

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**



ЦВЕЛИХ ІВАН СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.373.5

**МЕТОДИ ПОБУДОВИ МАЛОШУМЛЯЧИХ ТРАНЗИСТОРНИХ
ГЕНЕРАТОРІВ САНТИМЕТРОВОГО ТА МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНІВ
ДОВЖИН ХВИЛЬ**

05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України на кафедрі радіотехнічних пристроїв та систем.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Коцержинський Борис Олексійович
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри радіотехнічних пристроїв та систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Нікітенко Юрій Гордійович
Державне підприємство Науково-дослідний інститут радіолокаційних систем «Квант – Радіолокація»,
головний науковий співробітник

кандидат технічних наук
Карушкін Микола Федорович
Державне підприємство Науково-дослідний інститут «Оріон»,
начальник відділу

Захист відбудеться «22» травня 2017 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.14 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056 м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 1. ауд. 163.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056 м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «__» квітня 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.002.14
д.т.н., проф.

Л.О. Уривський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Найбільший прогрес в індустрії телекомунікацій в останні роки досягнуто в секторі безпроводових систем зв'язку, найпоширеніші з яких охоплюють діапазони частот від 1 до 86 ГГц та забезпечують передачу інформації на відстанях від сотень метрів до десятків кілометрів на швидкостях, що сягають декількох Гбіт/с.

Серед широкого спектру вимог до пристроїв та вузлів цифрових систем передачі інформації в першому ряду знаходяться здатність працювати зі складними методами квадратурної модуляції, збільшення щільності каналів, висока технологічність виробництва вузлів з метою забезпечення нижчої вартості послуги доступу. При побудові каналів передачі цифрових даних, які відповідають переліченим вимогам, фазовий шум гетеродинів перетворювачів частоти виступає обмежуючим чинником, що обумовлено підвищеною чутливістю методів квадратурної модуляції високих порядків до цього параметру. Окрім того, завдяки явищу взаємного змішування при перетворенні частоти у приймачах, фазовий шум гетеродина здатен погіршити чутливість прийому при наявності потужної завади в сусідньому каналі. Потреба збільшення швидкостей передачі інформації стимулює освоєння технікою зв'язку короткохвильової частини сантиметрового та міліметрового діапазонів, що дозволяє використовувати ширші смуги каналів, а також має переваги вищої захищеності інформації, ширших можливостей повторного використання частот та зниження вітрових навантажень, в порівнянні з більш заселеними низькочастотними діапазонами. Тому зменшення рівня шумів опорних генераторів у вказаних діапазонах має велике практичне значення.

Аналіз сучасного стану вирішення цієї задачі розкриває значну ефективність методу побудови НВЧ генераторів за двотактною схемою з виходом на другій гармонії основного коливання. Для досягнення найкращих результатів необхідне застосування високодобротної резонансної системи. Однак широковідомим рішенням на основі інтегрованих електродинамічних систем притаманні низькі значення добротностей, а застосування більш високодобротних (діелектричних, об'ємних, сапфірових, оптоелектронних) резонаторів призводить до зниження технологічності конструкції та/або підвищенню її вартості. На сьогоднішній день задача зниження спектральної щільності потужності фазового шуму залишається однією з найбільш складних при проектуванні генераторів і потребує створення нових методів її вирішення.

Таким чином, актуальною є науково-прикладна задача створення моделей, методів розрахунку та розроблення технологічних конструктивних рішень високоефективних багатотактних генераторів та високодобротних резонансних систем у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати дисертації отримані в процесі виконання наукових досліджень кафедри радіотехнічних пристроїв та систем радіотехнічного факультету НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського” в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт, а саме: № 2038-п “Розробка принципів побудови та інженерної реалізації гібридно-інтегральних малoshумлячих генераторів частоти міліметрового діапазону” (номер держреєстрації 0107U002492), № 2239-п “Розробка інтегральних прийомо-

передавальних модулів міліметрового діапазону для систем широкосмугового безпроводового доступу” (номер держреєстрації 0109U001791) та № 2423-п “Розробка багатоканальних передавачів короткохвильової частини сантиметрового діапазону для систем багатостанційного радіодоступу” (номер держреєстрації 0111U000705).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є зниження рівня фазового шуму опорних генераторів систем зв'язку у сантиметровому та міліметровому діапазонах шляхом розроблення методів побудови та нових конструкцій генераторів та їх резонансних структур.

Для досягнення цієї мети необхідне вирішення наступних задач:

1. Проведення порівняльного аналізу методів побудови генераторів з малим рівнем фазового шуму у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль.

2. Вдосконалення методу проектування двотактних генераторів зі зниженими значеннями рівня фазового шуму у сантиметровому та міліметровому діапазонах.

3. Створення нових резонансних структур зі збільшеним значенням добротності для створення планарних та квазіпланарних конструкцій малoshумлячих генераторів у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль. Проведення аналізу їх моделей та експериментального дослідження конструкцій.

4. Розроблення методу об'єднання об'ємних металевих резонансних структур з планарними підкладками генераторів.

5. Розроблення нових високотехнологічних конструкцій генераторів зі зниженими рівнями фазового шуму на основі розроблених резонансних структур у сантиметровому та міліметровому діапазонах, їх теоретичний аналіз та експериментальне дослідження.

6. Розроблення технологічних вузлів синтезаторів частоти з малим рівнем фазового шуму у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль, їх аналіз та експериментальне дослідження.

Об'єктом дослідження є фазовий шум твердотільних генераторів сантиметрового та міліметрового діапазонів довжин хвиль.

Предметом дослідження є принципи та методи побудови ГС генераторів з малим рівнем фазового шуму.

Методи дослідження. Завдання дисертаційної роботи розв'язувались із застосуванням методів математичного апарату теорії ліній передачі, розв'язання задач оптимізації, математичного моделювання НВЧ тривимірних структур, методу скінченних різниць у часовій області (СРЧО), методу гармонічного балансу (ГБ).

Наукова новизна отриманих результатів.

Встановлені у дисертації наукові положення є суттєвим доповненням знань, необхідних для вирішення задачі створення генераторів сантиметрового та міліметрового діапазонів довжин хвиль зі зниженим рівнем фазового шуму. У ході виконання дисертаційної роботи здобуто нові результати:

1. Розроблено новий метод об'єднання об'ємних металевих резонансних структур з планарною підкладкою генератора, що дозволяє значно знизити рівень фазового шуму за рахунок застосування резонаторів зі збільшеним значенням добротності.

2. Вдосконалено метод проектування двотактних генераторів сантиметрового та міліметрового діапазонів довжин хвиль шляхом використання в якості корисного вихідного сигналу третьої гармоніки основного коливання, що досягається зміною вихідного ланцюга генератора та дозволяє досягти зниження рівня фазового шуму у вищих діапазонах частот.

3. Розроблено моделі резонансних структур зі збільшеним значенням власної добротності, на основі яких побудовано нові високотехнологічні конструкції генераторів зі зниженим рівнем фазового шуму у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль.

Практична цінність отриманих результатів.

1. Запропонований метод проектування двотактних генераторів дозволяє створювати їх зразки у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль, які за технологічністю конструкцій перевершують аналоги з подібними рівнями фазового шуму та працюють на упівтора рази вищих частотах. Базову конструкцію такого генератора захищено патентом України.

2. Запропонований метод об'єднання об'ємних металевих резонаторів з планарними підкладками генераторів та використанням виходу на третій гармоніці основного коливання дозволили досягти значень середньоквадратичного відхилення (СКВ) фази вихідного сигналу на рівні $0,84^\circ$ в міліметровому діапазоні (фазовий шум $-96,4$ дБн/Гц при відстроюванні 10 кГц від носійної частоти 36 ГГц).

3. Запропонована методика розрахунку рівня фазового шуму генераторів, що полягає в поєднанні методів скінченних різниць в часовій області (СРЧО) та методу гармонічного балансу (ГБ), характеризується високою точністю, що підтверджено розбіжностями з результатами експериментальних даних в межах ± 5 дБ.

4. Розроблені синтезатори частоти на основі двотактних генераторів керованих напругою (ГКН) з виходом на другій (24 ГГц) та третій (36 ГГц) гармоніках є температурно-стабілізованими завершеними серійно придатними виробами, характеризуються низькими рівнями СКВ фази ($0,853^\circ$ та $1,3^\circ$, відповідно) та можуть бути використані в якості гетеродинів перетворювачів частоти в зовнішніх антенних блоках цифрових систем зв'язку в каналах з методами модуляції до 8-PSK та 32-QAM включно.

5. Розроблений модуль синтезаторів частоти на основі інтегральних мікросхем ГКН у сантиметровому діапазоні частот ($9,9$ — $11,28$ ГГц) з малим рівнем фазового шуму (СКВ фази $1,16^\circ$) впроваджено у діючій системі багатостанційного ширококутового доступу AIDAAS (ТОВ “Лінкстар”). Застосування розробки дозволило реалізувати серійнопридатну конструкцію трансівера абонента зі зменшеними габаритними розмірами, яка позбавлена необхідності налаштування в процесі випуску.

Запропоновані в роботі оригінальні конструктивні рішення та проведені їх детальні теоретичні та експериментальні дослідження розширюють та доповнюють базу відомих елементів для створення технологічних конструкцій гібридних інтегральних схем генераторів.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні положення, результати моделювання, експериментальні та прикладні результати отримані автором самостійно. У співавторстві з науковим керівником сформульовані мета і задачі досліджень. В роботах, опублікованих у співавторстві особисто автором: в [1]

проведено моделювання умов самозбудження генератора; в [2], [3] виконано теоретичний аналіз ймовірності бітових помилок в каналі з PSK-модуляцією, в [3] проведено розробку модуля синтезаторів частоти; в [4], [5] виконано розробку макетів двотактних генераторів, в [5] запропоновано та втілено методику розрахунку фазового шуму генератора; в [6] — [9] виконано моделювання та розробку плечей генератора, підготовку та оформлення патентної документації, в [9] запропоновано використання резонатора на основі ППХ на основній гармоніці коливань для побудови двотактного генератора; в [10] виконано моделювання та розробку резонатора, теоретичний аналіз та експериментальне вимірювання добротності; в [11] проведено порівняльний аналіз підходів до побудови малoshумлячих генераторів; в [12] проведено теоретичний аналіз та експериментальне дослідження з метою визначення умов оптимального перетину годографів вхідного імпедансу резонатора та лінії приладу активного елемента двотактного генератора для забезпечення мінімального рівня фазового шуму; в [13], [14] проведено розробку резонатора та плечей генератора, експериментальні дослідження характеристик резонатора та генератора; в [1] — [3], [5] виконано розробку та розрахунки петлі з ФАПЧ; в [1] — [5], [12] — [14] проведено експериментальні дослідження характеристик генераторів та синтезаторів частоти.

Апробація. Матеріали дисертації та основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на на 5-ти міжнародних науково-технічних конференціях: I та III міжнародних науково-технічних конференціях “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций” (Міжнародні конференції, м. Севастополь, 2005 р., 2007 р.); “VII International Conference on Antenna Theory and Techniques” (Міжнародна конференція, м. Львів, 2009 р.); XII, XIII International Conference “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science” (Міжнародна конференція, м. Львів, 2012 р., 2014 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 14 робіт, з них 5 – у наукових фахових виданнях України, з яких 2 статті – у науково-метричних базах SCOPUS, Inspec, Ei Compendex, SCIE, 3 статті в інших міжнародних науково-метричних базах (одна з них входить до баз Web of Science, Directory of open access journals, Index Copernicus International, та дві до бази Російський Індекс Наукового Цитування), 4 патенти України на корисну модель, 5 публікацій тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури, двох додатків. Робота містить 163 сторінки, в тому числі 140 сторінок основного тексту, 95 рисунків, 6 таблиць. Перелік літератури містить 127 джерел. Додатки розміщені на 8 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету і основні завдання досліджень, визначено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача, подано відомості про впровадження результатів, їх апробацію та публікації.

У першому розділі розглянуто механізми впливу фазового шуму генераторів перетворювачів частоти на характеристики каналів передачі даних, проведено моделювання каналів з цифровими методами фазової маніпуляції та кількісно визначено вимоги щодо рівнів фазового шуму гетеродинів перетворювачів частоти; розглянуто методи побудови генераторів з малим рівнем фазового шуму та сформульовано принципи побудови таких генераторів; сформульовано задачі дослідження.

Фазовий шум (ФШ) гетеродинів перетворювачів частоти здійснює найбільш істотний вплив на характеристики НВЧ каналів передачі даних через вплив на СКВ фази сигналу, переданого по радіоканалу, що призводить до спотворення сигнального сузір'я при перетворенні частоти. З метою оцінки такого впливу в середовищі MATLAB Simulink проведено аналіз моделі каналу передачі даних з методами цифрової модуляції N-PSK та N-QAM, в якому досліджено значення коефіцієнта бітових помилок в каналі в залежності від СКВ фази гетеродинів перетворювачів частоти.

За максимально допустимий рівень ФШ гетеродинів перетворювачів частоти прийнято такий, при якому для збереження коефіцієнта бітових помилок на рівні 10^{-4} необхідно збільшити відношення сигнал/шум на 1дБ. ФШ задаючих генераторів модулятора та демодулятора при цьому вважається значно нижчим та в розрахунках не врахований.

Отримані дані дозволяють сформулювати вимоги до шумових характеристик гетеродинів в каналах з методами квадратурної фазової та амплітудної модуляції. Для високих порядків вимоги можуть представляти складну задачу навіть в діапазоні проміжних частот, а в сантиметровому та міліметровому діапазонах потребують застосування спеціальних методів.

Характеристика ФШ ГКН може бути представлена рівнянням Лізона:

$$L(f_m) = 10 \log \left[\frac{FkT}{2P} \left(\left(\frac{f_0}{2Q_L} \right)^2 \frac{f_c}{f_m^3} + \left(\frac{f_0}{2Q_L} \right)^2 \frac{1}{f_m^2} + \frac{f_c}{f_m} + 1 \right) + \frac{2kTRK_0^2}{f_m^2} \right],$$

аналіз якого в застосуванні до НВЧ генераторів дозволив сформулювати основні принципи побудови джерел з малим рівнем фазового шуму: 1) застосування резонаторів з високим значенням навантаженої добротності Q_L ; 2) вибір активних елементів з малими значеннями частоти кута флікер шуму f_c та коефіцієнта шуму F ; 3) вибір варакторів з якомога меншим шумовим опором R ; 4) забезпечення максимальної потужності сигналу; 5) забезпечення мінімально необхідного коефіцієнта перестроювання частоти K_0 ; 6) вибір оптимального режиму роботи активного елемента, при якому нелінійний характер перетворення низькочастотного шуму активного елемента у високочастотний фазовий буде мінімізовано.

Таблиця 1

Тип модуляції	$\theta_{TX}^{rms}, \theta_{RX}^{rms}$	Тип модуляції	$\theta_{TX}^{rms}, \theta_{RX}^{rms}$
QPSK	3°	16QAM	1,3°
8PSK	1,37°	32QAM	0,91°
16PSK	0,77°	64QAM	0,61°
32PSK	0,34°	128QAM	0,43°
64PSK	0,19°	256QAM	0,34°

Аналіз публікацій, присвячених методам побудови малошумлячих генераторів НВЧ діапазону показав, що найбільш ефективним з них є метод побудови генераторів за двотактною схемою. Метод забезпечує вивід енергії другої гармоніки основного коливання резонатора f_0 за рахунок складання насичених гармоніками сигналів на вихідних електродах активних елементів (АЕ). Протифазна робота плечей забезпечує складання парних та придушення непарних гармонік, при цьому енергія коливань зосереджена головним чином на корисній другій гармоніці $2f_0$. Завдяки когерентності коливань в плечах генератора та некогерентності шумів АЕ, при складанні рівень ФШ знижується на $10\lg(2) = 3$ дБ, в порівнянні зі схемами на одному транзисторі, а вико-ристання другої гармоніки в якості вихідного сигналу дозволяє задіяти резонатор на нижчій частоті, де його добротність вища.

На основі отриманих даних в ході аналізу впливу ФШ гетеродинів перетворювачів частоти на якість каналів передачі даних, а також огляду методів та принципів побудови малошумлячих генераторів НВЧ діапазону сформульовано науково-прикладні задачі дисертації.

У другому розділі запропоновано високодобротні резонансні структури для побудови технологічних зразків генераторів у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль, запропоновано метод об'єднання об'ємних металевих резонансних структур з планарною підкладкою генератора; проведено теоретичний аналіз моделей резонаторів та експериментально досліджено виготовлені зразки.

Для розробки НВЧ генераторів за запропонованою методикою розроблено технологічні конструкції резонансних структур та проведено їх теоретичні та експериментальні дослідження.

Мікросмушковий кільцевий резонатор.

Топологія та конструкція запропонованого кільцевого резонатора на основі мікросмушкової лінії передачі (МСЛ) представлені на рис. 1. Резонатор сформований відрізком МСЛ довжиною $3\lambda/2$, згорнутим у кільце з конденсаторами C в якості елементів зв'язку. Довжина $3\lambda/2$ обрана виходячи з можливості геометричної реалізації. Різниця фаз в точках зв'язку складає 180° , що необхідно для роботи двотактного генератора. До особливостей резонатора слід віднести близьке розташування пар частот $\omega_s^{(n)}$, $\omega_p^{(n)}$ паралельного та послідовного резонансів, що дозволяє підвищити навантажену добротність резонатора, пропорційну похідній $\partial X_R(\omega)/\partial\omega$. Резонатор виготовлено

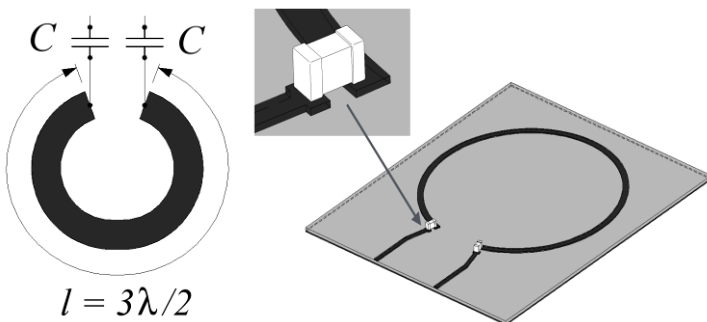


Рис. 1 Мікросмушковий кільцевий резонатор

на полімерній підкладці Rogers RO4003C: діелектрична проникність $\epsilon = 3,38$; тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta = 0,0027$ на частоті 10 ГГц; товщина підкладки $d = 0,203$ мм; ширина лінії резонатора $w = 0,7$ мм; довжина лінії резонатора $l = 66$ мм. На частоті резонансу $f_0 = 3,74$ ГГц

вимірне значення власної добротності склало $Q_0 = 68$.

Резонатор на основі зваженої мікросмужкової лінії.

З метою збільшення власної добротності запропоновано застосування в якості лінії резонатора зваженої МСЛ. Резонатор представляє собою квазіпланарну структуру, об'ємні елементи конструкції якої можуть бути реалізовані без порушення планарності конструкції (рис. 2). Збільшений робочий об'єм поля

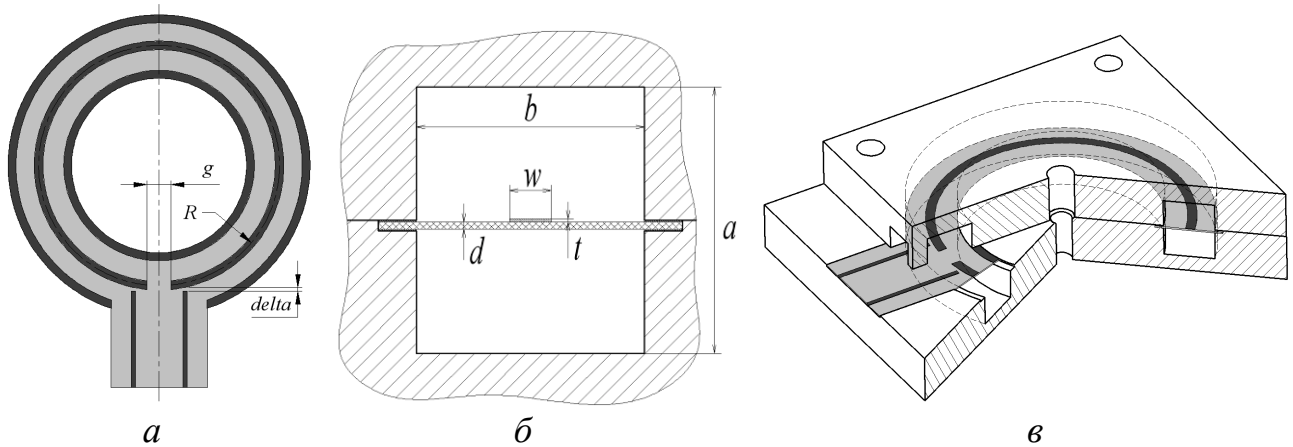


Рис. 2 Резонатор на основі зваженої МСЛ: підкладинка (а), поперечний переріз лінії резонатора (б) та конструкція (в)

корисної моди дозволяє виключити зосереджені елементи зв'язку, що призводить до додаткового зниження втрат. Зв'язок з резонатором регулюється зміною зазору $delta$. Запропонована модель резонатора дозволяє поєднати в одній конструкції об'ємний резонатор та планарну підкладинку. В якості підкладинки використано матеріал RO4003C для виготовлення резонатора з наступними розмірами: $a = 7$ мм; $b = 6$ мм; $t = 17$ мкм; $d = 0,203$ мм; $R = 15,2$ мм; $g = 3$ мм; $delta = 0,05$ мм. На частоті резонансу $f_0 = 3,72$ ГГц вимірне значення власної добротності склало $Q_0 = 143$.

Резонатор на основі інтегрованого в підкладинку хвилеводу (ПХ).

Верхній та нижній шари металізації в сукупності з металізованими отворами по периметру структури резонатора створюють об'єм в тілі підкладинки, який представляє собою короткозамкнений відрізок прямокутного хвилеводу довжиною L та поперечним перерізом $W \times d$ (рис. 3). Зв'язок резонатора з зовнішньою мікросмужковою лінією регулюється геометрією верхнього шару металізації в області їх з'єднання. Введені в об'єм резистори, що з'єднують верхній та нижній шари металізації придушують коливання паразитних мод. Різниця фаз 180° в точках зв'язку з резонатором забезпечується конфігурацією корисної моди H_{102} . Резонатор виготовлений на підкладинці NH9338 з

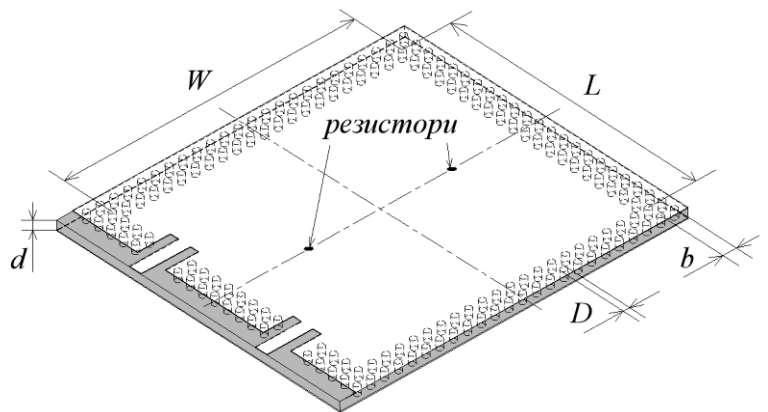


Рис. 3 Резонатор на основі ПХ

наступними характеристиками та розмірами: $\epsilon = 3,38$; $tg\delta = 0.0027$ на частоті 10 ГГц; $d = 1,016$ мм; $L = W = 47$ мм. На частоті резонансу $f_0 = 3,75$ ГГц вимірне значення власної добротності склало $Q_0 = 233$.

Об'ємний резонатор на основі прямокутного хвильоводу.

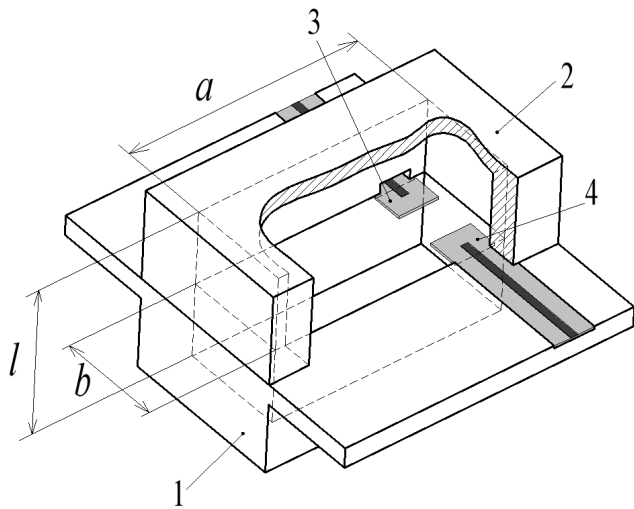


Рис. 4 Резонатор на основі прямокутного хвильоводу

Резонатор сформований відрізком прямокутного хвильоводу з поперечним перерізом $a \times b$ (рис. 4). Повздовжній розмір резонатора l , розміщений вертикально та визначається короткозамикаючими стінками. Точно посередині резонатор розсічений на дві рівні частини та утворюється двома порожнинами у основі 1 та кришці 2. Така конструкція дозволяє отримати максимальну добротність, оскільки поверхневі струми для корисної моди H_{101} течуть паралельно площині перерізу. Зв'язок з резонатором здійснюється за допомогою зондів на

підкладках 3 та 4, розміщених у протилежних широких стінках. Це забезпечує зсув фаз між коливаннями в них на 180° та дозволяє поєднати планарну підкладку генератора з об'ємною конструкцією високодобротного резонатора. Розміри резонатора: $a \times b \times l = 23 \times 10 \times 14$ мм. Матеріал підкладки Rogers Duroid: $\epsilon = 3,38$; $tg\delta = 0,0009$ на частоті 10 ГГц; $d = 0,254$ мм. На частоті резонансу $f_0 = 11,929$ ГГц вимірне значення власної добротності склало $Q_0 = 2978$.

У третьому розділі запропоновано вдосконалення методу проектування двотактних генераторів; представлено нові конструкції генераторів сантиметрового та міліметрового діапазонів довжин хвиль; запропонований метод розрахунку рівня фазового шуму генераторів, що полягає в поєднанні методів СРЧО та методу ГБ, характеризується високою точністю, що підтверджено малими розбіжностями з результатами експериментальних даних; створено та проаналізовано моделі, виготовлено та експериментально досліджено генератори у см та мм діапазонах.

Метод побудови генераторів за двотактною схемою вдосконалено для використання в якості корисного вихідного сигналу третьої гармоніки основної моди коливань резонатора. Для цього вихідний ланцюг синфазного складання сигналів замінено на схему балансного суматора, що призводить до складання непарних та придушення парних гармонік основного коливання (рис. 5). Припускаючи повну ідентичність плечей генератора, колекторні напруги активних елементів можуть бути представлені як:

$$s_{V3}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot \sin(n\omega_0 t + \varphi_n); \quad s_{V4}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot \sin(n\omega_0 t + \varphi_n + \Delta\varphi_n).$$

Завдяки протифазному режиму роботи плечей, різниці фаз гармонічних компонентів визначаються як: $\Delta\varphi_n = n\pi$. При додаванні колекторних напруг в балансну суматорі відбувається компенсація парних гармонічних складових та підсилення непарних:

$$s_{V5}(t) = s_{V3}(t) - s_{V4}(t) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} 2 \cdot a_n \cdot \sin(n\omega_0 t + \varphi_n).$$

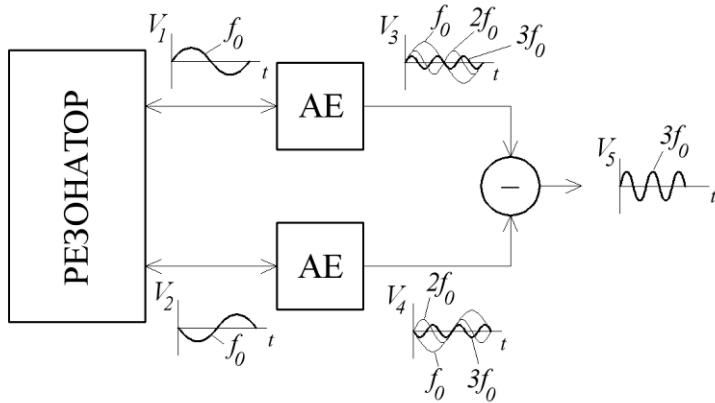


Рис. 5 Вдосконалення методу побудови генератора за двотактною схемою

Ланцюг балансного суматора спроектований так, що повертає енергію коливань на основній моді f_0 назад до АЕ, де вона перетворюється в енергію корисної третьої гармоніки $3f_0$. Це дозволяє отримати вихідний сигнал не вдвічі, а втричі вище частоти резонатора, а також знизити ступінь перетворення низькочастотних $1/f$ -шумів АЕ в фазовий шум генератора завдяки зміні характеру нелінійності АЕ.

Двотактні генератори (ДГ) з виходом на третій гармоніці у сантиметровому діапазоні довжин хвиль.

На рис. 6 представлені топології запропонованих в роботі моделей ДГ з

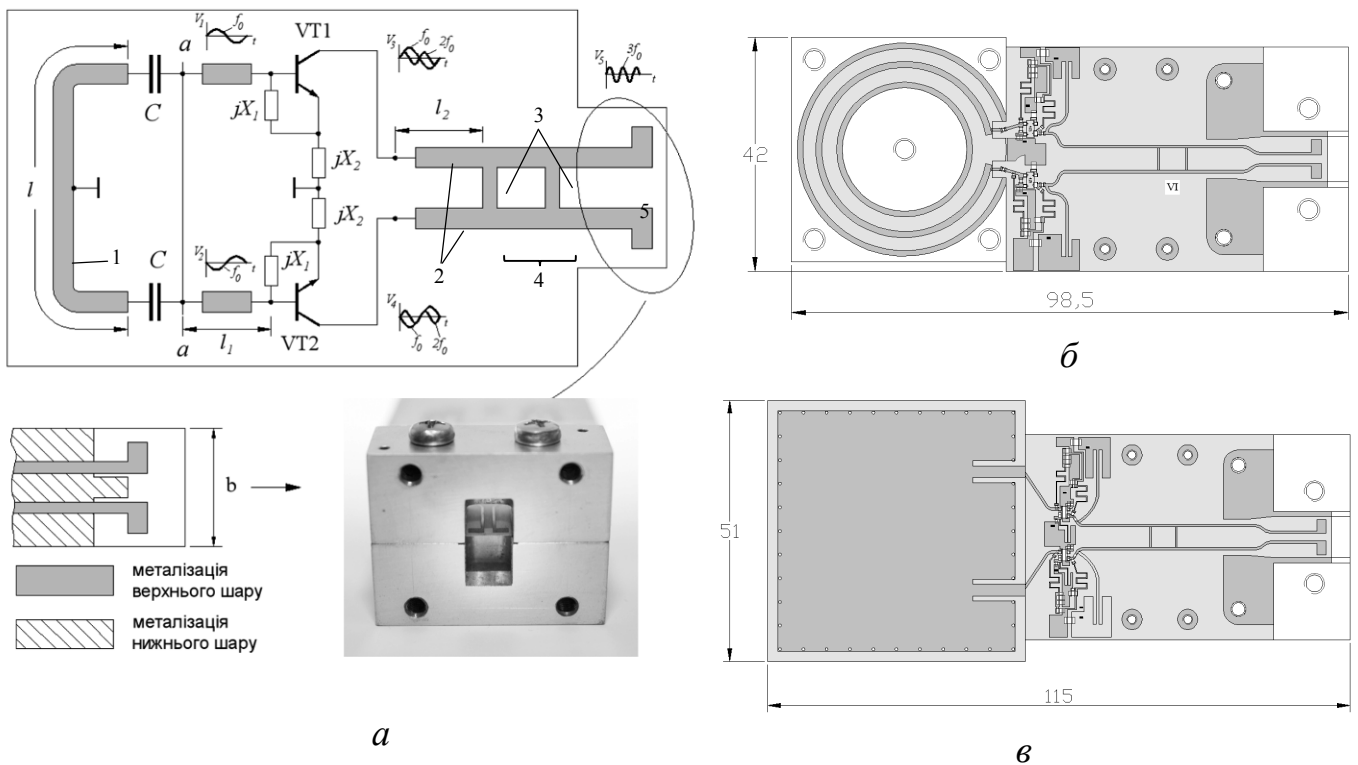


Рис. 6 Топології моделей ДГ з виходом на третій гармоніці у см діапазоні довжин хвиль: ДГ на основі кільцевого МСЛ резонатора та запропонований перехід на прямокутний хвилевід (а); ДГ на ЗМСЛ резонаторі (б); ДГ на ППХ резонаторі (в)

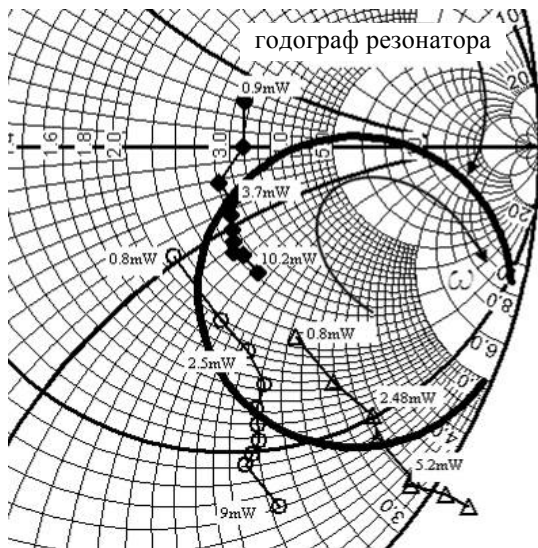


Рис. 7 Годограф вхідного опору резонатора 1 та лінії приладу для різних положень вихідного трансформатора 4: \triangle $l_2 = 14.5$ мм; \square $l_2 = 21$ мм; \blacklozenge $l_2 = 24.3$ мм

виходом на третій гармоніці у сантиметровому діапазоні довжин хвиль на основі резонаторів на МСЛ, зваженій МСЛ та ПХ. Основу плечей складають кремнієві біполярні транзистори VT1 та VT2 (тип АТ41511: $f_T = 8$ ГГц, $F = 1,7$ дБ), охоплені позитивним зворотним зв'язком за допомогою реактивностей X_1 та X_2 (рис. 6,а). Сірими смугами позначені провідники МСЛ, ланцюги живлення транзисторів для спрощення рисунку не показані. Непарний тип коливань кільцевого резонатора на МСЛ 1 забезпечує протифазну роботу транзисторів та збудження вихідних МСЛ 2 на непарній моді на частоті f_0 . Короткі перемички 3 ефективно відбивають хвилі саме такого типу (f_0), а відстань між ними та їх ширина обрані так, щоб структура 4 утворила прохідний резонатор на частоту третьої гармоніки ($3f_0$) генерованого сигналу. Вихід генератора реалізовано на секції 5, яка суміщає функції протифазного суматора та збуджувача прямокутного хвилевода перерізом 23×10 . Необхідно проводити ретельний вибір елементів X_1 , X_2 а також відстані l_2 до вихідного резонатора 4 з метою забезпечення оптимального перетину в площині $a-a$ годографів вхідного опору резонатора $\dot{Z}_R(\omega) = X_R(\omega) + jR_R(\omega)$ та величини $-\dot{Z}_d(P)$, де $\dot{Z}_d(P)$ - імпеданс активного елемента при подачі на нього потужності P (рис. 7). Перетин годографів під кутом, близьким до 90° забезпечує максимальну стійкість коливань, що також знижує рівень ФШ генератора.

Відповідно до запропонованої методики було розраховано та виготовлено макети ДГ з виходом на третій гармоніці на резонаторах МСЛ, зваженій МСЛ та ПХ, два з яких показані на рис. 8. Генератори виконані на полімерних підкладках RO4003С товщиною 203 мкм, для ДГ з резонатором на ПХ товщина підкладки

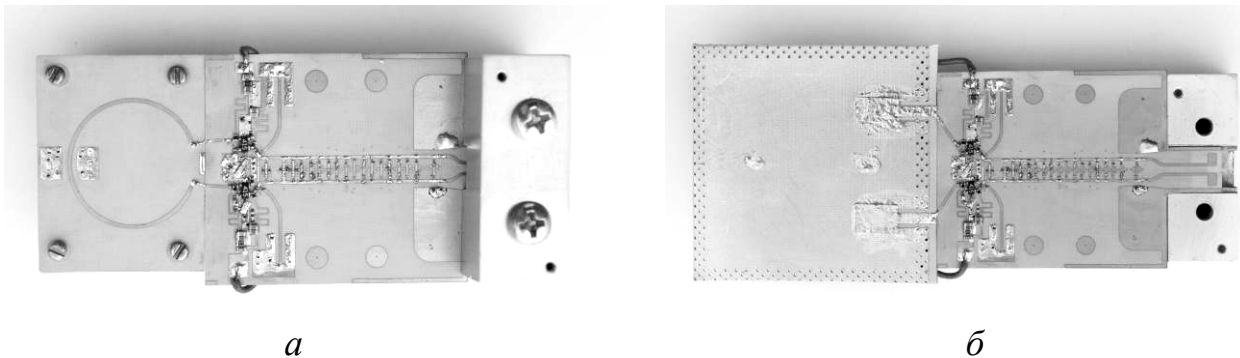


Рис. 8 Макети ДГ з виходом на третій гармоніці у сантиметровому діапазоні: генератор на кільцевому МСЛ резонаторі (а); генератор на резонаторі ПХ (б)

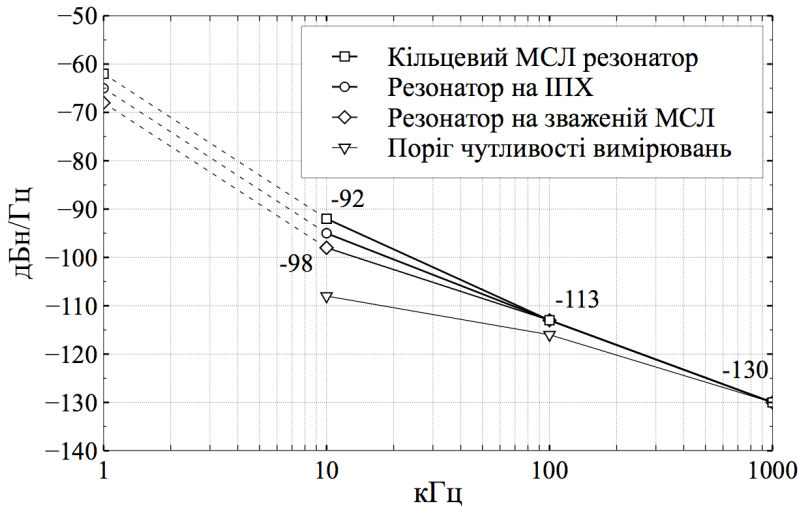


Рис. 9 ФШ ДГ на основі резонаторів МСЛ, зваженої МСЛ та ПИХ

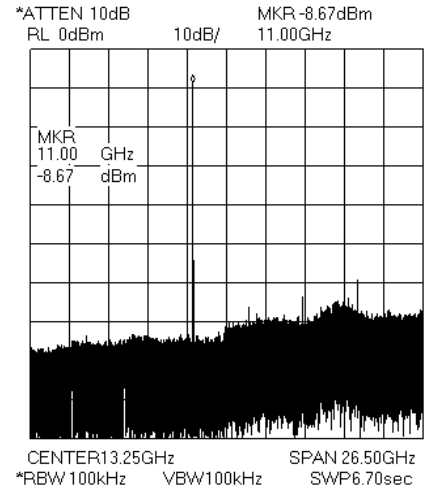


Рис. 10 Спектр ДГ на основі резонатора МСЛ

резонатора склала 1,016 мм. Характеристики вихідного сигналу, виміряного на хвилеводному виході приведені в табл. 2, характеристики ФШ показані на рис. 9.

Результати вимірювань ФШ, проведені в діапазоні відстроювань від носійної від 10 кГц до 1 МГц на аналізаторі спектра Agilent 8563E, демонструють низькі рівні фазових шумів запропонованих моделей генераторів.

З рис. 9 видно також, що для частот відстроювання від носійної вище 100кГц результати вимірювань обмежуються порогом чутливості і можуть приймати менші значення. Припускаючи типовий нахил характеристики ФШ для частот нижче 10кГц у 30дБ на декаду, було розраховано значення СКВ фази сигналу генератора в діапазоні 1кГц — 1МГц (табл.2):

$$\theta^{rms} = \frac{180}{\pi} \sqrt{2 \int_{f_1}^{f_2} L(f_m) df}.$$

Отримані результати свідчать про високу ефективність викладених принципів та запропонованого методу побудови ДГВТГ. Слід відмітити особливо низькі значення коефіцієнту якості генераторів FOM, який для генератора на ЗМСЛ склав -194 дБн/Гц. Коефіцієнти якості розраховані за виразом:

$$FOM = L(f_m) - 20 \log \left(\frac{f_0}{f_m} \right) + 10 \log(P_{DC}),$$

де $L(f_m)$ – рівень фазового шуму при відстроюванні від носійної на f_m ; f_0 – частота генерації (носіїна); P_{DC} – потужність споживання в мВт.

До переваг запропонованих ДГ слід віднести також низькі рівні гармонічних складових у спектрі вихідного сигналу, що досягається

Таблица 2

Тип ДГ \ Параметр	МСЛ	зваж. МСЛ	ПИХ
f , ГГц	11,012	11,129	11,250
P, дБм	-8,67	-8,32	-9,25
θ^{rms}	1,45°	0,73°	1,026°
FOM, дБн/Гц	-188	-194	-191

завдяки використанню хвильоводного виходу (рис. 10). Результати СКВ фази свідчать, що розроблені генератори можуть застосовуватись у перетворювачах частоти систем зв'язку з методами модуляції до 16PSK, 32QAM.

ДГ з виходом на другій та третій гармоніках у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль на основі об'ємного резонатора.

На рис. 11 показані топології запропонованих в роботі двотактного генератора з виходом на другій та третій гармоніках на основі об'ємного хвильоводного резонатора. Мікросмушкові тракти показані сірими смугами, ланцюги активного зміщення транзисторів $VT1$ та $VT2$ не показані з метою спрощення рисунка. Кожне з плечей генератора охоплене петлею зворотного зв'язку, в розриві якої розміщений спільний для них резонатор. З метою досягнення мінімального рівня ФШ зв'язок з резонатором забезпечує співвідношення власної та навантаженої добротностей $Q_L/Q_0=1/2$. В якості транзисторів обрано кремній-германієві біполярні транзистори з гетероструктурними переходами BFU730F ($f_T = 55$ ГГц, $F = 1,3$ дБ). Довжина ліній плечей генератора l_1+l_2 , що задовольняє умови самозбудження розрахована в середовищі Agilent ADS з використанням моделі резонатора, побудованій у пакеті електродинамічного аналізу CST Microwave Studio. Встановлені коливання в базових ланцюгах на основній частоті $f_0=12$ ГГц (V_1 та V_2) підсилюються та збагачуються гармоніками (V_3 та V_4). Вихід генератора на другій гармоніці утворено за класичною схемою прямим з'єднанням колекторних напруг V_3 та V_4 в точці А, куди під'єднано коаксіальний вихід (рис. 11,а). В умовах балансу плечей генератора в точці А відбудеться повне придушення коливань на основній частоті f_0 та подвоєння напруги другої гармоніки на частоті $2f_0=24$ ГГц (V_5). Для основної гармоніки коливань в точці А створюється віртуальне коротке замикання (КЗ). Утворені таким чином КЗ-шлейфи l_3 близькі до $\lambda_{f_0}/4$, чим забезпечується виключення впливу виходу схеми на роботу плечей генератора.

Для формування вихідного сигналу на третій гармоніці основної частоти коливань, вихідний ланцюг замінюється на показаний на рис. 11,б. В точці А

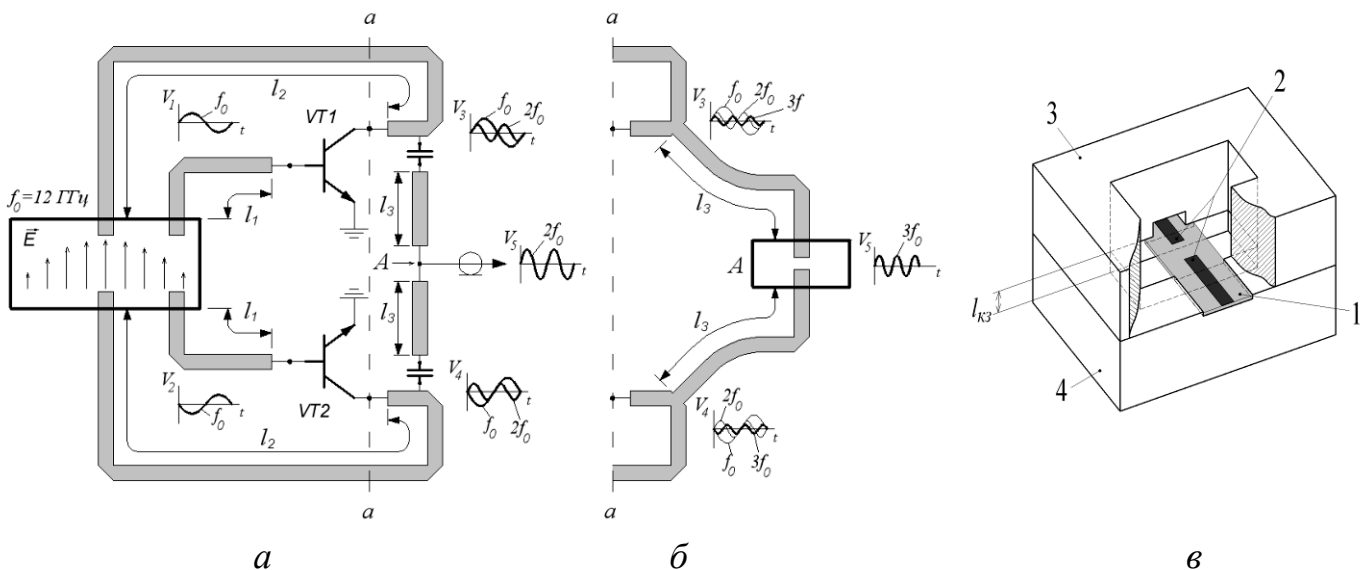


Рис. 11 Топології ДГ на основі об'ємного резонатора з виходом на другій (а) та третій (б) гармоніках; балансний перехід з МСЛ на хвильвід 7.2×3.4 мм (в)

розміщено мікросмушковий зондовий перехід на прямокутний хвилевід перерізом 7.2×3.4 мм (аналог EIA — WR28) (рис. 11,в). Перехід виконує функцію балансного складання напруг V_3 та V_4 в результаті чого спектральні складові $2f_0$ віднімаються, а коливання на третій гармоніці $3f_0 = 36$ ГГц складаються та поступають у вихідний тракт. МСЛ зонди 2 на підкладинці 1 розміщені таким чином, що при різниці фаз в 180° між коливаннями в них, вони збуджують моду H_{10} у вихідному хвилеводі, розміщеному в кришці 3. Розраховані довжина поршня l_{K3} в основі 4 та розміри зондів забезпечують $K_{CX} < 1.2$ на частоті 36 ГГц у смузі 2 ГГц. Довжина шлейфів l_3 на рис. 11,б обрана близькою до $\lambda_{f_0}/2$, що виключає витік енергії коливань на основній гармоніці у вихідний ланцюг, оскільки вхідний опір вихідного балансного переходу близький до холостого ходу. Додаткова ізоляція виходу забезпечується поза межовими розмірами вихідного хвилеводу на основній частоті.

В роботі запропоновано метод розрахунку рівня фазового шуму генератора, що полягає в поєднанні методів скінченних різниць у часовій області (СРЧО) та методу гармонічного балансу (ГБ). На першому етапі необхідно провести розрахунок частотної залежності S-параметрів резонансної системи в околі частоти резонансу в середовищі електродинамічного аналізу CST Microwave Studio з застосуванням методу СРЧО. Отримані характеристики поєднуються з лінійною частиною схеми заміщення та ліній передачі плечей генератора таким чином, щоб відокремити нелінійну частину схеми, представлену еквівалентними моделями транзисторів (рис. 12). Транзистори BFU730F представлено детальною нелінійною моделлю Mextram 504.7, яка є фізичною моделлю та характеризується значною кількістю врахованих ефектів, а також точними даними щодо низькочастотного шуму активного елемента. Після розділення схеми на лінійну та нелінійну частини в середовищі Agilent ADS виконується розрахунок схеми генератора в два етапи. На першому з них методом ГБ проводиться розрахунок стаціонарного режиму коливань, в результаті якого визначається спектральний склад напруг в схемі. На другому етапі розрахунку встановлюється рівень фазового шуму навколо вже розрахованих гармонічних складових методом малосигнального змішування: джерела низькочастотного шуму транзисторів розглядаються як модулюючі коливання, та визначається ступінь їх перетворення в фазовий шум нелійнностями транзисторів.

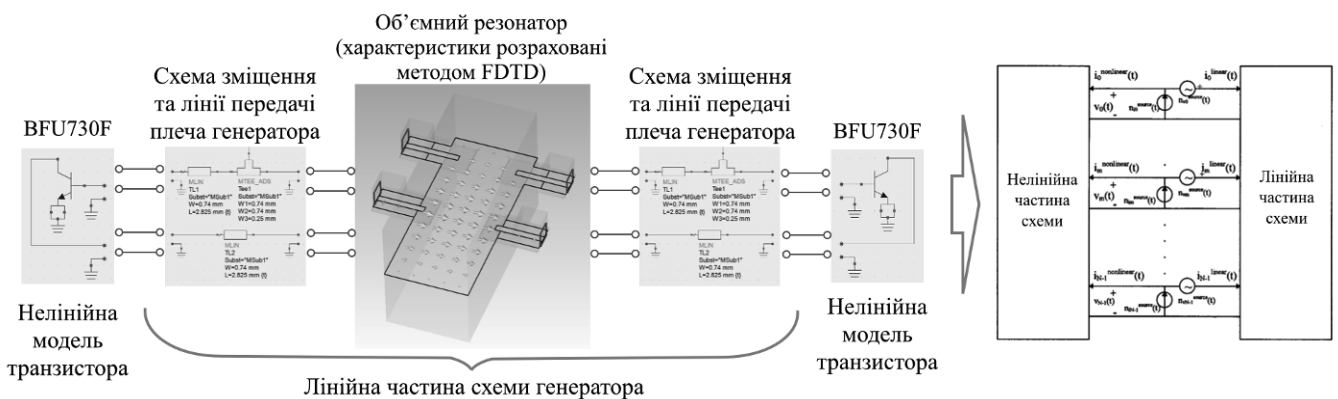


Рис. 12 Модель двотактного генератора з виділенням лінійної та нелінійної частин

За запропонованою методикою, було розраховано та виготовлено макети ДГ на основі об'ємного резонатора з виходами на другій та третій гармоніках (рис. 13). Генератори виконано на підкладках Rogers RT5880 Duroid товщиною 254 мкм. На рис. 14 приведені результати розрахунків та вимірювань рівня ФШ розроблених генераторів. На рис. 15 зображено гармонічні складові в спектрі сигналу генератора з виходом на третій гармоніці, в табл. 3 приведено ключові характеристики

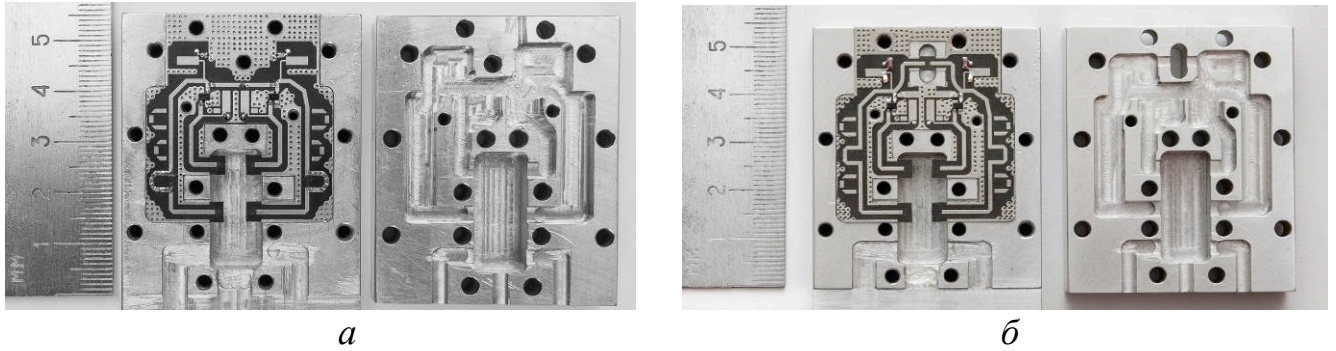


Рис. 13 Фото макетів двотактних генераторів на основі об'ємного резонатора з виходом на другій (а) та третій (б) гармоніках

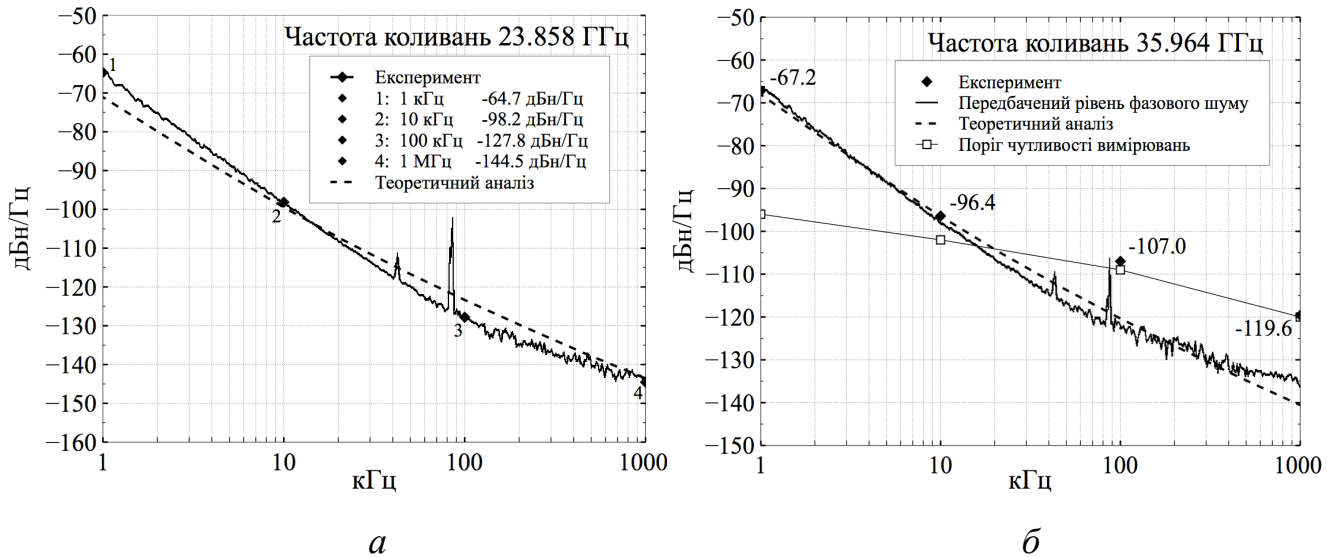
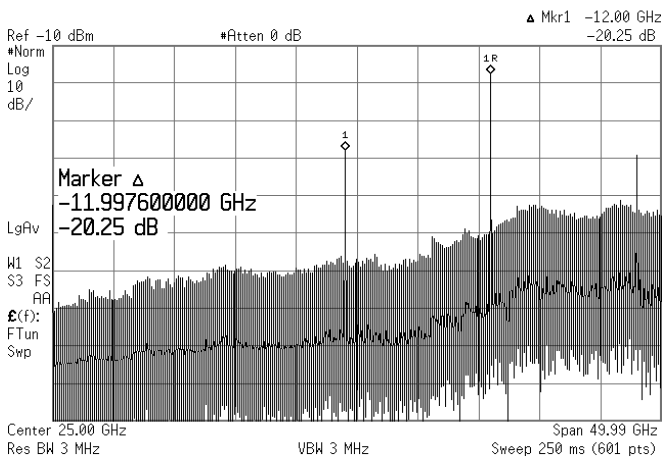


Рис. 14 ФШ двотактних генераторів на основі об'ємного резонатора з виходом на другій (а) та третій (б) гармоніках



Таблиця 3

Тип ДГ / Параметр	ДГ рис.14,а	ДГ рис. 14,б
f , ГГц	23,858	35,964
P , дБм	-9,5	-14
θ^{rms}	0,97°	0,836°
ФОМ, дБн/Гц	-215,35	-207,5

Рис. 15 Спектр ДГ з виходом на третій гармоніці на основі резонатора МСЛ

генераторів. Вимірювання характеристики на рис.14,а проведені на аналізаторі сигналів Agilent E5052B, можливості якого дозволяють провести точні вимірювання сигналів у необхідному динамічному діапазоні. Характеристика на рис.14,б отримана на аналізаторі спектра Agilent E4448A. Для частот відстроювання від носійної на 100кГц та 1МГц виміряні значення шуму повторюють поріг чутливості вимірювань, тоді як результати теоретичного розрахунку практично повністю збігаються з вимірюваннями на частотах 1кГц та 10кГц. Також встановлено малі розбіжності теоретичного розрахунку з передбаченим рівнем шуму вихідного сигналу на основі вимірювань ФШ основної гармоніки. Це дозволяє стверджувати про значно менші рівні шуму на частотах відстроювання вище 20 кГц, однак в розрахунку СКВ фази використано значення, отримані експериментально на частоті 35,964 ГГц: -107 дБн/Гц для 100кГц та $-119,6$ дБн/Гц для 1МГц відстроювання.

Слід відмітити особливо низькі значення коефіцієнту добротності генераторів FOM, що для генератора 24 ГГц досягає -215.4 дБн/Гц. Результати СКВ фази свідчать, що розроблені генератори можуть застосовуватись у перетворювачах частоти систем зв'язку з методами модуляції до 8PSK, 32QAM.

У **четвертому розділі** представлено розроблені синтезатори частоти на основі двотактних ГКН з виходом на другій (24 ГГц) та третій (36ГГц) гармоніках; представлено розроблений модуль синтезаторів частоти у сантиметровому діапазоні частот, впроваджений у діючій системі багатостанційного широкосмугового доступу AIDAAS.

З метою компенсації температурної нестабільності частоти ДГ на основі об'ємного резонатора, були розроблені схеми варакторного перестроювання частоти резонатора та синтезатора частоти на основі петлі з ФАПЧ (рис. 16). В якості елементів керування частотою використані НВЧ варактори з балочними виводами виробництва НДІ "Оріон" $VD1$ та $VD2$, які характеризуються високим значенням коефіцієнту перекриття ємності при зміні напруги керування в межах 0...20 В: $C_{0B}=1,73$ пФ, $C_{20B}=0,139$ пФ ($K_{\Pi}=12,4$). Регістри синтезатора частоти ADF4159 за допомогою мікроконтролера ATTiny15L програмуються для замикання петлі ФАПЧ з цілочисельним коефіцієнтом ділення $N=240$ на основній частоті коливань

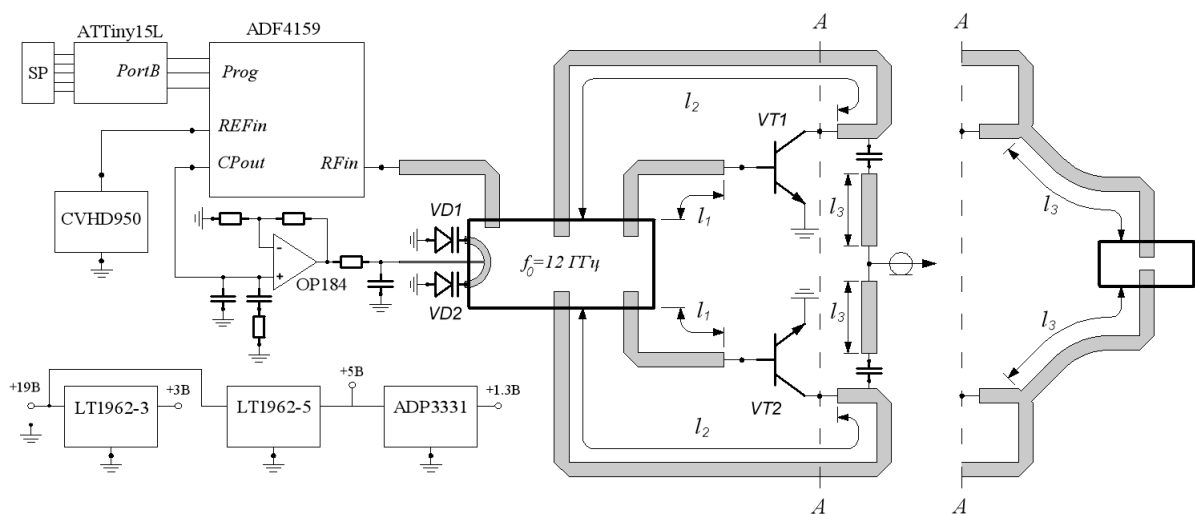


Рис. 16 Топологія синтезаторів частоти на основі двотактного та двотактного з виходом на третій гармоніці ГКН

генераторів $f_0 = 12$ ГГц та смугою фільтра петлі 5 кГц. В якості опорного генератора застосовано малoshумлячий кварцовий генератор CVHD-950 на частоті 50 МГц. Фото виготовлених макетів синтезаторів приведені на рис. 17.

На рис. 18 показані результати вимірювань розподілення фазового шуму розроблених синтезаторів частоти з частотою вихідного сигналу 24 ГГц та 36 ГГц. Також показана характеристика для основної моди коливань 12 ГГц. Отримані характеристики показують погіршення рівня фазового шуму генераторів до 10 дБ за рахунок введення перестроювання частоти, однак покращення цих характеристик в межах смуги петлевого фільтра дозволяє втримати СКВ фази вихідних коливань на низькому рівні: $\theta^{rms} = 0,853^\circ$ для 24 ГГц та $\theta^{rms} = 1,3^\circ$ для 36 ГГц. На основній гармоніці 12 ГГц СКВ фази склали $\theta^{rms} = 0,44^\circ$. Залежності частоти та потужності від напруги керування двотактних генераторів керованих напругою (ГКН) представлені на рис. 19. Відносна смуга перестроювання частоти для ГКН 24 ГГц складає 0,15%, для ГКН 36 ГГц – 0,19%. Такі значення дозволяють компенсувати дрейф частоти генераторів в інтервалі температур 80°C .

В рамках роботи було проаналізовано можливості гібридно-інтегральної технології для побудови синтезаторів частоти з застосуванням інтегральних

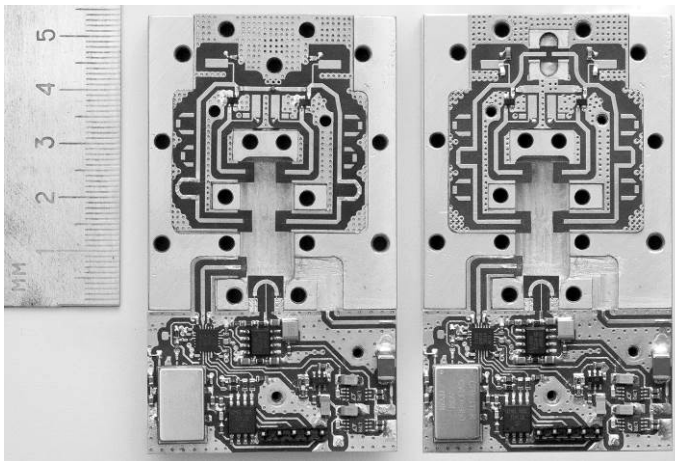


Рис. 17 Макети синтезаторів частоти на основі двотактного та двотактного з виходом на третій гармоніці ГКН

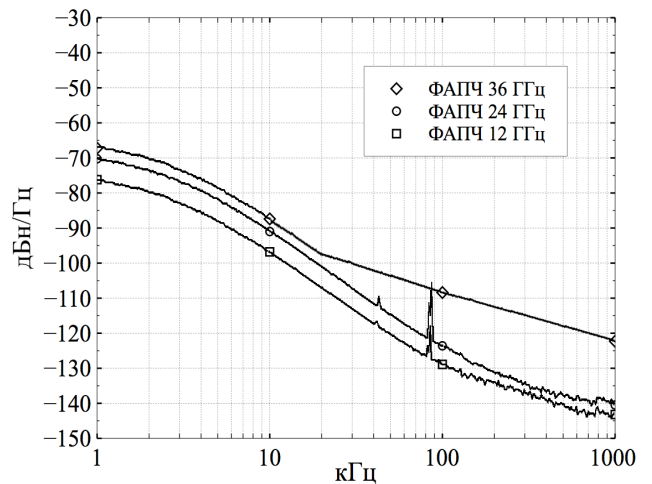


Рис. 18 ФШ вихідних сигналів синтезаторів частоти 24 ГГц та 36 ГГц

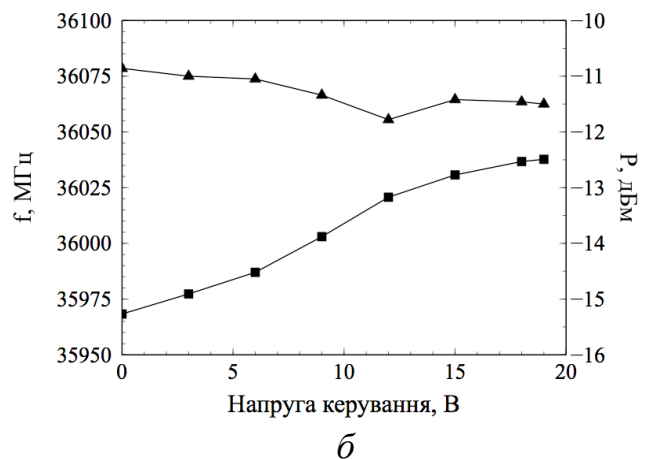
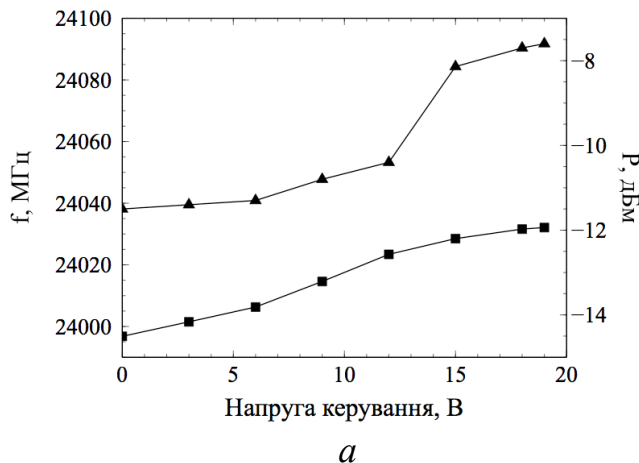


Рис. 19 Залежності частоти та потужності вихідного сигналу ГКН 24 ГГц (а) та 36 ГГц (б) від напруги керування

мікросхем ГКН НМС430 виробництва Nittite Microwave. Синтезатори побудовані за схемою з помноженням частоти (рис. 20). В якості цифрової частини синтезатора застосовано мікросхему ADF4108 з цілочисельним коефіцієнтом ділення, помножувач частоти на два та підсилювач розроблені на основі польових транзисторів з гетеропереходом ERA018A-070. Синтезатори розраховані на частоти вихідного сигналу 9,909 ГГц, 10,24 ГГц та 11,277 ГГц з потужністю 13 дБм. Результати розрахунку та вимірювань СЦПФШ вихідного сигналу синтезатора на частоті 9,909 ГГц приведено на рис. 21. Розрахунок проведено з врахуванням всіх складових шуму петлі:

$$L_{PLL} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{PLLref}}{10}} + 10^{\frac{L_{PLLdet}}{10}} + 10^{\frac{L_{R1}}{10}} + 10^{\frac{L_{R2}}{10}} + 10^{\frac{L_{PLLvco}}{10}} \right),$$

де L_{PLLref} – ФШ опорного кварцевого генератора; L_{PLLdet} – ФШ фазового детектора; L_{R1} , L_{R2} – ФШ резисторів петлевого фільтра; L_{PLLvco} – ФШ ГКН.

СКВ фази вимірюного сигналу для відстроювань 1 кГц – 1 МГц склало 2,06°.

На основі розроблених синтезаторів було створено блок гетеродинів абонентського трансівера діючої комерційної системи широкосмугового доступу AIDAAS, що підтверджено актом про впровадження (фото на рис. 22). Застосування розробки дозволило реалізувати серійнопридатну конструкцію трансівера абонента зі зменшеними габаритними розмірами, яка позбавлена необхідності налаштування в процесі випуску.

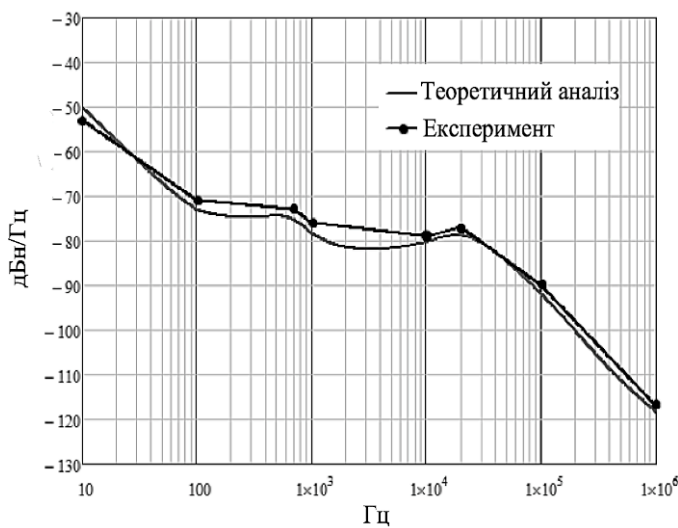


Рис. 21 Рівень ФШ вихідних сигналів блоку гетеродинів трансівера системи AIDAAS

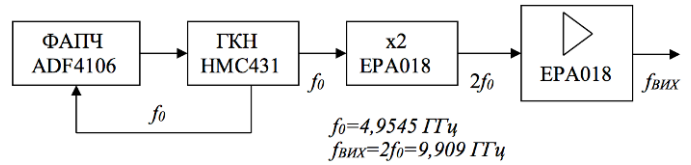


Рис. 20 Блок-схема тракту синтезатора блоку гетеродинів трансівера системи AIDAAS

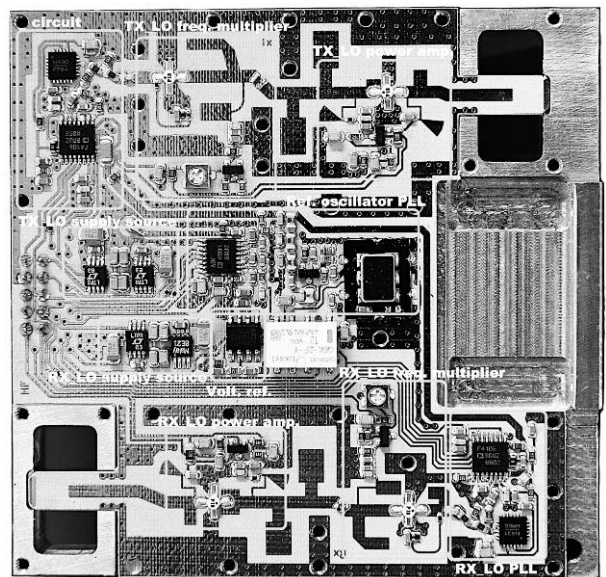


Рис. 22 Фото блоку гетеродинів трансівера системи AIDAAS

ВИСНОВКИ

1. Розроблений метод об'єднання об'ємних металевих резонансних структур з планарною підкладинкою генератора у двотактному виконанні дозволяє створювати вузли, що поєднують високодобротні резонатори та гібридно-інтегральні схеми у компактних конструкціях генераторів, придатних до випуску методами масового виробництва та досягати значного зниження рівня фазового шуму. Для генератора міліметрового діапазону досягнуто значення СКВ фази вихідного сигналу на рівні $0,84^\circ$ (фазовий шум $-96,4$ дБн/Гц при відстроюванні 10 кГц від носійної частоти 36 ГГц).

2. Запропоноване вдосконалення методу проектування двотактних генераторів шляхом використання в якості корисного вихідного сигналу третьої гармоніки основного колювання дозволяє досягти знижених рівнів фазового шуму двотактних генераторів на упівтора рази вищих частотах. Запропонований метод побудови дозволяє створювати зразки генераторів у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль, які за технологічністю конструкцій перевершують аналоги з подібними рівнями фазового шуму. Базову конструкцію такого генератора захищено патентом України.

3. Розроблено нові резонансні структури зі збільшеними значеннями власної добротності (до 3000) для побудови двотактних генераторів, на основі яких побудовано нові високотехнологічні конструкції генераторів зі зниженими рівнями фазового шуму у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль.

4. Запропонований метод розрахунку рівня фазового шуму генераторів, що полягає в поєднанні методів СРЧО та методу гармонічного балансу, характеризується високою точністю, що підтверджено розбіжностями не більше ± 5 дБ з результатами експериментальних даних.

5. Запропоновані оригінальні конструктивні рішення та проведені їх детальні теоретичні та експериментальні дослідження розширюють та доповнюють базу відомих елементів для створення технологічних конструкцій генераторів.

6. Розроблені синтезатори частоти на основі двотактних ГКН з виходом на другій (24 ГГц) та третій (36 ГГц) гармоніках є температурно-стабілізованими завершеними серійнопридатними виробами, мають малі рівні інтегральної фазової помилки ($0,853^\circ$ та $1,3^\circ$, відповідно) та можуть бути використані в якості гетеродинів перетворювачів частоти в зовнішніх антенних блоках цифрових систем зв'язку в каналах з методами модуляції до 8-PSK та 32-QAM включно.

7. Розроблений модуль синтезаторів частоти у сантиметровому діапазоні частот впроваджено у діючій системі багатостанційного широкосмугового доступу AIDAAS. Застосування розробки дозволило реалізувати серійнопридатну конструкцію трансівера абонента зі зменшеними габаритними розмірами, яка позбавлена необхідності налаштування в процесі випуску.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Цвелих І.С. Малошумлячий синтезатор частоти сантиметрового діапазону довжин хвиль / Цвелих І.С., Омеляненко М.Ю., Туреева О.В., Коцержинський Б.О. // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія — Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2007. — Вип. 34. — С. 81—85. (входить до наукометричних баз РІНЦ, Google Scholar, DOAJ, Web of Science, Index Copernicus International).

2. Цвелих І.С. Малошумлячий синтезатор частоти діапазону 12 ГГц для приймач-передавача фазоманіпульованих сигналів. / Цвелих І.С., Омеляненко М.Ю., Коцержинський Б.О. // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія — Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2008. — Вип. 36. — С. 80—86. (входить до наукометричних баз РІНЦ, Google Scholar, DOAJ, Web of Science, Index Copernicus International).

3. Омеляненко М.Ю. Планарные трансиверы абонентских станций систем широкополосного доступа в Ku- и K- диапазонах / Омеляненко М.Ю., Правда В.И., Туреева О.В., Цвелых И.С. // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. — 2012. — Т. 55. — Вип. 2. — С. 3-23. (входить до наукометричних баз SCOPUS, РІНЦ)

4. Цвелых И.С. Квазипланарный малошумящий двухтактный генератор K-диапазона с малым уровнем шума, стабилизированный полым резонатором. / И.С. Цвелых // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. — 2014. — Т. 57. — Вип. 9. — С. 55-60. (входить до наукометричних баз SCOPUS, РІНЦ)

5. Tsvelykh I. S. Low cost low phase noise PLL controlled push-push VCOs in K- and Ka- bands, stabilized by cavity resonator / Tsvelykh I. S., Kotserzhynskiy B. A. // Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv. — 2016. — № 65. — с. 40-50. (входить до наукометричних баз РІНЦ, Google Scholar, DOAJ, Web of Science, Index Copernicus International).

Патенти України на корисну модель:

6. Патент України на корисну модель UA 55064 U, МПК (2009) H01P 1/00 Малошумлячий транзисторний генератор з виходом на третій гармоніці / Цвелих І.С.; Омеляненко М.Ю.; Коцержинський Б.О. — u201004092; заявл. 07.04.2010; опубл. 10.12.2010; Бюл. №23.

7. Патент України на корисну модель UA 48389 U, МПК (2009) H01P 1/00 Малошумний транзисторний генератор з виходом на третій гармоніці / Цвелих І.С.; Омеляненко М.Ю.; Коцержинський Б.О. — u200911138; заявл. 02.11.2009; опубл. 10.03.2010; Бюл. №5.

8. Патент України на корисну модель UA 71356 U, МПК (2012.01) H01P 1/00 Малошумний транзисторний генератор із виходом на третій гармоніці / Цвелих І.С.; Омеляненко М.Ю. — u201115680; заявл. 30.12.2011; опубл. 10.07.2012; Бюл. №13.

9. Патент України на корисну модель UA 73370 U, МПК (2012.01) H01P 1/00 Малошумний транзисторний генератор з виходом на третій гармоніці / Цвельх І.С.; Омеляненко М.Ю. — u201201823; заявл. 17.02.2012; опубл. 25.09.2012; Бюл. №18.

Тези доповідей:

10. Цвельх І.С. Высокодобротные микрополосковые резонаторы для колебательных систем малошумящих транзисторных автогенераторов / Цвельх І.С., Омеляненко М.Ю. // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2005»: Материалы 1-ой междунар. молодежной научн.-техн. конф. — Севастополь: Изд-во СевНТУ. — 2005. — С. 100.

11. Цвельх І.С. Анализ схем построения малошумящих генераторов сантиметрового диапазона длин волн / Цвельх І.С., Омеляненко М.Ю. // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2007»: Материалы 3-й междунар. молодежной научн.-техн. конф. — Севастополь: Изд-во СевНТУ. — 2007. — С. 98.

12. Kotzerzhynskyi B.O. A low phase noise microstrip push-push oscillator with third harmonic output. / Kotzerzhynskyi B.O., Omelianenko M.Y., Tsvelykh I.S. // VII International Conference on Antenna Theory and Techniques. — Lviv: LvivPNU. — 2009. — P. 337—339.

13. Omelianenko M.Y. Low phase noise push-push microstrip oscillator with third harmonic output on basis of SIW resonator / Omelianenko M.Y., Tsvelykh I.S. // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science, XI International Conference. — Lviv: LPNU. — 2012. — P. 487.

14. Tsvelykh I.S. Low Noise Low Cost X-band Cavity Stabilized Oscillator / I.S. Tsvelykh // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science, XII International Conference. — Lviv: LPNU. — 2014. — P. 167.

АНОТАЦІЯ

Цвелих І. С. Методи побудови малoshумлячих транзисторних генераторів сантиметрового та міліметрового діапазонів довжин хвиль. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 — радіотехнічні та телевізійні системи. — Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, 2017.

В дисертаційній роботі розроблено метод об’єднання об’ємних металевих резонансних структур з планарною підкладкою генератора, що дозволяє значно знизити рівень фазового шуму за рахунок застосування резонаторів зі збільшеними значеннями добротності. Вдосконалено метод проектування двотактних генераторів шляхом використання в якості корисного вихідного сигналу третьої гармоніки основного коливання, що дозволяє досягти низьких рівнів фазового шуму у сантиметровому та міліметровому діапазонах.

Розроблено високодобротні моделі резонансних структур, на основі яких побудовано та досліджено нові високотехнологічні конструкції генераторів та синтезаторів зі зниженим рівнем фазового шуму у сантиметровому та міліметровому діапазонах довжин хвиль.

Ключові слова: двотактний генератор, синтезатор, генератор з виходом на гармоніках, низький рівень фазового шуму, генератор на основі об’ємного резонатора, планарний генератор, квазіпланарний генератор, сантиметровий діапазон, міліметровий діапазон, Х-діапазон, К-діапазон, Ка-діапазон.

АННОТАЦИЯ

Цвелых И. С. Методы построения малoshумящих транзисторных генераторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 — радиотехнические и телевизионные системы. — Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”, Киев, 2017.

В диссертационной работе разработан метод объединения полых металлических резонансных структур с планарной подложкой генератора, что позволяет значительно снизить уровень фазового шума за счет применения резонаторов с повышенными значениями добротности. Усовершенствован метод проектирования двухтактных генераторов путем использования в качестве полезного выходного сигнала третьей гармоніки основного колебания, что позволяет достигнуть низких уровней фазового шума в сантиметровом и миллиметровом диапазонах.

Разработаны високодобротные модели резонансных структур, на основе которых построены и исследованы високотехнологичные конструкции генераторов и синтезаторов со сниженными уровнями фазового шума в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн.

Ключевые слова: двухтактный генератор, синтезатор, генератор с выходом на гармоніках, низкий уровень фазового шума, генератор на основе полого резонатора, планарный генератор, квазіпланарный генератор, сантиметровый диапазон, миллиметровый диапазон, Х-диапазон, К-диапазон, Ка-диапазон.

ABSTRACT

Tsvelykh I. S. Design methods of low noise transistor oscillators in centimeter and millimeter wavelength ranges. — Manuscript.

Dissertation on conferring the graduate degree of Ph.D. (Engineering) on specialty 05.12.17 — Radio and Television Systems. — National Technical University of Ukraine “Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2017.

The effect of phase noise of local oscillators of frequency converters on the performance of data transmission channels with digital modulation techniques N-PSK and N-QAM is analyzed in the thesis.

A method for combining metallic cavity resonance structures with planar oscillator substrate is developed. It significantly reduces the phase noise due to the use of resonators with high quality factors while preserving the planarity of the structure.

Push-push design method of oscillators is improved by using the third harmonic of the fundamental oscillation as a useful output, which is achieved by replacing the output circuit of the oscillator and allows reaching low phase noise levels in the centimeter and millimeter bands.

The models of resonant structures based on microstrip transmission line, suspended microstrip line, substrate integrated waveguide and cavity rectangular waveguide resonators are developed. They are characterized by high values of quality factor (68—2978). On their basis, and using the proposed improvement of push-push oscillator design method the high-tech designs of planar and quasiplanar oscillators were made. The oscillators are characterized by reduced levels of phase noise in the centimeter and millimeter wavelengths, RMS phase of the output signal reaches $0,84^\circ$ in the millimeter range (phase noise of $-96,4$ dBc/Hz at offset 10 kHz from the carrier frequency of 36 GHz).

A method for calculating the level of oscillator phase noise, which consists in combining Finite-Difference Time-Domain method and the method of Harmonic Balance, is proposed. The method is characterized by high accuracy, which is confirmed by discrepancies with the experimental data within ± 5 dB.

Frequency synthesizers have been developed basing on a push-push VCOs with the output at the second (24 GHz) and the third (36 GHz) harmonics, and the VCO integrated circuits (9,9—11,28 GHz), which are thermally stabilized suitable for mass production devices, have low levels of the integrated phase error (RMS $0,85^\circ$ — $1,3^\circ$) and can be used as a local oscillators of frequency converters in the antenna outdoor unit of digital communications channels with modulation methods up to 8-PSK and 32-QAM.

Keywords: push-push oscillator, oscillator with harmonics output, low phase noise, cavity resonator oscillator, planar oscillator, quasiplanar oscillator, centimeter range, millimeter range, X-band, K-band, Ka-band.