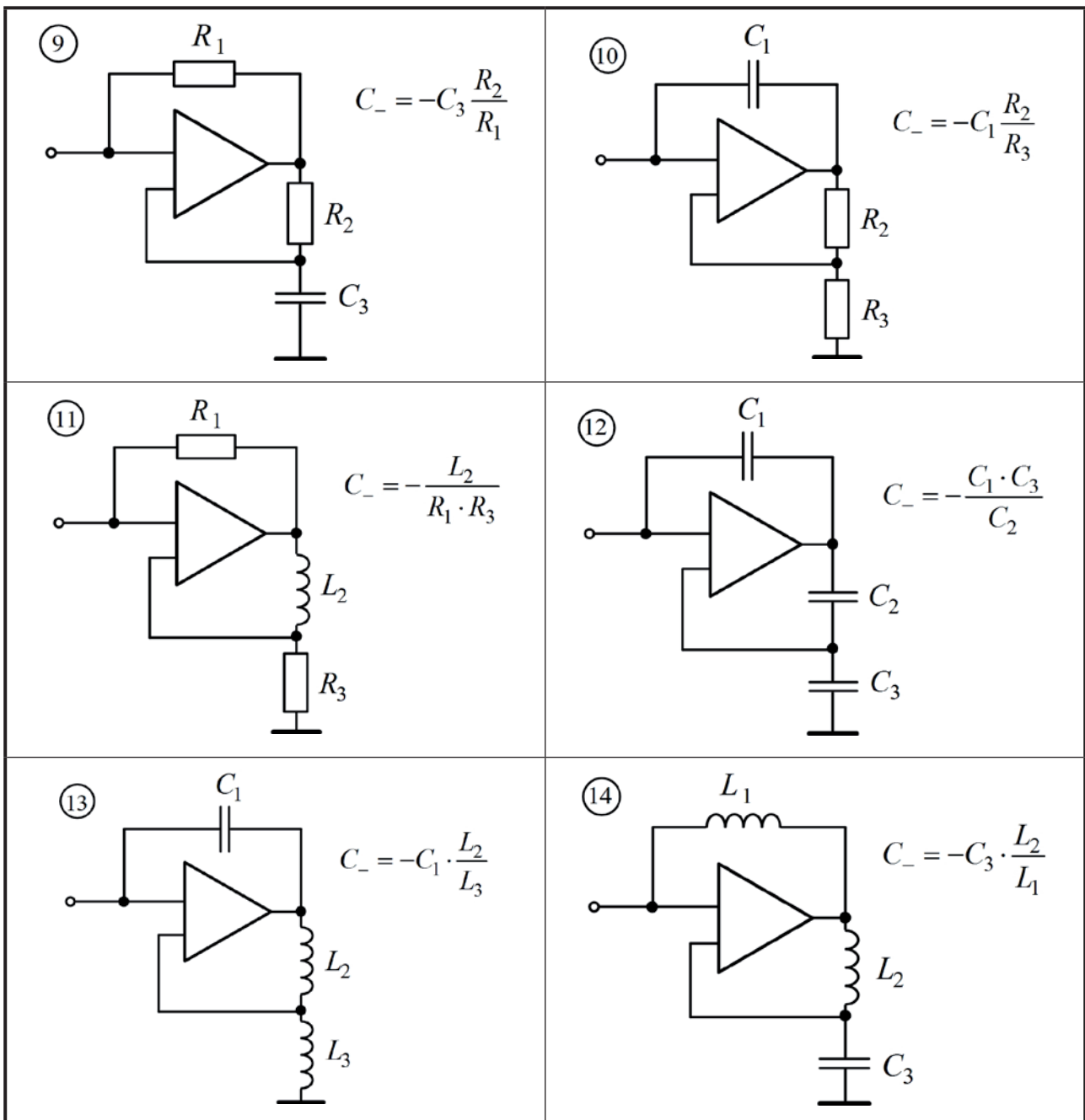
<p>① <i>I</i>-негатрон</p> <p>$R_- = -\frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}$</p>	<p>② <i>U</i>-негатрон</p> <p>$R_- = -\frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}$</p>
<p>③</p> <p>$R_- = -\frac{L_1}{R_2 \cdot C_3}$</p>	<p>④</p> <p>$R_- = -\frac{L_3}{C_1 \cdot R_2}$</p>
<p>⑤</p> <p>$R_- = -R_3 \frac{C_2}{C_1}$</p>	<p>⑥</p> <p>$R_- = -\frac{R_1 \cdot C_2}{C_3}$</p>

Закінчення табл. 3



Таблиця 4

C-негатрони



L-негатрони

Таблица 5

<p>15</p> <p>$L_- = -R_1 C_2 R_3$</p>	<p>16</p> <p>$L_- = -L_1 \frac{R_3}{R_2}$</p>
<p>17</p> <p>$L_- = -L_3 \frac{R_1}{R_2}$</p>	<p>18</p> <p>$L_- = -L_1 \frac{C_2}{C_3}$</p>
<p>19</p> <p>$L_- = -L_3 \frac{C_2}{C_1}$</p>	<p>20</p> <p>$L_- = -\frac{L_1 \cdot L_3}{L_2}$</p>

При застосуванні інших можливих комбінацій пасивних елементів у ланках додатного і від'ємного зворотних зв'язків, що охоплюють операційний підсилювач, створюються частотозалежні резистори, опір яких змінюється прямо пропорційно квадрату частоти ($R = \omega^2 L_1 C_2 R_3$, $R = \omega^2 R_1 C_2 L_3$), $R = \omega^2 L_1 L_3 / R_2$ і обернено ($R = R_1 / \omega^2 L_2 C_3$, $R = R_3 / \omega^2 L_1 C_2$, $R = 1 / \omega^2 C_1 R_2 C_3$).

5. Результати дослідження границь робочих діапазонів надійного функціонування схемотехнічних негатронів на операційних підсилювачах

Запропоновані схеми негатронів мають практичне значення тільки у випадку гарантованої стабільної ро-

боти, яка забезпечується функціонуванням операційного підсилювача у лінійному режимі, аж доки ОП не потрапляє у режим насичення і на виході не встановлюється напруга розщепленого джерела живлення $u_{\text{вих}} = \pm E_{\text{ж}}$. Проаналізуємо вплив значень вхідних сигналів на роботу негатрона на прикладі R-негатрона U-типу за схемою № 2 (табл. 3).

У режимі додатного насичення $u_{\text{вих}} = \pm E_{\text{ж}}$ на прямий вхід ОП з виходу через ділянку напруги R_2 , R_3 подається сигнал $u_{\text{вх}+} = E_{\text{ж}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3)$ (рис. 5), а на інвертуючий вхід для забезпечення насичення має надходити сигнал менший за значенням $u_{\text{вх}-} < u_{\text{вх}+} = E_{\text{ж}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3)$. Вхідний струм негатрона у такому режимі приймає від'ємні значення. Дійсно, навіть для найбільшого за значенням вхідного сигналу $u_{\text{макс вх-}}$ виконується співвідношення:

$$i_{\text{вх}} = \frac{u_{\text{максвх}} - u_{\text{вих}}}{R_1} = \frac{E_{\text{ж}} \cdot R_3}{R_2 + R_3} - \frac{E_{\text{ж}}}{R_1} < 0. \quad (12)$$

На рис. 6 зображена ВАХ R -негатрона U -типу, яка складається з трьох лінійних ділянок. Ділянка ② є робочою: при значеннях вхідного струму із діапазону $i_{\text{мін}} < i_{\text{вх}} < i_{\text{макс}}$ негатрон має від'ємний опір $R_{\text{вх}} = -R_2/R_1 R_3$. Точка перемикання операційного підсилювача із лінійного режиму у додатне насичення на ВАХ негатрона U -типу (точка a на рис. 6) має координати $[i_{\text{вх}} = i_{\text{мін}} < 0, u_{\text{вх}} = E_{\text{ж}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3)]$.

Негатрон U -типу керується струмом, тому при значеннях струму $i_{\text{вх}} < i_{\text{мін}}$ операційний підсилювач буде залишатися у режимі насичення, і зі зменшенням струму напруга на вході двополюсника $u_{\text{вх}}$ буде поступово зменшуватися (ділянка ① на рис. 6). При збільшенні струму керування $i_{\text{вх}} > i_{\text{мін}}$ схема потрапляє у лінійний режим і працює як негатрон, аж доки струм не збільшиться до значення $i_{\text{вх}} = i_{\text{макс}}$ (рис. 6).

У режимі від'ємного насичення схеми № 2 $u_{\text{вх}} = -E_{\text{ж}}$ на прямий вхід операційного підсилювача з виходу через дільник напруги R_2, R_3 подається сигнал $u_{\text{вх}+} = -E_{\text{ж}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3)$, а на інвертуючий вхід має надходити сигнал більший за це значення $u_{\text{вх}-} > u_{\text{вх}+} = -E_{\text{ж}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3)$. Вхідний струм схеми у такому режимі приймає додатні значення, тобто протікає від входу до виходу ОП через ланки зворотного зв'язку. Дійсно, навіть для найменшого за значенням вхідного сигналу виконується співвідношення:

$$i_{\text{вх}} = \frac{u_{\text{мінвх}} - u_{\text{вих}}}{R_1} = \frac{-E_{\text{ж}} \cdot R_3}{R_2 + R_3} + \frac{E_{\text{ж}}}{R_1} > 0. \quad (13)$$

Таким чином, точка перемикання операційного підсилювача із лінійного режиму у негативне насичення на ВАХ негатрона U -типу (точка b на рис. 6) має координати $(i_{\text{вх}} = i_{\text{макс}} > 0, u_{\text{вх}} = -E_{\text{ж}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3))$. При збільшенні значення струму керування $i_{\text{вх}} > i_{\text{макс}}$ напруга на вході схеми негатрона також буде невпинно збільшуватися (ділянка ③ на рис. 6).

З вищесказаного виходить, що діапазон значень вхідного струму R -негатрона U -типу обмежений значеннями струму у точках перемикання режиму роботи операційного підсилювача: $i_{\text{мін}} < i_{\text{вх}} < i_{\text{макс}}$ або з урахуванням вхідного опору негатрона:

$$-\frac{E_{\text{ж}} \cdot R_2}{R_1(R_2 + R_3)} < i_{\text{вх}} < \frac{E_{\text{ж}} \cdot R_2}{R_1(R_2 + R_3)}. \quad (14)$$

При цьому значення вхідної напруги належать діапазону:

$$-E_{\text{ж}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3) < u_{\text{вх}} < E_{\text{ж}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3). \quad (15)$$

Якщо миттєві значення вхідного сигналу напруги більші за $u_{\text{вх}} > +U_{\text{sat}} = E_{\text{ж}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3)$ або менші від $u_{\text{вх}} < -U_{\text{sat}} = -E_{\text{ж}} \cdot R_3 / (R_2 + R_3)$, то настають спотворення функціонування як наслідок роботи операційного підсилювача в режимі насичення.

Подібний аналіз впливу значень вхідних сигналів на роботу негатрона на прикладі R -негатрона I -типу за схемою № 1 (табл. 3) веде до висновку, що саме співвідношення (15) і (14) визначають граничні допустимі значення вхідної керуючої напруги на прямому вході ОП $u_{\text{вх}} = u_{\text{вх}+}$ та вхідного струму. Це означає, що координати точок перемикання ОП із лінійного режиму у насичення не змінюються, не зважаючи на зміну форми самої вольт-амперної характеристики (рис. 2).

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 виразі (15) замість значень опорів резисторів у ланках зворотного зв'язку потрібно підставити комплексні опори компонентів, а потім кількісно оцінити модуль комплексної амплітуди напруги за виразом:

$$U_{\text{sat}} = |\pm E_{\text{ж}} \cdot Z_3 / (Z_2 + Z_3)|. \quad (16)$$

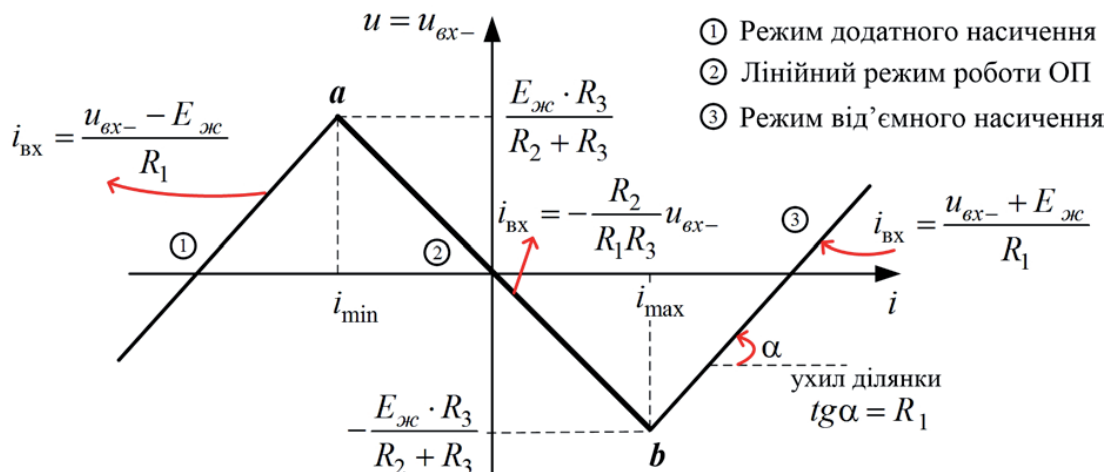


Рис. 6. Вольт-амперна характеристика R -негатрона U -типу: ab — робоча ділянка; a і b — точки перемикання ОП із лінійного режиму у додатне і від'ємне насичення

Значення струму насичення можна розрахувати за законом Ома в комплексній формі для точок перемикавання операційного підсилювача у режимі насичення:

$$I_{sat} = \frac{U_{sat}}{|Z_{вх}|} = \left| \frac{E_{ж} \cdot Z_2}{Z_1(Z_2 + Z_3)} \right|, \quad (17)$$

де $Z_{вх} = -Z_1 \cdot Z_3 / Z_2$ – комплексний вхідний опір негatrona згідно (11).

Наприкінці потрібно зробити висновок щодо миттєвих значень сигналів збудження:

$$-I_{sat} < i_{вх} < I_{sat}, \quad (18)$$

$$-U_{sat} < u_{вх} < U_{sat}. \quad (19)$$

Наприклад, обчислимо робочі діапазони вхідних сигналів для схеми R-негатрона U-типу за схемою № 3 із табл. 3 (рис. 7).

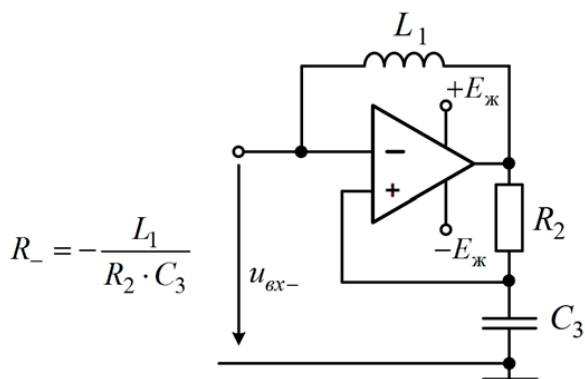


Рис. 7. Схема R-негатрона U-типу

$$U_{sat} = \left| \pm E_{ж} \cdot Z_3 / (Z_2 + Z_3) \right| = \left| \pm E_{ж} \cdot \frac{1}{j\omega C_3} / \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C_3} \right) \right| = \left| \frac{E_{ж}}{R_2 \cdot j\omega C_3 + 1} \right| = \left| \frac{E_{ж}}{\sqrt{1 + \omega^2 R_2^2 C_3^2}} e^{-j \arctg(\omega R_2 C_3)} \right|, \quad (20)$$

$$I_{sat} = \frac{U_{sat}}{|Z_{вх}|} = \frac{E_{ж}}{\sqrt{1 + \omega^2 R_2^2 C_3^2} \cdot \left| \frac{-j\omega L_1 \cdot 1}{j\omega C_3} / R_2 \right|} = \frac{E_{ж} R_2 C_3}{L_1 \sqrt{1 + \omega^2 R_2^2 C_3^2}}. \quad (21)$$

Отже, для коректної роботи R-негатрона вхідні сигнали напруги та струму на інвертую-

чому вході мають приймати миттєві значення із діапазонів, зазначених виразами:

$$-E_{ж} / \sqrt{1 + \omega^2 R_2^2 C_3^2} < u_{вх} < E_{ж} / \sqrt{1 + \omega^2 R_2^2 C_3^2}, \quad (22)$$

$$-E_{ж} R_2 C_3 / L_1 \sqrt{1 + \omega^2 R_2^2 C_3^2} < i_{вх} < E_{ж} R_2 C_3 / L_1 \sqrt{1 + \omega^2 R_2^2 C_3^2}. \quad (23)$$

6. Обговорення результатів дослідження границь робочих діапазонів надійного функціонування схемотехнічних негatronів на операційних підсилювачах

Результатом дослідження впливу миттєвих значень вхідних сигналів на коректність роботи схемних негatronів, створених на основі операційного підсилювача з двома ланками зворотного зв'язку (рис. 5), є отримання співвідношень для кількісної оцінки меж діапазонів значень сигналів збудження. Skorиставшись виразами (16)–(19) можна оцінити діапазон допустимих значень вхідних сигналів заданої частоти для кожної із 38 схемних реалізацій R-, C-, L-негатронів, представлених у табл. 3, 4 і 5.

Для доведення отриманих результатів було виконано моделювання роботи схемних реалізацій R-негатронів, C-негатронів та L-негатронів з урахуванням робочих діапазонів вхідних сигналів та їхньої частоти з залученням програмного продукту MultiSim. Результати параметричного моделювання продемонстрували базові властивості додаткових схемних компонентів електротехніки та довели обґрунтованість вищезазначених обмежень на області функціонування (рис. 8, 9).

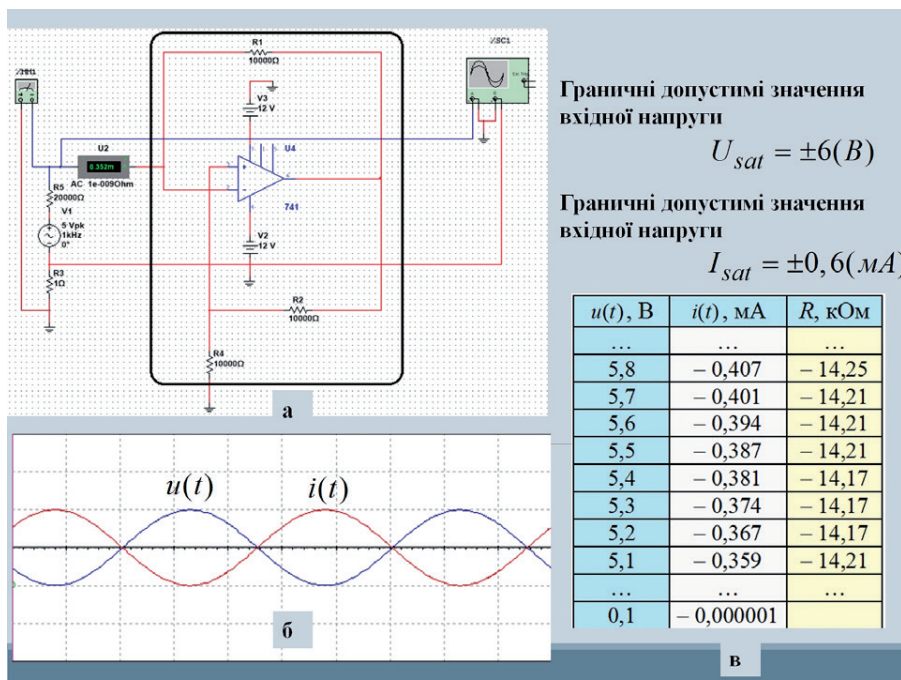


Рис. 8. Моделювання R-негатрона U-типу: а — експериментальна схема; б — MultiSim осцилограма з протифазними вхідними напругою і струмом; в — результати дослідження функціонування у робочому діапазоні

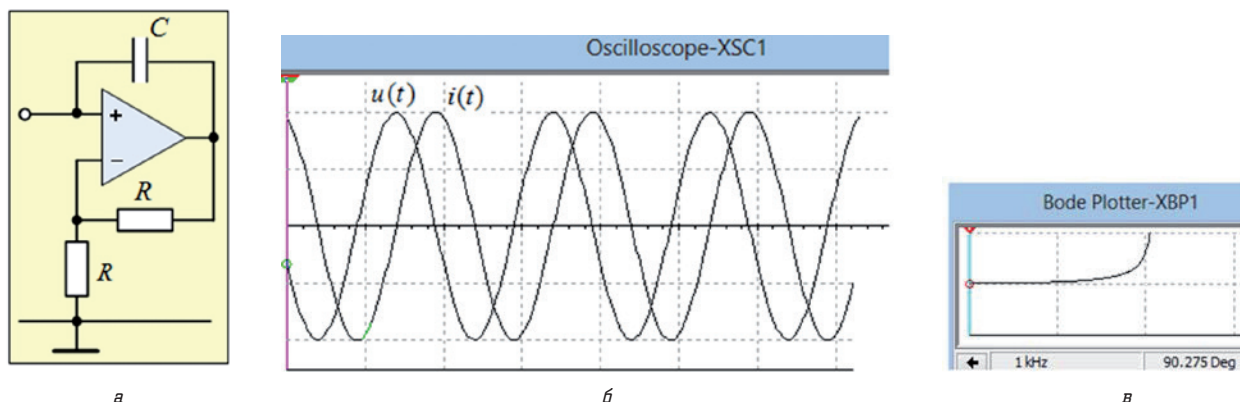


Рис. 9. Моделювання C -негатрона I -типу: a — схема; b — осцилограма з синусоїдами вхідної напруги і вхідного струму; b — фазочастотна характеристика на екрані MultiSim спектроаналізатора у робочому діапазоні

Слід зазначити, що отримані дослідним шляхом робочі діапазони R -, C -, L -негатронів виявлялись дещо вужчими за розрахункові. Це зрозуміло і очікувано, тому що на межі 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. Отже, наступним доцільним кроком у дослідженні умов технічного застосування схемних реалізацій негатронів на операційних підсилювачах із зворотними зв'язками, які мають у робочому режимі від'ємне значення основного параметра (активного опору, ємності або індуктивності), мають стати уточнення співвідношень (16)–(19) і з'ясування впливу на стабільність роботи пристроїв з негатронами співвідношення номіналів компенсуємих параметрів і параметрів негатронів.

7. Висновки

Проведеними дослідженнями щодо схемотехнічних реалізацій негатронів на основі операційного підсилювача виконано узагальнення понять схемотехнічних R -, C -, L -негатронів з позицій теоретичних основ електротехніки як базових схемних компонентів: представлені компонентні рівняння і обговорені реакції в колах змінного струму.

Обґрунтована можливість спрямованого синтезу R -, C -, L -негатронів на базі операційного підсилювача, охопленого водночас колами додатного і від'ємного зворотного зв'язку за напругою на обидва входи, та надано перелік схемних реалізацій для негатронів різних типів з зазначенням кількісної оцінки параметрів.

На стабільність роботи схемотехнічного негатрона впливає амплітуда вхідного сигналу та частотний діапазон сигналу збудження. В роботі вперше отримані співвідношення для кількісної оцінки меж діапазонів значень сигналів збудження для належного функціонування R -, C -, L -негатронів, побудованих на базі операційного підсилювача з двома ланками послідовного та паралельного зворотного зв'язку на обидва входи. Кількісна оцінка границь робочих діапазонів напруг та струмів урахує значення електрорушійної сили

джерела розщепленого живлення операційного підсилювача, параметри елементів ланок зворотного зв'язку та частоту сигналів збудження. Результати моделювання роботи схемних реалізацій негатронів з урахуванням робочих діапазонів вхідних сигналів та їхньої частоти з залученням програмного продукту MultiSim довели обґрунтованість розглянутих обмежень на області функціонування.

Література

- Сигорский, В. П. Алгоритмы анализа электронных схем [Текст] / В. П. Сигорский, А. И. Петренко. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Советское Радио, 1976. — 608 с.
- Chua, L. O. Memristor — The Missing Circuit Element [Text] / L. O. Chua // IEEE Transactions on Circuit Theory. — 1971. — Vol. 18, № 5. — P. 507–519. doi:10.1109/tct.1971.1083337
- Филинюк, Н. А. Негатроника. Исторический обзор [Текст] / Н. Ф. Филинюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 1999. — № 3. — С. 38–43.
- Лебедев, И. В. Техника и приборы СВЧ [Текст]. Т. II. Электровакuumные приборы СВЧ / И. В. Лебедев; под ред. Н. Д. Девяткова. — М.: Высшая школа, 1972. — 318 с.
- Shockley, W. Negative resistance arising from transit time in semiconducting diodes [Text] / W. Shockley // Bell System Technical Journal. — 1954. — Vol. 33, № 4. — P. 799–826. doi:10.1002/j.1538-7305.1954.tb03742.x
- Gunn, J. B. Microwave oscillations of current in III-V semiconductors [Text] / J. B. Gunn // Solid State Communications. — 1963. — Vol. 1, № 4. — P. 88–91. doi:10.1016/0038-1098(63)90041-3
- Esaki, L. New Phenomenon in Narrow Germanium p-n Junctions [Text] / L. Esaki // Physical Review. — 1958. — Vol. 109, № 2. — P. 603–604. doi:10.1103/physrev.109.603
- Read, W. T. A proposed high frequency negative resistance diode [Text] / W. T. Read // Bell System Technical Journal. — 1958. — Vol. 37, № 2. — P. 401–446. doi:10.1002/j.1538-7305.1958.tb01527.x
- Гаряинов, С. А. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением [Текст] / С. А. Горяинов, И. Д. Абергауз. — М.: Энергия, 1970. — 423 с.
- Дьяконов, В. П. Генерация и генераторы сигналов [Текст] / В. П. Дьяконов. — М.: ДМК Пресс, 2009. — 384 с.
- Филановский, И. М. Схемы с преобразователями сопротивления [Текст] / И. М. Филановский, А. Ю. Персианов, В. К. Рыбин. — Л.: Энергия, 1973. — 192 с.
- Марше, Ж. Операционные усилители и их применение [Текст]: пер. с франц. / Ж. Марше. — Л.: Энергия, 1974. — 216 с.
- Бенинг, Ф. Отрицательные сопротивления в электронных схемах [Текст]: пер. с нем. / Ф. Бенинг; под ред. Д. П. Линде. — М.: Советское Радио, 1975. — 288 с.
- Биберман, Л. И. Широкодиапазонные генераторы на негатронах [Текст] / Л. И. Биберман. — М.: Радио и связь, 1982. — 89 с.

15. Chua, L. O. Bipolar-JFET-MOSFET Negative Resistance Devices [Text] / L. O. Chua, J. Yu, Y. Yu // IEEE Transactions on Circuits and Systems. — 1985. — Vol. 32, № 1. — P. 46–61. doi:10.1109/tcs.1985.1085599
16. Reddy, R. K. Design of Low-Power CMOS Limiting Amplifier Using Negative Impedance [Text] / K. R. Reddy, P. R. Krishna // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. — 2013. — Vol. 3, № 12. — P. 634–638.
17. Linvill, J. G. Transistor Negative-Impedance Converters [Text] / J. G. Linvill // Proceedings of the IRE. — 1953. — Vol. 41, № 6. — P. 725–729. doi:10.1109/jrproc.1953.274251
18. Sheingold, D. H. Impedance and admittance transformations using operational amplifiers [Text] / D. H. Sheingold // Lightning Empiricist. — 1964. — Vol. 12, № 1. — P. 1–8.
19. Mechkov, C. S. A heuristic approach to teaching negative resistance phenomenon [Electronic resource] / C. S. Mechkov // Third International Conference «Computer Science'06», 12–15 October 2006. — Istanbul, Turkey, 2006. — Available at: \www/URL: http://www.circuit-fantasia.com/my_work/conferences/cs_2006/paper.htm
20. Лазарев, А. А. Исследование схмотехнических реализаций С-негатронов на конверторах с отрицательным сопротивлением [Текст] / А. А. Лазарев, К. В. Огородник, Р. Ю. Чехмestрук, Н. А. Филинюк // Наукові праці ВНТУ. — 2011. — № 4. — С. 1–10.
21. Петренко, І. А. Моделювання конверторів з негативними імпедансами, реалізованих на операційних підсилювачах [Текст] / І. А. Петренко, Д. К. Марков // Збірник матеріалів V Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми електроенергетики та автоматики». — К.: Політехніка, 2013. — С. 568–571.
22. Петренко, І. А. Схмотехнічні реалізації С-негатронів на операційних підсилювачах [Текст] / І. А. Петренко, В. С. Приходько // Збірник матеріалів VI Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми електроенергетики та автоматики». — К.: Політехніка, 2014. — С. 384–386.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СХЕМНЫХ НЕГАТРОНОВ, РЕАЛИЗОВАННЫХ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Приведен анализ свойств и параметров схемных негатронов с позиций классической электротехники. Описаны реализации R-, C-, L-негатронов на базе операционного усилителя, охваченного цепями положительной и отрицательной обратной связи. Обоснован выбор границ рабочих диапазонов надежного функционирования схмотехнических негатронов на операционных усилителях. Осуществлена проверка работоспособности схемных негатронов с привлечением программного продукта MultiSim.

Ключевые слова: негатроника, схемный негатрон, преобразователь с отрицательным импедансом.

Петренко Ирина Анатоліївна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: petrenkoiryna17@gmail.com.

Петренко Ирина Анатолієвна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра теоретическої електротехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Petrenko Iryna, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: petrenkoiryna17@gmail.com