

УДК 621.382

О. В. Осадчук, д. т. н.;

А. О. Семенов, асп.

ДОСЛІДЖЕННЯ НВЧ ГЕНЕРАТОРА ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛИВАНЬ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

Розглянуто можливість побудови НВЧ генератора електричних коливань на транзисторній структурі з від'ємним опором на основі двох НЕМТ транзисторів. Запропоновану лінійну еквівалентну схему генератора і отримані рівняння можна використати для моделювання параметрів і характеристик НВЧ генератора з похибкою не більше 10 %.

Вступ

Останнім часом для побудови генераторів НВЧ коливань широко використовуються напівпровідникові прилади з від'ємним диференційним опором — тунельні діоди, діоди Ганна, лавинно-пролітні діоди та ін. Основними недоліками використання твердотільних негатронів є фіксована статична ВАХ, а також несумісність технології виготовлення радіотехнічних пристроїв на їх основі в інтегральному виконанні [1]. Перспективнішим напрямком є використання реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором для створення пристроїв генерування та функціональних мікроелектронних перетворювачів з частотним кодуванням інформації [2—6]. Відомі [7—12] схемотехнічні рішення генераторів електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором. Проте запропоновані схемні рішення генераторів є низькочастотними і працюють в діапазоні не вище декількох десятків мегагерц. Зокрема в роботі [13] теоретично обґрунтовано, що на основі транзисторних структур з від'ємним опором можна побудувати генератори електричних коливань в діапазоні частот не вище 50...100 МГц.

Метою даної роботи є обґрунтування можливості побудови НВЧ генераторів електричних коливань на основі транзисторної структури з від'ємним опором. В роботі проведено дослідження НВЧ генератора електричних коливань на основі двох НЕМТ транзисторів і наведені рекомендації щодо його проектування. Отримано аналітичні співвідношення, які описують залежності статичних характеристик активного елемента генератора, запропоновано лінійну модель генератора. Основні положення роботи перевірено експериментально.

Моделювання статичних характеристик активного елемента генератора

Транзистори з високою рухливістю електронів (НЕМТ транзистори) використовуються для побудови генераторів і підсилювачів НВЧ діапазону. НЕМТ транзистор представляє собою електронний прилад на гетероструктурах, в якому використовується явище високої рухливості електронного газу, що формується у межі поділу двох напівпровідникових матеріалів (як правило, сильно легованого AlGaAs і нелегованого GaAs). Статичні прохідні й вихідні вольт-амперні характеристики (ВАХ) НЕМТ транзисторів ідентичні статичним ВАХ польових транзисторів з $p-n$ переходом.

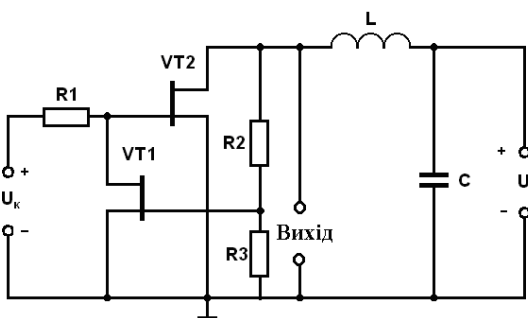


Рис. 1. Електрична схема НВЧ генератора на основі двох НЕМТ транзисторів

На рис. 1 зображена електрична схема НВЧ генератора на основі транзисторної структури з від'ємним опором.

НВЧ генератор працює таким чином. Коливальний контур генератора, утворений ємнісною складовою повного опору транзисторної структури на електродах стік-витік польових транзисторів VT1 і VT2 та пасивною індуктивністю L. Підвищенням напруги джерел постійної напруги U_k і $U_ж$ до величини, коли на електродах стік-витік польових транзисторів VT1 і VT2 виникає від'ємний опір, що компенсує втрати в колива-

льному контурі, призводить до виникнення стаціонарних електричних коливань. Резистори R1, R2 і R3 здійснюють електричне живлення польових транзисторів VT1 і VT2, а ємність С запобігає проходженню змінного струму через джерело постійної напруги $U_{ж}$. Джерело постійної напруги $U_{ж}$ регулює величину від'ємного опору, що визначає потужність вихідного сигналу. Підстройку частоти генерованих коливань можна здійснювати шляхом зміни напруги джерел $U_{к}$ і $U_{ж}$.

Для дослідження НВЧ генератора на основі транзисторної структури з від'ємним опором був створений експериментальний макет. В якості НЕМТ транзисторів були використані арсенід-галієві транзистори фірми Mitsubishi Semiconductor типу MGF4714CP. В якості пасивної індуктивності використовувалась плівкова індуктивність, отримана шляхом напилення на полікоровій підкладці. Величина еквівалентної індуктивності складає 10 нГн.

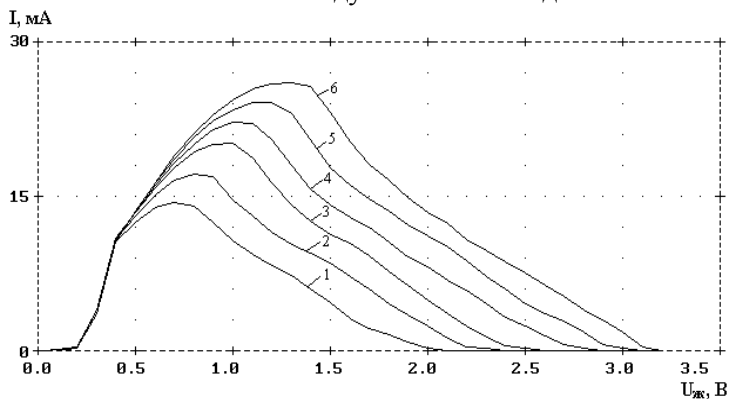


Рис. 2. Сімейство статичних ВАХ активного елемента НВЧ генератора для різних значень напруги керування:

- 1) $U_{к} = 0,2$ В, 2) $U_{к} = 0,25$ В,
- 3) $U_{к} = 0,3$ В, 4) $U_{к} = 0,35$ В,
- 5) $U_{к} = 0,4$ В, 6) $U_{к} = 0,45$ В

На рис. 2 показано сімейство статичних ВАХ активного елемента генератора НВЧ (залежність струму $I_{ж}$ від напруги $U_{ж}$ для різних значень напруги $U_{к}$).

Аналіз рис. 2 показує, що сімейство статичних ВАХ активного елемента генератора на основі двох НЕМТ транзисторів містить ряд спадних ділянок, які мають лінійний характер. Нелінійну апроксимацію статичних ВАХ транзисторної структури з від'ємним опором на основі двох НЕМТ транзисторів можна виконати, використовуючи методику запропоновану у роботі [14] і апробовану в роботах [15, 16]. У відповідності з методикою сімейство ви-

хідних статичних ВАХ транзисторів можна апроксимувати рівнянням

$$I_C = I_{C0} \left(1 - \frac{U_{3B}}{U_0} \right)^2 (\text{th} M)^{-1} \text{th} \left[M \frac{U_{CB}/U_0}{1 - U_{3B}/U_0} \right], \quad (1)$$

де I_{C0} — струм стоку, якщо $U_{3B} = 0$, $U_{CB} = U_0$; U_{3B} , U_{CB} — напруги на електродах відповідно затвор-витік та стік-витік; U_0 — напруга відсікання. Параметр M визначається зі співвідношення $M = S_{\max} \frac{U_0}{I_{C0}}$, де $S_{\max} = \frac{dI_C}{dU_{CB}}$.

Поліноміальна апроксимація статичної прохідної ВАХ НЕМТ транзисторів [17]

$$I_C(U_{3B}) = S(U_{3B} - U_0 - bU_{3B}^2), \quad (2)$$

де b — коефіцієнт апроксимації, який визначається з графіка статичної прохідної ВАХ транзистора.

На основі рівнянь (1) і (2) отримано рівняння (3), яке апроксимує сімейство статичних ВАХ транзисторної структури на рис. 1:

$$I(U_{ж}, U_{к}) = \frac{U_{ж}}{R_2 + R_3} + I_0 \left(1 - P(U_{ж}, U_{к}) \right)^2 (\text{th} M)^{-1} \text{th} \left[M \frac{U_{ж}/U_0}{1 - P(U_{ж}, U_{к})} \right], \quad (3)$$

де

$$P(U_{ж}, U_{к}) = \frac{U_{ж}}{U_0} - SR_1 \left[\frac{U_{ж}}{U_0} \frac{R_3}{R_2 + R_3} - \frac{bU_{ж}^2}{U_0} \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right)^2 - 1 \right]. \quad (4)$$

Залежність провідності транзисторної структури з від'ємним на основі НЕМТ транзисторів від напруг $U_{к}$ і $U_{ж}$ описується рівнянням (5).

$$G_z^{(-)}(U_{ж}, U_{к}) = \frac{\partial I}{\partial U_{ж}} = \frac{1}{R2 + R3} + \frac{I_0}{U_0} (\text{th} M)^{-1} [1 - P(U_{ж}, U_{к})] \cdot \left\{ 2SR1 \left[\frac{R3}{R2 + R3} - 2bU_{ж} \left(\frac{R3}{R2 + R3} \right)^2 \right] \text{th} \left[M \frac{U_{ж}/U_0}{1 - P(U_{ж}, U_{к})} \right] + \frac{M[1 - P(U_{ж}, U_{к})]}{ch^2 \left[M \frac{U_{ж}/U_0}{1 - P(U_{ж}, U_{к})} \right]} \cdot \frac{2[1 - P(U_{ж}, U_{к})] - SR1 - 1}{[1 - P(U_{ж}, U_{к})]^2} \right\}. \quad (5)$$

Рівняння (3) з похибкою не більше 10 % апроксимує статичні ВАХ транзисторної структури з від'ємним опором на основі НЕМТ транзисторів. Порівнюючи запропонований спосіб апроксимації з відомими нелінійними моделями статичних характеристик НЕМТ транзисторів [18, 19] слід відзначити простоту і зручність у його застосуванні для аналізу радіотехнічних пристроїв на основі НЕМТ транзисторів з порівняно незначною похибкою.

На основі отриманих рівнянь (1)–(5), що описують статичні характеристики транзисторної структури з від'ємним опором на рис. 1, можна провести моделювання параметрів НВЧ генератора у відповідності з методикою [20]. При цьому слід врахувати, що розробку і дослідження пристроїв на основі НЕМТ транзисторів з використанням рівнянь (1)–(5) можна виконувати на частотах до 5...10 % від граничної частоти обраних транзисторів. На вищих частотах необхідно враховувати частотні властивості НЕМТ транзисторів.

Дослідження НВЧ генератора

На рис. 3 показано експериментально отримані залежності зміни частоти генерації від напруг $U_{к}$ і $U_{ж}$. Вихідний сигнал генератора — синусоїдальний. Під час підстроєння генератора шляхом зміни напруг $U_{к}$ і $U_{ж}$ джерел живлення коефіцієнт нелінійних спотворень вихідного сигналу генератора змінюється в межах 0,2...1 %. З рис. 3 видно, що відносна нестабільність частоти генерації по колах живлення більша для джерела напруги $U_{к}$.

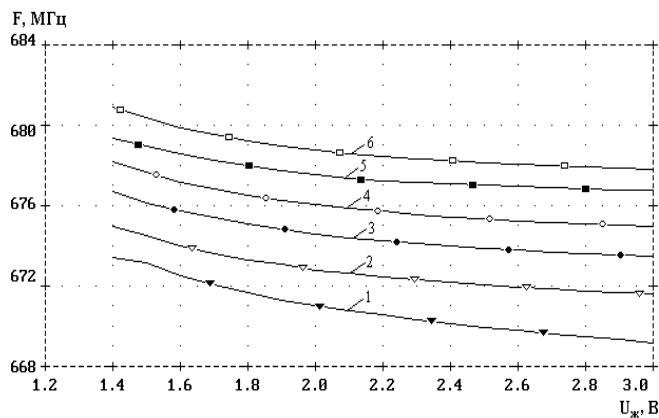


Рис. 3. Графіки залежності зміни частоти генерації від напруги живлення для різних значень напруги керування: 1) $U_{к} = 0,2$ В, 2) $U_{к} = 0,25$ В, 3) $U_{к} = 0,3$ В, 4) $U_{к} = 0,35$ В, 5) $U_{к} = 0,4$ В, 6) $U_{к} = 0,45$ В

Аналіз фізичних процесів в транзисторних структурах з від'ємним опором виконують за допомогою еквівалентних схем [21]. Еквівалентна схема генератора, що побудована на основі малосигнальної лінійної моделі НЕМТ транзистора, зображена на рис. 4 [19]. На рис. 4 взяті такі позначення: R_g — опір затвора, R_{gs} — опір затвор-витік, R_d — опір стоку, R_s — опір витоку, G_{ds} — провідність каналу «стік-витік», C_{gs} — ємність затвор-витік, C_{gd} — ємність затвор-стік, C_{ds} — ємність стік-витік, I_{gm} — джерело струму, кероване напругою затвор-витік. C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 — паразитні ємності корпусу, L_g, L_d і L_s — паразитні індуктивності виводів. Індеси V1 і V2 відповідно означають позначення транзистора на рис. 1.

Визначення параметрів елементів малосигнальної моделі НЕМТ транзисторів здійснюється на основі системи Y-параметрів шляхом перерахування елементів системи S-параметрів, які наведені в довідкових матеріалах.

$$C_{gd} = -\frac{1}{\omega} I_m(Y_{12}), \quad (6)$$

$$C_{ds} = \frac{1}{\omega} \{ I_m(Y_{22}) + I_m(Y_{12}) \}, \quad (7)$$

$$C_{gs} = \frac{1}{\omega} \{ I_m(Y_{11}) + I_m(Y_{12}) \}, \quad (8)$$

$$C_{ds} = \text{Re}(Y_{22}), \quad (9)$$

$$R_{gs} = \frac{1 - \sqrt{1 - 4 \text{Re}(Y_{11}) / C_{gs} \omega}}{2 \text{Re}(Y_{11})}, \quad (10)$$

$$g_v = \sqrt{g_{mr}^2 + g_{mi}^2}, \quad (11)$$

$$g_{mr} = \text{Re}(Y_{21}) - I_m(Y_{21}) R_{gs} C_{gs} \omega - C_{gd} C_{gs} \omega^2 R_{gs}, \quad (12)$$

$$g_{mi} = \text{Re}(Y_{21}) R_{gs} C_{gs} \omega + I_m(Y_{21}) + C_{gd} \omega. \quad (13)$$

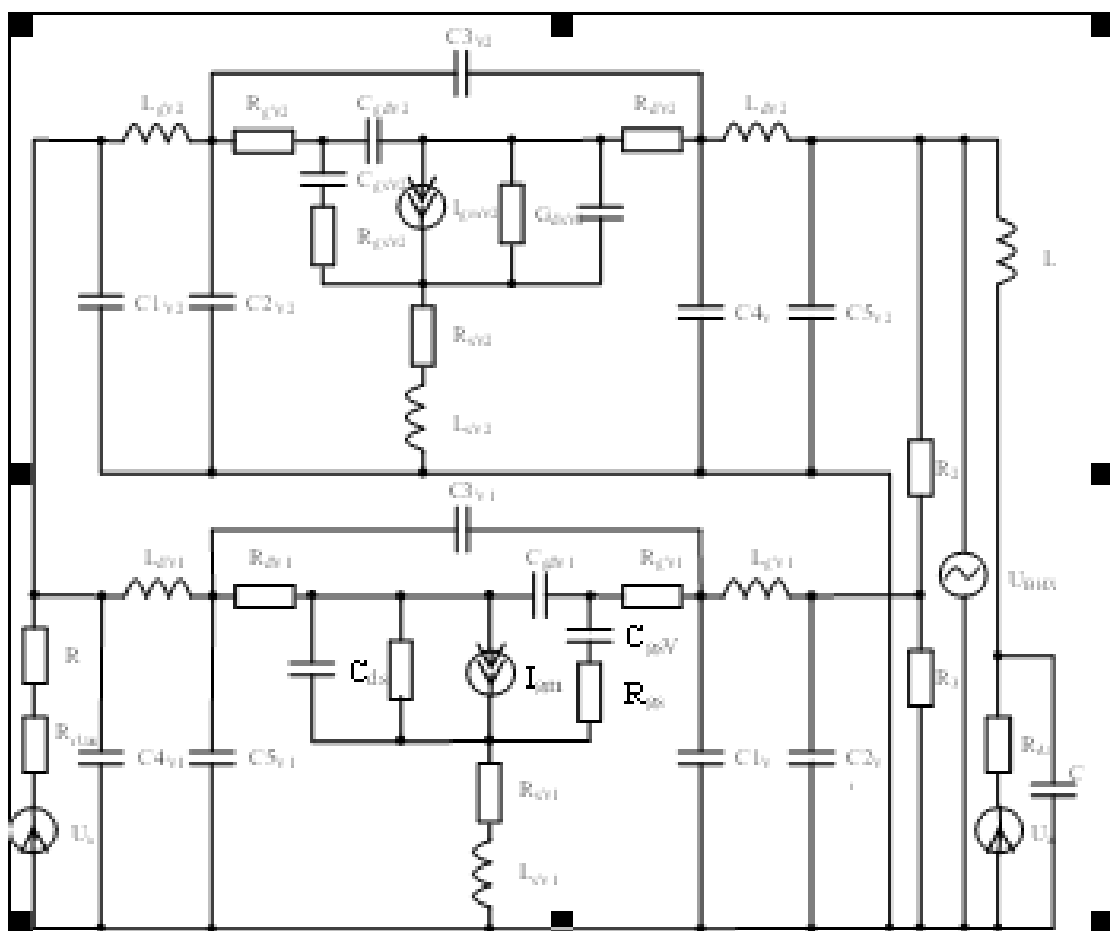


Рис. 4. Еквівалентна схема НВЧ генератора на основі двох НЕМТ транзисторів

Запропоновану еквівалентну схему НВЧ генератора на основі НЕМТ транзисторів можна використовувати в широкому діапазоні частот від 1...40 ГГц [19]. Подальший аналіз роботи генератора на основі еквівалентної схеми на рис. 4 можна проводити одним з відомих методів розрахунку, зокрема методом контурних струмів [21].

На рис. 5 показано графічні залежності активної і на рис. 6 реактивної складової повного опору транзисторної структури, що розраховані за [2, 21].

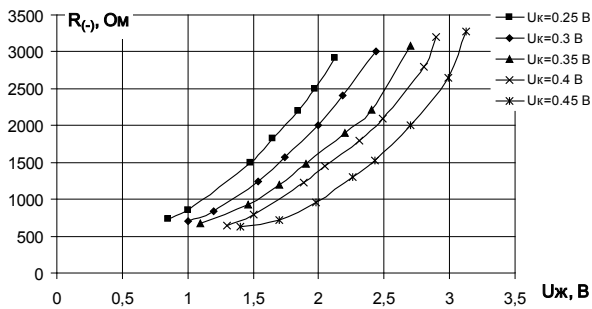


Рис. 5. Графіки залежностей активної складової від'ємного опору транзисторної структури від напруг U_k і U_j

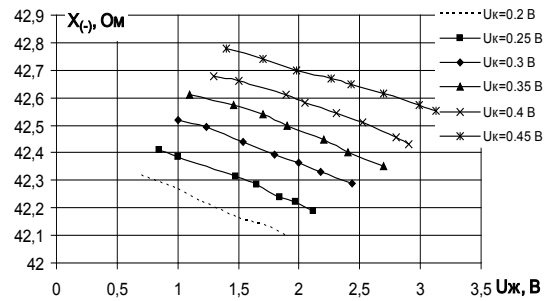


Рис. 6. Графіки залежностей реактивної складової від'ємного опору транзисторної структури від напруг U_k і U_j

Основним недоліком роботи НВЧ генератора на основі транзисторної структури з від'ємним опором є залежність параметрів НЕМТ транзисторів від температури. На рис. 7 показано графіки залежності частоти генерації від температури. Підвищити стабільність частоти генерації можна шляхом введення до схеми генератора струмового дзеркала. При цьому стабільність частоти коливань збільшиться приблизно на порядок [13].

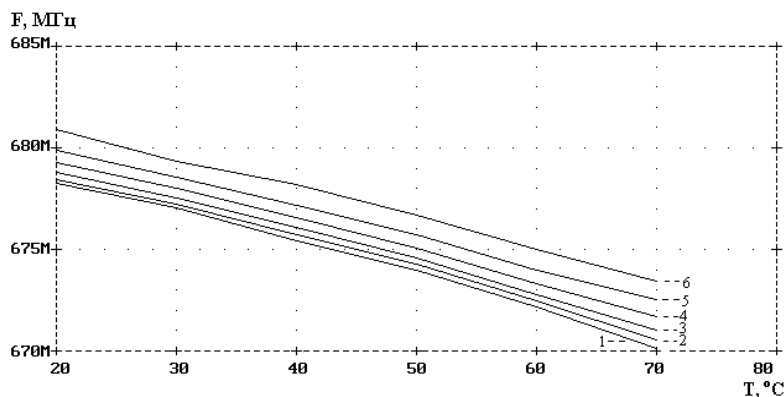


Рис. 7. Температурна залежність частоти генерації для різних значень напруги U_k :
1) $U_k = 0,2$ В, 2) $U_k = 0,25$ В, 3) $U_k = 0,3$ В, 4) $U_k = 0,35$ В, 5) $U_k = 0,4$ В, 6) $U_k = 0,45$ В

З рис. 3 можна визначити, що відносна нестабільність частоти генерації, становить $\delta f = 0,65 \cdot 10^{-4}$. Температурний коефіцієнт частоти генератора (рис. 7) $TKЧ = 2,1 \cdot 10^{-5}$ [1/°C]. Отримані значення задовольняють вимоги, які висуваються до НВЧ генераторів [22].

Висновки

1. Запропоновано і досліджено електричну схему НВЧ генератора на основі транзисторної структури з від'ємним опором.
2. Отримані рівняння (3)...(5) утворюють математичну модель статичних характеристик транзисторної структури з від'ємним опором на основі двох НЕМТ транзисторів.
3. Еквівалентна схема на рис. 4 і рівняння (6)...(13) утворюють модель НВЧ генератора для аналізу на змінному струмі.
4. Висока стабільність роботи пристрою в широкому діапазоні напруг живлення та напруг керування і малий коефіцієнт нелінійних спотворень генерованого сигналу дозволяє використовувати його в якості опорного НВЧ генератора.

5. Запропоновану схему генератора на транзисторній структурі з від'ємним опором можна в подальшому використати для розробки генератора НВЧ електричних коливань з широкою перебудовою частоти генерації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Філінюк М. А. Теоретичні основи негatronіки: Навчальний посібник. — Вінниця: ВДТУ, 2002. — 105 с.
2. Осадчук В. С., Осадчук О. В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем: Монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. — 275 с.
3. Осадчук А. В. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением. — Вінниця: Континент, 1998. — 130 с.
4. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором: Монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. — 303 с.
5. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Вербицький В. Г. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі: Монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. — 195 с.
6. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Крилик Л. В. Сенсори вологості: Монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. — 208 с.
7. Пат. 24375А Україна, МКИ H03B7/00. Електрично керований генератор гармонійних коливань // Осадчук В. С., Осадчук О. В.; Опубл. 1998, Бюл. № 5.
8. Пат. 34249А Україна, МКИ H03B7/00. Напівпровідниковий генератор електричних коливань // Осадчук В. С., Осадчук О. В., Ковальчук О. М., Семеренко М. М.; Опубл. 2001, Бюл. № 1.
9. Пат. 40298А Україна, МКИ H03B7/00. Генератор електричних коливань // Осадчук В. С., Осадчук О. В.; Опубл. 2001, Бюл. № 6.
10. Пат. 41665А Україна, МКИ H03B7/00. Мікроелектронний генератор електричних коливань // Осадчук В. С., Осадчук О. В.; Опубл. 2001, Бюл. № 8.
11. Деклараційний патент України на корисну модель №7411 по класу H03B7/00. Генератор з електричним регулюванням частоти генерації // Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О.; Опубл. 2005, Бюл. № 6.
12. А. с. № 1695486 СССР МКИ H03B7/02. Генератор синусоидальных колебаний // Ильин О. П.; Опубл. 1991, Бюл. № 44.
13. Арефьев А. А., Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н. Эквиваленты приборов с отрицательным дифференциальным сопротивлением. — М.: Знание, 1987. — 64 с.
14. Молотков В. И., Потапов Е. И. Исследования ВАХ маломощных полевых транзисторов и лямбда-диодов и расчёт амплитуд автогенератора на лямбда-диоде // Радиоэлектроника, 1991. — № 11. — С. 108—110.
15. Семенов А. О. Апроксимація ВАХ двоелектродної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором // Труды МНТК «Приборостроение 2004». — Вінниця—Ялта, 2004. — С. 49—53.
16. Семенов А. О., Осадчук О. В. Апроксимація сімейства статичних ВАХ лямбда-транзистора // Праці VIII МНПК «Наука і освіта '2005». Том 62. Техніка. — Дніпропетровськ: Наука і освіта, — 2005. — С. 39—42.
17. Дьяконов В. П., Смердов В. Ю., Фролков О. А. Нелинейная аппроксимация передаточных и выходных характеристик мощных МДП транзисторов. Полупроводниковая электроника в технике связи / Под ред. И. Ф. Николаевского. Вып. 25, 1985. — С. 163—167.
18. Angelov I., Rorsman N., Stenarson J. et al. An empirical table-based FET model // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique. — 1999. — Vol. 47, — № 12. — P. 2350—2356.
19. Емцев П. А. Моделирование транзисторов с высокой подвижностью электронов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2003. — № 6. — С. 20—26.
20. Осадчук О. В., Семенов А. О. Математичне моделювання генератора НВЧ на основі транзисторної структури з від'ємним опором // Вісник Хмельницького національного університету. — 2005. — Т.2. — № 1. — С. 256—259.
21. Осадчук О. В., Семенов А. О. Дослідження мікроелектронного широкодіапазонного генератора на транзисторній структурі з від'ємним опором // Вісник Хмельницького національного університету. — 2005. — Т.1. — № 1. — С. 154—160.
22. Колосов М. В., Перегонов С. А. СВЧ генераторы и усилители на полупроводниковых приборах. — М.: Сов. радио, 1974. — 80 с.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» (2—5. 07.05)

Надійшла до редакції 11.07.05
Рекомендована до друку 21.07.05

Осадчук Олександр Володимирович — завідувач кафедри; **Семенов Андрій Олександрович** — аспірант.

Кафедра радіотехніки, Вінницький національний технічний університет