

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.3.011.7

О. О. Лазарєв, к. т. н.;

М. А. Філінюк, д. т. н., проф.

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ТИПУ ВНУТРІШНЬОГО ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ З ТИПОМ С-НЕГАТРОНА

Подано теоретичне обґрунтування взаємозв'язку типу внутрішнього зворотного зв'язку з видом кулон-вольтної характеристики та еквівалентної схемою С-негатрона. Показано, що позитивний зворотний зв'язок за напругою визначає кулон-вольтну характеристику N-типу та еквівалентну схему С-негатрона, що складається з негативної ємності та негативної активної провідності. Позитивний зворотний зв'язок за струмом (зарядом) визначає вигляд кулон-вольтної характеристики S-типу та еквівалентної схеми С-негатрона, що складається з негативної ємності та позитивного активного опору.

Вступ

Перспективним шляхом підвищення ефективності сучасних електронних пристроїв є використання нової елементної бази, зокрема R-, L-, С-негатронів — електронних приладів, що в певному режимі роботи мають від'ємне значення основного диференційного параметра (негативний активний опір, негативна індуктивність, негативна ємність). Теорія створення та використання R-негатронів вже досить розвинута [1, 2]. Тільки напівпровідникових R-негатронів створено більше двох десятків різновидів. Серед них найпотужніші надвисокочастотні прилади — лавинно-прольотні діоди, найшвидкодійні ключі на лавинних транзисторах, найпотужніші напівпровідникові струмові перемикачі на динисторах та тиристорах. Негатрони є багатофункціональними елементами на базі яких можна створювати схемотехнічно прості та ефективні аналогові та цифрові електронні пристрої, як то перемикачі, генератори, перетворювачі, активні фільтри, логічні елементи, сенсори, тощо.

Наближення класичної мікроелектроніки до теоретичних обмежень спонукає дослідників щораз більше уваги приділяти пошуку нових функціональних приладів. Відкриття нових фізичних ефектів від'ємної ємності призвело до появи фізичних С-негатронів [3—8], використання яких дозволяє вирішити ряд проблем класичної електроніки [9—11].

Першою систематичною роботою, в якій розглядаються властивості від'ємної ємності, способи її схемотехнічної реалізації та приклади застосування є книга Бенінга Ф. [12]. На даний час галузь використання С-негатронів значно розширилася — це компенсація паразитних додатних ємностей, збільшення швидкодії, розширення частотного діапазону, збільшення чутливості сенсорів, зменшення енергоспоживання, тощо.

Проте, на відміну від теорії R-негатронів, багато питань для С-негатронів залишається відкритим і потребує подальших досліджень.

Абезгауз І. Д. показав [13], що необхідною умовою отримання негативного активного опору на клемі електронного приладу є наявність внутрішнього позитивного зворотного зв'язку, а також сформулював теорему про вплив типу зворотного зв'язку на вид вольт-амперної характеристики (ВАХ) R-негатрона та характер реактивності на ділянці негативного опору: прилади з негативним опором, що мають внутрішній позитивний зворотний зв'язок за напругою, мають ВАХ N-типу та ємнісний характер реактивності; прилади з внутрішнім позитивним зворотним зв'язком за струмом

мають ВАХ S-типу та індуктивний характер реактивності. Необхідно зауважити, що до аналогічних висновків про взаємозв'язок між типом R-негатрона та характером реактивності прийшов і Г. Баркгаузен [14, 4], виходячи із причинно-наслідкового закону. Дані теоретичні положення добре узгоджуються з експериментальними даними для існуючих R-негатронів. Так тунельний, обернений, λ -діоди мають ВАХ N-типу та ємнісний характер реактивності; динистор, тиристор, одноперехідний транзистор, лавинний транзистор мають ВАХ S-типу та індуктивний характер реактивності.

Як показав огляд літератури, незважаючи на вже досить велику кількість відомих фізичних C-негатронів та їх схемотехнічних аналогів, питання про взаємозв'язок внутрішнього зворотного зв'язку з типом C-негатрона та його еквівалентною схемою залишається відкритим. Визначення такого взаємозв'язку дозволить за типом зворотного зв'язку, що використовується в приладі, передбачати тип його кулон-вольтної характеристики та характер додаткових елементів еквівалентної схеми, а також навпаки, за видом кулон-вольтної характеристики визначати тип внутрішнього зворотного зв'язку та еквівалентну схему C-негатрона.

Теоретичне обґрунтування

В [15] Бессонов Л. А., аналізуючи нелінійні електричні кола, показав, що шляхом введення електричного зворотного зв'язку в схемах з лінійним підсилювачем можна отримати ефект, при якому опір двополюсника є негативним.

Покажемо на простому прикладі, що наявність внутрішнього позитивного зворотного зв'язку є необхідною умовою для отримання негативної ємності.

На рис. 1 зображений двополюсник, внутрішня будова якого містить опір R_d , лінійний підсилювач з коефіцієнтом підсилення K та деякий опір Z . Напруга з виходу підсилювача через опір Z подається на вхід підсилювача. При $K > 1$ підсилювач забезпечує підсилення та маємо позитивний зворотний зв'язок тому, що напруга зворотного зв'язку буде у фазі з вхідною напругою.

За другим законом Кірхгофа при $I_0 \approx 0$ для рис. 1 отримаємо

$$\dot{E}_{\text{вих}} = K\dot{U}_1 = \dot{I}_2 Z + \dot{U}_1 + \dot{I}_2 R_{\text{вих}}.$$

Звідки

$$I_2 = \frac{\dot{U}_1 (K - 1)}{Z + R_{\text{вих}}}.$$

Вхідний опір двополюсника визначається з виразу

$$Z_{\text{вх}} = R_d + \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = R_d + \frac{\dot{U}_1}{-\dot{I}_2} = R_d - \frac{Z + R_{\text{вих}}}{K - 1}.$$

Якщо

$$R_d = \frac{R_{\text{вих}}}{K - 1},$$

тоді

$$Z_{\text{вх}} = -Z \frac{1}{K - 1},$$

тобто в даному випадку схема перетворює позитивний опір Z в негативний, одночасно змінюючи

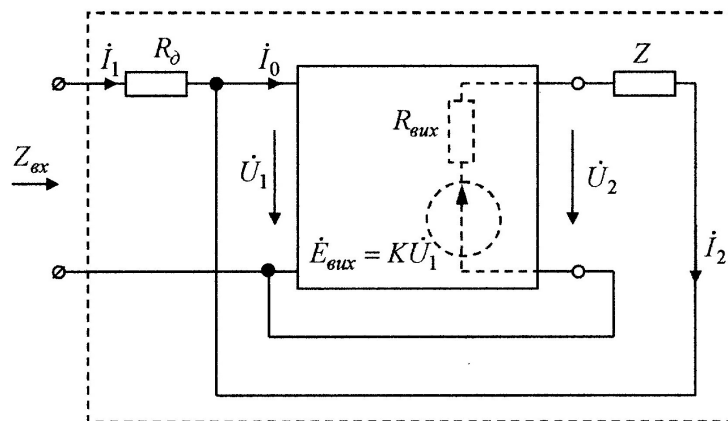


Рис. 1. Двополюсник з внутрішнім зворотним зв'язком

його за модулем в $1/(K-1)$ раз. З даного виразу видно, що отримати негативний вхідний опір двополюсника можна лише при позитивному внутрішньому зворотному зв'язку коли $K > 1$. При негативному зворотному зв'язку $K < 0$ і вхідний опір двополюсника завжди буде позитивним.

Якщо в якості Z використати позитивну ємність C , тобто $Z = \frac{1}{j\omega C}$, то на вході двополюсника отримаємо негативну ємність $C^{(-)}$ з опором $Z_{\text{вх}} = -\frac{1}{j\omega C} \cdot \frac{1}{K-1}$. При $K = 2$, $C^{(-)} = -C$.

Розглянута схема на лінійному підсилювачі виконує функцію перетворення опору, тобто є перетворювачем іммітансу. Перетворювачі іммітансу на різній елементній базі (біполярних та польових транзисторах, операційних підсилювачах) широко використовуються для отримання схемотехнічних негatronів. Теорії та практика використання перетворювачів іммітансу детально викладені в роботах авторів [4, 16—18] та інших.

В фізичних С-негатронах зворотний зв'язок відбувається на рівні фізичних процесів, а його позитивність виявляється в тому, що будь-які зміни в системі, що стимулюються зовнішнім впливом, викликають подальшу їх зміну в той же бік.

Для С-негатрона N-типу заряд є однозначною функцією напруги, тобто такі С-негатрони керуються напругою [19]. В певному діапазоні напруги ми маємо спадну ділянку на кулон-вольтній характеристиці N-типу (рис. 2а), де значення диференційної ємності $C = dq(u)/du$ буде від'ємним (рис. 2а).

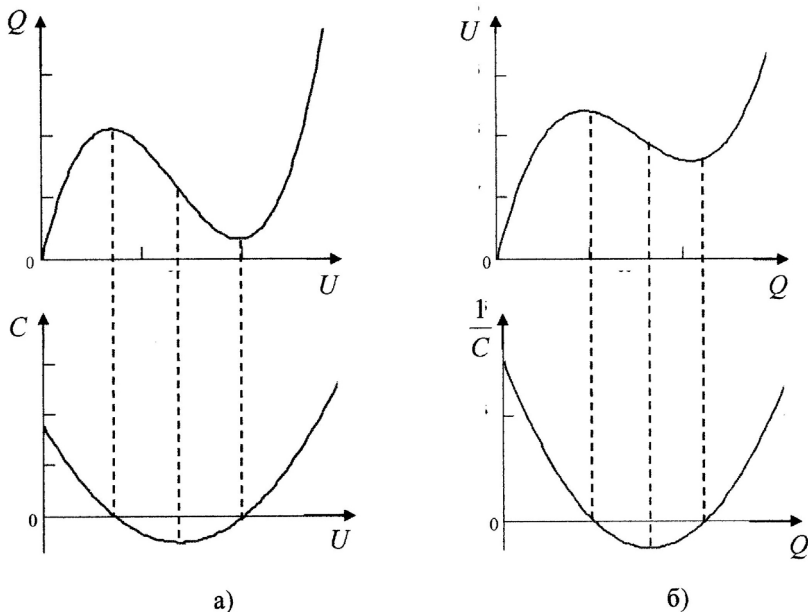


Рис. 2. Залежність диференційної ємності від напруги для С-негатронів N-типу (а) та оберненої диференційної ємності від заряду для С-негатронів S-типу (б)

диференційної ємності аналогічні до вищерозглянутих характеристик С-негатронів N- та S-типів (рис. 2а, б). Це дозволить встановити взаємозв'язок між типом внутрішнього зворотного позитивного зв'язку та типом С-негатрона.

Дослідження проведемо аналогічно до визначення Абезгаузом І. Д. взаємозв'язку між типом зворотного зв'язку та типом R-негатронів [13].

Розрізняються два основних типи зворотного зв'язку — за напругою та за струмом. В нашому випадку будемо говорити про зворотний зв'язок за напругою для С-негатронів N-типу тому, що вони керуються напругою. Та про зворотний зв'язок за зарядом (струмом) для С-негатронів S-типу, так як вони керуються зарядом (струмом).

Чотиріполюсники зі зворотними зв'язками за напругою та струмом показані на рис. 3.

Ці чотиріполюсника можна розглядати як двополюсники із внутрішнім зворотним зв'язком.

Для С-негатронів S-типу напруга є однозначною функцією заряду, і такі С-негатрони керуються зарядом. Так як заряд є функцією струму та часу,

$$q = \int_0^t i(t) dt,$$

то С-негатрони S-типу можна вважати приладами, що керуються струмом. В певному діапазоні значень заряду ми маємо спадну ділянку на кулон-вольтній характеристиці S-типу (рис. 2б), де значення диференційної оберненої ємності $1/C = du(q)/dq$ буде від'ємним (рис. 2б).

Покажемо, що на клеммах двополюсника, в залежності від типу внутрішнього позитивного зворотного зв'язку, можна отримати кулон-вольтні характеристики та залежності

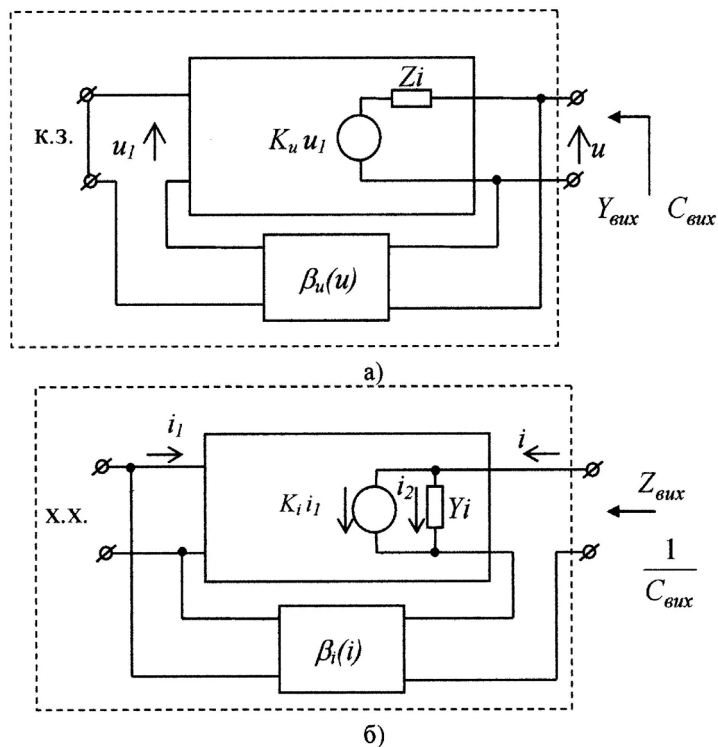


Рис. 3. Чотириполосники з зворотним зв'язком за напругою (а) та струмом (б)

На схемах: K_u — коефіцієнт підсилення чотириполосника за напругою, K_i — коефіцієнт підсилення чотириполосника за струмом, $\beta_u(u)$ — коефіцієнт передачі кола зворотного зв'язку за напругою, $\beta_i(i)$ — коефіцієнт передачі кола зворотного зв'язку за струмом, Z_i — внутрішній вихідний опір чотириполосника, Y_i — внутрішня вихідна провідність чотириполосника. На рис. 3а сигнал зворотного зв'язку є пропорційним до напруги на навантаженні та додається до вхідної напруги. Будемо вважати, що струм кола зворотного зв'язку значно менший струму навантаження і ним знехтуємо. Сигнал зворотного зв'язку за струмом (рис. 3б) є пропорційним до струму навантаження і додається до вхідного струму. Будемо вважати, що напруга, що падає в колі зворотного зв'язку значно менше напруги на навантаженні, і нею знехтуємо.

Як відомо [20], вихідна провідність чотириполосника визначається в режимі короткого замикання на вході, як

реакція на його виході.

Струм на виході i буде реакцією на збудження u та визначається виразом

$$i = \frac{u - K_u u_1}{Z_i},$$

де $u_1 = \beta_u u$ — напруга зворотного зв'язку.

Вихідна провідність чотириполосника з позитивним зворотним зв'язком за напругою (рис. 3а) дорівнює

$$Y_{\text{вих}} = \frac{i}{u} = \frac{1 - K_u \beta_u}{Z_i}.$$

Звідки видно, що коли внутрішній вихідний опір чотириполосника буде ємнісним, тобто $Z_i = \frac{1}{j\omega C_i}$, то значення вихідної провідності також буде мати ємнісний характер

$$Y_{\text{вих}} = (1 - K_u \beta_u) j\omega C_i.$$

Для отримання виразу для значення вихідної ємності чотириполосника (див. рис. 3а), складемо диференціальне рівняння за другим законом Кірхгофа, підставивши замість Z_i внутрішню ємність чотириполосника C_i .

$$K_u u = u + \frac{1}{C_i} \int i dt.$$

Звідки вихідний струм

$$i = \frac{1 - K_u \beta_u}{C_i} \frac{du}{dt}.$$

Тоді вихідна ємність дорівнює

$$C_{\text{вих}} = \frac{i}{\frac{du}{dt}} = \frac{1 - K_u \beta_u}{C_i}.$$

З отриманого виразу видно, що оскільки $C_i = \text{const}$, то вихідна ємність чотириполюсника буде визначатися коефіцієнтом позитивного зворотного зв'язку $K_u \beta_u$. При певному виборі параметрів кола зворотного зв'язку можна забезпечити залежність вихідної ємності від прикладеної напруги, аналогічної до С-негатронів N-типу (рис. 2а). Якщо $K_u \beta_u \rightarrow 1$, то $C_{\text{вих}} \rightarrow 0$, при $K_u \beta_u > 1$, $C_{\text{вих}} < 0$.

Якщо коефіцієнт передачі кола зворотного зв'язку $\beta_u \in \beta_u(u)$ є однозначною функцією напруги u , то отримаємо чотириполюсник з вихідною ємністю, що керується напругою. Підбором елементів кола зворотного зв'язку можна забезпечити будь-який вид залежності $\beta_u(u)$. На рис. 4 показана залежність коефіцієнта передачі кола зворотного зв'язку $\beta_u(u)$ від напруги, коли залежність $C_{\text{вих}}(u)$ відповідає аналогічній залежності С-негатрона N-типу (рис. 2а). Негативна ємність буде спостерігатися в діапазоні напруги (U_1, U_3) , а максимальне від'ємне значення — при напрузі U_2 .

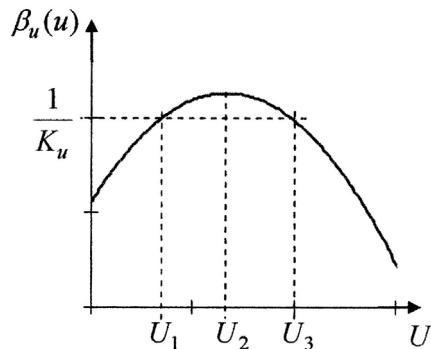


Рис. 4. Залежність коефіцієнта передачі кола зворотного зв'язку від напруги, що необхідна для отримання кулон-вольтної характеристики N-типу

Статичну кулон-вольтну характеристику для розглянутого чотириполюсника з позитивним зворотним зв'язком за напругою можна отримати, виходячи з виразу $C = dq/du$.

Тоді

$$Q(U) = \int C_{\text{вих}} dU = \int \frac{1 - K_u \beta_u(U)}{C_i} dU.$$

Якщо залежність коефіцієнта передачі кола зворотного зв'язку $\beta_u(u)$ від напруги відповідає графіку на рис. 4, то кулон-вольтна характеристика буде N-типу (рис. 2а).

Проведемо аналогічне дослідження чотириполюсника зі зворотним зв'язком за струмом (рис. 3б).

Як відомо [20], вихідний опір чотириполюсника визначається в режимі короткого замикання на вході, як реакція на його виході.

При зворотному зв'язку за струмом напруга $u \in$ реакцією на зовнішнє збудження — струм i , і дорівнює

$$u \approx i_2 / Y_i,$$

де $i_2 = i - K_i i_1$, $i_1 = \beta_i i$.

Вихідний опір $Z_{\text{вих}}$ чотириполюсника з позитивним зворотним зв'язком за струмом визначається виразом

$$Z_{\text{вих}} = \frac{u}{i} = \frac{(1 - K_i \beta_i)}{Y_i}.$$

Якщо внутрішня вихідна провідність чотириполюсника буде мати ємнісний характер реактивності, тобто $Y_i = j\omega C_i$, тоді значення вихідного опору також буде мати ємнісний характер

$$Z_{\text{вих}} = \frac{(1 - K_i \beta_i)}{j\omega C_i}.$$

Замінивши провідність Y_i на ємність C_i , знайдемо вираз для оберненої вихідної ємності чотириполюсника

$$\frac{1}{C_{\text{вих}}} = \frac{i}{du} = \frac{1 - K_i \beta_i}{C_i}.$$

Кулон-вольтна характеристика в даному випадку визначається виразом

$$U(Q) = \int \frac{1}{C_{\text{вих}}} dQ = \int \frac{1 - K_i \beta_i(Q)}{C_i} dQ.$$

Якщо коефіцієнт зворотного зв'язку є однозначною функцією заряду, то вихідна обернена ємність чотириполосника керується зарядом. Залежність коефіцієнта позитивного зворотного зв'язку β_i від заряду, що необхідна для отримання кулон-вольтної характеристики S-типу, буде аналогічною до β_u (див. рис. 4).

Таким чином, тип зворотного зв'язку визначає вид кулон-вольтної характеристики: позитивний зворотний зв'язок за напругою відповідає характеристиці N-типу, а позитивний зворотний зв'язок за струмом (зарядом) — характеристиці S-типу.

Взаємозв'язок між типом зворотного зв'язку та додатковими елементами еквівалентної схеми C-негатронів можна визначити, якщо врахувати, що в реальних системах процес здійснення зворотного зв'язку не є безінерційним. Тобто між причиною та наслідком буде виникати певний фазовий зсув, що буде визначатися часом затримки. Наслідок завжди буде відставати від причини і фазовий зсув буде від'ємним.

Інерційність врахуємо шляхом введення в коло зворотного зв'язку коефіцієнта затримки $e^{-j\omega\tau}$. Будемо вважати, що від часу залежать лише коефіцієнти передачі зворотного зв'язку, які представимо такими виразами:

$$\begin{aligned}\beta_u &= \beta_{u0} e^{-j\omega\tau}; \\ \beta_i &= \beta_{i0} e^{-j\omega\tau},\end{aligned}$$

де τ — час затримки; ω — циклічна частота вхідного сигналу; $-\omega\tau$ — фазовий зсув між наслідком та причиною.

Тоді отримані вище вирази для вихідної провідності $Y_{\text{вих}}$ чотириполосника з позитивним зворотним зв'язком за напругою, та вихідного опору $Z_{\text{вих}}$ чотириполосника з позитивним зворотним зв'язком за струмом запишемо у вигляді

$$\begin{aligned}Y_{\text{вих}} &= (1 - K_u \beta_{u0} e^{-j\omega\tau}) j\omega C_i, \\ Z_{\text{вих}} &= \frac{(1 - K_i \beta_{i0} e^{-j\omega\tau})}{j\omega C_i}.\end{aligned}$$

Виділивши дійсну та уявну складові $Y_{\text{вих}}$ та $Z_{\text{вих}}$, отримаємо

$$\begin{aligned}Y_{\text{вих}} &= -\beta_{u0} K_u \sin(\omega\tau) \omega C_i + j(1 - K_u \beta_{u0} \cos(\omega\tau)) \omega C_i, \\ Z_{\text{вих}} &= \frac{K_i \beta_{i0} \sin(\omega\tau)}{\omega C_i} - j \frac{(1 - K_i \beta_{i0} \cos(\omega\tau))}{\omega C_i}.\end{aligned}$$

Звідки видно, що вихідна провідність $Y_{\text{вих}}$ має негативну активну складову, а вихідний опір $Z_{\text{вих}}$ — позитивну активну складову. Тобто до еквівалентної схеми C-негатрона, що керується напругою, буде входити негативна активна провідність $G^{(-)}$, а до еквівалентної схеми C-негатрона, що керується струмом — позитивний активний опір R . Зауважимо, що до аналогічних висновків про еквівалентні схеми від'ємних ємностей, що керуються напругою та струмом, прийшов Ф. Бенінг емпіричним шляхом, аналізуючи хід годографів повних опорів враховуючи закон причинності [12]. Також авторами раніше були отримані аналогічні додаткові елементи до еквівалентних схем C-негатронів N-, S-типів [19], виходячи з аналізу їх енергетичних властивостей. Тобто різні підходи до визначення еквівалентних схем C-негатронів дали аналогічні результати, що підтверджує коректність проведених досліджень. Однак на відміну від попередніх досліджень, в даному випадку встановлено взаємозв'язок між типом зворотного внутрішнього зв'язку, видом кулон-вольтної характеристики, та еквівалентною схемою C-негатрона. А врахування попередніх досліджень дозволяє встановити також взаємозв'язок між типом зворотного зв'язку та енергетичними властивостями C-негатронів.

Висновки

1. Таким чином тип позитивного зворотного зв'язку визначає вид кулон-вольтної характеристики C-негатрона. Позитивний зворотний зв'язок за напругою визначає кулон-вольтну характе-

ристику N-типу, а зворотний зв'язок за струмом (зарядом) — кулон-вольтну характеристику S-типу.

2. Тип позитивного зворотного зв'язку визначає також еквівалентну схему C-негатрона. При зворотному зв'язку за напругою еквівалентна схема C-негатрона складається з негативної ємності та негативної активної провідності. Такий C-негатрон N-типу є активним приладом та віддає енергію в зовнішнє коло. При зворотному зв'язку за струмом еквівалентна схема C-негатрона складається з негативної ємності та позитивного активного опору. Такий C-негатрон є пасивним приладом.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Філінюк М. А. Основи негатроніки. Т. 1. Теоретичні і фізичні основи негатроніки / М. А. Філінюк. — Вінниця : УНІВЕРСУМ—Вінниця, 2006. — 456 с.
2. Філінюк М. А. Основи негатроніки. Т. 2. Прикладні аспекти негатроніки / М. А. Філінюк. — Вінниця : УНІВЕРСУМ—Вінниця, 2006. — 306 с.
3. Пенін Н. А. Отрицательная емкость в полупроводниковых структурах / Н. А. Пенін // ФТП. — 1996. — Т. 30, № 4. — С. 626—634.
4. Negative capacitance effect in semiconductor devices / M. Ershov, H. C. Liu, L. Li., M. Buchanan, Z. R. Wasilevski, A. K. Jonscher // IEEE Trans. On Electron Devices. — 1998. — Vol. 45, № 10. — P. 2196—2203.
5. Wu X. Negative capacitance at metal-semiconductor interfaces / X. Wu, E. S. Yang, H. L. Evans // J. Appl. Phys. — 1990. — Vol. 68, № 6. — P. 2845—2848.
6. Эффекты накопления заряда и отрицательная емкость в гетероструктурах на основе кремния / А. П. Болтаев, Т. М. Бурбаев, В. А. Курбатов [и др.] // Известия академии наук. Серия физическая. — 1999. — № 2. — С. 312—318.
7. Отрицательная емкость в локально выращенных пленках поликристаллического кремния / А. Г. Абдулаев, В. А. Ветхов, Ф. Д. Касимов [и др.] // Электронная техника, Сер. 3. Микроэлектроника. — 1985. — Т. 116, Вып. 4. — С. 21—25.
8. Partenskii M. B. The question of negative capacitance and its relation to instabilities and phase transitions at electrified interfaces / M. B. Partenskii, V. L. Dorman, P. C. Jordan // Int. Rev. Phys. Chem. — 1996. — No 11, 153. — P. 153—181.
9. Anup P. Jose. Distributed Loss-Compensation Techniques for Energy-Efficient Low-Latency On-Chip Communication / Anup P. Jose, Kenneth L. Shepard // IEEE Journal of Solid-State Circuits. — 2007. — Vol. 42, No. 6. — P. 1415 — 1424.
10. Kolev Svilen. Using a negative capacitance to increase the tuning range of a varactor diode in MMIC technology / Kolev Svilen, Delacressonniere Bruno, Gautier Jean-Luc // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. — 2007. — Vol. 49, No 12. — P. 2425—2430.
11. Zhimov V. V. Negative capacitance to the rescue? / Victor V. Zhimov, Ralph K. Cavin // Nature Nanotechnology. — 2008. — Vol. 3. — P. 77 — 78.
12. Бенинг Ф. Отрицательное сопротивление в электронных схемах / Ф. Бенинг. — М. : Сов. радио, 1975. — 286 с.
13. Гаряинов С. А. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением / С. А. Гаряинов, И. Д. Абезгауз — М. : Энергия, 1970. — 319 с.
14. Barkhausen H. Warum kehren sich die für den Lichtbogen gültigen Stabilitätsbedingungen bei Elektronenrohren um? // Physik. Zeitschrift. — 1926. — 27. — S. 43—36.
15. Бессонов Л. А. Нелинейные электрические цепи : учебное пособие для вузов / Л. А. Бессонов — [3-е изд.]. — М. : Высш. школа, 1977. — 343 с.
16. Филановский И. М. Схемы с преобразователями сопротивления / И. М. Филановский, А. Ю. Персианов, В. К. Рыбин. — Л. : Энергия, 1973. — 192 с.
17. Марше Ж. Операционные усилители и их применение ; пер. с франц. / Ж. Марше. — Л. : Энергия, 1974. — 216 с.
18. Філінюк Н. А. Активні СВЧ фільтри на транзисторах / Н. А. Філінюк. — М. : Радио и связь, 1987. — 112 с.
19. Філінюк М. А. Дослідження енергетичних властивостей нелінійної ємності / М. А. Філінюк, О. О. Лазарев // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2000. — № 4. — С. 94—97.
20. Бакалов В. П. Основы теории электрических цепей и электроники : учебник для вузов / В. П. Бакалов, А. Н. Игнатов, Б. И. Крук. — М. : Радио и связь, 1989. — 528 с.

Рекомендована кафедрою проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури

Надійшла до редакції 27.11.08
Рекомендована до друку 23.12.08

Лазарев Олександр Олександрович — старший викладач; **Філінюк Микола Антонович** — завідувач кафедри.

Кафедра проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, Вінницький національний технічний університет