

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.383

О. В. Осадчук, д. т. н., проф.;

А. О. Семенов, к. т. н.;

К. О. Коваль

ГЕНЕРАТОР ПРЯМОКУТНИХ ІМПУЛЬСІВ НА ОСНОВІ ПОЛЬОВОЇ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

Запропоновано математичну модель генератора прямокутних імпульсів на основі польової транзисторної структури з від'ємним опором (ПТСВО), яка базується на основі нелінійної апроксимації статичних характеристик активного елемента генератора і квазілінійних схем-заміщень генератора в області швидких і повільних рухів.

Вступ

Під час проектування генераторів прямокутних імпульсів на основі приладів з від'ємним опором розробникам необхідно вирішити дві задачі: забезпечення необхідної тривалості переднього і заднього фронтів або отримання необхідної форми вершини імпульсу чи паузи [1]. Найкращу прямокутну форму мають імпульси генераторів на основі логічних елементів або операційних підсилювачів [2]. Однак такі генератори мають ряд недоліків, основними з яких є фіксована амплітуда імпульсів, а також низька частота проходження прямокутних імпульсів, обмежена швидкодією логічного елемента або частотою одиничного підсилення операційного підсилювача.

Перераховані недоліки можна усунути шляхом використання транзисторних структур з від'ємним опором, керування величиною активної та реактивної складових повного опору яких здійснюється зміною напруги живлення, що розширює функціональні можливості імпульсних генераторів.

Метою роботи є розробка і дослідження генератора прямокутних імпульсів на основі польової транзисторної структури з від'ємним опором.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно розв'язати такі задачі: 1) розробити математичну модель статичних характеристик ПТСВО з урахуванням фізичних процесів, які в ній відбуваються, 2) розробити квазілінійну математичну модель генератора прямокутних імпульсів на основі ПТСВО у областях швидких і повільних рухів.

Обґрунтування вибору схеми генератора прямокутних імпульсів

Аналіз процесів, які відбуваються у генераторах електричних коливань у релаксаційному режимі на основі приладів з Λ -характеристикою, можна провести за допомогою методики, описаної у [3]. Результати дослідження імпульсного релаксатора на основі аналогу інжекційно-польового транзистора з електричною і оптичною перебудовою частоти генерації, отримані у роботі [4], показують, що використання котушки індуктивності як накопичувача електричної енергії погіршує форму вершини і спаду генерованих прямокутних імпульсів. Покращити форму генерованих коливань можна за допомогою транзисторного аналогу індуктивності на основі біполярного транзистора і фазозсувного RC кола, при цьому процес зарядження і розрядження конденсатора здійснюється через канал польового транзистора [5].

Запропонована авторами у [5] електрична схема генератора прямокутних імпульсів на основі

ПТСВО подана на рис. 1. Підвищенням напруги джерела постійної напруги $U_{\text{ж}}$ до величини, коли робоча точка розташовується на другій висхідній ділянці статичної вольт-амперної характеристики транзисторного аналогу лямбда-діода на основі польових транзисторів VT3 і VT4, конденсатор C1 почне заряджатися крізь змінний резистор R1. Збільшення напруги на конденсаторі C1 приводить до зменшення струму стоку польового транзистора VT1, що приводить до зменшення струму через транзисторний аналог лямбда-діода на основі польових транзисторів VT3 і VT4. При цьому робоча точка переміститься на першу висхідну ділянку статичної вольт-амперної характеристики лямбда-діода на основі польових транзисторів VT3 і VT4. Конденсатор C1 почне розряджатися крізь аналог лямбда-діода на основі польових транзисторів VT3 і VT4, що приводить до збільшення його струму. При цьому робоча точка знову переміститься на другу висхідну ділянку статичної вольт-амперної характеристики лямбда-діода на основі польових транзисторів VT3 і VT4 і процес перезарядження конденсатора почнеться знову. Таким чином, генератор формує незатухаючі в часі прямокутні імпульси з тривалістю, що дорівнює тривалості паузи.

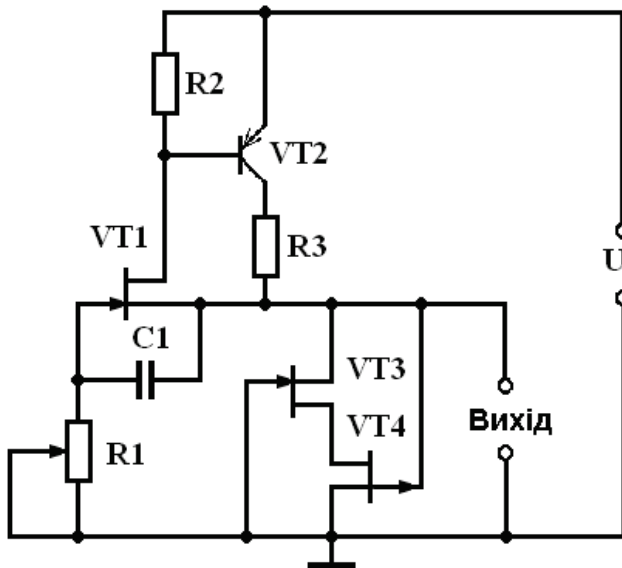


Рис. 1. Електрична схема генератора прямокутних імпульсів на основі польової транзисторної структури з від'ємним опором

Від'ємний диференційний опір лямбда-діода на основі польових транзисторів VT3 і VT4 компенсує втрати в частотно-задавальному колі генератора, яке складається зі змінного резистора R1 і конденсатора C1. Біполярний транзистор VT2 спільно з резисторами R2 і R3, а також з польовим транзистором VT1 спільно з конденсатором C1 утворюють транзисторний аналог індуктивності, який має великий опір на частоті генерованих коливань і мале значення опору постійному струму, що зменшує вплив зміни напруги живлення на параметри генерованих прямокутних імпульсів і приводить до підвищення потужності генерованих коливань. Шляхом зміни опору змінного резистора R1 є можливість змінювати частоту повторення прямокутних імпульсів в широких межах. Також, період повторення прямокутних імпульсів та їх тривалість можна змінювати шляхом зміни величини напруги живлення.

Для отримання прямокутних імпульсів типу меандр, до виходу генератора через розділовий конденсатор підключається формувач на основі логічного елемента І-НЕ.

Розробка математичної моделі статичних характеристик ПТСВО

Задачею дослідження розробленого генератора є встановлення зв'язку між формою коливання

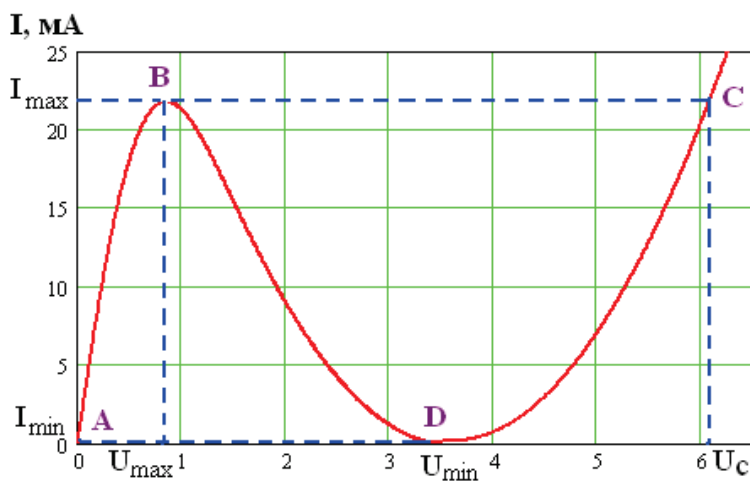


Рис. 2. Статична ВАХ ПТСВО

$u(t)$ та параметрами елементів електричної схеми генератора. Окремою задачею дослідження є встановлення зв'язку між формою коливання $u(t)$ і вольт-амперною характеристикою $i(u)$ польової транзисторної структури з від'ємним опором. На рис. 2 зображена статична ВАХ польової транзисторної структури з нанесеними точками, які обумовлюють граничний цикл руху робочої точки по фазовій площині генератора прямокутних імпульсів.

Ділянки граничного циклу АВ і CD відповідають повільним рухам робочої точки (формування відповідно паузи та вершини імпульсу), а ділянки граничного циклу ВС і DA відповідають швидким рухам робочої точки (формування відповідно переднього та заднього фронтів імпульсу).

Для математичного опису статичної характеристики польової транзисторної структури з від'ємним опором доцільно використати нелінійну апроксимацію сімейства вихідних статичних характеристик польових транзисторів за допомогою функції гіперболічного тангенсу, запропоновану у роботі [6]

$$I = I_{C0} \left(1 - \frac{U}{2U_0}\right)^2 (\operatorname{th} M)^{-1} \operatorname{th} \left[M \frac{U/2U_0}{1 - U/2U_0} \right], \quad (1)$$

де I_{C0} — струм стоку при $U_{ЗВ} = 0$, $U_{СВ} = U_0$; $U_{ЗВ}$, $U_{СВ}$ — напруги на електродах відповідно затвор-витік та стік-витік; U_0 — напруга відсічки.

Параметр M визначається зі співвідношення

$$M = S_{\max} \frac{U_0}{I_{C0}}, \quad (2)$$

де $S_{\max} = \frac{dI_c}{dU_{СВ}}$ — крутість вихідної характеристики польового транзистора, якщо $U_{СВ} = U_{ЗВ} = 0$.

Рівняння (1) містить основні параметри польових транзисторів і з точністю не менше 10 % апроксимує сімейство статичних ВАХ ПТСВО з p - n переходом [7].

Для польових транзисторів з однаковими значеннями напруги відсічки але з різними параметрами струму стоку кожного транзистора лямбда діода [6]

$$I_{C3} = I_{C03} \left(1 - \frac{U(1-\Delta)}{2U_0}\right)^2 (\operatorname{th} M)^{-1} \operatorname{th} \left[M \frac{U(1+\Delta)/2U_0}{1 - U(1-\Delta)/2U_0} \right]; \quad (3)$$

$$I_{C4} = I_{C04} \left(1 - \frac{U(1-\Delta)}{2U_0}\right)^2 (\operatorname{th} M)^{-1} \operatorname{th} \left[M \frac{U(1+\Delta)/2U_0}{1 - U(1-\Delta)/2U_0} \right], \quad (4)$$

де I_{C03} , I_{C04} — струм стоку для $U_{ЗВ} = 0$ і $U_{СВ} = U_0$ польових транзисторів VT3 і VT4 відповідно;

$$\Delta = (U_{СВ3} - U_{СВ4})/U_0. \quad (5)$$

Використовуючи польові транзистори зі струмами стоку $I_{C03} > I_{C04}$, які відрізняються за величиною у 1,5..2,0 разів, що широко використовується на практиці, наближене рівняння струму лямбда-діода з точністю порядку Δ^2 [6] має вигляд

$$I = \frac{2I_{C03}}{1 + I_{C03}/I_{C04}} \left(1 - \frac{U}{2U_0}\right)^n (\operatorname{th} M)^{-1} \operatorname{th} \left[M \frac{U/2U_0}{(1 - U/2U_0)^{n-1}} \right], \quad (6)$$

де $n = 1,8..2,0$ для малопотужних польових транзисторів. При $I_{C03} = I_{C04}$ і $n = 2$ рівняння (6) переходить у рівняння (1).

Від'ємна диференційна провідність лямбда-діода

$$G(U) = \frac{2I_{C03}}{1 + I_{C03}/I_{C04}} (\operatorname{th} M)^{-1} \left\{ n \left(1 - \frac{U}{2U_0}\right)^{n-1} \operatorname{th} \left[M \frac{U/2U_0}{(1 - U/2U_0)^{n-1}} \right] + \right. \\ \left. + \frac{M}{2U_0} \left[1 + (n-1) \left(1 - \frac{U}{2U_0}\right) \right] \left(1 - \frac{U}{2U_0}\right) \operatorname{ch}^{-2} \left[M \frac{U/2U_0}{(1 - U/2U_0)^{n-1}} \right] \right\}. \quad (7)$$

Розробка квазілінійної моделі генератора прямокутних імпульсів на основі ПТСВО

Узагальнена еквівалентна схема генератора прямокутних імпульсів подана на рис. 3.

На рис. 3 використані такі позначення: $L_{\text{екв}}$ — еквівалентна індуктивність транзисторного аналогу індуктивності, $R_{\text{екв}}$ — еквівалентний опір втрат, $C_{\text{екв}}$ — еквівалентна ємність транзисторної структури з від'ємним опором.

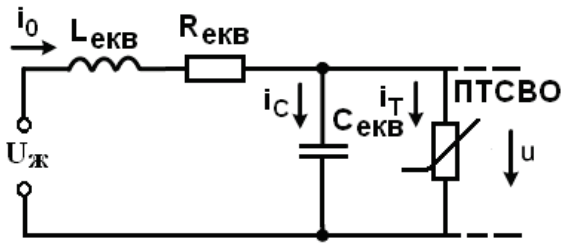


Рис. 3. Еквівалентна схема генератора прямокутних імпульсів на основі польової транзисторної структури

імпульсів на основі польової транзисторної структури

При аналізі еквівалентної схеми на рис. 2 необхідно врахувати, що від'ємний диференціальний опір ПТСВО у динамічному режимі компенсує еквівалентний опір втрат $R_{\text{екв}}$. З урахуванням цього за першим і другим законами Кірхгофа отримаємо систему лінійних диференціальних рівнянь першого порядку [1]

$$\begin{cases} L_{\text{екв}} \frac{di_0}{dt} = U_{\text{Ж}} - u; \\ i_0 = C_{\text{екв}} \frac{du}{dt} + i_T. \end{cases}$$

Систему диференціальних рівнянь (8) можна звести до одного диференціального рівняння другого порядку відносно генерованої напруги [1]

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{G(u)}{C_{\text{екв}}} \frac{du}{dt} + \omega_0 (u - U_{\text{Ж}}) = 0, \quad (9)$$

де $G(u) = di_T/du$ — диференціальна провідність польової транзисторної структури з від'ємним опором, яка описується рівнянням (7), $\omega_0 = 1/\sqrt{L_{\text{екв}} C_{\text{екв}}}$ — кутова частота проходження прямокутних імпульсів.

На рис. 4 зображені прямокутні імпульси генерованих коливань напруги у нормованому часі, побудовані у програмі MathCad 11.0.

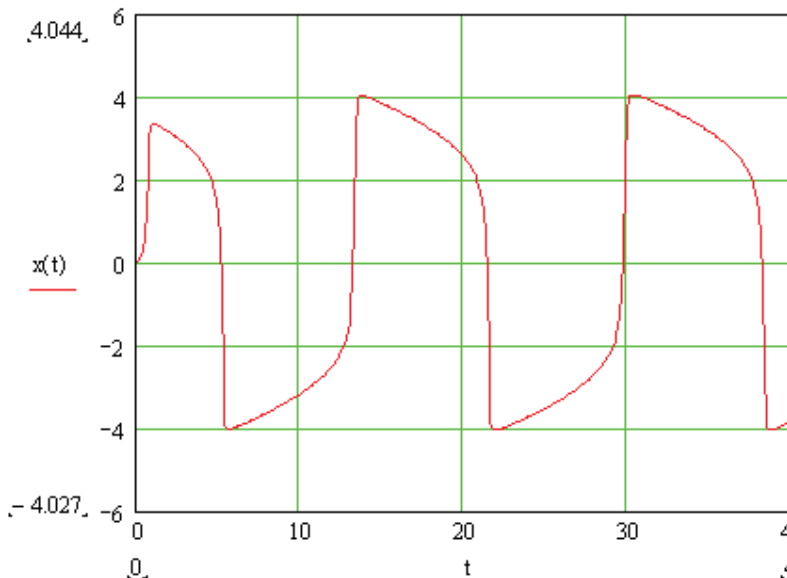


Рис. 4. Генеровані прямокутні імпульси, побудовані у MathCad 11.0

Особливість прямокутної форми генерованих коливань дозволяє розділити процес формування імпульсів на область швидких і повільних рухів робочої точки. Для області повільних рухів можна знехтувати еквівалентною ємністю $C_{\text{екв}}$ ПТСВО і представити еквівалентну схему генератора у вигляді рис. 5а [1]. Для області швидких рухів можна вважати, що струм $i_0 = I_0 = \text{const}$, а тому еквівалентну схему можна зобразити у вигляді рис. 5б [1].

Для області повільних рухів відповідно до еквівалентної схеми на рис. 3а отримаємо диференціальне рівняння

$$L_{\text{екв}} G(u) \frac{du}{dt} +$$

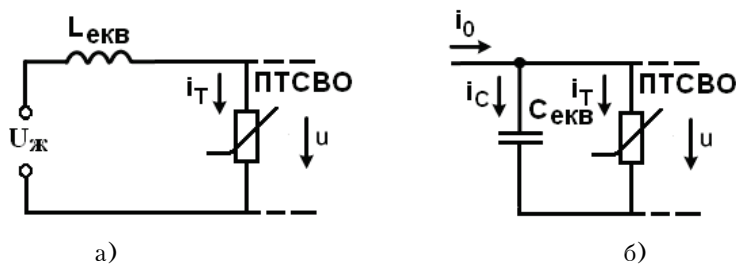


Рис. 5. Еквівалентні схеми генератора прямокутних імпульсів

МО

Розв'язок диференціального рівняння (10) можна подати у вигляді

$$t = L_{екв} \int_{U_C}^u \frac{G(u)}{U_{ж} - u} du, \quad (11)$$

де нижня границя U_C — абсциса точки С на рис. 2.

Використавши інтегрування по частинах, з рівняння (11) отримаємо

$$t = L_{екв} \int_{U_C}^u \frac{G(u)}{U_{ж} - u} du = \frac{L_{екв} i(u)}{U_{ж} - u} \Big|_{U_C}^u - L_{екв} \int_{U_C}^u \frac{i(u)}{(U_{ж} - u)^2} du, \quad (12)$$

де $i(u)$ описується рівнянням (6). До складу рівняння (12) входить інтеграл який неможна визначити у явному вигляді, що ускладнює подальший аналіз. Тому для визначення тривалості паузи та тривалості імпульсу необхідно використати числові методи обчислення.

Рівняння для визначення тривалості паузи і тривалості імпульсу необхідно проінтегрувати (12) по траєкторіям АВ і CD

$$\tau_n = \frac{L_{екв} i(U_B)}{U_{ж} - U_B} - \frac{L_{екв} i(U_A)}{U_{ж} - U_A} - L_{екв} \int_{U_A}^{U_B} \frac{i(u)}{(U_{ж} - u)^2} du; \quad (13)$$

$$\tau_n = \frac{L_{екв} i(U_C)}{U_{ж} - U_C} - \frac{L_{екв} i(U_D)}{U_{ж} - U_D} - L_{екв} \int_{U_D}^{U_C} \frac{i(u)}{(U_{ж} - u)^2} du. \quad (14)$$

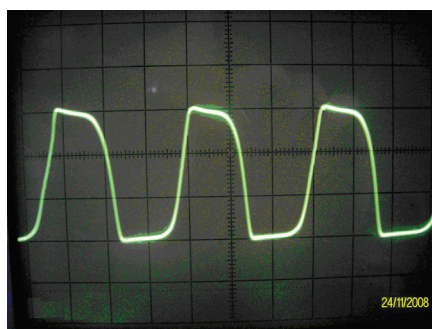
Передній фронт прямокутних імпульсів формується при швидкому переході робочої точки з положення В у положення С, а задній фронт імпульсу формується при швидкому переході робочої точки з положення D у положення А. Для еквівалентної схеми на рис. 3б справедливе диференціальне рівняння

$$C_{екв} \frac{du}{dt} + i(u) = I_0. \quad (15)$$

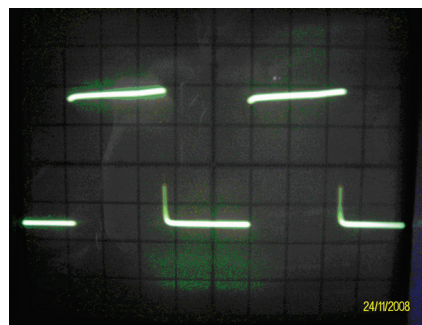
Розв'язання диференціального рівняння (15) дає співвідношення для обчислення тривалості переднього і заднього фронту генерованих прямокутних імпульсів (рис. 6а)

$$t_{\phi} = C_{екв} \int_{U_B}^{U_C} \frac{du}{I_0 - i(u)}; \quad (16)$$

$$t_{\phi} = C_{екв} \int_{U_D}^{U_A} \frac{du}{I_0 - i(u)}. \quad (17)$$



а)



б)

Рис. 6. Осцилограма генерованих (а) прямокутних імпульсів і імпульсів після формувача (б)

Експериментальні дослідження показують, що за час руху робочої точки по граничному циклу фазової траєкторії (це відповідає одному періоду коливань), вона двічі проходить по статичній ВАХ ПТСВО. Це зумовлює зв'язок між формою коливань тривалості паузи і тривалості імпульсу з формою коливань переднього і заднього фронтів. Тому синтезувати генератори прямокутних імпульсів на основі транзисторної структури з від'ємним опором можна або на задану форму вершини, або на задану форму. На рис. 6б наведено осцилограми прямокутних імпульсів після формувача на основі логічного елемента І-НЕ.

Висновки

Розроблений генератор на основі ПТСВО характеризується підвищеною стабільністю частоти повторення прямокутних імпульсів і може бути використаний у вимірюваній та імпульсній техніці. Запропоновано математичну модель на основі нелінійної апроксимації статичних характеристик польових транзисторів і квазілінійної моделі генератора в області швидких і повільних рухів робочої точки для розрахунку динамічних параметрів генератора. Проведені експериментальні дослідження підтверджують адекватність розроблених математичних моделей. Використання комплементарних МДН транзисторів у схемі генератора покращує температурний режим роботи і дозволить реалізувати генератор у інтегральному виконанні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Моругин Л. А. Вопросы синтеза нелинейных импульсных устройств / Л. А. Моругин, Л. С. Бартенев, Д. А. Кабанов. — М.: Сов. Радио, 1972. — 212 с.
2. Яковлев В. Н. Микроэлектронные генераторы импульсов / В. Н. Яковлев. — К.: Техника, 1982. — 208 с.
3. Осадчук О. В. Теоретичні основи побудови генераторів електричних коливань на транзисторних структурах з від'ємним опором / О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Вісник Хмельницького національного університету. — 2006. — № 2, Т.1 (79). — С. 147—151.
4. Семенов А. О. Дослідження оптично-керованого генератора на основі аналогу інжекційно-польового транзистора / А. О. Семенов // Вісник Хмельницького національного університету. — 2006. — № 4 (83). Технічні науки. — С. 153—158.
5. Патент 33049 на корисну модель МПК8 H03B7/00. Генератор прямокутних імпульсів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов, К. О. Коваль. — Реєстр. номер заявки u2008 01301. Дата подання 3.03.2008. Опубл. 10.006.2008. — Бюл. № 11. — 4 с.
6. Молотков В. И. Исследования ВАХ маломощных полевых транзисторов и лямбда-диодов и расчёт амплитуд автогенератора на лямбда-диоде / В. И. Молотков, Е. И. Потапов // Радиоэлектроника. — 1991. — № 11. — С. 108—110.
7. Осадчук О. В. Дослідження НВЧ генератора електричних коливань на основі транзисторної структури з від'ємним опором / О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2005. — № 5(62). — С. 149—154.

Рекомендована кафедрою радіотехніки

Надійшла до редакції 15.12.08
Рекомендована до друку 29.12.08

Осадчук Олександр Володимирович — завідувач кафедри; **Семенов Андрій Олександрович** — старший викладач, **Коваль Костянтин Олегович** — інженер.

Кафедра радіотехніки Вінницького національного технічного університету