

УДК 621.382

О. В. Осадчук, д. т. н., проф.; А. О. Семенов, к. т. н.; К. О. Коваль, к. т. н.**БАГАТОЧАСТОТНИЙ ГЕНЕРАТОР НА ОСНОВІ ЄМНІСНОГО ЕФЕКТУ ПОЛЬОВОЇ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**

Проведено дослідження генератора багаточастотних сигналів зі складною спектральною характеристикою. Отримано математичну модель, проведено експериментальні дослідження та чисельне моделювання багаточастотного генератора на основі ємнісного ефекту польової транзисторної структури з від'ємним опором.

Ключові слова: математична модель, транзисторна структура, від'ємний опір, багаточастотний генератор, еквівалентна ємність.

Актуальність

Актуальною задачею сучасної радіотехніки є розробка та дослідження генераторів складних багаточастотних сигналів із заданою спектральною характеристикою, або шумоподібних [1]. Такі генератори застосовуються для підвищення завадозахищеності систем радіозв'язку [2], а також для передавання дискретної інформації з розширенням спектру за допомогою хаотичних і багаточастотних сигналів [3]. У вимірювальній техніці багаточастотні генератори застосовують для дослідження частотних характеристик чотириполосників і групового часу запізнення абонентських ліній зв'язку.

Традиційно багаточастотні генератори складаються з лінійного коливального контуру, взаємопов'язаного з ним нелінійного коливального контуру, а також підсилювача з обмежувальною характеристикою, який забезпечує самозбудження системи [4]. У нелінійному коливальному контурі генератора як змінний реактивний елемент традиційно використовується бар'єрна ємність р-п-переходу (зокрема варикапу).

Інший підхід до побудови багаточастотних генераторів полягає у використанні ємнісного ефекту транзисторних структур з від'ємним опором [5]. Це дозволяє на одному активному елементі здійснювати збудження електричних коливань і керувати їх частотою. Такий підхід суттєво спрощує конструкторське виконання багаточастотних генераторів і покращує їхні функціональні та економічні показники.

Метою роботи є розробка математичної моделі багаточастотного генератора на основі ємнісного ефекту польової транзисторної структури з від'ємним опором та її експериментальна перевірка.

Опис роботи багаточастотного генератора

Електрична схема багаточастотного генератора на основі польової транзисторної структури з від'ємним опором (ПТСВО), розробленою авторами, представлена на рис. 1 [5]. Нелінійний коливальний контур утворено реактивним складником повного опору транзисторної структури на електродах стік-витік польового транзистора VT2 та котушки L1, а лінійний – з елементів L1 і C3.

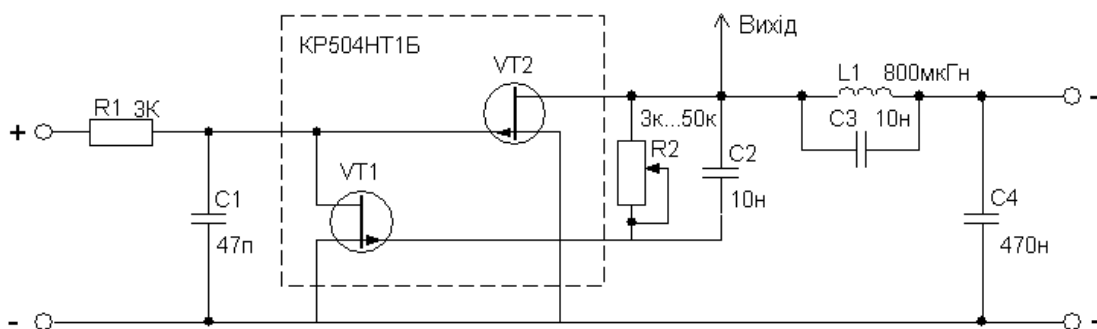


Рис. 1. Електрична схема багаточастотного генератора на основі польової транзисторної структури з від'ємним опором

Принцип дії генератора такий [5]: у номінальному положенні повзунка змінного резистора R2 еквівалентна ємність польової транзисторної структури дорівнює ємності конденсатора C3, а тому власні резонансні частоти лінійного і нелінійного коливних контурів однакові, що призводить до генерації гармонічного коливання. Якщо змінюється положення повзунка резистора R2, то змінюється еквівалентна ємність польової транзисторної структури, що призводить до зміни резонансної частоти нелінійного контуру. При цьому відхилення від резонансної частоти лінійного контуру незначне, тому в генераторі здійснюється биття двох близьких за частотою коливань. Частоти цих коливань потрапляють всередину смуги пропускання лінійного контуру L1 – C3, і спектр вихідного сигналу складається з двох гармонік, що зумовлює двочастотний режим генератора. Більша зміна опору R2 викликає різку зміну ємнісного складника повного опору ПТЦСВО, що зумовлює значне відхилення резонансних частот лінійного й нелінійного коливальних контурів. Унаслідок значної нелінійності динамічної вольт-амперної характеристики (ВАХ) активного елемента генератора на польових транзисторах VT1 – VT2 спектр вихідного сигналу матиме велику кількість гармонічних складників, які є продуктами перехресних комбінацій двох генерованих коливань з різними частотами.

Математична модель багаточастотного генератора

Еквівалентна схема багаточастотного генератора на ПТЦСВО має вигляд, зображений на рис. 2, причому під нелінійним опором розуміємо джерело струму, що враховує вплив першої гармоніки струму активного елемента генератора на лінійний коливальний контур [6]. На рис. 2 прийнято такі позначення: $i_T(u)$ – керуване джерело струму, яке являє собою залежність струму крізь транзисторну структуру з від'ємним опором від напруги (визначається режимом живлення генератора); $C_{екв}$, $L_{екв}$ і $R_{екв}$ – відповідно еквівалентні ємність, індуктивність і опір активних втрат коливального контура генератора.

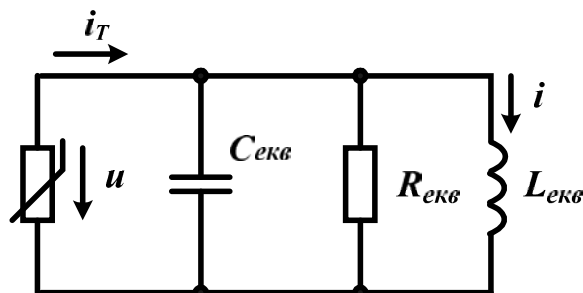


Рис. 2. Еквівалентна схема багаточастотного генератора на польовій транзисторній структурі

Диференціальні рівняння для струму індуктивності і напруги на контурі в реальному часі мають вигляд

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{1}{L}u, \\ \frac{du}{dt} = \frac{1}{C} \left[i_B - i - \frac{u}{R_{екв}} \right]. \end{cases} \quad (1)$$

Номінальна частота багаточастотного генератора на ПТСВО в одночастотному режимі близька до резонансної частоти лінійного коливального контура генератора

$$\omega_{лин} = \omega_{нелін} \approx \omega_0, \quad (2)$$

де $\omega_{нелін}$ – резонансна частота нелінійного коливального контура.

Перетворимо систему диференціальних рівнянь (1) в нормованому (безрозмірному) часі

$$t_H = \omega_0 t, \quad (3)$$

де $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{екв} C_{екв}}}$ – резонансна частота лінійного коливального контура, з урахуванням співвідношень вторинних параметрів цього контура.

$$\rho = \omega_0 L_{екв} = \frac{1}{\omega_0 C_{екв}} = \sqrt{\frac{L_{екв}}{C_{екв}}}, \quad (4)$$

$$Q = \frac{\rho}{R} = \omega_0 C_{екв} R. \quad (5)$$

За умови (2) система (1) перетвориться в диференціальне рівняння другого порядку виду [6]

$$\frac{d^2 i}{dt_H^2} + 1 = i_T - \frac{1}{Q} \frac{di}{dt} + \nu i, \quad (6)$$

де ν – відносне розстроювання резонансної частоти нелінійного коливального контура щодо резонансної частоти лінійного коливального контура генератора, що описується співвідношенням

$$\nu = \frac{\omega_{лин}^2 - \omega_0^2}{\omega_0^2} \approx \frac{2(\omega_{лин} - \omega_0)}{\omega_0}. \quad (7)$$

Рішення диференціального рівняння (6) можна подати у вигляді [6]

$$i = I_m \sin(t_H + \phi) = I_m \sin \psi, \quad (8)$$

$$\frac{di}{dt_H} = I_m \cos(t_H + \phi) = I_m \cos \psi. \quad (9)$$

Диференціальні рівняння встановлення амплітуди I_m і фази ϕ генерованих коливань мають вигляд [6]

$$\frac{dI_m}{dt_H} = \frac{1}{2} I_{1C} - \frac{I_m}{2Q}, \quad (10)$$

$$\frac{d\phi}{dt_H} = \frac{1}{2} \frac{I_{1S}}{I_m} - \frac{1}{2} \nu, \quad (11)$$

де I_{1C} і I_{1S} – косинусоїдальний і синусоїдальний складники першої гармоніки розкладу функції $i_T(u, t)$ в ряд Фур'є.

Для багаточастотного генератора на основі ПТСВО можна використати апроксимацію

статичної ВАХ таким степеневим поліномом [7]

$$i_T(u) = (I_s + gU_s - hU_s^3) - (g - 3hU_s^2) \cdot (u - e) - 3hU_s(u - e)^2 + h(u - e)^3, \quad (12)$$

де $u = U_m \cos \omega t$ – напруга на лінійному коливальному контурі; U_s, I_s – координати середини спадної ділянки вольт-амперної характеристики польової транзисторної структури з від’ємним опором; g, h – коефіцієнти апроксимації, які визначаються з експериментальних даних, а

$$e(t) = E_m \cos \omega_{\text{нелін}} t \quad (13)$$

$e(t)$ – еквівалентна е. р. с. напруги на нелінійному коливальному контурі.

Амплітуда стаціонарних коливань генератора в одночастотному режимі визначається співвідношенням [7]

$$U_{CT} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{g - 3hU_s^2}{h} + \frac{1}{hQ\rho \cos \phi_\beta}}. \quad (14)$$

Середньоквадратичне значення амплітуди стаціонарних коливань напруги генератора в двочастотному режимі описується співвідношенням

$$\tilde{U} = \left| \frac{\rho E_m \left[3hU_s^2 - g + \frac{3}{4}hU_{m0}^2 \right]}{\nu} \sin \phi \right|, \quad (15)$$

де U_{m0} – амплітуда стаціонарних коливань лінійного коливального контуру.

Багаточастотний генератор може працювати в одночастотному режимі. Величина критичного розстроювання резонансних частот нелінійного і лінійного коливальних контурів визначається зі співвідношення (15)

$$\nu_{kp} = \frac{E_m \rho \left[3hU_s^2 - g + \frac{3}{4}hU_{m0}^2 \right]}{U_{m0}}. \quad (16)$$

Рівняння нижньої і верхньої граничних частот робочого діапазону частот генератора в одночастотному режимі щодо резонансної частоти лінійного коливального контуру мають вигляд

$$\omega_H = \omega_0 \left(1 - \frac{E_m}{2QU_{m0}} \right), \quad (17)$$

$$\omega_B = \omega_0 \left(1 + \frac{E_m}{2QU_{m0}} \right). \quad (18)$$

Результати математичного моделювання

Отримані аналітичні співвідношення (1) – (18) становлять математичну модель багаточастотного генератора на основі ПТСВО. Класично система диференціальних рівнянь (1) у теорії коливань зводиться до рівняння вигляду Ван-дер-Поля й розв’язується одним з асимптотичних методів, зокрема, малого параметра або повільно змінних амплітуд. Ці методи накладають суворі обмеження на вихідні дані, а тому є малоприматними для дослідження багаточастотних режимів роботи цього генератора. Тому розв’язок системи нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку (1) з урахуванням (4) – (7) і рівняння

апроксимації (12) проведено методом Рунге – Кутта 4-го порядку за допомогою математичного пакету програм MathCad [8]. З цією метою використано вбудовану в MathCad функцію rkfixed. Для підвищення точності розрахунків, враховуючи особливість швидкого перетворення Фур'є в пакеті MathCad, обрано кількість відліків 1024. Результати чисельного моделювання одно- і багаточастотних режимів подано на рис. 3 – 5 у вигляді осцилограм, амплітудо-частотного спектра й траєкторій руху робочої точки на фазовій площині генерованих коливань.

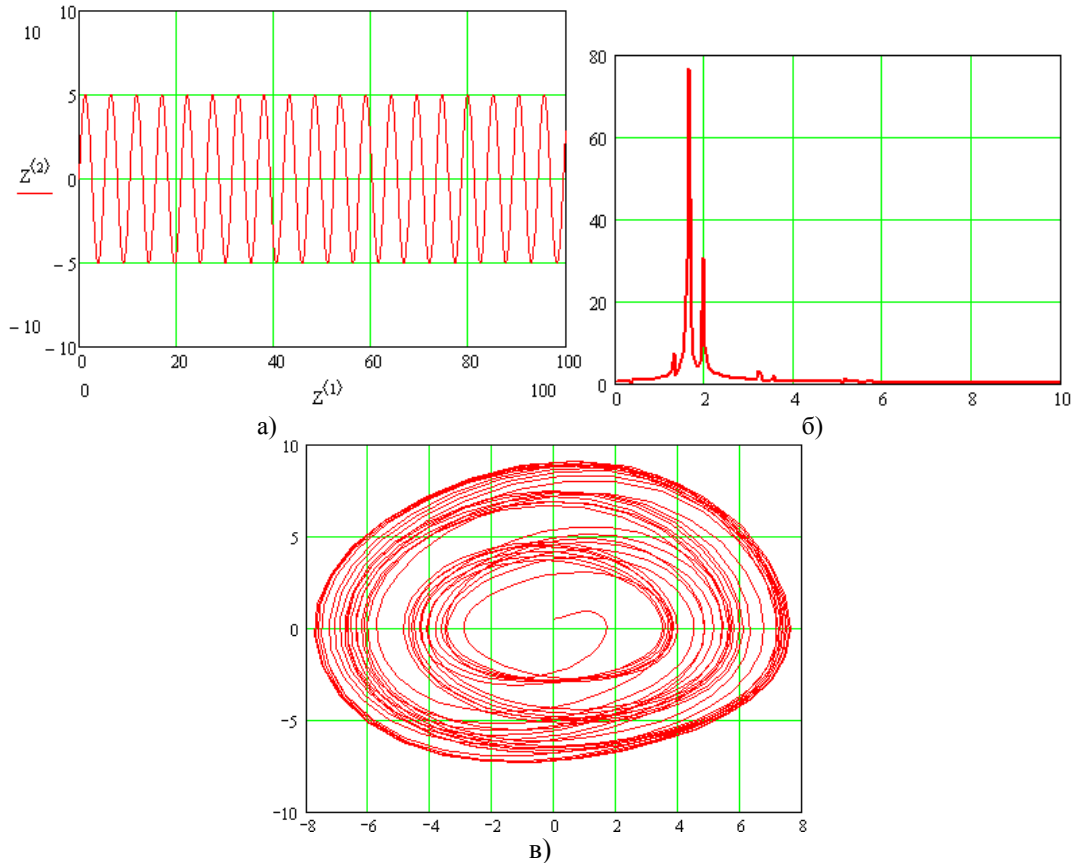


Рис. 3. Графіки осцилограм (а), амплітудо-частотного спектра (б) й фазової площини (в) генерованих коливань у одночастотному режимі

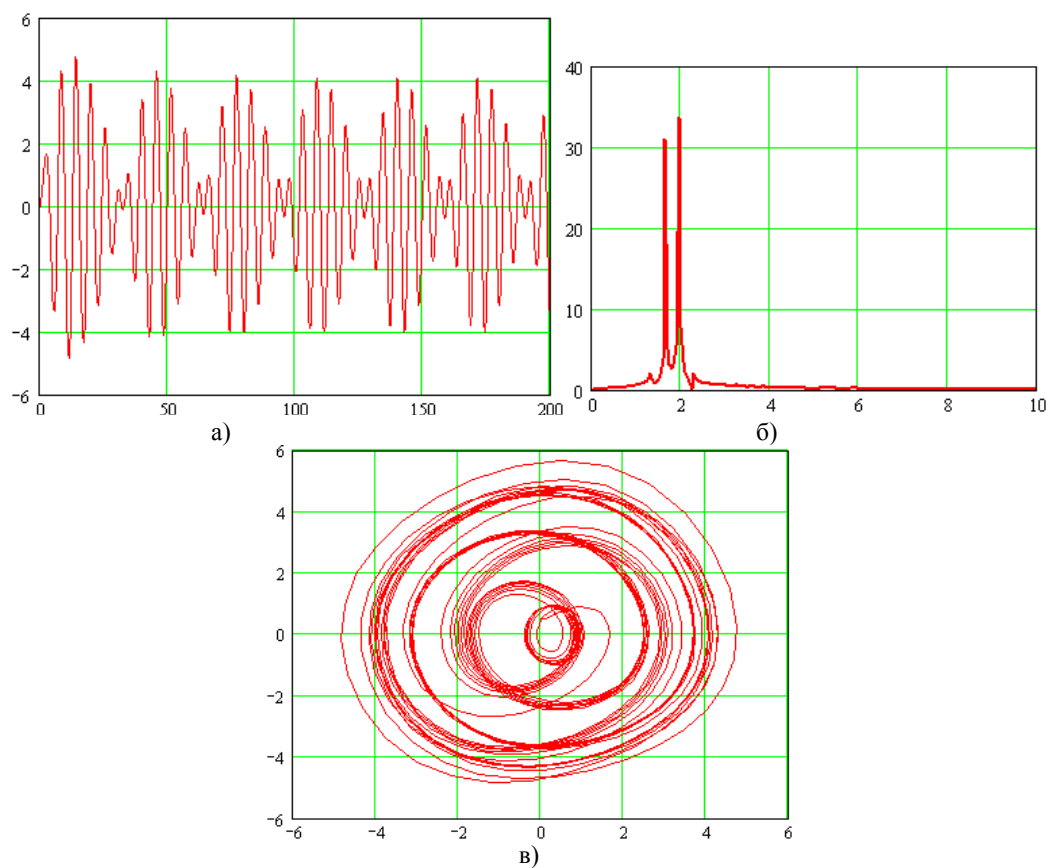


Рис. 4. Графіки осцилограм (а), амплітудо-частотного спектра (б) й фазової площини (в) генерованих коливань у двочастотному режимі

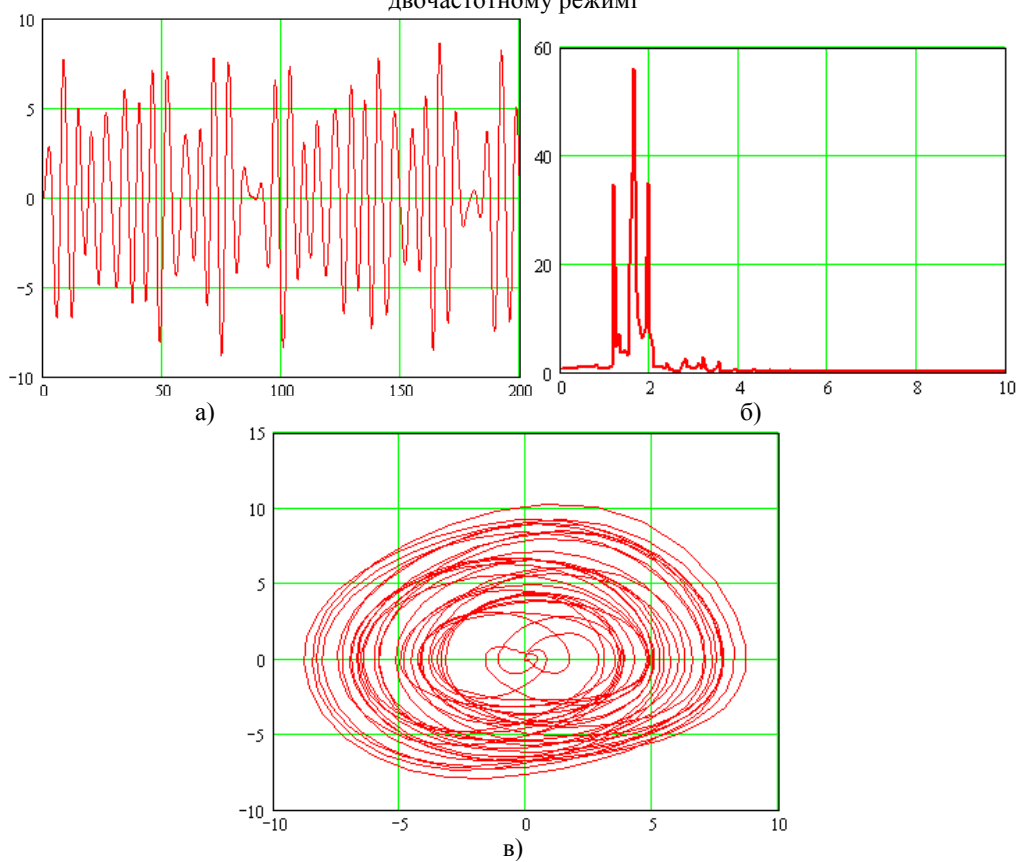


Рис. 5. Графіки осцилограм (а), амплітудо-частотного спектра (б) й фазової площини (в) генерованих коливань у тричастотному режимі

Результати експериментальних досліджень

У роботі було розроблено експериментальний макет багаточастотного генератора на основі серійного мікробирання польових транзисторів типу КР504НТ1Б. Номінали елементів і полярність підключення напруги живлення подано на рис. 1. Авторами було проведено експериментальне дослідження режимів роботи багаточастотного генератора на ПТСВО, результати яких представлено на рис. 6 – 10 [5]. Експериментально перевірено одночастотний і багаточастотні режими роботи генератора. Як видно зі спектрограм, багаточастотні режими з різної кількості генерованих коливань характеризуються високою спектральною щільністю поблизу гармоніки основного коливання з частотою резонансу паралельного контуру L1C3.

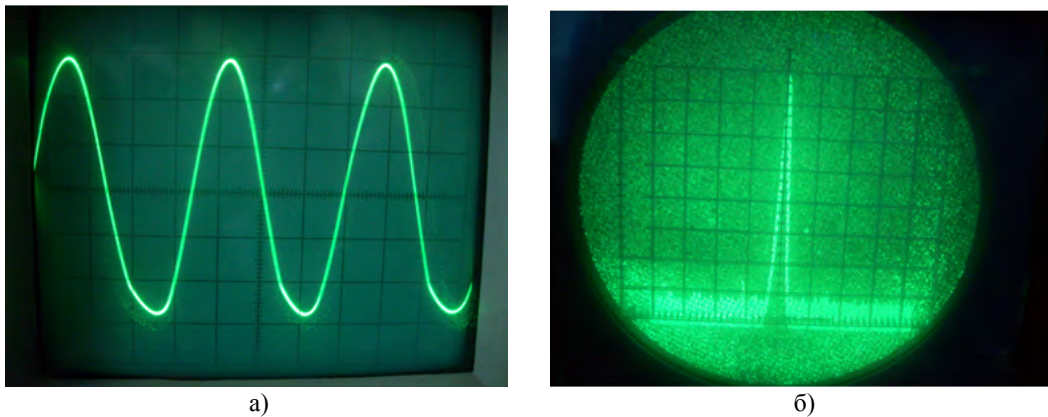


Рис. 6. Осцилограма (а) і спектр (б) генерованих коливань в одночастотному режимі

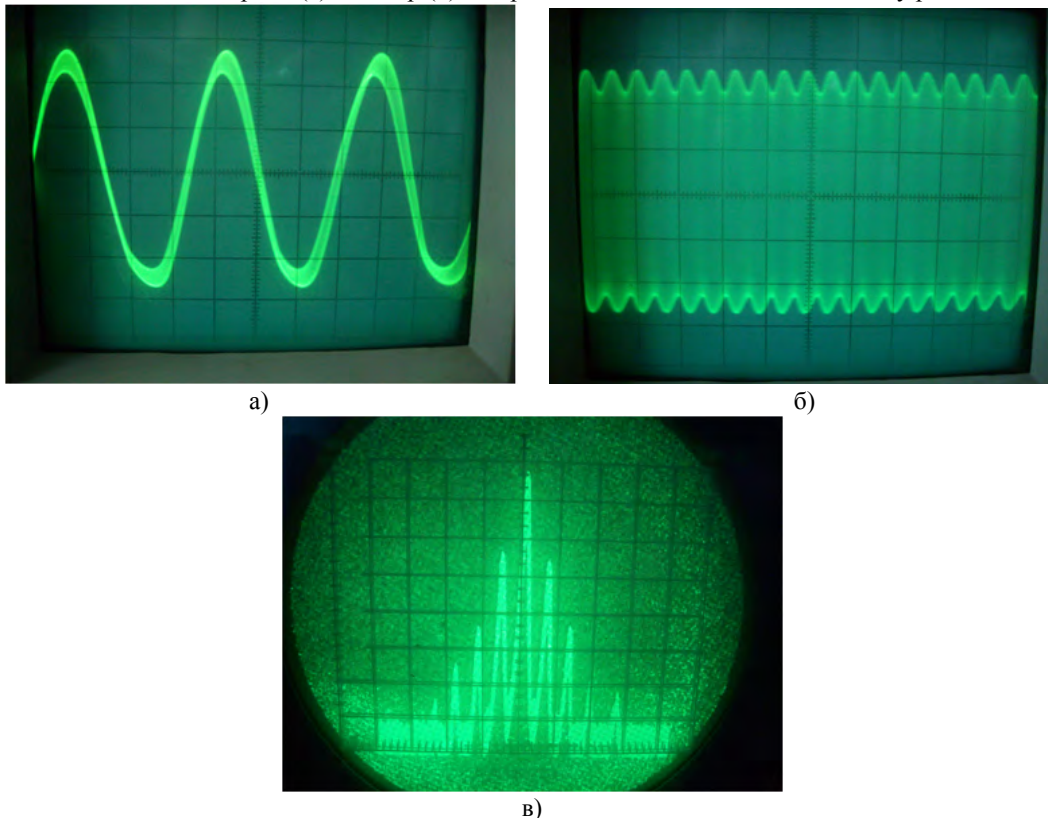


Рис. 7. Осцилограми генерованих коливань, синхронізованих за основною частотою (а) і за частотою биття (б); спектр коливань (в)

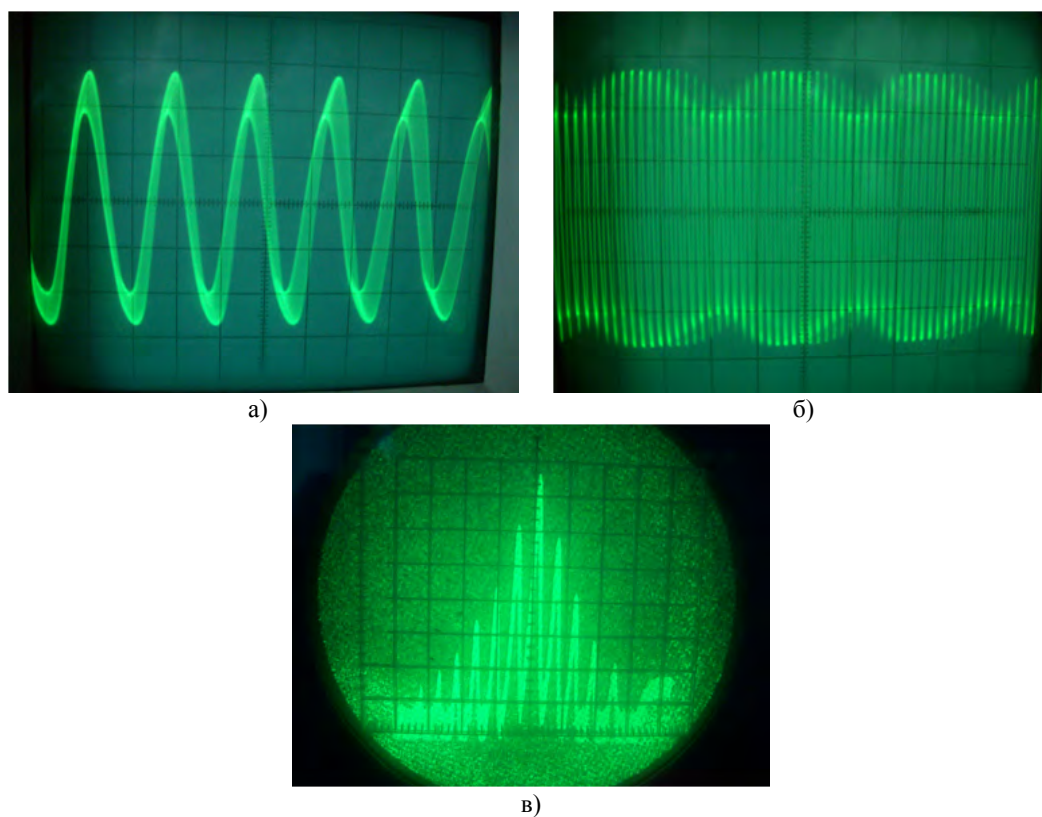


Рис. 8. Осцилограми генерованих коливань, синхронізованих за основною частотою (а) й за частотою биття (б); спектр коливань (в)

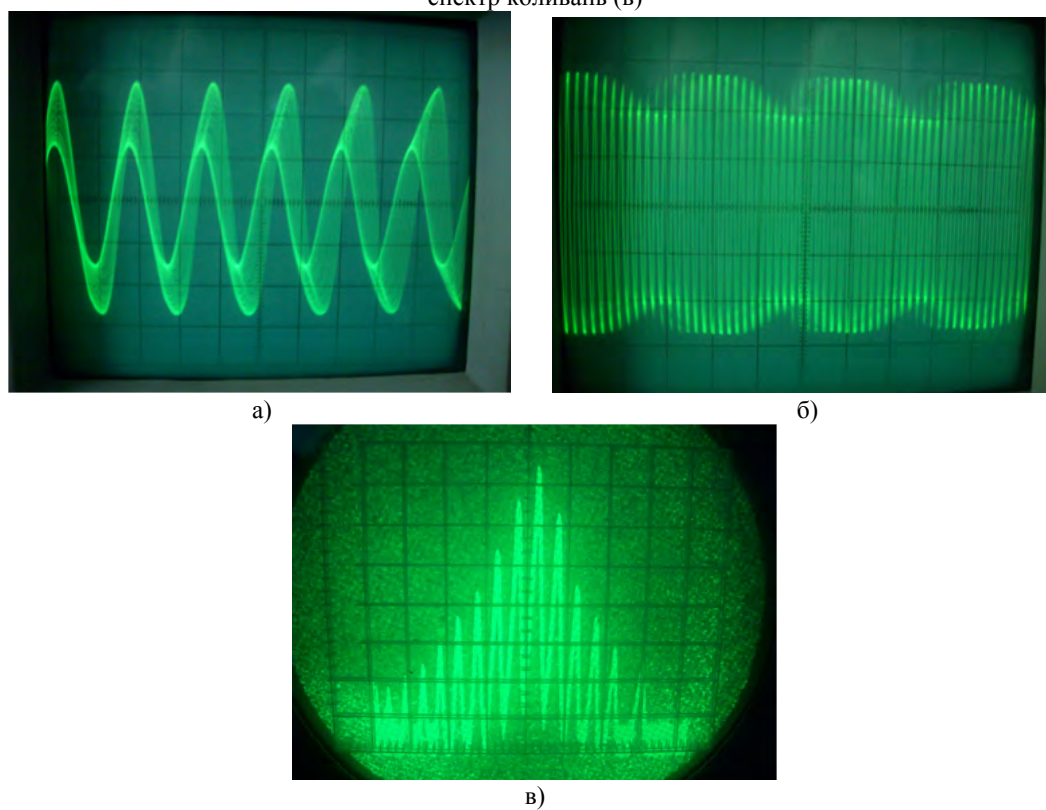


Рис. 9. Осцилограми генерованих коливань, синхронізованих за основною частотою (а) й за частотою биття (б); спектр коливань (в)

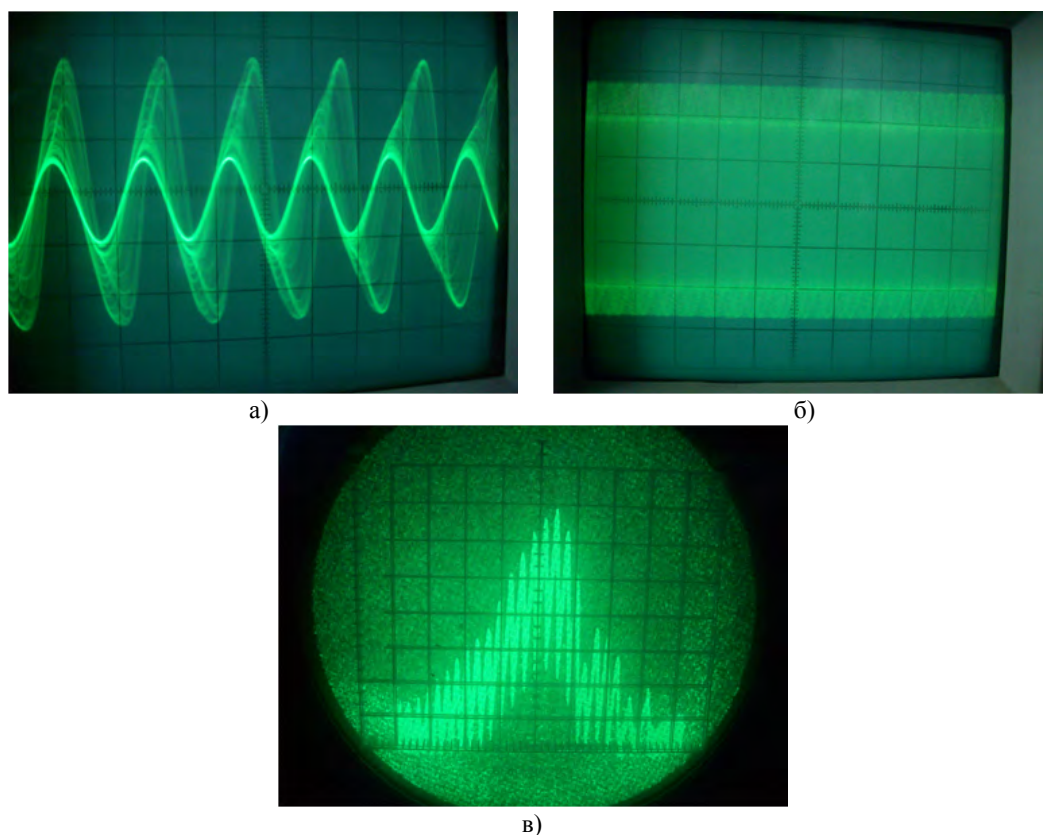


Рис. 10. Осцилограми генерованих коливань, синхронізованих за основною частотою (а) й за частотою биття (б); спектр коливань (в)

Висновки

У роботі проведено аналітичні та експериментальні дослідження багаточастотного генератора на основі емнісного ефекту польової транзисторної структури з від'ємним опором. Розроблено математичну модель генератора зі складною динамікою генерованих коливань. Наведено результати чисельного моделювання й експериментальних досліджень. Збіжність отриманих результатів підтверджує адекватність розробленої математичної моделі. Як недолік чисельного моделювання в пакеті програм MathCad потрібно зазначити неможливість дослідити режими роботи генератора вище трьох генерованих коливань за допомогою отриманих співвідношень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Курин В. Г. Получение многочастотных сигналов в генераторах дифракционного излучения / В. Г. Курин // Радиофизика и электроника. – Том 13, № 1. – 2008. – С. 110 – 113.
2. Помехозащищённость систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов и др. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.
3. Патент 2185032 Российской Федерации, МПК⁷ Н 04 К 1/00 Способ передачи информации с помощью хаотических сигналов / А. С. Дмитриев, А. И. Панас, С. О. Старков, Ю. В. Андреев, Л. В. Кузьмин, Б. Е. Кяргинский, Н. А. Максимов; Заявник та патентовласник Дмитриев А. С. – № 2000125307/09; заявл. 06.10.2000; опубл. 10.07.2002. – Бюл. 12.
4. Максимов Н. А. Хаотическая и регулярная динамика автономных автоколебательных систем, содержащих р-п-переход / Н. А. Максимов, В. Я. Кислов // Радиотехника и электроника. – 1997. – N 12. – С. 1487 – 1492.
5. Осадчук О. В. Багаточастотний генератор на основі польової транзисторної структури з від'ємним опором / О. В. Осадчук, А. О. Семенов, К. О. Коваль // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009). Матеріали IV МНТК. м. Вінниця, 8 – 10 жовтня 2009 року. Частина 1. – Вінниця, 2009. – С. 96 – 97.
6. Самойло К. А. Метод анализа колебательных систем второго порядка / К. А. Самойло. – М.: Сов. радио, 1976. – 208 с.

7. Семенов А. О. Квазілінійна математична модель генераторів на основі транзисторних структур з від'ємним опором / А. О. Семенов // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – № 4. – 2009. Режим доступу до журн.: http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009-4/2009-4.files/uk/09aaswnr_ua.pdf.
8. Каганов В. И. Радиотехника + компьютер + Mathcad / В. И. Каганов. – М.: Горячая линия, 2001. – 416 с.

Осадчук Александр Володимирович – д. т. н., професор, завідувач кафедри радіотехніки.

Семенов Андрій Олександрович – к. т. н., доцент кафедри радіотехніки.

Коваль Костянтин Олександрович – к. т. н., асистент кафедри радіотехніки.
Вінницький національний технічний університет.