

теплотехнического расчета и энергетического баланса позволит обеспечить ресурсосбережение, экономия энергозатрат и оптимизировать необходимый технологический процесс.

Литература

1. Соколов Н. А. Литье в оболочковые формы. – М: Машиностроение, 1978. – 461с.
2. Карманов В. В. Теплотехнический расчет и энергетический баланс рабочего органа прессы-экструдера. Херсон, 1997.
3. Карманов В. В. Универсальные регулированные винтовые рабочие органы. Херсон: ХИИ, 1994 г. - 41 с.

Надійшла 21.9.2009 р.

УДК 621.382.2

А.О. СЕМЕНОВ, О.В. ОСАДЧУК, К.О. КОВАЛЬ
Вінницький національний технічний університет

КВАЗІЛІНІЙНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОМНОЖУВАЧА ЧАСТОТИ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНОЇ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

В роботі запропоновано квазілінійну математичну модель помножувача частоти аналогових сигналів на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Квазілінійна математична модель побудована на основі степеневої апроксимації вольт-амперних характеристик біполярної транзисторної структури та квазілінійної схеми-заміщення у режимах подвоєння та потроєння частоти.

In this work it is proposed a quasi-linear mathematical model of an analog signal frequency multiplier on a base of bipolar transistor structure with negative resistance. The quasi-linear mathematical model is developed on a base of power approximation of U/I characteristics of the bipolar transistor structure and a quasi-linear substitution circuit in frequency doubling and tripling modes.

Ключові слова: помножувач частоти аналогових сигналів, квазілінійна математична модель.

Вступ

Помножувачами частоти є радіотехнічні пристрої для створення дискретної множини частот, які широко використовуються як функціональні вузли радіовимірвальних приладів, систем діагностування і автоматичного керування, пристроїв формування і оброблення радіосигналів тощо [1]. Перспективним напрямком побудови помножувачів частоти ВЧ і НВЧ діапазонів є використання реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором [2-5]. Проведені дослідження у роботах [2,3] показали, що помножувачі частоти на основі транзисторних структур з від'ємним опором (ТСВО) діапазонів ВЧ і НВЧ у порівнянні з помножувачами частоти на основі генераторів зовнішнього збудження мають покращенні техніко-експлуатаційні характеристики. Проте, в порівнянні з останніми, для помножувачів частоти на основі ТСВО немає узагальноної методики теоретичних досліджень. У статті частково вирішена ця актуальна наукова задача і запропонована квазілінійна математична модель помножувача частоти на основі біполярної ТСВО, яка може бути покладена за основу для аналізу фізичних процесів у помножувачах частоти аналогових сигналів інших типів ТСВО.

Метою даної роботи є розробка квазілінійної моделі помножувача частоти аналогових сигналів на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором.

Розробка квазілінійної математичної моделі помножувача частоти на основі біполярної ТСВО

На рис. 1 представлено електричну схему помножувача частоти ВЧ аналогових сигналів на біполярній ТСВО (рис. 1,а) [5]. Фотографію помножувача частоти, який складається із біполярних транзисторів BFT92 і BFR93 та виготовлений по гібридній технології, подано на рис. 1,б.

Помножувач частоти структурно складається з емітерного повторювача на біполярному транзисторі VT1 і резисторів R_1 , R_2 і R_3 , біполярної ТСВО на основі транзисторів VT2 і VT3, а також послідовного коливального контуру з котушки L_1 та реактивної складової повного опору ТСВО на електродах колектор-емітер VT3. Помножувач частоти на основі біполярної ТСВО працює таким чином [5]. Сигнал з частотою ω_1 надходить на вхід емітерного повторювача на біполярному транзисторі VT1. Опори подільника напруги R_1 і R_2 , а також R_3 вибираються з умови розташування робочої точки на лінійній ділянці вихідних статичних ВАХ біполярного транзистора VT1 та забезпечення половини напруги живлення на емітері VT1. Емітерний повторювач використовується для узгодження опорів попереднього каскаду з біполярною транзисторною структурою, повний опір якої складається з від'ємного опору активної складової і реактивної складової емнісного характеру. Коливальний контур помножувача налаштований на резонансну частоту $\omega_p = p\omega_1$, що дозволяє виділити n -ту гармонічну складову з суми гармонічних сигналів. За рахунок компенсації від'ємним опором біполярної ТСВО у паралельному коливальному контурі рівень вихідного сигналу є набагато більшим за рівень відповідної n -ої складової, що можна характеризувати еквівалентним коефіцієнтом

резонансного підсилення по напрузі $K_{\text{рез}}$. Вибір положення робочої точки на статичній ВАХ біполярної ТСВО здійснюється за допомогою зміни опорів резисторів R_1 , R_2 і R_3 при умові роботи емітерного повторювача у лінійному режимі. Еквівалентна схема помножувача частоти представлена на рис. 2.

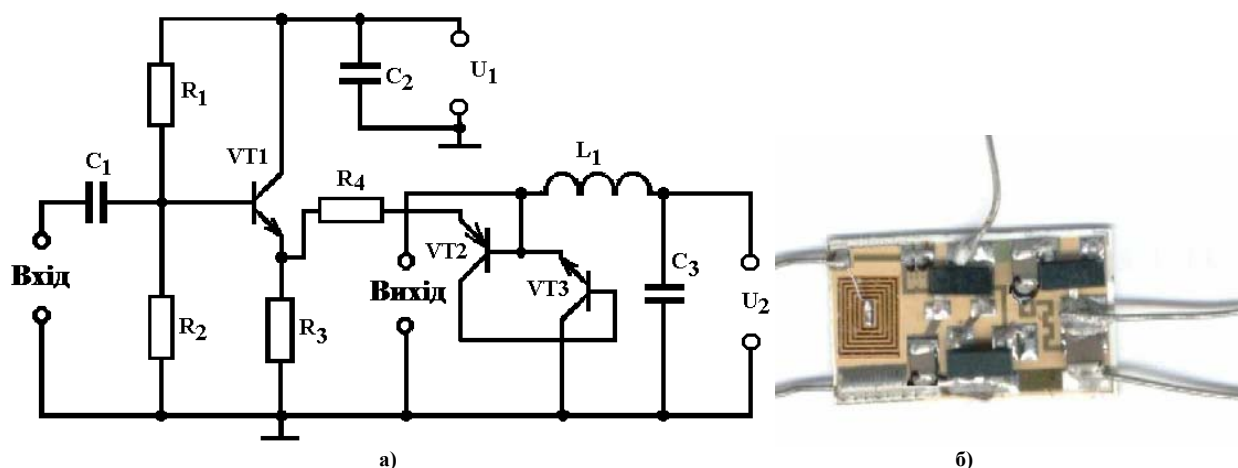


Рис. 1. Електрична схема помножувача частоти на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором

На рис. 2 прийняті такі позначення: БТСВО – нелінійний опір, що враховує нелінійні властивості біполярної транзисторної структури з від'ємним опором; E , R_i – параметри джерела сигналу, що створює струм з частотою ω_1 ; $L_{\text{екв}}$, $C_{\text{екв}}$, $g_{\text{екв}}$ – елементи коливного контуру, який налаштований на частоту $\omega_p = \omega\omega_1$.

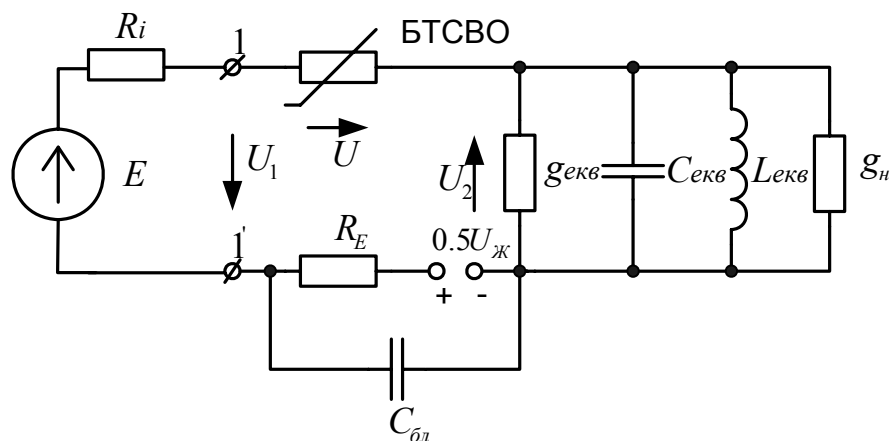


Рис. 2. Еквівалентна схема помножувачів частоти на основі транзисторних структур з від'ємним опором

Аналіз режимів роботи помножувача від зміни вхідної частоти та режимів живлення потребує отримання аналітичних залежностей ВАХ, значення від'ємного опору, резонансного коефіцієнту передачі по напрузі транзисторної структури від вказаних вище параметрів, що складає квазілінійну математичну модель помножувача частоти, яка описує фізичні процеси, які відбуваються у помножувачі частоти.

Для апроксимації статичної ВАХ помножувача частоти на біполярній ТСВО використаємо запропонований в роботі [6] апроксимуючий степеневий поліном

$$i_T(u) = (I_S + gU_S - hU_S^3) - (g - 3hU_S^2)u - 3hU_S u^2 + hu^3, \quad (1)$$

де U_S, I_S – координати середини спадаючої ділянки вольт-амперної характеристики біполярної транзисторної структури з від'ємним опором; g, h – коефіцієнти апроксимації, які визначаються з геометричної форми статичної ВАХ ТСВО.

Графік апроксимованої статичної ВАХ помножувача частоти на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором представлено на рис. 3.

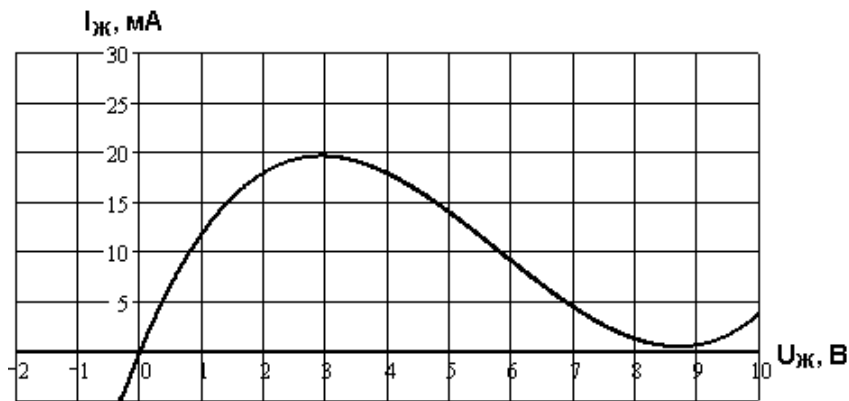


Рис. 3. Графік статичної ВАХ помножувача частоти на біполярній ТСВО, апроксимованої поліномом 3-го степеня

Величини I_S , U_S , g , і h рівняння апроксимації (1) ВАХ біполярної ТСВО визначаються з системи лінійних алгебраїчних рівнянь (2)- (5) за експериментально отриманими точками початку (U_{\max} , I_{\max}) і кінця (U_{\min} , I_{\min}) ділянки від'ємного опору [6]

$$U_{\max} = U_S - \sqrt{\frac{g}{3h}}, \quad (2)$$

$$U_{\min} = U_S + \sqrt{\frac{g}{3h}}, \quad (3)$$

$$I_{\max} = I_S + g\sqrt{\frac{g}{3h}} - h\left(\sqrt{\frac{g}{3h}}\right)^3, \quad (4)$$

$$I_{\min} = I_S - g\sqrt{\frac{g}{3h}} + h\left(\sqrt{\frac{g}{3h}}\right)^3. \quad (5)$$

Експериментальні дослідження показали, що такий помножувач ефективно працює в режимах подвоєння і потроєння частоти. При цьому, в режимі подвоєння робоча точка розташовується поблизу максимуму статичної ВАХ, а в режимі потроєння робоча точка розташовується на середині ділянки від'ємного опору

Режим подвоєння частоти

Для режиму подвоєння робоча точка розташовується поблизу максимуму статичної ВАХ біполярної ТСВО. В режимі подвоєння частоти амплітуди складових струму біполярної транзисторної структури з від'ємним опором з частотами ω_1 і $\omega_2 = 2\omega_1$ визначаються за допомогою методики [7], яка апробована у [2,3]

$$I_1 = (3hU_S^2 - g)U_1 - 3hU_SU_1U_2, \quad (6)$$

$$I_2 = (3hU_S^2 - g)U_2 - \frac{3}{2}hU_SU_1^2. \quad (7)$$

На підставі еквівалентної схеми на рис. 2 можна записати рівняння амплітуди напруги другої гармонічної складової

$$U_2 = -\frac{I_2}{g_n + g_{екв}} = \frac{3}{2} \frac{hU_SU_1^2}{3hU_S^2 - g + g_n + g_{екв}}. \quad (8)$$

Роботу помножувача частоти на ділянці від'ємного опору, на якій спостерігається часткова компенсація активних втрат (регенеративний підсилювач), можна характеризувати резонансним коефіцієнтом підсилення, величина якого визначається з рівняння

$$K_{ном} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{3}{2} \frac{hU_SU_1}{3hU_S^2 - g + g_n + g_{екв}}. \quad (9)$$

Вхідна провідність еквівалентної схеми на рис. 2 праворуч точок 1-1' визначається як

$$g_{вх} = \frac{I_1}{U_1} = 3hU_S^2 - g - 3hU_SU_2 = 3hU_S^2 - g - \frac{9}{2} \frac{h^2U_S^2U_1^2}{3hU_S^2 - g + g_n + g_{екв}}. \quad (10)$$

Резонансний коефіцієнт передачі по напрузі вхідного кола помножувача (рис. 2)

$$K_{ex} = \frac{g_c}{g_c + g_{ex}} = \frac{g_c}{g_c + 3hU_S^2 - g - \frac{9}{2} \frac{h^2 U_S^2 U_1^2}{3hU_S^2 - g + g_y + g_{екв}}}. \quad (11)$$

Умови стійкої роботи помножувача частоти визначаються співвідношеннями

$$\begin{aligned} 3hU_S^2 - g + g_H + g_{екв} &\geq 0, \\ g_c + 3hU_S^2 - g - \frac{9}{2} \frac{h^2 U_S^2 U_1^2}{3hU_S^2 - g + g_H + g_{екв}} &\geq 0, \\ g_c &\geq 3hU_S^2 - g. \end{aligned} \quad (12)$$

Режим потроєння частоти

У режимі потроєння частоти робоча точка вибирається посередині спадаючої ділянки статичної ВАХ біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Визначимо амплітуди складових струму транзисторного аналогу лямбда-діода з частотами ω_1 і $\omega_3 = 3\omega_1$

$$I_1 = (3hU_S^2 - g)U_1 + \frac{3}{4}hU_1(U_1^2 + U_1U_3 + 2U_3^2) \approx (3hU_S^2 - g)U_1 + \frac{3}{4}hU_1^2(U_1 + U_3), \quad (13)$$

$$I_3 = (3hU_S^2 - g)U_3 + \frac{1}{4}h(U_1^3 + 6U_1^2U_3 + 3U_3^3) \approx (3hU_S^2 - g)U_3 + \frac{1}{4}h(U_1 + 6U_3)U_1^2. \quad (14)$$

Враховуючи, що $U_3 = -\frac{I_3}{g_H + g_{екв}}$, зі співвідношення (14) можна отримати

$$U_3 = -\frac{hU_1^3}{2\left[3hU_1^2 + 2(3hU_S^2 - g + g_{екв} + g_H)\right]}. \quad (15)$$

Резонансний коефіцієнт передачі помножувальної частини пристрою праворуч клем 1-1' на рис. 2.

$$K_{ном} = \frac{U_3}{U_1} = -\frac{hU_1^2}{2\left[3hU_1^2 + 2(3hU_S^2 - g + g_{екв} + g_H)\right]}. \quad (16)$$

Вхідна провідність частини схеми праворуч точок 1-1' (рис. 2)

$$g_{ex} = \frac{I_1}{U_1} = 3hU_S^2 - g + \frac{3}{4}hU_1(U_1 + U_3). \quad (17)$$

Умови стійкості помножувача частоти у режимі потроєння, як і в режимі подвоєння частоти визначаються співвідношеннями (12).

Дослідження стабільності характеристик помножувача частоти на основі БТСВО

Стабільність параметрів помножувачів частоти на основі біполярної ТСВО визначаються сталістю напруги джерела живлення і температури оточуючого середовища. У загальному випадку приріст довільного параметра N помножувача частоти на основі біполярної ТСВО можна записати у вигляді [7]

$$dN = \frac{\partial N}{\partial U_{Ж}} dU_{Ж} + \frac{\partial N}{\partial T} dT. \quad (18)$$

Параметр N має складну залежність від $U_{Ж}$ і T . Зміна цих величин призводить до зміни параметрів G_0 , G_K , C_0 і C_K еквівалентної схеми біполярної ТСВО [7]

$$\frac{\partial N}{\partial U_{Ж}} = \frac{\partial N}{\partial G_0} \frac{\partial G_0}{\partial U_{Ж}} + \frac{\partial N}{\partial G_K} \frac{\partial G_K}{\partial U_{Ж}} + \frac{\partial N}{\partial C_0} \frac{\partial C_0}{\partial U_{Ж}} + \frac{\partial N}{\partial C_K} \frac{\partial C_K}{\partial U_{Ж}}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial N}{\partial T} = \frac{\partial N}{\partial G_0} \frac{\partial G_0}{\partial T} + \frac{\partial N}{\partial G_K} \frac{\partial G_K}{\partial T} + \frac{\partial N}{\partial C_0} \frac{\partial C_0}{\partial T} + \frac{\partial N}{\partial C_K} \frac{\partial C_K}{\partial T}. \quad (20)$$

При розрахунку нестабільності помножувача частоти на основі біполярної ТСВО необхідно врахувати вплив нестабільності напруги джерела живлення і температури на середнє значення провідності G_0 і диференційної провідності G_K k -ї гармоніки за допомогою рівняння (3) з врахуванням (1), (2), (5)- (8). Дослідження впливу напруги живлення і температури на C_0 і C_K можна здійснити за допомогою результатів експериментальних досліджень [8].

Висновки

В роботі запропоновано квазілінійну модель помножувача частоти аналогових сигналів на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. На основі запропонованої степеневої апроксимації

статичних характеристик біполярної транзисторної структури і розробленої еквівалентної схеми отримано аналітичні співвідношення для визначення параметрів помножувача в режимах подвоєння і потроєння частоти. Результати теоретичних досліджень придатні для застосування при дослідженні помножувача частоти на біполярній ТСВО у широкому діапазоні частот. Розроблену квазілінійну математичну модель помножувача частоти можна поширити для аналізу помножувачів частоти на інших видах транзисторних структур з від'ємним опором.

Література

1. Дорожовець М. Основи метрології та вимірювальної техніки. / Дорожовець М., Мотало В., Стадник Б., та ін.: у двох томах. – Львів: 2005. – 656 с.
2. Семенов А.О. НВЧ помножувач частоти на основі транзисторної структури з від'ємним опором / Семенов А.О., Осадчук О.В., Коваль К.О // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 2008. – № 1 (29). – С. 48-52.
3. Семенов А.О. Помножувач частоти на основі польової транзисторної структури з від'ємним опором / Семенов А.О., Осадчук О.В., Коваль К.О // Вісник Хмельницького національного університету. – Технічні науки. – Хмельницький. – 2008. – № 3. – Т.1. – С. 139– 144.
4. Патент на корисну модель № 38506 по класу Н03В19/00. Електрично-керований помножувач частоти / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, А.О. Семенов, К.О. Коваль. – Реєстр. номер заявки u 2008 10040. Дата подання 04.08.2008 р.; опубл. 12.01.2009. – Бюл. № 1. – 5 с.
5. Патент на корисну модель № 38347 по класу Н03В19/00. Мікроелектронний електрично керований помножувач частоти / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, А.О. Семенов, К.О. Коваль. – Реєстр. номер заявки u 2008 12443. Заявл. 23.10.2008.; Опубл. 12.01.2009. – Бюл. № 1. – 5 с.
6. Семенов А.О. Узагальнене диференційне рівняння ГЕК на основі ТСВО / А. О. Семенов // Матеріали другої Міжнародної науково-технічної конференції “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування” (СПРТП-2007). – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – С.77-78.
7. Акчурина Э.А., Рудь В.В., Спирина В.Я. Туннельные диоды в технике связи. – М.: Связь, 1971. – 136 с.
8. Семенов А.О. Електрично керована еквівалентна ємність на основі транзисторної структури з від'ємним опором / Семенов А.О., Осадчук О.В., Коваль К.О // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. – Севастополь: СНУЯЕтаП, 2008. – Вип. 1 (25). – С. 159-164.

Надійшла 12.9.2009 р.