

УДК 621.391

А.О. СЕМЕНОВ

Вінницький національний технічний університет

## **ТРАНЗИСТОРНІ ГЕНЕРАТОРИ ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ ЗА СХЕМОЮ КОЛПИТЦЯ**

*Наведено результати огляду електричних схем і математичних моделей генераторів детермінованого хаосу за схемою Колпитця. Розглянуто можливості керування динамічними процесами в таких генераторах. Проведено порівняльний аналіз схемотехнічних рішень хаотичних генераторів Колпитця. Показано, що для практичного застосування в телекомунікаційних системах більш зручна двокаскадна схема хаотичного генератору Колпитця.*

*Ключові слова.* Детермінований хаос, генератор Колпитця, електрична схема, математична модель.

A.O. SEMENOV

Vinnitsia National Technical University

### **DETERMINISTIC CHAOS TRANSISTOR OSCILLATORS ON THE COLPITTS CIRCUIT**

*Abstract.* Results of reviewing electric circuits and mathematical models for deterministic chaos oscillators on the Colpitts circuit have been presented. Feasibility of dynamic processes controlling in such oscillators has been considered. Comparative analysis of chaotic Colpitts oscillators circuitry has been performed. The two-stage circuit of the chaotic Colpitts oscillator has been shown as more convenient for practical application in telecommunicational systems.

*Keywords.* Deterministic chaos, Colpitts oscillator, electric circuit, mathematical model.

#### **Вступ**

Сучасним напрямком в теорії автоматичного керування і теорії зв'язку є практичне застосування генераторів хаотичних коливань та хаотичних сигналів. Застосування хаотичних сигналів значно підвищує завадостійкість і конфіденційності передачі інформації [1-4].

Хаотичним коливанням притаманні такі специфічні особливості [1]:

- широкосмуговість (хаотичні сигнали неперіодичні та мають неперервний спектр, при цьому в багатьох із них спектр займає широку смугу частот);
- складність (один і той же генератор хаотичних сигналів може формувати зовсім різні сигнали при малій зміні початкових умов);
- ортогональність (в хаотичних сигналах автокореляційна функція дуже швидко затухає, що вказує на їхню слабку корельованість та ортогональність).

До того ж хаотичні сигнали мають велику інформаційну ємність [1-4]. В інформаційних і телекомунікаційних системах детермінований хаос застосовується як носій інформації. Тобто, хаотичні електричні коливання – це динамічний процес, що перетворює інформацію до нового вигляду, а також використовується у вигляді комбінацій таких коливань. Найбільшого поширення як засіб інформаційних і телекомунікаційних систем набув генератор Колпитця та його варіанти [5-20].

При цьому актуальними науково-технічними задачами є синхронізація та підвищення стійкості генераторів детермінованого хаосу. Для розв'язку цих задач потрібно знати схемотехнічні особливості та математичні моделі генераторів детермінованого хаосу, а також часові та частотні характеристики генерованих хаотичних коливань.

Метою роботи є огляд електричних схем і математичних моделей транзисторних генераторів детермінованого хаосу, які побудовані за схемою Колпитця.

#### **Базові схеми транзисторного генератору Колпитця**

Відкриття М.П. Кеннеді в 1994 році явища детермінованого хаосу в генераторі Колпитця [5] стало поштовхом ретельного дослідження динамічних властивостей транзисторних електричних схем і пристроїв. На сьогоднішній день хаотичний генератор Колпитця є класичним генератором детермінованого хаосу та однією з основних динамічних систем [21, 22]. Розрізняють дві базові схеми генератору Колпитця – із симетричним живленням (рис. 1,а) [6] і несиметричним живленням (рис. 1,б) [14]. Основна частота генерованого сигналу визначається параметрами реактивних елементів схеми генератора Колпитця [6, 14, 21]

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \quad (1)$$

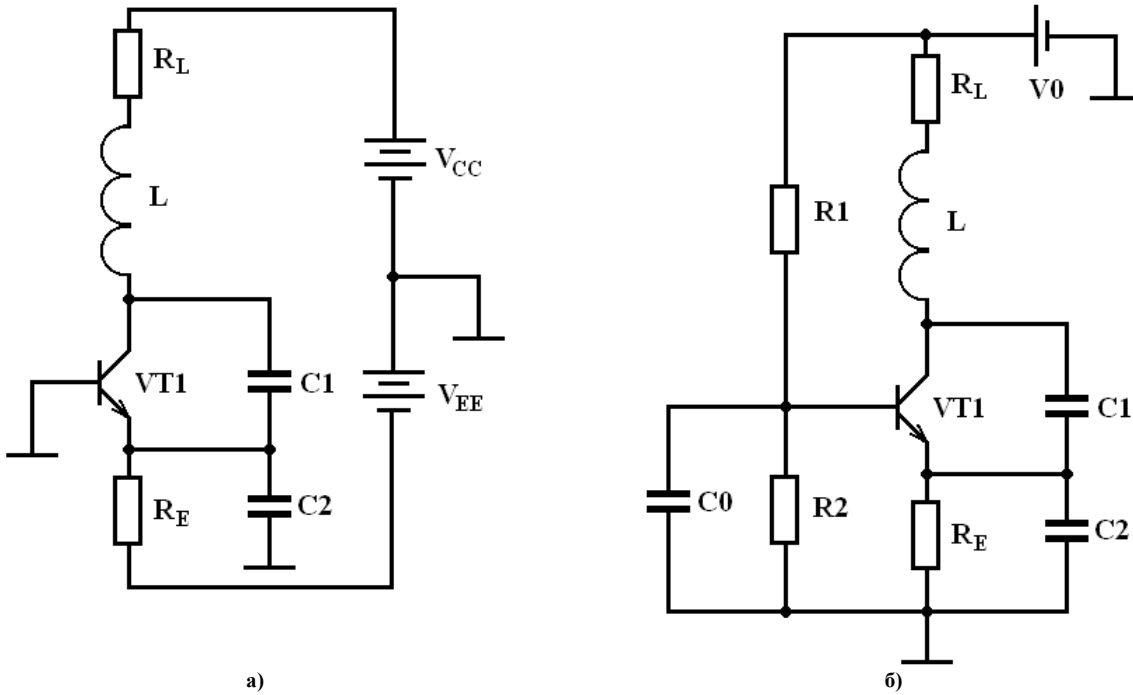


Рис. 1. Електричні схеми генератора Колпитця із симетричним (а) та несиметричним (б) живленням

Рівняння Кірхгофа для схеми генератора Колпитця із симетричним живленням мають вигляд [5,21]

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_{CE}}{dt} = I_L - I_C, \\ C_2 \frac{dV_{BE}}{dt} = -\left( \frac{V_E + V_{BE}}{R_E} + I_L + I_B \right), \\ L \frac{dI_L}{dt} = V_C - V_{CE} + V_{BE} - I_L R_L, \end{cases} \quad (2)$$

де  $V_{CE}, V_{BE}$  - напруги колектор-емітер і база-емітер;  $I_L, I_C, I_B$  - струми індуктивності, колектора і бази.

На низьких частотах дослідження біполярного транзистора проводять за допомогою його сімейства вольт-амперних характеристик. У режимі великого сигналу модель біполярного транзистора зводять до вигляду двосегментного кусково-лінійного резистора, який керується напругою, і лінійного джерела струму, який керується струмом, вигляду [5, 21]

$$I_B = \begin{cases} 0, & \text{if } V_{BE} \leq V_0, \\ (V_{BE} - V_0)/R_1, & \text{if } V_{BE} > V_0, \end{cases} \quad (3)$$

$$I_C = \beta I_B,$$

де  $V_0$  - порогова напруга емітерного р-п переходу;  $R_1$  - опір емітерного р-п переходу в режимі малого сигналу;  $\beta$  - коефіцієнт підсилення біполярного транзистора по струму.

Математична модель генератора Колпитця із симетричним живленням у безрозмірних змінних має вигляд [9, 21]

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{C_1} x_3 - \frac{\beta}{C_1} h(x_2), \\ \frac{dx_2}{dt} = -\frac{1}{C_2 R_E} x_2 - \frac{V_E}{R_E C_2} - \frac{1}{C_2} x_3 - \frac{1}{C_2} h(x_2), \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{V_C}{L} - \frac{1}{L} x_1 + \frac{1}{L} x_2 - \frac{R_L}{L} x_3. \end{cases} \quad (4)$$

де  $V_{KE} = x_1, V_{BE} = x_2$  та  $I_L = x_3$ .

Аналогічно отримана математична модель генератора Колпитця із несиметричним живленням у безрозмірних змінних, яка має вигляд [14, 15]

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 - a \cdot F(x_3), \\ \frac{dx_2}{dt} = c - x_1 - bx_2 - x_3, \\ \frac{dx_3}{dt} = x_2 - dx_3, \end{cases} \quad (5)$$

де  $F(z)$  - функція апроксимації колекторного струму залежно від вхідної напруги, яка в нормованих змінних має вигляд

$$F(x_3) = \begin{cases} e - 1 - x_3, & x_3 < e - 1, \\ 0, & x_3 \geq e - 1. \end{cases} \quad (6)$$

Рівняння нормованих змінних і коефіцієнтів системи (5) мають вигляд [14, 15]

$$\begin{aligned} x_1 = \frac{V_{C1}}{V^*}, \quad x_2 = \frac{\rho I_L}{V^*}, \quad x_3 = \frac{V_{C2}}{V^*}, \quad v = \frac{t}{\tau}, \quad \dot{u} \equiv \frac{du}{dv}, \quad \rho = \sqrt{\frac{L}{C_1}}, \\ \tau = \sqrt{LC_1}, \quad \varepsilon = \frac{C_2}{C_1}, \quad a = \frac{\rho}{r}, \quad b = \frac{R}{\rho}, \quad c = \frac{V_0}{V^*}, \quad d = \frac{\rho}{R_e}, \quad e = \frac{R_2}{R_1 + R_2} c. \end{aligned} \quad (7)$$

У роботах [14, 15] наведено результати моделювання генератора Колпитця із несиметричним живленням на біполярному транзисторі 2N3904 із такими параметрами пасивних елементів:  $L = 850$  мкГн,  $C_1 = C_2 = 470$  нФ,  $C_0 = 47$  мкФ,  $R = 36$  Ом,  $R_e = 510$  Ом,  $R_1 = R_2 = 3$  кОм,  $V_0 = 15$  В. У такому разі значення нормованих змінних системи диференціальних рівнянь (1.5) за умови (7):  $\varepsilon = 1$ ,  $a = 30$ ,  $b = 0.8$ ,  $c = 20$ ,  $d = 0.08$ ,  $e = 10$ .

### Варіанти схем транзисторного генератора детермінованого хаосу за схемою Колпитця

Транзисторний хаотичний генератор Колпитця отримав широке практичне застосування [5-21]. Потрібно зазначити, що такий хаотичний генератор є найбільш високочастотний серед відомих транзисторних [7, 8]. У роботі [7] досліджено НВЧ генератор Колпитця із смугою частот 10 ГГц. У НВЧ діапазоні математична модель генератора Колпитця повинна враховувати вплив паразитних ємностей база-емітер і колектор-емітер біполярного транзистору на динаміку хаотичних коливань, як зображено на рис. 2,б [8].

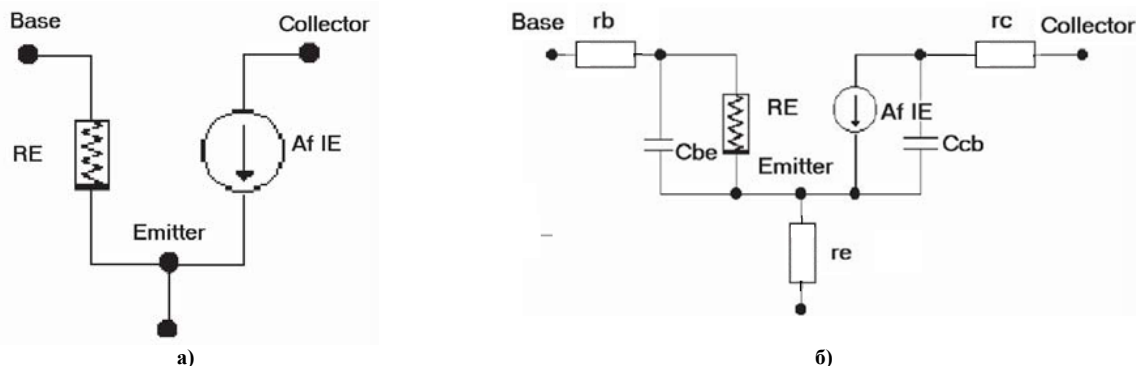


Рис. 2. Еквівалентні схеми БТ: низькочастотна (а) та високочастотна гібридна (б) [8]

Хаотичні генератори Колпитця із несиметричним живленням отримали практичне застосування в засобах зв'язку [9] та НВЧ радарх [8]. З метою керуванням струмом параметрами хаотичного генератора Колпитця у роботі [9] запропонована схема на рис. 3,а. Керування хаотичною динамікою у такому генераторі здійснюється шляхом зміни режиму транзистора VT1 по постійному струму.

Інший шлях керування хаотичним режимом коливань – це зміна величини індуктивності котушки в колекторному колі. У схемі генератора на рис. 3,б зміна величини опору  $R_L$  викликає зміну струму в котушці зв'язку  $L_C$ , що приводить до зміни взаємної індуктивності трансформатора [10]. У схемі використані такі радіокомпоненти: n-p-n транзистор VT1 типу 2N2222, резистори  $R_L = 35$  Ом,  $R_E = 500$  Ом, потенціометр R на 1 кОм, конденсатори  $C_1 = 54$  нФ,  $C_2 = 54$  нФ, індуктивності котушок трансформатора  $L = 98,5$  мГн,  $L_c = 23,5$  мГн, напруга джерел живлення  $V_{cc} = 5$  В,  $V_{ee} = 0,5$  В [10].

Дослідження динаміки та вирішення питання синхронізації генератора Колпитця із несиметричним живленням здійснено в роботах [11, 12]. У роботі [11] запропоновано динамічну систему master-slave для використання в засобах телекомунікацій. Отримано результати дослідження хаотичних режимів і оцінено вплив адитивного шуму на якість синхронізації та динаміку коливань.

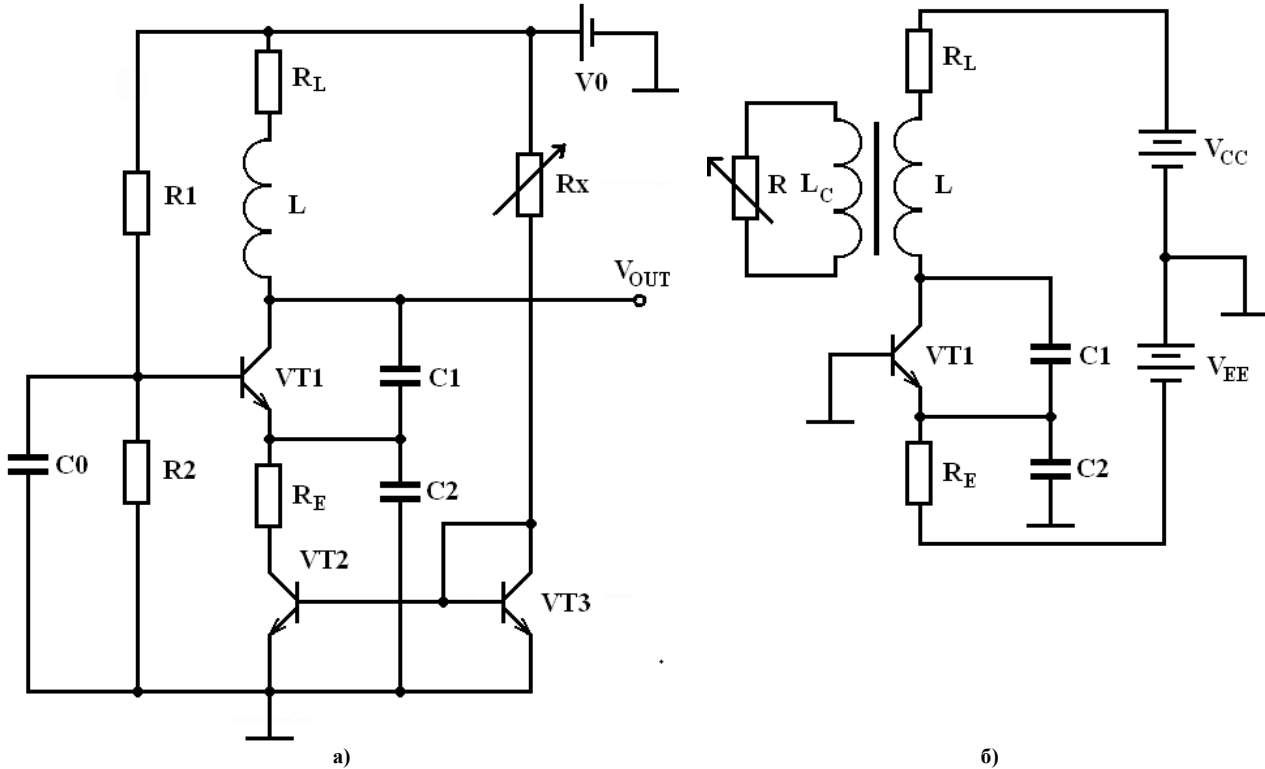


Рис. 3. Електричні схеми керованих генераторів Колпітця: а) із несиметричним живленням і струмовим дзеркалом; б) із симетричним живленням і трансформаторним зв'язком з керуючим елементом

**Електрично керований транзисторний генератор хаосу за схемою Колпітця**

Електричне керування нелінійною динамікою хаотичних коливань у генераторі Колпітця значно розширює його функціональні можливості. Це забезпечує здатність генерувати два і більше хаотичних сигналів у широкому робочому режимі активного елемента [23]. Електрична схема такого хаотичного генератора наведена на рис. 4. У схемі на рис. 4 використано такі радіоелементи: n-p-n біполярний транзистор типу 2N2222, VD1 – варикап типу BA102, VD2 – стабілітрон, резистори R1=36 Ом, R3=220 кОм, R4=1 кОм, R5=1 кОм, конденсатори C1=C2=2 нФ, C3=10 мкФ, C4=1 нФ, C5=100 пФ, C6=470 нФ, котушки індуктивності L1=48 мкГн.

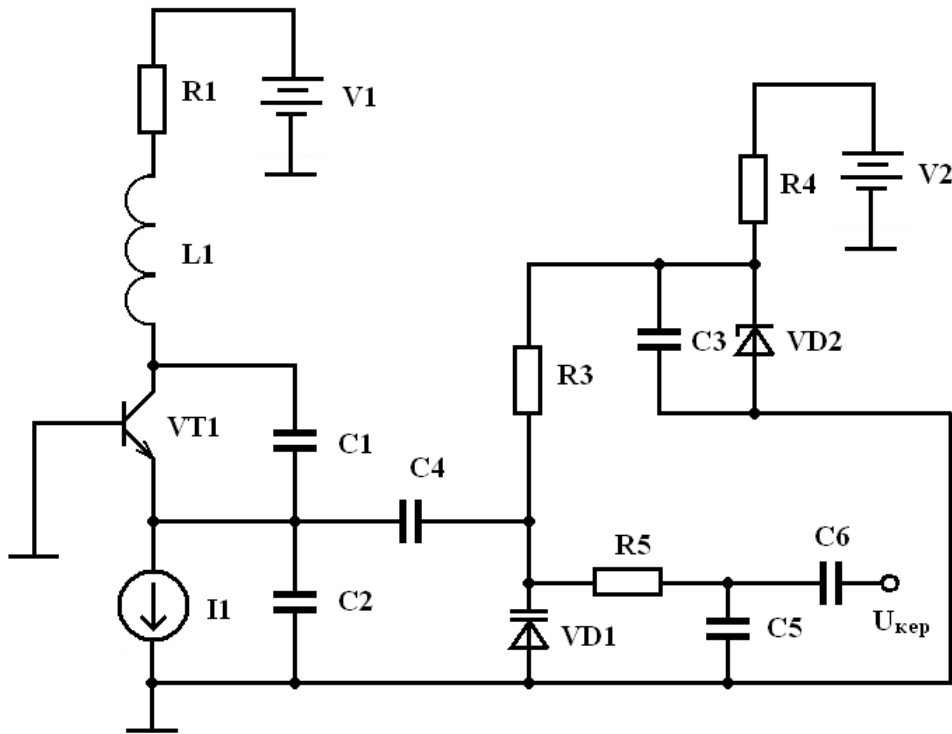


Рис. 4. Схема електрично керованого хаотичного генератора Колпітця

Електрично керований генератор за схемою Колпитця працює таким чином. Робоча точка напруги і струму зміщення біполярного транзистору VT1 встановлюються номіналами джерела напруги V1, резистору R1 та джерела струму I1. Коло додатного зворотного зв'язку генератора утворене елементами L1, C1, C2. Паралельно конденсатору C2 через розділовий конденсатор C4 підключений варикап VD1. У схемі варикап у зворотному включенні та живиться від джерела напруги V2 крізь подільник напруги R3R4. Для стабілізації напруги зміщення варикапа у схемі застосований стабілітрон VD2 із паралельно підключеним конденсатором C3, який шунтує стабілітрон по змінному струму. Керування динамікою хаотичних коливань здійснюється напругою Uкер крізь розділовий конденсатор C6 і фільтр ВЧ R5C5.

Основна частота електрично керованого хаотичного генератора Колпитця [23]

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \frac{C_1 C_2 // D_1}{C_1 + C_2 // D_1}}}, \quad (8)$$

де  $D_1$  – ємність варикапу VD1.

Динаміка коливань в схемі електрично керованого хаотичного генератора Колпитця описується системою диференціальних рівнянь [23]

$$\begin{cases} C_3 \frac{dV_{CE}}{dt} = I_{L1} - I_{C1}, \\ L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} = V_3 - R_1 I_{L1} - V_{CE} - V_{BE} - V_{Q_{on}}, \\ C_1 / 2 \frac{dV_{BE}}{dt} = I_{L1} - I_{C1} + I_{E1}(V_{CE}, Q_1) - I_1. \end{cases} \quad (9)$$

Струм колектора  $I_c$  біполярного транзистора пропорційний емітерному струму

$$I_{c1} = \alpha I_{e1}. \quad (10)$$

Нелінійна вольт-амперна характеристика переходу емітер-база апроксимована кусково-лінійною функцією таким чином [23]

$$I_{E1}(V_{BE}) = \begin{cases} \frac{-V_{BE1} - V_{th}}{r}, & V_{BE1} < -V_{th}, \\ 0, & V_{BE1} \geq -V_{th}. \end{cases} \quad (11)$$

де  $r$  – опір переходу емітер-база в режимі малого сигналу та граничній напрузі (біля 0,7 В).

У безрозмірних величинах система диференціальних рівнянь матиме вигляд [23]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{g}{Q(1-k)} [-n(x_2) + x_3], \\ \dot{x}_2 = \frac{g}{Qk} x_3, \\ \dot{x}_3 = -\frac{k(1-k)Q}{g} [x_1 + x_2] - \frac{1}{Q} x_3, \end{cases} \quad (12)$$

де

$$n(x_2) = e^{-x_2} - 1, \quad (13)$$

$$Q = \frac{2\pi f_o L}{R}, \quad (14)$$

$$g = \frac{I_0 L}{V_T R (C_1 + C_2 // D_1)}, \quad (15)$$

$$k = \frac{C_2}{C_1 + C_2}. \quad (16)$$

В системі рівнянь (12), лише перше рівняння містить нелінійний член  $n(x_2)$ , який, в свою чергу, залежить лише від однієї змінної стану  $x_2$ . Крім того, слід зазначити, що динамічна поведінка системи рівнянь (12) залежить від таких двох параметрів:

$g$ , коефіцієнт підсилення підсилювального кола генератора (15);

$Q$ , добротність ненавантаженого коливального контуру (14).

У той же час зміна коефіцієнту  $k$  (16) має ефект масштабування змінних стану. Змінюючи ємність варикапу  $D1$  величина  $g$  змінюється обернено пропорційно, тим самим змінюючи динаміку коливань генератору.

Авторами роботи [23] розроблено простий за схемним рішенням генератор детермінованого хаосу з електричним керуванням хаотичної носійної, який здатний генерувати декілька хаотичних сигналів. За отриманими результатами видно, що зміна ємності варикапу у 10 разів (від 100 пФ до 10 пФ) мало змінює динаміку хаотичних коливань. Здатність запропонованого генератору працювати на частотах до 8 ГГц

підтверджує можливість його застосування в телекомунікаційних системах.

### Балансний генератор хаосу за схемою Колпитця

Основним недоліком схеми хаотичного генератора Колпитця з несиметричним живленням є суттєвий вплив паразитної ємності на параметри генерованих коливань [23]. Зменшити вплив паразитних ємностей колекторного та емітерного переходів біполярного транзистору, а також вплив паразитних ємностей компонентів схеми можна використавши диференціальний каскад як активний елемент генератора за схемою Колпитця. Схема такого хаотичного автогенератора, запропонованого в роботі [24], представлена на рис. 5. Диференціальний каскад активного елементу значно розширює його функціональні можливості – отримання прямого та інверсного хаотичного сигналів. Іншою суттєвою перевагою є підвищення стабільності генерованого сигналу за рахунок компенсації відхилень параметрів елементів схеми [25].

У схемі балансного генератора хаосу використано такі радіоелементи: джерело постійної напруги 12 В; джерело постійного струму номіналом 25 мА; НВЧ n-p-n біполярні транзистори VT1 і VT2 типу BFR 96 із граничною частотою 5 ГГц, резистори R1 і R2 опором 22 Ом; котушки індуктивності L1 і L2 10 нГн; конденсатори C3 і C4 ємністю 4,7 пФ; розділовий конденсатор C1 ємністю 2,2 пФ [24].

Частота власних коливань балансного генератора хаосу за схемою Колпитця (рис. 5) обраховується по формулі [24]

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \frac{C_3 2C_1}{C_3 + 2C_1}}} \quad (17)$$

Система рівнянь стану схеми балансного генератора хаосу за схемою Колпитця має такий вигляд

$$\begin{cases} C_3 \frac{dV_{CE}}{dt} = I_{L1} - I_{C1}, \\ L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} = V_3 - R_1 I_{L1} - V_{CE} - V_{BE} - V_{Q_{4on}}, \\ C_1 / 2 \frac{dV_{BE}}{dt} = I_{L1} - I_{C1} + I_{E1}(V_{CE}, Q_1) - I_1. \end{cases} \quad (18)$$

Рівняння колекторного та емітерного струмів математичної моделі мають вигляд (10) і (11) відповідно.

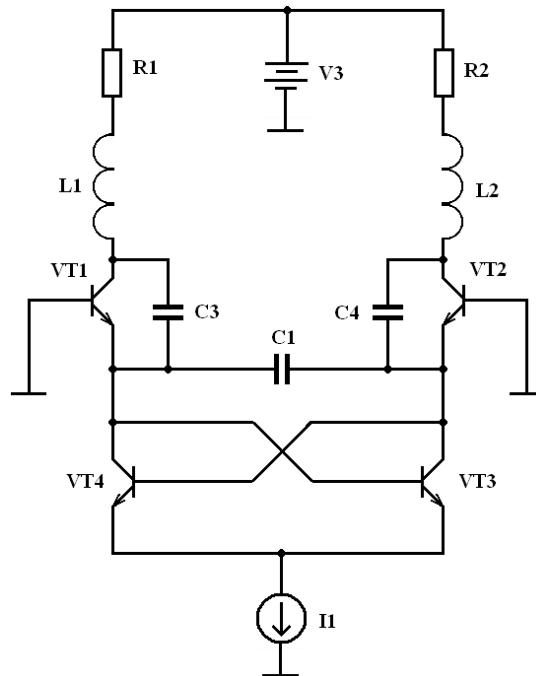


Рис. 5. Електрична схема хаотичного генератора Колпитця з диференціальним активним елементом

Сигнал диференціального виходу може бути отриманий шляхом поєднання двох ідентичних генераторів Колпитця та сполучення шунтуючих конденсаторів їхніх емітерів C3-C4 через розділовий конденсатор C1. Оскільки у центральному вузлі, де обидва конденсатори з'єднані один з одним, є диференціальним, вихідний різницевий сигнал є постійним, коли коливання обох плечей зсунуті по фазі 180°. Диференціальний сигнал буде незмінним, якщо центральний вузол є «плаваючою землею» та не заземлений. Струм через кожен з транзисторів VT1 і VT2 осциляторів Колпитця протікає менше половини періоду. Тому зручно для заміни джерел постійного струму емітера підімкнути синхронізований вимикач,

який буде переключати струм між двома плечами генератору. Перемикання повинне відбуватися синхронно та може бути досягнуто шляхом використання пари біполярних транзисторів для перемикання струму від одного плеча до іншого.

Струми через транзистори VT1 і VT2 керуються відповідно транзисторами VT4 і VT3, які є транзисторами того ж типу. Крім того, від’ємний опір кола перехресно зв’язаної пари, забезпечує дуже ефективний засіб для підвищення коефіцієнта підсилення сигналу каскаду та покращення стану запуску. У режимі комутації транзистори VT4 і VT3 працюють в основному між режимами насичення та відсікання, а тому вони здійснюють менший вклад шуму ніж основні транзистори балансного генератору. Використання одного джерела струму спрощує будову каскаду та забезпечує один й той же потік струму на вихідних транзисторах, тим самим підвищуючи якість вихідних сигналів [24].

### Двокаскадний генератор хаосу за схемою Колпитця

Застосування хаотичного генератору Колпитця в діапазоні високих частот накладає обмеження на динаміку коливань [20, 25]. Перші дослідження хаотичного режиму генератору Колпитця проведено для діапазону НЧ – десятки кілогерць [5]. Пізніше дослідження динамічних процесів у генераторі Колпитця були проведені в діапазоні частот ВЧ – від 3 до 30 МГц [26, 27]. Хаотичні коливання виникали з основною частотою  $f = 23$  МГц для випадку біполярного транзистору 2N2222A [26] та з основною частотою  $f = 26$  МГц для випадку біполярного транзистору 2N3904 [26]. Гранична частота обох цих транзисторів 300 МГц. При заміні на НВЧ біполярні транзистори спостерігались хаотичні коливання з основною частотою  $f = 500$  МГц для АТ41486 із граничною частотою 3 ГГц [26], та з основною частотою  $f = 1,0$  ГГц для BFG520 із граничною частотою 9 ГГц [28].

Таким чином, експериментально підтверджено, що основна частота генерованих хаотичних коливань класичного генератору Колпитця становить  $f = 0,1 \cdot f_T$ . Зменшення впливу параметрів схеми генератору та навантаження на динаміку НВЧ хаотичних коливань забезпечується застосуванням каскаду підсилення по схемі спільний емітер [18]. Підвищення частоти хаотичних коливань до рівня  $f = 0,3 \cdot f_T$  забезпечується застосуванням двокаскадного активного елементу [19, 20].

Основна частота генерації двокаскадного генератору Колпитця на рис. 6 може бути визначена як [20]

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 C_2 + C_1 C_3 + C_2 C_3}{LC_1 C_2 C_3} - \frac{R^2}{L^2}} \quad (19)$$

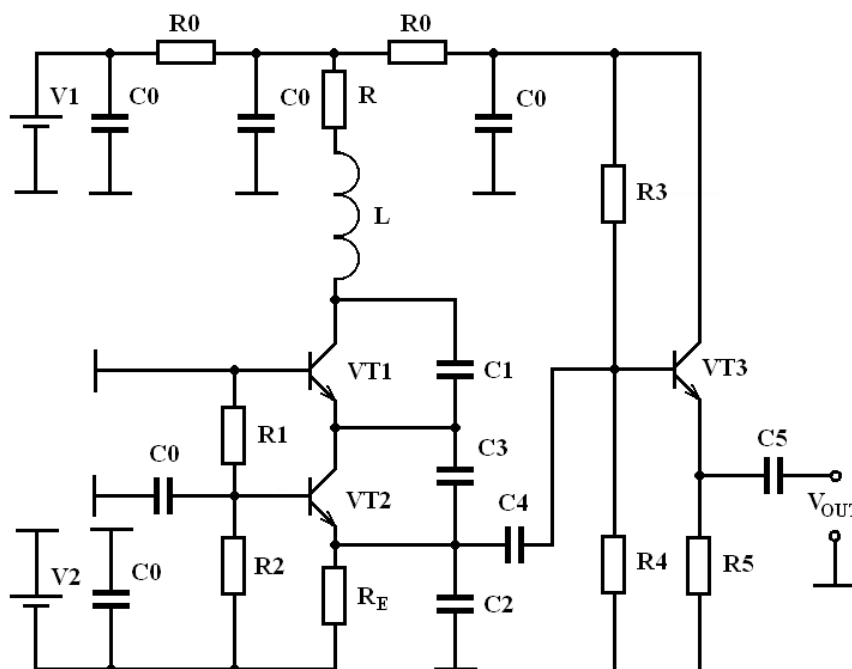


Рис. 6. Електрична схема двокаскадного генератору хаосу Колпитця

Динаміка двокаскадного генератору детермінованого хаосу Колпитця описується системою таких звичайних диференціальних рівнянь [20]

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = I_L - I_{EVT1}(r, V_{C2}, V_{C3}), \\ L \frac{dI_L}{dt} = V_0 - V_{C1} - V_{C2} - V_{C3} - RI_L, \\ C_3 \frac{dV_{C3}}{dt} = I_L - I_{EVT2}(r, V_{C2}), \\ C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} = I_L - I_0. \end{cases} \quad (20)$$

При складанні системи (20) прийнято такі спрощення: 1) коефіцієнт підсилення  $\alpha = 1$ ; 2) диференціальний опір переходу база-емітер  $R$  є постійною величиною (на практиці це можна забезпечити підбором струму зміщення  $I_0$ ). У безрозмірних змінних система рівнянь (20) матиме вигляд

$$\begin{cases} \dot{x} = y - F_1(a, z, v), \\ \dot{y} = -x - z - v - by, \\ \varepsilon_3 \dot{v} = y - F_2(a, z), \\ \varepsilon_2 \dot{z} = y - 1, \end{cases} \quad (21)$$

де

$$x = \frac{V_{C1}}{\rho I_0}, y = \frac{I_L}{I_0}, z = \frac{V_{C2}}{\rho I_0}, v = \frac{V_{C3}}{\rho I_0}, t = \frac{t}{\tau}, a = \frac{\rho}{r}, b = \frac{R}{\rho}, \rho = \sqrt{\frac{L}{C_1}}, \tau = \sqrt{LC_1}, \varepsilon_{2,3} = \frac{C_{2,3}}{C_1}, \quad (22)$$

а кусково-лінійні функції апроксимації ВАХ переходів база-емітер

$$F_1(a, z, v) = \begin{cases} 1 - a(z + v), & a(z + v) < 1, \\ 0, & a(z + v) \geq 1, \end{cases} \quad (23)$$

$$F_2(a, z) = \begin{cases} 1 - az, & az < 1, \\ 0, & az \geq 1. \end{cases} \quad (24)$$

Експериментальні дослідження, результати яких наведено в роботі [20] показали, що основна частота хаотичних коливань становить  $f = 0,3 \cdot f_T$ . При цьому графік спектральної щільності сигналу має більшу рівномірність в діапазоні частот від 250 МГц до 1,1 ГГц.

### Висновки

У роботі проведено огляд сучасного стану теорії та практики генераторів детермінованого хаосу за схемою Колпитця. Розглянуто основні варіанти схемотехнічних рішень хаотичних генераторів Колпитця та їхні математичні моделі. Показано, що для практичного застосування в телекомунікаційних системах більш придатними є хаотичні генератори Колпитця з диференціальним та двокаскадним активним елементом. Застосування диференціального та двокаскадного активних елементів у схемах генераторів Колпитця розширює діапазон робочих частот та згладжує графік спектральної щільності генерованої напруги. Електричне керування в генераторі Колпитця мало змінює динаміку генерованих коливань і на практиці може бути застосовано для підстроювання робочих параметрів.

### Література

1. Дмитриев А. С. Динамический хаос : Новые носители информации для систем связи / А. С. Дмитриев, А. И. Панас. – М.: Физматлит, 2002. – 251 с.
2. Малинецкий Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. – М.: УРСС, 2002. – 360 с.
3. Залогин Н. Н. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах / Н. Н. Залогин, В. В. Кислов. – М.: Радиотехника, 2006. – 205 с.
4. Vadim S. Anishchenko. Deterministic Nonlinear Systems. A Short Course / Vadim S. Anishchenko, Tatyana E. Vadivasova, Galina I. Strelkova. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
5. M. P. Kennedy. Chaos in the Colpitts Oscillator / M. P. Kennedy // IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Fundamental theory and applications. – 1994. – Vol. 11. – pp. 771-774.
6. Cherif Aissi, A Review of Chaotic circuits, Simulation and Implementation / Cherif Aissi, Demetrios Kazakos // Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on CIRCUITS, Vouliagmeni, Athens, Greece, July 10-12, 2006. – pp. 125-131.
7. Shan Qiao. Ultra-wide Band Noise-signal Radar Utilizing Microwave Chaotic Signals and Chaos Synchronization / Shan Qiao, Tao Jiang, Lixin Ran, Kangsheng Chen // Progress In Electromagnetics Research Symposium 2007, Prague, Czech Republic, August 27-30 2007. – pp. 503-506.
8. O. Tsakiridis. Chaotic Operation of a Colpitts Oscillator in the Presence of Parasitic Capacitances / O. Tsakiridis, D. Syvridis, E. Zervas, J. Stonham // WSEAS Trans. on Electronics, vol. 1, Apr. 2004. – pp. 416-421.
9. Suva Sarkar. Dynamics of Driven Colpitts Oscillator in Presence of Co-channel Tone Interference: An



Experimental Study / Suvra Sarkar, Sandeepa Sarkar, B. C. Sarkar // International Journal of Electronics and Applied Research (IJEAR). – 2014. – No. 1. – Published Online June 2014. – pp. 1-14.

10. Arturo Buscarino. Chaos Control in Inductor-Based Chaotic Oscillators / Arturo Buscarino, Luigi Fortuna, Mattia Frasca, Gregorio Sciuto // Proceedings of the 19th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems – MTNS 2010, 5–9 July 2010, Budapest, Hungary. – pp. 2207-2210.

11. R C Bonetti. Super persistent transient in a master–slave configuration with Colpitts oscillators / R C Bonetti, S L T de Souza, A M Batista, J D Szezech Jr, I L Caldas, R L Viana, S R Lopes and M S Baptista // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. – 2014. – No 47. – 405101 (12 pp).

12. J. Kengne. Dynamical properties and chaos synchronization of improved Colpitts oscillators / J. Kengne, J.C. Chedjou, G. Kenne, K. Kyamakya // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – July 2012. – Volume 17. Issue 7. – pp. 2914–2923.

13. Prodyot Kumar Roy. A high frequency chaotic signal generator: A demonstration experiment / Prodyot Kumar Roy, Arijit Basuray // Am. J. Phys. – January 2003. – 71 (1). – pp. 34-37.

14. Antanas Cenys. Hyperchaos in coupled Colpitts oscillators / Antanas Cenys, Arunas Tamasevicius, Antanas Baziliauskas, Romanas Krivickas, and Erik Lindberg // J. Chaos, Solitons and Fractals. – 2003. – Vol. 17. – pp. 349-353.

15. Guo Hui Li. Controlling chaos in Colpitts oscillator / Guo Hui Li, Shi Ping Zhou, Kui Yang // Chaos, Solitons and Fractals. – 2007. – Vol. 33. – pp. 582-587.

16. E. Lindberg. The Colpitts Oscillator Family / E. Lindberg, K. Murali, and A. Tamasevicius // Proceedings NWP-2008, International Symposium: Topical Problems of Nonlinear Wave Physics, Nizhny Novgorod, July 20-26, 2008. NWP-1: Nonlinear Dynamics of Electronic Systems - NDES'2008. – pp. 47-48.

17. Prodyot Kumar Roy. A high frequency chaotic signal generator: A demonstration experiment / Prodyot Kumar Roy, Arijit Basuray // Am. J. Phys. – January 2003. – No 71 (1). – pp. 34-37.

18. Z. G. Shi. Microwave chaotic Colpitts oscillator: design, implementation and applications / Z. G. Shi // Journal of Electromagn. Waves and Appl. – 2006. – Vol. 20, No. 10. – pp. 1335–1349.

19. S. Bumeliene. Hardware Prototype of the Two-Stage Chaotic Colpitts Oscillator for the UHF Range / S. Bumeliene, A. Tamaševičius, G. Mykolaitis, A. Baziliauskas and E. Lindberg // Proceedings of the NDES 2004. – pp. 99-102.

20. G. Mykolaitis. Two-stage chaotic Colpitts oscillator for the UHF range / G. Mykolaitis, A. Tamaševičius, S. Bumelienė, A. Baziliauskas, E. Lindberg // Elektronika Ir Elektrotechnika. – 2004. – Nr. 4(53). – pp. 13-15.

21. Шахтарин Б.И. Генераторы хаотических колебаний : учебн. пособие / [Б.И. Шахтарин, П.И. Кобылкина, Ю.А. Сидоркина, А.В. Кондратьев, С.В. Митин]. – М.: Гелиос АРВ, 2014. – 248 с.

22. Генерация хаоса / Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И. [под общ. ред. Дмитриева А.С.]. – М.: Техносфера, 2012. – 424 с.

23. O. Tsakiridis. Design of a voltage control chaotic Colpitts oscillator / O. Tsakiridis, E. Zervas, E. Lytra, J. Stonham // Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Electronics, Hardware, Wireless and Optical Communications. Article No. 14. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS) Stevens Point, Wisconsin, USA, 2005.

24. O. Tsakiridis. Design of a Chaotic Balanced Colpitts Oscillator / O. Tsakiridis, E. Zervas, M. Koutsoumpos, J. Stonham // WSEAS Trans. on Circuits and Systems. June 2004. – Vol. 3. – pp. 839-841.

25. Andriy Semenov. Reviewing the Mathematical Models and Electrical Circuits of Deterministic Chaos Transistor Oscillators / Andriy Semenov // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Moscow: National Research University "Higher School of Economics". Russia, Moscow, May 12–14, 2016.

26. Wegener C. RF Chaotic Colpitts Oscillator / Wegener C. and Kennedy M.P. // Proc. the 3rd Int. Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, NDES'95. - Dublin, Ireland, 1995. - P. 255-258.

27. Mykolaitis G. HF and VHF chaos oscillators / Mykolaitis G., Tamaševičius A., Bumelienė S., Lasienė G., Čenys A., Lindberg E. // Electronics and Electrical Engineering. – 2001. – No. 3 (32). – P. 12-17.

28. Tamaševičius A. Two-stage chaotic Colpitts oscillator / Tamaševičius A., Mykolaitis G., Bumelienė S., Čenys A., Anagnostopoulos A.N., Lindberg E. // Electron. Lett. – 2001. – V.37. – No. 9. – P. 549-551.

#### References

1. Dmitriev A. S. Dinamicheskij haos : Novye nositeli informacii dlja sistem svjazi / A. S. Dmitriev, A. I. Panas. – М.: Fizmatlit, 2002. – 251 p.

2. Malineckij G.G. Sovremennye problemy nelinejnoj dinamiki / G.G. Malineckij, A.B. Potapov. – М.: URSS, 2002. – 360 p.

3. Zalogin N. N. Shirokopolosnye haoticheskie signaly v radiotekhnicheskij i informacionnyh sistemah / N. N. Zalogin, V. V. Kislov. – М.: Radiotekhnika, 2006. – 205 p.

4. Vadim S. Anishchenko. Deterministic Nonlinear Systems. A Short Course / Vadim S. Anishchenko, Tatyana E. Vadivasova, Galina I. Strelkova. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014.

5. M. P. Kennedy. Chaos in the Colpitts Oscillator / M. P. Kennedy // IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Fundamental theory and applications. – 1994. – Vol. 11. – pp. 771-774.

6. Cherif Aissi, A Review of Chaotic circuits, Simulation and Implementation / Cherif Aissi, Demetrios Kazakos // Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on CIRCUITS, Vouliagmeni, Athens, Greece, July 10-12, 2006. – pp. 125-131.

7. Shan Qiao. Ultra-wide Band Noise-signal Radar Utilizing Microwave Chaotic Signals and Chaos Synchronization / Shan Qiao, Tao Jiang, Lixin Ran, Kangsheng Chen // Progress In Electromagnetics Research Symposium 2007, Prague, Czech Republic, August 27-30 2007. – pp. 503-506.
8. O. Tsakiridis. Chaotic Operation of a Colpitts Oscillator in the Presence of Parasitic Capacitances / O. Tsakiridis, D. Syvridis, E. Zervas, J. Stonham // WSEAS Trans. on Electronics, vol. 1, Apr. 2004. – pp. 416-421.
9. Suvra Sarkar. Dynamics of Driven Colpitts Oscillator in Presence of Co-channel Tone Interference: An Experimental Study / Suvra Sarkar, Sandeepa Sarkar, B. C. Sarkar // International Journal of Electronics and Applied Research (IJEAR). – 2014. – No. 1. – Published Online June 2014. – pp. 1-14.
10. Arturo Buscarino. Chaos Control in Inductor-Based Chaotic Oscillators / Arturo Buscarino, Luigi Fortuna, Mattia Frasca, Gregorio Sciuto // Proceedings of the 19th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems – MTNS 2010, 5–9 July 2010, Budapest, Hungary. – pp. 2207-2210.
11. R C Bonetti. Super persistent transient in a master–slave configuration with Colpitts oscillators / R C Bonetti, S L T de Souza, A M Batista, J D Szezech Jr, I L Caldas, R L Viana, S R Lopes and M S Baptista // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. – 2014. – No 47. – 405101 (12 pp).
12. J. Kengne. Dynamical properties and chaos synchronization of improved Colpitts oscillators / J. Kengne, J.C. Chedjou, G. Kenne, K. Kyamakya // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – July 2012. – Volume 17. Issue 7. – pp. 2914–2923.
13. Prodyot Kumar Roy. A high frequency chaotic signal generator: A demonstration experiment / Prodyot Kumar Roy, Arijit Basuray // Am. J. Phys. – January 2003. – 71 (1). – pp. 34-37.
14. Antanas Cenys. Hyperchaos in coupled Colpitts oscillators / Antanas Cenys, Arunas Tamasevicius, Antanas Baziliauskas, Romanas Krivickas, and Erik Lindberg // J. Chaos, Solitons and Fractals. – 2003. – Vol. 17. – pp. 349-353.
15. Guo Hui Li. Controlling chaos in Colpitts oscillator / Guo Hui Li, Shi Ping Zhou, Kui Yang // Chaos, Solitons and Fractals. – 2007. – Vol. 33. – pp. 582-587.
16. E. Lindberg. The Colpitts Oscillator Family / E. Lindberg, K. Murali, and A. Tamasevicius // Proceedings NWP-2008, International Symposium: Topical Problems of Nonlinear Wave Physics, Nizhny Novgorod, July 20-26, 2008. NWP-1: Nonlinear Dynamics of Electronic Systems - NDES'2008. – pp. 47-48.
17. Prodyot Kumar Roy. A high frequency chaotic signal generator: A demonstration experiment / Prodyot Kumar Roy, Arijit Basuray // Am. J. Phys. – January 2003. – No 71 (1). – pp. 34-37.
18. Z. G. Shi. Microwave chaotic Colpitts oscillator: design, implementation and applications / Z. G. Shi // Journal of Electromagn. Waves and Appl. – 2006. – Vol. 20, No. 10. – pp. 1335–1349.
19. S. Bumeliene. Hardware Prototype of the Two-Stage Chaotic Colpitts Oscillator for the UHF Range / S. Bumeliene, A. Tamaševičius, G. Mykolaitis, A. Baziliauskas and E. Lindberg // Proceedings of the NDES 2004. – pp. 99-102.
20. G. Mykolaitis. Two-stage chaotic Colpitts oscillator for the UHF range / G. Mykolaitis, A. Tamaševičius, S. Bumeliene, A. Baziliauskas, E. Lindberg // Elektronika ir Elektrotechnika. – 2004. – Nr. 4(53). – pp. 13-15.
21. Shahtarin B.I. Generatory haoticheskikh kolebanij : uchebn. posobie / [B.I. Shahtarin, P.I. Kobylkina, Ju.A. Sidorkina, A.V. Kondrat'ev, S.V. Mitin]. – M.: Gelios ARV, 2014. – 248 s.
22. Generacija haosa / Dmitriev A.S., Efremova E.V., Maksimov N.A., Panas A.I. [pod obshh. red. Dmitrieva A.S.]. – M.: Tehnosfera, 2012. – 424 s.
23. O. Tsakiridis. Design of a voltage control chaotic Colpitts oscillator / O. Tsakiridis, E. Zervas, E. Lytra, J. Stonham // Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Electronics, Hardware, Wireless and Optical Communications. Article No. 14. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS) Stevens Point, Wisconsin, USA, 2005.
24. O. Tsakiridis. Design of a Chaotic Balanced Colpitts Oscillator / O. Tsakiridis, E. Zervas, M. Koutsoumpas, J. Stonham // WSEAS Trans. on Circuits and Systems. June 2004. – Vol. 3. – pp. 839-841.
25. Andriy Semenov. Reviewing the Mathematical Models and Electrical Circuits of Deterministic Chaos Transistor Oscillators / Andriy Semenov // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Moscow: National Research University "Higher School of Economics". Russia, Moscow, May 12–14, 2016.
26. Wegener C. RF Chaotic Colpitts Oscillator / Wegener C. and Kennedy M.P. // Proc. the 3rd Int. Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, NDES'95. - Dublin, Ireland, 1995. - P. 255-258.
27. Mykolaitis G. HF and VHF chaos oscillators / Mykolaitis G., Tamaševičius A., Bumeliene S., Lasienė G., Čenys A., Lindberg E. // Electronics and Electrical Engineering. – 2001. – No. 3 (32). – P. 12-17.
28. Tamaševičius A. Two-stage chaotic Colpitts oscillator / Tamaševičius A., Mykolaitis G., Bumeliene S., Čenys A., Anagnostopoulos A.N., Lindberg E. // Electron. Lett. – 2001. – V.37. – No. 9. – P. 549-551.

Рецензія/Peer review : 23.1.2017 р.

Надрукована/Printed :7.3.2017 р.

Стаття рецензована редакційною колегією